

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Vagner Mateus Funck

**ANÁLISE DO USO DE RECURSOS NATURAIS E ALTERNATIVAS
PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO EM
CERVEJARIAS DE PEQUENA ESCALA: UM ESTUDO DE CASO**

Santa Maria, RS
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Funck, Vagner

ANÁLISE DO USO DE RECURSOS NATURAIS E ALTERNATIVAS
PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO EM CERVEJARIAS DE
PEQUENA ESCALA: UM ESTUDO DE CASO / Vagner Funck.- 2022.
132 p.; 30 cm

Orientador: Mario Eduardo Santos Martins

Coorientador: Julio Cezar Mairesse Siluk

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, RS, 2022

1. Pequenas Cervejarias 2. Eficiência Energética 3.
Recursos Naturais 4. Eficiência de produção I. Martins,
Mario Eduardo Santos II. Siluk, Julio Cezar Mairesse
III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, VAGNER FUNCK, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Vagner Mateus Funck

**ANÁLISE DO USO DE RECURSOS NATURAIS E ALTERNATIVAS PARA
AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO EM CERVEJARIAS DE PEQUENA
ESCALA: UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de concentração em Eficiência Energética, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**

Orientador: Prof. Mario Eduardo Santos Martins, PdD.
Coorientador: Prof. Júlio Cezar Mairesse Siluk

Santa Maria, RS
2022

Vagner Mateus Funck

**ANÁLISE DO USO DE RECURSOS NATURAIS E ALTERNATIVAS PARA
AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO EM CERVEJARIAS DE PEQUENA
ESCALA: UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de concentração em Eficiência Energética, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**

Aprovado em 08 de setembro de 2022:

Mario Eduardo Santos Martins, PhD (UFSM) – Videoconferência
(Presidente/Orientador)

Nina Paula Gonçalves Salau, Dra. (UFSM) – Videoconferência

Paulo Smith Schneider, Dr. (UFRGS) – Videoconferência

Santa Maria, RS, Brasil
2022

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mario Eduardo Santos Martins, e ao meu coorientador Prof. Dr. Julio Cezar Mairesse Siluk por guiar e incentivar que esse estudo fosse concluído. Obrigado pela confiança.

Agradeço imensamente a UFSM por todo o investimento e acolhimento que recebi durante meus 13 anos estudando nesta instituição. Espero um dia retribuir à altura todo o conhecimento e desenvolvimento pessoal que adquiri nessa longa jornada.

Deixo um agradecimento especial a Fernanda Americo por permanecer ao meu lado e abraçar comigo esse desafio. A tua presença, paciência e carinho foram fundamentais. Te amo, sempre.

Ao meu irmão Vinicius e minha cunhada Elisa por serem exemplos de estudo, dedicação e esforço. À minha sobrinha Liana por ser uma fonte constante de alegria e sorrisos em nossas vidas.

Aos meus pais, Elaine Giacomelli e Ademir Funck por todo esforço e dedicação investidos em mim durante todo o meu percurso acadêmico. Vocês são minha força e inspiração para toda a vida. Amo vocês.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

USO DE RECURSOS NATURAIS E RESÍDUOS GERADOS POR CERVEJARIAS DE PEQUENA E MÉDIA ESCALA: MELHORES PRÁTICAS E OPORTUNIDADES

AUTOR: Vagner Mateus Funck
ORIENTADOR: Prof. Mario Eduardo Santos Martins, PhD.
COORDINADOR: Prof. Dr. Julio Cesar Mairesse Siluk

A partir de 2010, houve no Brasil um aumento expressivo no número de cervejarias registradas no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Grande parte dos novos registros são de pequenas e médias cervejarias, que seguindo uma tendência de mercado, buscam atender à demanda por cervejas de maior qualidade que as comerciais. Grandes cervejarias conseguem, através do aumento de escala, mão de obra qualificada e tecnologia obter maior eficiência de produção. Pequenas e médias cervejarias, por não terem menos recursos financeiros e escala reduzida, consomem muito mais recursos para produzir a mesma quantidade de cerveja. Desta forma, torna-se relevante realizar um estudo para compreender os processos produtivos, usos de recursos naturais e rejeitos por parte de pequenas cervejarias. Diante do contexto, os objetivos deste estudo são determinar as principais perdas de energia e insumos, as limitações, as melhores práticas e as oportunidades de melhoria no processo produtivo de pequenas cervejarias, com foco na mitigação de impactos ambientais, no aumento da eficiência produtiva e na redução de custos de produção. Através de um estudo de caso, conduziu-se uma auditoria energética para quantificar uso de insumos, energia, quantidade de cerveja produzida e descarte de resíduos. Criou-se *Key Performance Indicators* (KPI) para comparar os dados obtidos com valores de referência da bibliografia. Observou-se que as principais perdas de energia se encontram no não reaproveitamento do calor de resfriamento do mosto e pela realização do cozimento com a panela aberta. A prática mais viável de implementação é a produção de cerveja por alta gravidade, podendo reduzir até 10% do consumo de energia elétrica na brassagem. Para aumentar a eficiência produtiva cervejarias devem automatizar processos, controlar perdas de produto e aumentar a disponibilidade de dados de produção através do registro de histórico de consumo de energia e insumos.

Palavras-chave: Pequenas cervejarias. Eficiência energética. Recursos naturais. Eficiência de produção.

ABSTRACT

USE OF NATURAL RESOURCES AND WASTE GENERATED BY SMALL AND MEDIUM-SCALE BREWERS: BEST PRACTICES AND OPPORTUNITIES

AUTHOR: Vagner Mateus Funck
ADVISOR: Prof. Mario Eduardo Santos Martins, PhD.
CO-ADVISOR: Prof. Dr. Julio Cesar Mairesse Siluk

After 2010 there was a significant increase in breweries registered by the Ministry of Agriculture, Livestock, and Supply. Most of the new registrations were from small and medium-sized breweries, which, following a market trend, seek to meet the demand for higher quality beers than commercial beers. Large breweries can achieve greater production efficiency by increasing scale. On the other hand, small and medium-sized breweries consume much more resources to produce the same amount of beer. Thus, it becomes relevant to carry out a study to understand production processes, the use of natural resources, and emissions by these companies. Given the context, the objectives of this study are to determine best practices and main opportunities to mitigate environmental impacts, increase production efficiency and reduce production costs of small and medium-sized breweries. Through a case study, an energy audit was conducted to quantify raw materials, energy, amount of beer produced, greenhouse gas emissions (GHG), and waste disposal. As a result, Key Performance Indicators (KPI) were created to compare this data with reference values from the bibliography. It was observed that the main energy losses are found in the non-reuse of the wort cooling heat and in cooking with the open pan. The most viable implementation practice is the production of beer by high gravity, which can reduce up to 10% of electrical energy consumption in the mash. To increase production efficiency, breweries must automate processes, control product losses, and increase the availability of production data by recording the history of energy and input consumption.

Keywords: Small Breweries. Energy Efficiency. Natural resources. Production efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Número de registros de cervejarias por ano no Brasil.	16
Figura 2 - Projeção de crescimento do número de cervejarias entre 2020 e 2025 com verificação de 2020.	18
Figura 3 - Processo de fabricação de cerveja e algumas formas de tratamento dos efluentes.	22
Figura 4 - Consumo de energia elétrica por processo.	29
Figura 5 - Classificação dos constituintes das águas residuais de cervejarias e suas formas de filtragem e tratamento.	32
Figura 6 - Procedimentos para condução do estudo de caso.	48
Figura 7 - Rampas de temperatura do mosto durante a brassagem.	55
Figura 8 - Efetividade do trocador de calor com o método ϵ /NUT.	58
Figura 9 - Esquema do processo produtivo da cervejaria analisada. A – Moedor de grãos; B – Filtros de água; C – Panela Single Vassel 750 L; D – Cesto de grãos; E – Panela de aquecimento da água de lavagem; F – Trocador de calor casco tubular; G – Tanques de água 1000L; H – Unidade de frio; I – Aerador; J – Fermentador; K – Limpador de barris; L – Barris; M – Câmara fria; N – Consumidor.	62
Figura 10 - Panela de mostura. <i>single vassel</i>	64
Figura 11 - Resfriadores casco-tubulares usados no resfriamento do mosto. O resfriador inferior é o de entrada com circulação de água, e o superior com circulação de etanol a -7°C.	65
Figura 12 - Principais formas de consumo de energia elétrica da cervejaria analisada.	76
Figura 13 - Histórico de consumo energético e produção. Em azul está circulado o mês em que o sistema fotovoltaico foi instalado.	77
Figura 14 - Histórico do consumo específico de energia elétrica.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das cervejarias quanto ao volume anual produzido.....	17
Tabela 2 - Consumo de matérias-primas para produção de cerveja segundo a literatura.....	25
Tabela 3 - Consumo de água para diferentes processos.	26
Tabela 4 - Descarte de resíduos e emissão de gases na produção de cerveja segundo a literatura.....	31
Tabela 5 - Técnicas de tratamento de resíduos mais usadas em cervejarias. A - Trabalho acadêmico com planta piloto; I - Aplicação industrial.....	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Consumo de energia elétrica nas cervejarias analisadas nos EUA em 2014.	29
Quadro 2 - Consumo de combustível nas cervejarias analisadas nos EUA em 2014.	30
Quadro 3 – Resumo das formas de reuso dos subprodutos de cervejarias conforme a literatura.	34
Quadro 5 - Benchmark de cervejarias europeias e americanas.....	44
Quadro 6 - Enquadramento metodológico.	47
Quadro 7 - Técnicas para garantir a qualidade do estudo de caso.	51
Quadro 8 - Etapas, fases e resultados esperados da pesquisa.	52
Quadro 10 - Entradas e saídas do processo produtivo acompanhado no estudo de caso.....	67
Quadro 11 - Resumo das observações realizadas no processo de produção na cervejaria. A coluna de Equipamento está relacionada com a Figura 9. ...	68
Quadro 15 - Resumo dos dados de <i>benchmark</i> para comparação.	72
Quadro 16 - Histórico de consumo de matérias-primas e produção da cervejaria. ...	74
Quadro 18 - Descrição das etapas de cozimento do mosto.	109
Quadro 19 - Variáveis de cálculo da brassagem.....	110

LISTA DE ABREVEAÇÕES

CIP	<i>Clean In Place</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
UF	Unidades de Federação

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Condutividade térmica do material [W/m*K]
ΔT	Diferença de Temperatura [K]
ε	Efetividade do trocador de calor
ρ	Densidade [kg/L]
A	Área [m ²]
C	Condutividade térmica do líquido de troca térmica [W/K]
c	Fluxo de calor [W]
C_{max}	Maior valor de C [W/K]
C_{min}	Menor valor de C [W/K]
cp	Calor específico [kJ/kg*K]
C_r	Constante
cv	Coeficiente de evaporação [kJ/kg]
e	Capacidade térmica volumétrica do ar [kJ/m ³ *K]
h	Coeficiente de transmissão de calor por convecção [W/m ² *K]
h_1	Coeficiente convectivo fluido quente [W/m ² *K]
h_2	Coeficiente convectivo fluido frio [W/m ² *K]
m	Massa [kg]
\dot{m}	Vazão mássica de fluido [kg/s]
n	Número de pessoas
NUT	Constante
P	Potência do equipamento [kW]
Q	Consumo de energia [kJ]
\dot{Q}	Taxa de energia [W]
q	Fluxo de energia entre fluidos do trocador [W]
s	Espessura do material [m]
T	Temperatura [K]
t	Tempo de uso do equipamento [s]
T_∞	Temperatura do ar ambiente [K]
U	Coeficiente global de transferência de calor [W/m ² *K]
v	Volume [L]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO	21
2.2	MATÉRIAS-PRIMAS E RECURSOS ENERGÉTICOS PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA	25
2.2.1	Água	26
2.2.2	Lúpulo	27
2.2.3	Malte	27
2.2.4	Levedura	27
2.2.5	Gás Carbônico	28
2.2.6	Embalagens	28
2.2.7	Energia elétrica	28
2.2.8	Gás Natural e GLP	30
2.3	RESÍDUOS	30
2.3.1	Resíduos Sólidos	31
2.3.2	Resíduos Líquidos	32
2.3.3	Emissões de gases	33
2.4	ALTERNATIVAS DE REUSO	33
2.5	PRÁTICAS E OPORTUNIDADES MAIS UTILIZADAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO	35
2.5.1	Moagem	36
2.5.2	Mostura	36
2.5.3	Fervura e resfriamento do mosto	37
2.5.4	Fermentação	37
2.5.5	Pasteurização	38
2.5.6	Envase	38

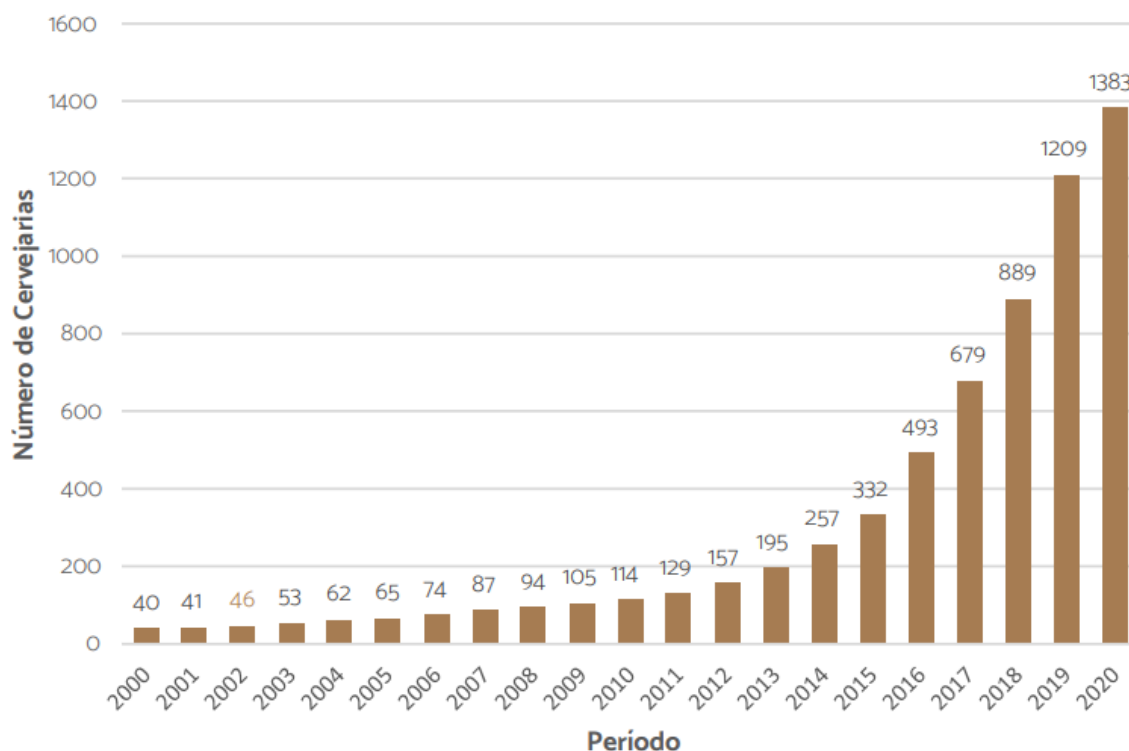
2.5.7	Outros.....	39
2.5.7.1	<i>Perda de produto</i>	39
2.5.7.2	<i>Energia solar</i>	40
2.5.7.3	<i>Cerveja de alta gravidade</i>	40
2.5.7.4	<i>Sistemas de refrigeração</i>	41
2.5.7.5	<i>Sistemas de aquecimento</i>	42
2.6	BENCHMARK.....	43
2.7	AUDITORIA ENERGÉTICA.....	45
2.8	RESUMO DO REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA	47
3.2	PROCEDIMENTOS DE CONDUÇÃO DA PESQUISA.....	48
3.2.1	Definição da estrutura conceitual-teórica	48
3.2.2	Planejamento do(s) caso(s)	49
3.2.3	Condução do teste piloto	49
3.2.4	Coleta de dados	50
3.2.5	Análise dos dados e geração de relatório de pesquisa	50
3.3	DESCRIÇÃO GERAL DO MÉTODO	52
3.4	METODOLOGIA DE CÁLCULOS.....	53
4	RESULTADOS	61
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA.....	61
4.2	COLETA DE DADOS	62
4.2.1	Descrição do processo	62
4.2.2	Históricos	72
4.3	CONSUMO DE ENERGIA.....	76
4.4	PRINCIPAIS PERDAS DE ENERGIA E ALTERNATIVAS DE MELHORIAS.....	79
4.4.1	Resfriamento do mosto e recuperação de calor	79
4.4.2	Panela aberta	79
4.4.3	Câmara fria	80
4.4.4	Cerveja de alta gravidade	80
4.5	REUSO DE RESÍDUOS	81
4.5.1	Reutilização de leveduras	81
4.5.2	Reuso do bagaço de malte e adjuntos	81

5	DISCUSSÃO	82
6	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	APÊNDICE A – PROTOCOLO DE PESQUISA	93
	APÊNDICE B – ROTEIRO PARA COLETA DE DADOS.....	94
	APÊNDICE C – PLANTA BAIXADA SIMPLIFICADA DA CERVEJARIA	105
	APÊNDICE D – CÁLCULOS DE CONSUMO ENERGÉTICO.....	109
	APÊNDICE E – CÁLCULOS DAS PERDAS ENERGÉTICAS.....	129

1 INTRODUÇÃO

A cultura cervejeira é forte há muitos anos em países como Estados Unidos e Alemanha, e devido à globalização essa cultura também chegou ao Brasil, embora de maneira mais tardia. (MARCUSO, 2015). A proposta de oferecer uma cerveja com mais qualidade, refino no processo, ingredientes especiais e com características diferenciadas tem transformado o mercado cervejeiro e o gosto do consumidor brasileiro, o que exigiu uma mudança no quadro geral do mercado. Grandes cervejarias com marcas tradicionais e com produtos de menor pureza e qualidade se viram forçadas a criar linhas especiais ao público geral para se adaptar a essa mudança do mercado, oferecendo assim cervejas que sejam no mínimo puro malte e com sabores e aromas mais acentuados de lúpulo (TOZETTO, 2017).

Figura 1 - Número de registros de cervejarias por ano no Brasil.



Fonte: (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2020).

Em 2020 alcançou-se a marca de 1383 cervejarias registradas no MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), ao mesmo tempo em que é o primeiro ano que se tem pelo menos uma cervejaria por Unidade de Federação (UF)

(MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2020). Isso demonstra o forte crescimento do setor nos últimos anos, sendo que grande parte desses registros são de micro e pequenas cervejarias (MARCUSO; MÜLLER, 2017).

Atualmente o MAPA não classifica as cervejarias brasileiras quanto ao volume produzido, por isso, utiliza-se a classificação da *Brewers Association*, associação de cervejarias dos Estados Unidos, que divide as cervejarias em 3 níveis de produção: *Production Brewery*, *Region Brewery*, e *Craft Brewery*. Dentro da classificação de *Craft Brewery* estão as subclasses: *micro brewery*, *nano brewery*, *pico brewery* e *home brewery*. Desta forma, modificou-se a nomenclatura da classificação e converteu-se os valores de barris para litros. Na Tabela 1 pode ser visto o volume de produção anual para cada uma das classificações.

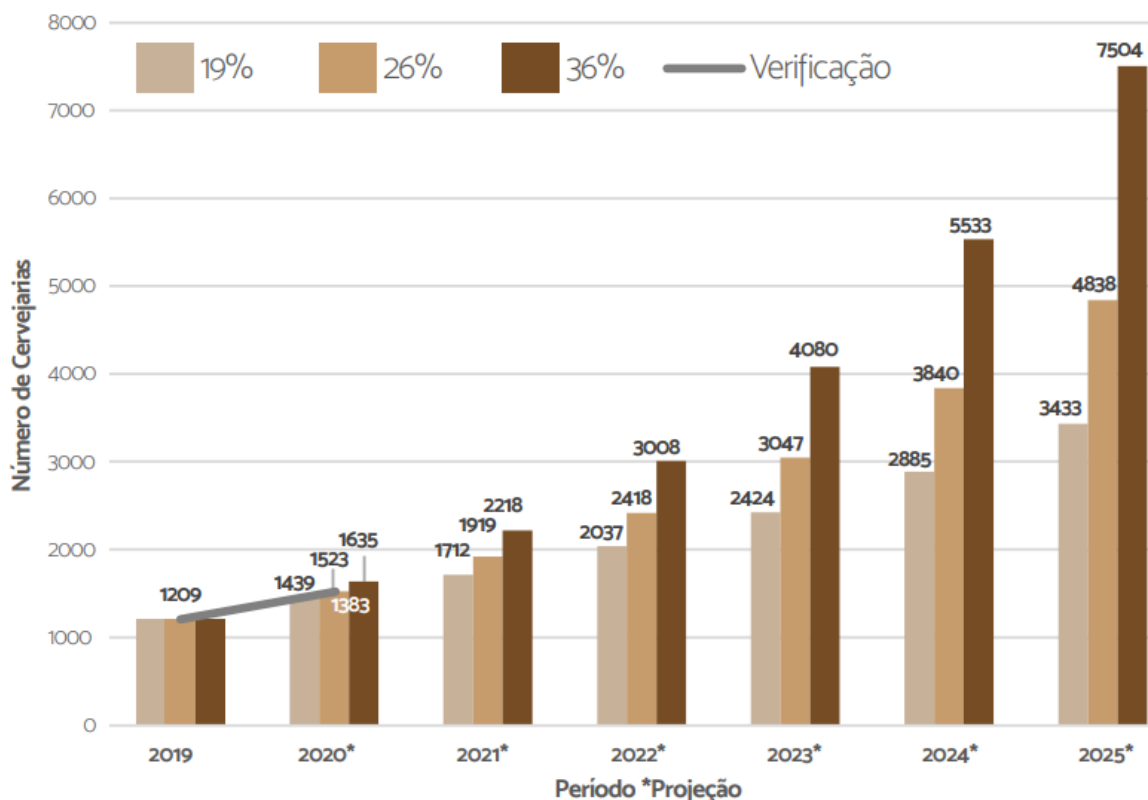
Tabela 1 - Classificação das cervejarias quanto ao volume anual produzido.

Classificação	Produção anual (L)
Grande porte	> 704.086.594,8
Médio porte	1.760.216,5 - 704.086.594,8
Pequeno porte	< 1.760.216,5
Micro cervejaria	117.348,0 - 1.760.216,5
Nano cervejaria	58.673,9 - 117.348,0
Pico cervejaria	< 58.673,9
Cervejeiro caseiro	< 821,434

Fonte: (BREWERS ASSOCIATION, 2015)

Projeta-se, em um cenário de crescimento mediano, que em 2025 existirão até 4838 cervejarias no Brasil, um crescimento de quase 350% em relação ao número atual, consolidando um movimento de expansão para o interior do país (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2020).

Figura 2 - Projeção de crescimento do número de cervejarias entre 2020 e 2025 com verificação de 2020.



Fonte: (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2020).

Cervejarias de grande porte têm uma eficiência de produção muito maior devido a economia de escala. Por sua vez, pequenas cervejarias tendem a consumir muito mais recursos para produzir a mesma quantidade de cerveja, o que torna o processo muito menos eficiente e mais agressivo ao meio ambiente (STURM et al., 2012). Cervejarias de pequena escala podem utilizar até 10 vezes mais energia elétrica, 7 vezes mais energia térmica e até 3 vezes mais água para produzir a mesma quantidade de cerveja que uma grande indústria (BREWERS ASSOCIATION, 2015).

Tendo em vista a pequena escala dessas cervejarias, algumas das técnicas utilizadas por grandes cervejarias para reduzir o consumo de recursos naturais não podem ser aplicadas, por exemplo o uso de bateladas sequenciais, automação de processos, reuso de água quente de resfriamento do mosto, isolamento térmico e uso de motores com velocidade variável (KUBULE et al., 2016). Outro importante aspecto para se ter um bom gerenciamento da eficiência de produção é a obtenção e disponibilidade de dados confiáveis sobre a produção, o que embasa mudanças e melhorias no processo produtivo, porém em grande parte das cervejarias de pequena

escala, a demanda real de energia dificilmente é identificada, mesmo que a existam dados de *benchmark* disponíveis (MUSTER-SLAWITSCH et al., 2011).

Dada a expectativa de aumento no número de pequenas cervejarias até 2025 e que cervejarias deste porte tem menor eficiência de produção, dificuldade de contratar mão-de-obra qualificada e menor capacidade de investimento, torna-se importante fazer um levantamento das melhores práticas e oportunidades que às contemplem. Por terem um custo maior de produção, micro e pequenas cervejarias comercializam seus produtos a um preço mais elevado. Além disso, não havendo uma estratégia para minimizar o uso de recursos naturais e reduzir os custos de produção, essas empresas podem ter dificuldades financeiras e causar um impacto ainda maior no meio ambiente. É de suma importância, portanto, que os gerentes dessas cervejarias conheçam seus processos produtivos, consigam identificar as maiores perdas, saibam que alternativas e práticas podem ser adotadas para reduzir essas perdas e consigam implementá-las para aumentar a eficiência de produção.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Tendo em vista o que já foi apresentado, elaborou-se a seguinte questão de pesquisa: quais as melhores práticas produtivas e oportunidades existentes em pequenas cervejarias brasileiras para reduzir consumo de recursos naturais e melhorar a eficiência produtiva?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o processo produtivo de pequenas cervejarias e documentar informações que auxiliem gestores a observar ineficiências produtivas e implementar melhorias.

1.2.2 Objetivos Específicos

1 – Construir um *benchmark* com os dados de outras cervejarias encontradas na literatura para usar como referência;

2 – Realizar estudo de caso em pequena cervejaria para avaliar o processo produtivo e levantar dados de consumo de recursos;

3 – Identificar as maiores perdas e ineficiências no uso de recursos naturais e listar melhorias que podem ser implementadas.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O custo com insumos e energia vem aumentando significativamente nos últimos anos e tende a continuar neste ritmo devido ao aumento na inflação e a problemas de escassez hídrica. De 2012 a 2020, houve um aumento de 71,8% no custo com energia elétrica, e entre 2011 e 2018 registrou-se um aumento de 40,6% o gás natural (“Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis,” 2021; “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020,” 2020).

Tendo-se em vista que há uma expectativa de aumento no número de cervejarias no Brasil até 2025, que grande parte dessas cervejarias são de pequeno porte e que por características produtivas consomem mais insumos e energia por litro produzido, tem-se um alerta financeiro e ambiental para os gestores dessas empresas. O alerta financeiro é por conta do aumento de custos das matérias-primas e da concorrência, impondo que as cervejarias busquem cada vez mais aprimorar seus processos produtivos para manter seu produto a um preço acessível ao consumidor. O alerta ambiental está associado ao aumento significativo no número de pequenas cervejarias, que somado a característica de consumir mais matéria-prima por litro produzido, aumentam expressivamente o impacto ambiental.

Sendo assim, percebe-se que aumentar a eficiência produtiva de pequenas cervejarias é extremamente relevante para mitigar impactos ambientais e econômicos por parte dessas empresas.

Grandes cervejarias possuem tecnologia e uma equipe técnica que acompanha constantemente a produção e controla todos parâmetros e resultados, identificando problemas e inconformidades que reduzem a eficiência produtiva e geram oportunidades de melhoria no processo produtivo. Porém, pequenas cervejarias muitas vezes não possuem recursos financeiros ou o conhecimento necessário para adotar tais medidas, o que dificulta a aquisição de dados necessários para encontrar as oportunidades de melhoria (STURM et al., 2013).

Desta forma, o trabalho se justifica por fornecer aos gestores de pequenas cervejarias, que não tem recursos para investir em consultoria ou profissional especializado, dados sobre padrões de consumo de energia e insumos, principais perdas e desperdícios, principais melhorias que podem ser implementadas, análises financeiras, entre outras informações relevantes que irão orientar e trazer *insights* para melhorar o processo produtivo da cervejaria, sendo este um estudo apropriado para a tomada de decisão de gestores.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 5 capítulos, partindo do problema de pesquisa, conteúdos e ferramentas necessários para se atingir o objetivo proposto. O primeiro capítulo corresponde a introdução do trabalho, onde são apresentados o problema de pesquisa, os objetivos, a justificativa e a relevância. O segundo capítulo é referente ao referencial teórico necessário para a fundamentação deste trabalho, o terceiro capítulo corresponde a metodologia de pesquisa, onde são descritas as etapas necessárias para se desenvolver os objetivos deste trabalho. No quarto capítulo os resultados são discutidos e, por fim, no quinto capítulo é realizada a conclusão do estudo, apresentadas as limitações e perspectivas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

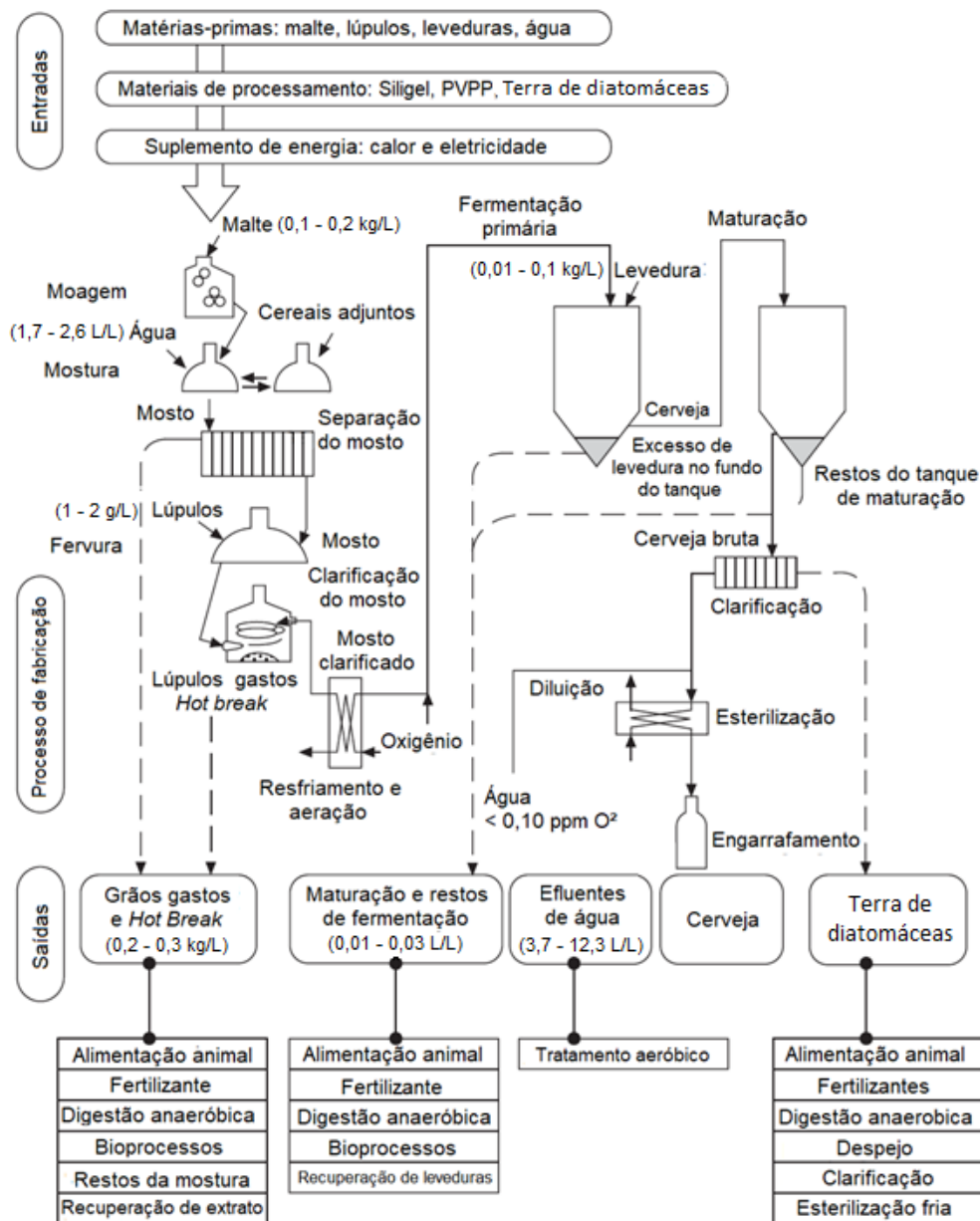
Em pequenas cervejarias o processo de fabricação da cerveja começa com a filtragem da água, que é feito por filtros de carvão ativado e de papel, para retirar o cloro livre da água e outras pequenas partículas sólidas (GALITSKY et al., 2003a). Dependendo do tipo de cerveja que se deseja fabricar, é necessário fazer a correção da água para que esta se encaixe na composição mineral desejada. Esse ajuste é feito adicionando-se sais, tipicamente cloreto de cálcio (CaCl), sulfato de cálcio (CaSO₄) e sulfato de magnésio (MgSO₄) (BOAN et al., 2014).

Na sequência é feita a moagem dos grãos, etapa de grande importância pois influencia diretamente na rapidez das transformações físico-químicas, no rendimento, na clarificação e na qualidade da cerveja. Este processo consiste em rasgar a casca

longitudinalmente para expor o endosperma amiláceo, facilitando a ação enzimática durante a mosturação (CURI, 2006). A moagem ideal é aquela que todos os grãos são moídos, as cascas são partidas de extremo a extremo sem deixar partículas de endosperma aderidas, o endosperma é reduzido a um tamanho uniforme de partícula e gera a mínima quantidade de farinha (pó branco) (BOAN et al., 2014).

Na Figura 3 é possível visualizar os processos de fabricação da cerveja.

Figura 3 - Processo de fabricação de cerveja e algumas formas de tratamento dos efluentes.



Fonte: Adaptado de (SMITH; KIM, 2008).

Com os ingredientes preparados inicia-se a brassagem que é o processo de obtenção do mosto cervejeiro composto por aproximadamente 85% de água e 15% de extrato. A brassagem consiste basicamente em misturar o malte com a água e cozinhá-lo a temperaturas e tempos pré-determinados para o tipo de cerveja que se deseja produzir. Ao fim da brassagem o extrato obtido é composto basicamente por: açúcares fermentescíveis e não-fermentescíveis, alfa-amino-nitrogênio, minerais, vitaminas, proteínas solúveis, substâncias inorgânicas, compostos de sabor e cor e outros nutrientes da levedura (BOAN et al., 2014).

O processo de filtragem acontece logo na sequência e é onde se separa a parte sólida, chamada de bagaço de malte, da líquida. Normalmente o próprio bagaço de malte forma uma espécie de colchão filtrante que separa a parte sólida da parte líquida do mosto, sendo a parte líquida bombeada para outro recipiente. É possível também usar um método conhecido como BIAB (*Brew In a Bag*), onde os grãos são colocados em um cesto ou saco filtrante e mergulhados na água. Ao fim da mostura, esse saco ou cesto é elevado sobre a panela de mostura, deixando-se escorrer a parte líquida e retira-se a parte sólida (STWEART; RUSSEL; ANSTRUTHER, 2018).

A parte sólida é descartada e o mosto líquido segue para a tina de fervura onde será fervido por aproximadamente 60 minutos para a eliminação de compostos sulfurosos, esterilização e escurecimento do mosto, isomerização dos alfa-ácidos do lúpulo, destruição das enzimas por desnaturalização, formação do *trub*, extração de componentes solúveis do lúpulo, formação de substâncias redutoras, evaporação de água e diminuição do pH. Nesta etapa ocorre a adição de lúpulos, no início da fervura os que conferem amargor a cerveja e mais para o fim os que dão o aroma característico da cerveja (BOAN et al., 2014; TOZETTO, 2017).

Uma vez realizada a fervura do mosto, forma-se um precipitado denominado *trub* quente que precisa ser retirado para não interferir na fermentação. O *trub* quente é formado por proteínas coaguladas, polifenóis (taninos) e carboidratos. A remoção do *trub* quente pode ser feito por centrífugas ou através de um processo chamado *Whirlpool* onde o mosto fervido é bombeado através de uma entrada tangencial à parede do tanque, o que induz um movimento de rotação fazendo com que o *trub* se acumule na parte central do fundo da panela (BOAN et al., 2014).

Para que seja mantida a qualidade e sabor da cerveja, é necessário resfriar o mosto em até no máximo 100 minutos após o término da fervura, passando de 95°C

a uma temperatura de 8 a 20°C dependendo do tipo de levedura que será utilizada na fermentação. Esse processo pode ser feito de diversas maneiras, entre as mais utilizadas está o trocador de placas que consiste em diversas placas finas de metal onde circula o mosto quente e o fluido refrigerante frio em sentidos opostos e sem se misturarem, retirando calor do mosto (BOAN et al., 2014).

Em grandes cervejarias é comum realizar a recuperação da água de resfriamento, ou seja, a água utilizada para resfriar o mosto é pré-aquecida pela troca térmica e vai diretamente para a panela de mostura onde inicia-se uma nova brassagem. Essa técnica diminui muito a quantidade de energia necessária na fabricação da cerveja, sendo uma das principais formas para melhorar a eficiência energética do processo (BOAN et al., 2014).

Resfriado o mosto, este é transferido para o fermentador onde é feita a inoculação da levedura. A quantidade é determinada pelo volume de mosto produzido, ficando em torno de 15-20 milhões de células por mililitro de mosto resfriado e aerado (ESSLINGER, 2009).

É necessário realizar a aeração do mosto para que as células de levedura se multipliquem, visto que para sintetizar os compostos que formam a parede celular é necessário ter oxigênio. Deve-se evitar fazer a aeração com o mosto quente pois dessa forma a oxidação acontece de forma muito mais rápida. Com o mosto frio a oxidação é bem menor e a levedura assimila rapidamente o oxigênio. A aeração deve ser feita com ar limpo, seco e esterilizado por filtração, sendo o volume determinado pela concentração de oxigênio no ar (20%), ficando em torno de 3,3 litros de ar para cada 100 litros de mosto (BOAN et al., 2014).

A fermentação inicia logo após a inoculação da levedura, esta passa por diversos estágios de crescimento, que são: A fase de latência onde a levedura se adapta ao meio, o que dura entre 10 e 20 horas, não sendo visível nenhuma atividade de fermentação, nem consumo de açúcares e nem geração de CO₂; a fase logarítmica ou exponencial onde a população aumenta rapidamente duplicando sucessivamente a população de três a quatro vezes, tendo uma duração de 48 a 60 horas e fermentando os açúcares na velocidade máxima; e por fim a fase estacionária ou de descanso na qual a fermentação diminui devido ao esgotamento dos nutrientes (BOAN et al., 2014).

Ao fim da fermentação é realizada uma etapa de maturação fria onde o fermentador é resfriado a uma temperatura próxima a 0°C para que os restos de levedura se sedimentem no fundo do fermentador, clarificando a cerveja. Esse processo pode levar uma semana ou até mais dependendo do tipo de cerveja que se deseja produzir. Feito isso, a levedura residual pode ser recuperada para ser usada posteriormente em outra fermentação e a cerveja já pronta é filtrada e transferida do fermentador para ser envasada no recipiente de preferência (BOAN et al., 2014).

Para um envase eficiente é necessário: preservar a pressão de saturação, minimizar o contato com o oxigênio, maximizar a precisão de enchimento, atender aos requisitos microbiológicos e evitar gotejamentos após a retirada dos instrumentos para enchimento. Dependendo do tipo de sistema disponível, os passos para realizar o enchimento são: evacuação para retirar o oxigênio de dentro do recipiente, seja por vácuo ou por insuflamento de CO₂; pressurização do recipiente com CO₂ para equilibrar a pressão do tanque de armazenamento e do recipiente; enchimento do recipiente com cerveja e por fim o arrolhamento da tampa (ESSLINGER, 2009). Esse processo é conhecido como enchimento por contrapressão.

Por fim, os recipientes são rotulados, embalados e distribuídos para os pontos de venda.

2.2 MATÉRIAS-PRIMAS E RECURSOS ENERGÉTICOS PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA

Na Tabela 2 encontra-se um resumo do consumo das principais matérias-primas por litro de cerveja produzido.

Tabela 2 - Consumo de matérias-primas para produção de cerveja segundo a literatura.

Matéria-prima	Consumo / litro de cerveja produzido
Água	4,7 - 13,3 (L)
Malte	0,1 - 0,2 (kg)
Lúpulo	1 (g)
Levedura	0,01 - 0,1 (kg)
CO ₂	0,003 – 0,005 (kg)
Energia elétrica	0,16 - 1,52 (kWh)
Energia térmica	1,43 - 9,88 (MJ)

Fonte: Autor.

2.2.1 Água

A cerveja é constituída por aproximadamente 90% de água, sendo, portanto, a matéria-prima mais abundante e com grande impacto sobre o resultado do produto. A água deve ser potável, livre de metais pesados, herbicidas ou pesticidas, sem cor, sem turbidez, sem gosto nem cheiro, sem agentes patogênicos, com pH adequado e o equilíbrio dos minerais deve ser adequado ao perfil da cerveja que se quer produzir. Pode provir de lagos e rios (superficiais) ou de fontes subterrâneas e necessita de um tratamento prévio para ser utilizada (BOAN et al., 2014).

Existem duas funções básicas da água em uma cervejaria. Uma delas é como matéria-prima, e outra é para a realização dos demais processos como alimentação da caldeira, torres de resfriamento, limpeza de equipamentos e embalagens (BUTTRICK, 2013).

O consumo específico de água, assim como o de energia, está diretamente relacionado a capacidade produtiva da cervejaria, sendo que quanto maior a produção, menor será o consumo específico. Na Tabela 3 é possível visualizar o volume de água utilizando em cada um dos processos de fabricação da cerveja. Em média, são consumidos 2/3 do total nos processos de fabricação e 1/3 para limpeza (SMITH; KIM, 2008).

Tabela 3 - Consumo de água para diferentes processos.

Local	Quantidade (litros de água/litros de cerveja produzida)
Brassagem	1,7 – 2,6
Armazenamento frio	1,1 – 2,4
Fermentação	0,4 - 0,8
Armazenamento	0,1 - 0,6
Filtração	0,1 - 0,8
Enchimento de Garrafas	0,9 - 1,0
Enchimento de Barris	0,1 - 1,2
Outros	0,3 - 4,0
Total	4,7 - 13,3

Fonte: Adaptado de (OLAJIRE, 2012).

2.2.2 Lúpulo

O lúpulo traz diversos benefícios para a cerveja, entre eles contribui para diferenciar uma cerveja de outra a partir do nível de aroma e amargor, ajuda na estabilidade da espuma da cerveja, na coagulação e formação do *trub* quente e frio e possui propriedades bactericidas (BOAN et al., 2014).

Em comparação com volume e peso de outras matérias-primas, o uso de lúpulo é relativamente baixo na produção de cerveja. Para cada litro de cerveja produzida, se consome em média 1 grama de lúpulo (SMITH; KIM, 2008).

2.2.3 Malte

O malte é a principal matéria-prima para a produção de cerveja, sendo este obtido da cevada. A cevada torna-se ingrediente da cerveja a partir da malteação do grão, que consiste na germinação forçada da cevada, submetendo-a a temperatura alta e umidade controlada (NETO et al., 2016).

A quantidade de malte utilizada varia conforme a densidade e teor alcoólico desejado. Em média utiliza-se entre 10 e 20 kg de malte para cada hectolitro de cerveja produzido (SMITH; KIM, 2008).

2.2.4 Levedura

As leveduras são micro-organismos responsáveis pelo processo fermentescível que sintetiza diversas substâncias do mosto cervejeiro como carboidratos, aminoácidos e proteínas, transformando-as em CO₂, álcool etílico e outras substâncias. Elas podem ser de alta fermentação ou *Ales* (18 – 24°C), ou de baixa fermentação ou *Lagers* (8 – 14°C) (LODOLO et al., 2008).

O consumo médio de levedura em uma cervejaria é de 0,01 a 0,1 L_{levedura}/L_{cerveja} (SMITH; KIM, 2008). Algumas cervejarias reutilizam as leveduras de 4 a 6 vezes, pois ao fim da fermentação muitas células permanecem vivas e saudáveis, podendo ser reaproveitadas e inoculadas em um novo mosto cervejeiro, trazendo economia de insumos (KARLOVIĆ et al., 2020).

2.2.5 Gás Carbônico

Em uma cervejaria o gás carbônico é utilizado principalmente durante o envase da cerveja. No processo de envase em barris, normalmente é feita a carbonatação forçada da cerveja, processo que consiste em injetar CO₂ dentro do barril para que ocorra a dissolução do gás no líquido de maneira forçada.

Já no envase em garrafas PET, latas e garrafas de vidro, é feito o enchimento por contrapressão para evitar desperdício de cerveja, impedindo que ela espume durante o processo. Para isso, é feita a retirada do ar atmosférico de dentro da garrafa através de um expurgo de CO₂, e na sequência o CO₂ é pressurizado dentro da garrafa e liberado para a atmosfera de maneira controlada, diminuindo a diferença de pressão entre o interior da garrafa e o tanque de armazenamento da cerveja, realizando o enchimento sem formar espuma. Nesse processo se utiliza entre 2 a 3 volumes de CO₂ para cada volume engarrafado (ESSLINGER, 2009).

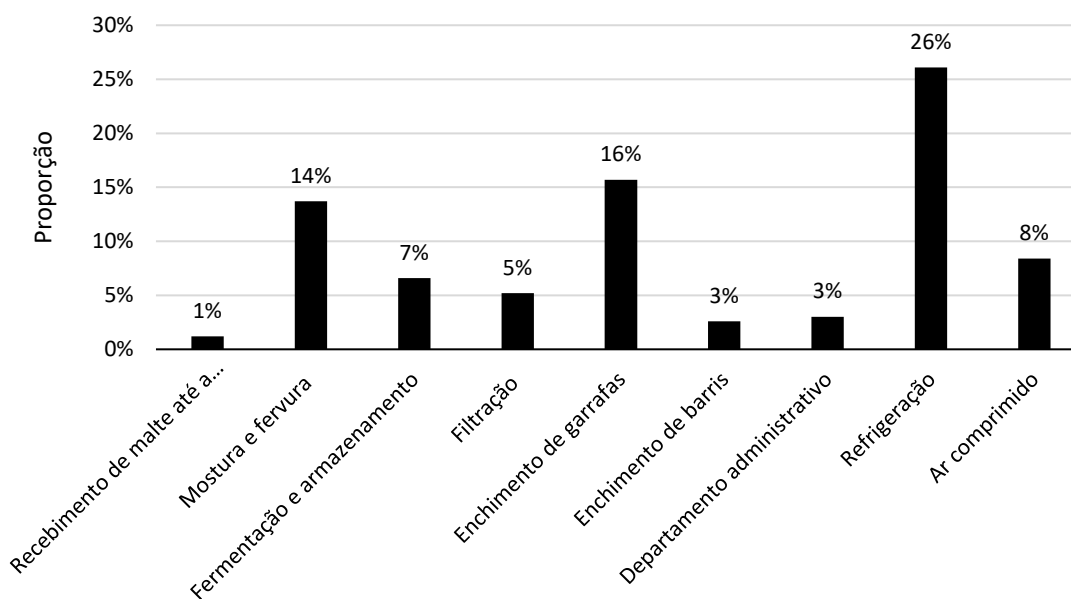
2.2.6 Embalagens

A cerveja pode ser armazenada em diversos tipos de embalagens, sendo as mais comuns garrafas de vidro, latas de alumínio, barris de metal e garrafas PET. Cada tipo de embalagem necessita de diferentes processos de enchimento, equipamentos, processos de limpeza e armazenamento (KUBULE et al., 2016).

2.2.7 Energia elétrica

Os sistemas de refrigeração são os equipamentos que mais consomem energia elétrica, cerca de 30% do gasto total. O setor de embalagem vem logo na sequência consumindo 15% do total de energia, sendo compressores de ar e motores os maiores consumidores. Em terceiro lugar com 10% de consumo, é citado o uso de motobombas para realizar a trafega do mosto entre tinas e na limpeza CIP, bem como de motores para moagem dos grãos, agitação e transporte (BÄR; VOIGT, 2019; ESSLINGER, 2009). Na Figura 4 pode-se ver a distribuição média de consumo de energia em uma cervejaria.

Figura 4 - Consumo de energia elétrica por processo.



Fonte: Adaptado de (ESSLINGER, 2009).

Segundo um relatório da BREWERS ASSOCIATION, 2015, pequenas cervejarias podem consumir quase 10 vezes mais energia elétrica que grandes cervejarias. Isso acontece pela maior tecnologia de equipamentos, automatização de processos e brassagens ininterruptas que grandes cervejarias conseguem ter e que trazem uma grande economia conforme a escala de produção cresce.

Quadro 1 - Consumo de energia elétrica nas cervejarias analisadas nos EUA em 2014.

BENCHMARK USA			
Categoria	Nível de produção (l/Ano)	Energia Elétrica/Cerveja (kWh/l)	Média Anual de energia elétrica (kWh)
I	0 - 11700	1,52	101.891
II	11700 – 11.73500	0,50	232.171
III	1173500 – 1.173.50000	0,23	981.536
IV	> 1.173.50000	0,16	5.515.386

Fonte: Adaptado de (BREWERS ASSOCIATION, 2015).

2.2.8 Gás Natural e GLP

Gases combustíveis ou energia térmica somam 60% do total de energia consumida em uma cervejaria. A brassagem é o processo que mais consome gás natural, ficando em média entre 40 e 45% do total consumido, podendo variar devido ao tipo de equipamento utilizado para aquecimento (fogo direto, água quente a alta pressão ou aquecimento à vapor). Além da brassagem, existe um alto consumo de energia térmica para aquecer a água que será usada em processos de limpeza como o CIP, na limpeza de filtros e embalagens e na pasteurização (ESSLINGER, 2009; GALITSKY et al., 2003b).

A diferença de escala entre as cervejarias impacta diretamente no consumo específico de gás natural. No Quadro 2 encontram-se as informações de consumo de energia na forma de combustível de diversas escalas de cervejarias dos EUA (BREWERS ASSOCIATION, 2015).

Quadro 2 - Consumo de combustível nas cervejarias analisadas nos EUA em 2014.

BENCHMARK USA			
Categoria	Nível de produção (hl/Ano)	Combustível/Cerveja (MJ/l)	Média anual de combustível (MJ)
I	0 - 117,35	9,88	715.998,24
II	117,35 – 11.735,00	3,54	1.637.577,00
III	11.735,00 – 1.173.500,00	1,91	8.229.866,04
IV	> 1.173.500,00	1,43	49.166.443,08

Fonte: Adaptado de (BREWERS ASSOCIATION, 2015).

2.3 RESÍDUOS

Na Tabela 4 encontra-se um resumo dos resíduos gerados por litro de cerveja produzido.

Tabela 4 - Descarte de resíduos e emissão de gases na produção de cerveja segundo a literatura.

Resíduos	Descarte / litro de cerveja produzido
Bagaço de grãos	0,18 - 0,24 (kg)
<i>Trub</i>	0,002 – 0,004 (L)
Resíduo de fermentação	0,001 – 0,003 (L)
Água	3,7 - 12,3 (L)
CO ₂	0,037 (kg)

Fonte: Autor.

2.3.1 Resíduos Sólidos

São basicamente formados por material orgânico, incluindo grãos e lúpulo descartados, excedente de levedura, lodo de terra de diatomáceas da filtração e materiais para embalagem (OLAJIRE, 2012).

Os grãos descartados representam a maior quantidade em todos os subprodutos do processo cervejeiro. Gera-se entre 0,18 e 0,24 kg por litro de cerveja, possuindo cerca de 80% de umidade e alto teor de proteínas (mais de 20%) e fibras (ESSLINGER, 2009; NOCENTE et al., 2019; SMITH; KIM, 2008).

O *trub*, constituído principalmente por partículas de lúpulo e proteínas coaguladas, é separado após o fim da fervura e representa em torno de 2 – 4% do volume do mosto, tendo de 15 a 20% de matéria seca (OLAJIRE, 2012).

As leveduras são o segundo maior subproduto do processo de fabricação da cerveja, gerando em torno de 4 a 5 vezes mais volume do que foi adicionado inicialmente. Após a fermentação e maturação, as leveduras sedimentam-se e acumulam-se no fundo do fermentador, gerando uma perda de 1,5 a 3% do total de cerveja produzido. Esse subproduto contém cerca de 10% de matéria seca e é rica em vitamina B (OLAJIRE, 2012; STWEART; RUSSEL; ANSTRUTHER, 2018).

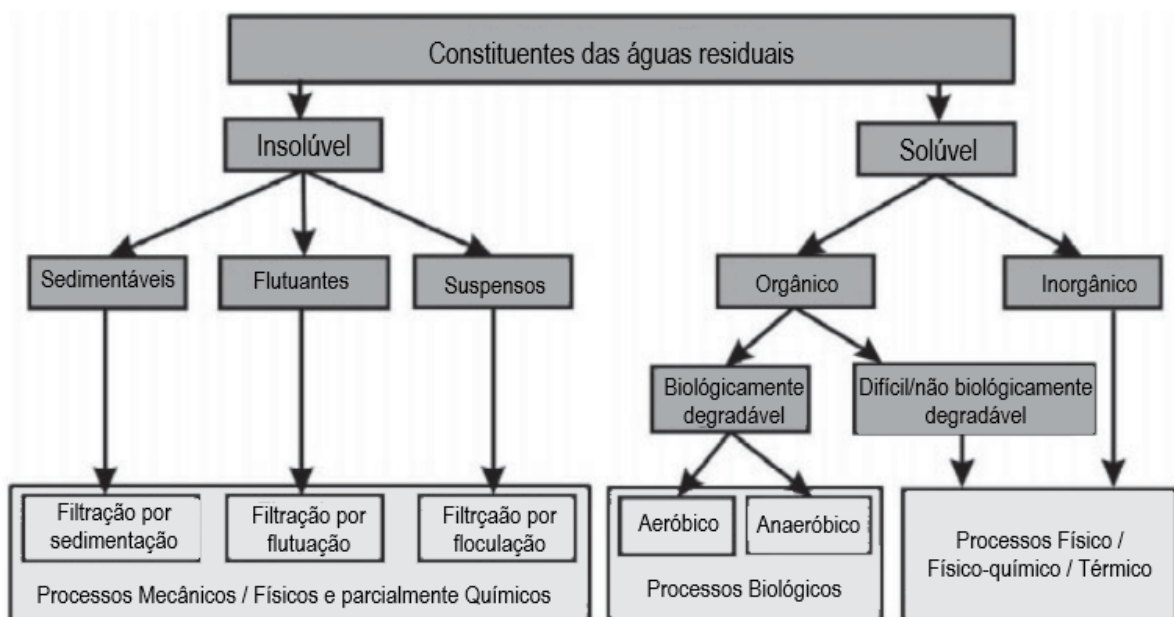
Os resíduos de embalagens são compostos basicamente por rótulos da lavagem das garrafas retornáveis, vidros quebrados, caixas de papel, tampas de garrafa e madeira de paletes. Resíduos de rótulos de papéis devem ser evitados ou no mínimo limitados pois são papeis resistentes, úmidos e impregnados com solução cáustica (OLAJIRE, 2012).

2.3.2 Resíduos Líquidos

A água residual de uma cervejaria é relativamente simples e altamente biodegradável, porém, existem alguns fatores agravantes nesse resíduo que são o seu volume, pH e materiais sólidos suspensos. As principais fontes são resíduos de cerveja, resíduos de fermentação e mostura, adjuntos como a terra de diatomáceas, água de limpeza de tanques, tubos e embalagens, e água para refrigeração (OLAJIRE, 2012; PETTIGREW et al., 2015).

Na Figura 5 é possível visualizar as formas de tratamento das águas residuais de uma cervejaria.

Figura 5 - Classificação dos constituintes das águas residuais de cervejarias e suas formas de filtragem e tratamento.



Fonte: Adaptado de (ESSLINGER, 2009).

A limpeza dos tanques e tubos feitos com a CIP geram um grande volume de efluentes que contém soluções de limpeza como ácidos, soluções cáusticas e desinfetantes. Antes de ser descartada, a água residual necessita ser tratada para se encaixar nos padrões impostos pelo governo. Primeiramente é feito um tratamento físico que inclui triagem, sedimentação e flutuação, para remover partículas maiores

como rótulos, tampas, fragmentos de vidro, plástico, grãos, cascalho e areia. (PETTIGREW et al., 2015).

Após o tratamento físico, a água passa por um tratamento químico para corrigir pH e evitar que microrganismos naturais sejam inativados. A partir dessa etapa a água de descarte pode ir direto para a rede de esgoto da cidade ou seguir para processos subsequentes de tratamento biológico, podendo estes serem aeróbicos ou anaeróbicos (OLAJIRE, 2012).

2.3.3 Emissões de gases

As emissões de gases em uma cervejaria podem ser divididas em duas categorias: por combustíveis fósseis (óleo, carvão, madeira etc.); e emissões específicas de cervejarias (CO₂ de fermentação, gases da planta de tratamento de efluentes, agentes de refrigeração, vapores do processo de mostura e das máquinas de lavagem de garrafas) (ESSLINGER, 2009).

A principal emissão de gases é durante a fermentação, na qual gera-se em torno de 3,7kg de CO₂ por hl de cerveja engarrafada, ou seja, 1 kg de CO₂ para cada quilograma de etanol produzido. Há também uma grande perda de gás carbônico durante o engarrafamento, pois as garrafas, latas e barris precisam receber uma descarga de CO₂ para remover o ar presente dentro dos recipientes, gerando em torno de 2 a 3 volumes de CO₂ para cada volume engarrafado. Esse volume representa cerca de 15% da quantidade de gás carbônico produzido durante a fermentação.

Algumas grandes fábricas recolhem e purificam o CO₂ da fermentação para ser usado posteriormente, diminuindo custos e emissões na atmosfera. Alguns dos subprodutos encontrados no CO₂ da fermentação são etanol, acetato de etila, acetaldeído e acetona (STWEART; RUSSEL; ANSTRUTHER, 2018).

2.4 ALTERNATIVAS DE REUSO

Os tratamentos mais comuns empregados são a destinação dos resíduos para alimentação animal, descarte em solo ou tratamentos biológicos. Na Tabela 5 tem-se uma relação resumida dos tipos de tratamentos mais comuns para os resíduos de cervejarias.

Tabela 5 - Técnicas de tratamento de resíduos mais usadas em cervejarias. A - Trabalho acadêmico com planta piloto; I - Aplicação industrial.

	Grãos (mostura)	Leveduras (fermentadores)	Terra de diatomáceas
Alimentação animal	I	I	I
Aplicação direta na terra	I	I	I
Fertilizante	I	I	I
Compostagem	A	A	
Despejo em costa marítima			I
Tratamento anaeróbico	I	I	I
Tratamento aeróbico	I	I	I
Incineração	A / I		

Fonte: Adaptado de (SMITH; KIM, 2008).

Diversas outras formas de reuso dos resíduos gerados em cervejarias são citados na literatura, como para alimentação humana através da produção de massas e outros alimentos, como também para a produção de novos materiais como embalagens de alimentos, aglutinantes geopoliméricos e placas de aglomerados de madeira.

As informações resumidas podem ser encontradas no Quadro 3.

Quadro 3 – Resumo das formas de reuso dos subprodutos de cervejarias conforme a literatura.

(continua)

Subproduto	Forma de Reuso	Resumo	Referência
Grãos e <i>trub</i>	Alimentação humana	Malte é usado como ingrediente para produzir pães ricos em proteínas e fibras.	(KTENIOUDAKI et al., 2015)
		Redução do amargor do <i>trub</i> resultando em um aumento da concentração de proteínas, possibilitando o uso como substrato em outros alimentos	(SARAIVA et al., 2019)
		Cevada residual usada para enriquecer semolina para a produção de macarrão desidratado	(NOCENTE et al., 2019)

Quadro 3 – Resumo das formas de reuso dos subprodutos de cervejarias conforme a literatura.

(conclusão)

Grãos e Trub	Criação de materiais	Produção de formas biodegradáveis para embalagem de alimentos.	(FERREIRA et al., 2019; MELLO; MALI, 2014)
		Aglutinante geopolimérico e concreto	(OKEYINKA et al., 2019)
		Produção de celulose bacteriana	(HUSSAIN et al., 2019)
		Uso como substrato para produção de placas de aglomerados de madeira	(KLÍMEK et al., 2016)
		Carvão ativado	(GONÇALVES et al., 2017; NADOLNY et al., 2020)
Água	Produção de combustíveis	Biometano	(DUDEK et al., 2019)
		Etanol	(WILKINSON; CERDAN; DORIGON, 2017)
		Biogás	(MALAKHOVA et al., 2015)
		Biohidrogênio	(BOBOESCU et al., 2014)
		Biodiesel	(MATA et al., 2014)
		Produção de fungos	(HULTBERG; BODIN, 2019)
		Bioetanol	(CLEMENTZ et al., 2019)
		Biobutanol	(MAITI et al., 2017)
Terra de diatomáceas	Criação de materiais	Cerâmica	(COTES-PALOMINO et al., 2020)

Fonte: Autor.

2.5 PRÁTICAS E OPORTUNIDADES MAIS UTILIZADAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO

Para realizar melhorias no processo produtivo de uma cervejaria é fundamental que antes de qualquer ação se tenha dados suficientes e confiáveis para embasar mudanças e investimentos. Dessa forma, primeiramente deve-se melhorar o

monitoramento das atividades produtivas registrando consumo de energia elétrica e térmica, água, insumos, agentes químicos e resíduos produzidos. Quanto mais detalhado for esse registro, maior a clareza dos problemas e das ações que podem ser tomadas para melhorar o processo produtivo (“Resource efficiency in the UK brewing sector,” 2012).

2.5.1 Moagem

Durante a moagem deve-se adotar medidas para reduzir a quantidade de farinha perdida por dispersão no ambiente. Isso pode ser feito instalando-se o moedor de malte em um local próximo ao local de mostura para que não haja perda durante o transporte e realizando-se o recolhimento de malte moído com uma bolsa ou recipiente bem vedado com a saída do moedor (FLANNERY NAGEL ENVIRONMENTAL LTDA, 2016).

2.5.2 Mostura

A escolha do modelo de panela de mostura é determinante para se obter uma melhor eficiência energética do processo de produção da cerveja. Painéis que sejam isoladas termicamente e fechadas para o ambiente, reduzem o desperdício de calor por condução nas laterais e por convecção na parte superior, diminuindo o consumo de energia. Os modelos *single vassel* normalmente possuem um cesto para separação dos grãos que é retirado pela parte superior da panela, sendo esses modelos na maioria das vezes abertos para o ambiente e os que acumulam maiores perdas de energia. Modelos fechados e com agitador automático consomem menos energia, no entanto, é necessário que durante o processo de mostura se mantenha a portinhola de inspeção fechada (FLANNERY NAGEL ENVIRONMENTAL LTDA, 2016).

Uma grande oportunidade que existe nesse processo é o reaproveitamento de calor do bagaço de grão de descarte que normalmente é descartado ainda quente, a uma temperatura média de 75°C, podendo representar até 17,3% de todas as perdas energéticas do processo produtivo (STURM et al., 2013).

2.5.3 Fervura e resfriamento do mosto

No processo de fervura ocorre uma grande perda de calor por evaporação, sendo essa equivalente a 68,9% da perda total de todo o processo (STURM et al., 2013). No entanto, esta perda é inerente ao processo, pois é necessário que ocorra a fervura e evaporação do mosto para torná-lo estéril e eliminar componentes orgânicos voláteis que afetam as propriedades da cerveja (FLANNERY NAGEL ENVIRONMENTAL LTDA, 2016).

A recuperação do calor de resfriamento do mosto é a oportunidade mais comumente usada e uma das que traz maior economia. É possível recuperar em torno de 0,16 MJ por litro de mosto resfriado, o que possibilita aquecer um litro de água de 25°C até 63°C em um cenário sem perdas energéticas. O retorno pelo investimento é de em média 3 anos (WORRELL; GALITSKY; MARTIN, 2002).

2.5.4 Fermentação

Na fermentação, a oportunidade mais comumente usada para reduzir custos com matéria-prima é a de reuso de leveduras, as quais podem ser reutilizadas de 5 a 10 vezes. Para que essa prática seja bem executada é necessário tomar alguns cuidados, principalmente com a higienização e armazenamento para que não ocorra contaminação. Utilizar recipientes e um refrigerador de armazenamento que sejam unicamente para leveduras, documentar número de gerações e etiquetar cada tipo de levedura, manter a temperatura de armazenamento baixa (1 a 2°C), proteger do ar ambiente, manter pressão de CO₂ baixa, reutilizar em no máximo 14 dias e monitorar pH do lodo durante o armazenado (aumento em mais de 1,0 significa aumento no número de células mortas), são alguns dos cuidados que asseguram que a reutilização da levedura seja bem-sucedida (WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

Para reduzir consumo de água, pode-se armazenar a água de enxague final da limpeza dos fermentadores para ser reutilizada na próxima limpeza, reduzindo o consumo de água. Nesta etapa do processo também é possível recuperar o CO₂ produzido durante a fermentação e reutilizá-lo na carbonatação e no envase, porém é necessário purificá-lo para retirar impurezas, o que demanda energia e equipamentos que a maioria das pequenas cervejarias não tem capacidade de adquirir, tornando-se

uma tecnologia que é mais utilizada entre grandes cervejarias (FLANNERY NAGEL ENVIRONMENTAL LTDA, 2016).

2.5.5 Pasteurização

A pasteurização é um processo que diminui o grau de contaminação da cerveja por microrganismos através da aplicação de calor a temperaturas entre 60 e 72°C, que são mantidas por um determinado tempo para inativar micróbios em estado vegetativo como as leveduras. Normalmente é feito de duas formas, em túnel e *flash* (SOUZA, 2021).

O consumo de energia da pasteurização em *flash* pode ser até 2/3 menor que o da pasteurização em túnel, tendo outras vantagens como ocupar menos espaço físico, usar menos fluido refrigerante e ter menor custo de investimento, manutenção e operação (WORRELL; GALITSKY; MARTIN, 2002). No entanto, os cuidados com higienização são muito mais críticos na pasteurização em *flash* e o produto fica mais suscetível a contaminação, pois a cerveja é pasteurizada dentro dos tubos do trocador de calor e depois é envasada. Na pasteurização em túnel a cerveja é primeiramente envasada e depois passa pelo processo de pasteurização, tendo menor probabilidade de contaminação (SOUZA, 2021).

2.5.6 Envase

O envase pode ser feito de diversas formas e cada uma delas possui diferentes consumos energéticos. Em barris é o que consome menos energia devido aos processos envolvidos e ao volume de cerveja ser maior por unidade envasada; garrafas PET, de vidro e latas vem logo na sequência enquanto *longneck* é o que tem o maior consumo de energia (KUBULE et al., 2016).

Para envase de cerveja em barris, é necessário antes realizar a limpeza e sanitização desses elementos. Desta forma, recomenda-se adquirir um limpador automático de barris para evitar fazer sua limpeza de forma manual, pois há um consumo maior de água e produtos de limpeza, há maior risco de contaminação por não realizar a limpeza de forma adequada, consumo maior de tempo e esforço. Os problemas que mais afetam a eficiência desses equipamentos são: pressão de água inadequada, que pode ser corrigida com o uso de medidores linha de limpeza e

motobombas com controle de velocidade; temperatura inadequada, que precisa de ser ajustada conforme especificações do fabricante, sendo que acima pode cozinhar a sujeira dentro do barril e abaixo pode não fazer a limpeza de forma adequada; e a concentração dos agentes químicos, que necessita de um monitoramento constante do pH para garantir que esteja dentro do padrão especificado pelo fabricante (FLANNERY NAGEL ENVIRONMENTAL LTDA, 2016).

Diversas cervejarias de pequeno porte não possuem recursos para investir em um limpador de barris, portanto, algumas boas práticas podem auxiliar no processo de limpeza manual: remover as válvulas o mais breve possível após o uso para prevenir o crescimento bacteriano na região, reduzindo tempo de limpeza; adquirir um kit de ferramentas especificamente para extração de válvulas para evitar utilizar ferramentas alternativas, reduzindo danos nos barris e aumentando sua vida útil (FLANNERY NAGEL ENVIRONMENTAL LTDA, 2016).

Segundo WORRELL; GALITSKY; MARTIN (2002), , pode-se recuperar calor da água de lavagem das embalagens e utilizar a água de enxague final de uma limpeza no início de outra, economizando até 40% de água e até 0,06 kWh por litro de cerveja, obtendo-se um retorno sobre investimento de 3,4 anos.

2.5.7 Outros

2.5.7.1 Perda de produto

Produtos descartados representam uma enorme perda de trabalho, tempo, material e energia, sendo essas métricas muitas vezes negligenciadas por não serem quantificadas e investigadas. Frequentemente aceita-se que são parte do processo e não se realiza um trabalho de melhoria mesmo que isso esteja custando muito dinheiro. Buscar implementar práticas que são exigidas por certificações do tipo ISO 9001 e ISO 14001, irão ajudar a reduzir as perdas de produto e aumentar a eficiência de produção (THE BREWERS ASSOCIATION OF CANADA, 2010).

Algumas das falhas mais comuns que levam a desperdiçar cerveja são: Levedura contaminada, cerveja fora das especificações, água de diluição da cerveja de alta gravidade com quantidade excessiva de O₂, cerveja muito ou pouco pasteurizada, quebra de embalagens durante transporte, embalagens com defeito, erros na rotulagem da cerveja, enchimento excessivo e explosão de garrafas durante

a pasteurização (FLANNERY NAGEL ENVIRONMENTAL LTDA, 2016; THE BREWERS ASSOCIATION OF CANADA, 2010).

2.5.7.2 Energia solar

O uso de energia solar vem se tornando cada vez mais comum no Brasil e seu uso em cervejarias pode se dar para aquecimento de água ou para produção de energia elétrica. O processo de fabricação de cerveja utiliza água aquecida a baixas temperaturas, sendo esse o cenário ideal para utilização de energia solar para aquecimento de água. Os painéis solares fotovoltaicos possuem maior tecnologia envolvida e necessitam maior investimento, enquanto os painéis para aquecimento de água utilizam menos tecnologia e o investimento é menor (URBAN; GEALL; WANG, 2016).

Um estudo realizado em uma cervejaria de pequeno porte no sul do Brasil, analisou a viabilidade econômica do uso de aquecedores solares de água e identificou uma redução de 60% no custo de energia elétrica para aquecimento de água. O consumo médio de água por batelada da cervejaria era de 350 litros e utilizava água entre 48 e 60°C, calculando-se um retorno pelo investimento de 4 anos (NUNES DE SOUSA; POLYDORO CASCAES; JENISCH RODRIGUES, 2020).

Outro estudo conduzido em uma cervejaria localizada no nordeste do Brasil, analisou a viabilidade econômica da instalação de energia solar fotovoltaica em uma cervejaria de pequeno porte. Sistemas solares fotovoltaicos são duráveis, possuem baixo custo de manutenção e reduzem a influência do aumento de tarifa de energia sobre os custos de produção. Calculou-se uma taxa interna de retorno de 18% e um retorno sobre investimento de 4 anos, configurando-se como uma excelente opção de investimento (PATRICK; MATIAS, 2020).

2.5.7.3 Cerveja de alta gravidade

Produzir cerveja de alta gravidade pode reduzir o consumo de energia térmica entre 0,12 e 0,19 MJ/L, tendo um retorno pelo investimento menor que um ano. Esse processo é um dos mais comumente usados em cervejarias dos Estados Unidos pela sua facilidade de implementação e por trazer grandes vantagens produtivas. É possível aumentar a capacidade de produção e usar de maneira mais eficiente as

instalações da fábrica, reduzindo tempo de cozimento, consumo de água, trabalho e custos com limpeza. Pode aumentar a qualidade do produto por se obter maior consistência e repetibilidade, apesar dos impactos no sabor e aroma serem sempre uma grande preocupação (WORRELL; GALITSKY; MARTIN, 2002).

O processo de fabricação de cerveja de alta gravidade consiste em realizar a mostura com um volume menor de água, resultando em um mosto com uma concentração maior de açúcares. Ao fim da fermentação, dissolve-se a cerveja com mais água para atingir as especificações da cerveja que se deseja (KINČL et al., 2021). A água necessita de um tratamento especial antes de ser dissolvida na cerveja, pois o oxigênio presente na água irá oxidar a cerveja precocemente, causando alteração nas características e perda de qualidade. Para retirar o oxigênio da água, diversas técnicas podem ser utilizadas, como uso de vácuo, calor e borbulhamento de CO₂ ou N₂ (GROSS et al., 2010).

2.5.7.4 Sistemas de refrigeração

Os sistemas de refrigeração representam aproximadamente 30% do consumo de energia elétrica de uma cervejaria, portanto otimizar o uso desses equipamentos é uma das melhores oportunidades para reduzir consumo de energia. A maior parte do tempo, os sistemas de refrigeração operam abaixo da sua capacidade máxima, visto que isso ocorre somente nos meses mais quentes e nos que há maior produção. Tendo isso em vista, existem alguns fatores que podem afetar a eficiência desses equipamentos: condensadores e evaporadores com sujeira incrustada dificultando troca térmica, exposição solar do condensador (aumento de 1°C da temperatura do condensador aumenta custos entre 2 e 4%), controle incorreto de compressores e equipamentos auxiliares como bombas e ventiladores, resfriamento excessivo e uso excessivo de potência de bombeamento de fluidos refrigerantes (deve-se usar motores de velocidade variável, chave liga/desliga automática, controladores de fluxo e pressão, entre outros). O retorno sobre investimento acontece entre 3 e 5 anos (THE BREWERS ASSOCIATION OF CANADA, 2010).

2.5.7.5 Sistemas de aquecimento

Por representarem um custo de investimento e de operação elevado, a escolha correta do sistema de aquecimento de água é fundamental para o bom funcionamento das operações de produção cervejeira. As principais fontes de energia térmica em uma cervejaria são a elétrica, a gás e a vapor. Os critérios de escolha devem levar em conta principalmente o volume de produção, o espaço disponível e os recursos disponíveis para investimento (FIGUEIREDO PAZETTO BRASÍLIA, 2018).

O aquecimento elétrico é feito através de resistências de baixa densidade instaladas no fundo das tinas, que ao serem energizadas se aquecem e transferem calor para o líquido em contato. Normalmente esses equipamentos permitem um bom controle do fluxo de calor pois já vem com controles automatizados de temperatura, tempo, bombeamento e agitação, necessitando de menos esforço e trabalho na instalação e operação. Em comparação aos outros sistemas, o elétrico possui o menor custo de investimento e o maior em operação devido aos custos mais altos de energia elétrica (FIGUEIREDO PAZETTO BRASÍLIA, 2018; JOSÉ DA ROCHA REIS, 2018).

Pequenas cervejarias que usam GLP ou Gás Natural para aquecimento de água, utilizam o método de chama direta, que consiste em um conjunto de queimadores localizados na parte inferior das painéis de mostura e fervura, onde é realizada a queima do combustível para fazer o aquecimento. Esse formato de aquecimento possui custo menor do que a energia elétrica e maior que o a vapor, é de fácil instalação, porém os controles podem não ser tão precisos, muitas vezes sendo feitos até de forma manual (FIGUEIREDO PAZETTO BRASÍLIA, 2018).

O sistema de aquecimento a vapor consiste no transporte de vapor d'água ou água aquecida da caldeira para os trocadores de calor nas tinas de mostura e fervura. Após a troca térmica, o condensado retorna para a caldeira onde o ciclo reinicia. Normalmente usa-se vapor de água superaquecido a 300°C ou água quente sobre pressão entre 160 e 170°C. A escolha por vapor ou água aquecida depende de alguns fatores como capacidade de produção, potência da caldeira, combustível, volume de água, entre outros. Possuem o menor custo de operação bem como outras vantagens como bom controle da temperatura e rapidez de aquecimento de água, porém, o custo de investimento inicial é o mais elevado entre todos, tanto para os equipamentos como para os sistemas de segurança e controle, visto que se trata de um equipamento que trabalha com pressões e temperaturas elevadas. Por conta dessas características,

são mais utilizados por médias e grandes cervejarias (FIGUEIREDO PAZETTO BRASÍLIA, 2018).

Aproximadamente 25% da energia total do combustível será perdida durante a operação da caldeira: 4% pelas paredes da caldeira, 18% nos gases de combustão e 3% com a purga de condensados (THE BREWERS ASSOCIATION OF CANADA, 2010). Algumas alternativas e boas práticas podem aumentar a eficiência desses equipamentos: manutenção periódica para programar as paradas e não afetar a produção, mantendo um histórico e garantindo máxima performance (GALITSKY et al., 2003c); reutilizar o calor dos gases de combustão para aquecimento da água de alimentação da caldeira, podendo trazer uma economia de até 18 kJ por litro de cerveja produzido (WORRELL; GALITSKY; MARTIN, 2002); monitoramento dos gases de exaustão para configurar a correta relação de ar-combustível (GALITSKY et al., 2003b); retornar o condensado para a caldeira; buscar e reparar imediatamente qualquer vazamento de vapor e utilizar isolamento térmico corretamente dimensionado em todos os equipamentos podem melhorar a eficiência de sistemas de aquecimento a vapor. Todas essas medidas possuem um retorno sobre investimento entre 1 e 3 anos (THE BREWERS ASSOCIATION OF CANADA, 2010).

2.6 BENCHMARK

Benchmark é uma comparação de performance entre organizações ou operações similares, tendo como objetivo evidenciar se há consumo excessivo ou não. Para fazer uma análise usando *benchmark*, é necessário que o volume de produção entre as cervejarias comparadas seja similar (BREWERS ASSOCIATION, 2015).

Quadro 4 - Benchmark de cervejarias europeias e americanas.

Níveis de produção		Consumo específico									Referências
Produção (L/ano)		Energia Térmica (MJ/L)		Energia Elétrica (kWh/L)		Água (L/L)		Malte (kg/L)		CO ₂ (kg/L)	
0	10.000	9,88		1,52		16,72		0,306		0,035	Brewers Association (2015)
10.000	100.000	3,54		0,50		8,61		0,306		0,022	Brewers Association (2015)
0	100.000	2,31	2,45	0,23	0,26	7,8	10	0,28	0,316	-	Beloborodko et al. (2014); Sturm et al. (2012)
0	2.000.000	2,262		0,18		7,84		-		-	Blümelhuber (2008)
2.000.000	5.000.000	2,113		0,16		6,76		-		-	Blümelhuber (2008)
100.000	10.000.000	1,91		0,23		5,98		0,306		0,034	Brewers Association (2015)
5.000.000	10.000.000	1,907		0,14		6,5		-		-	Blümelhuber (2008)
10.000.000	50.000.000	1,545		0,13		3,86		-		-	Blümelhuber (2008)
>	10.000.000	1,43		0,16		4,58		0,306		0,029	Brewers Association (2015)
25.000.000		1,6	1,8	0,13	0,17	6,4	7,2	0,2	0,22	-	Sturm et al. (2013)
>	50.000.000	1,025		0,11		4,95		-		-	Blümelhuber (2008)
>	100.000.000	0,85	1,2	0,11	0,12	4	10	0,18	0,2	-	EC (2006)

Fonte: Adaptado de diversas fontes.

Dessa forma, no Quadro 4 são apresentadas as informações de *Benchmark* de cervejarias europeias e americanas para diferentes níveis de produção. É possível visualizar que quanto menor o nível de produção, maior o consumo específico de energia e insumos. Cervejarias europeias consomem menos energia térmica e elétrica que cervejarias americanas, ou seja, são mais eficientes em seu processo de produção.

2.7 AUDITORIA ENERGÉTICA

A auditoria energética é uma inspeção, supervisão e análise do fluxo energético para a identificação de oportunidades de economia em um edifício, processo ou sistema, sem afetar negativamente a sua produção. Tem como objetivo melhorar a performance e minimizar impactos ambientais, mudar comportamentos da organização, fornecer informações claras a respeito dos padrões de uso energético bem como do retorno financeiro, a fim de priorizar os setores mais importantes da organização (SUSTAINABLE ENERGY AUTHORITY OF IRELAND, 2020)

Segundo THUMANN; NIEHUS; YOUNGER, 2013, existem diversos tipos de auditoria energética: A auditoria de referência (*benchmark*), avaliação prática, auditoria padrão e simulação computadorizada.

- Auditoria de referência: análise preliminar do uso de energia e dos custos para ter como referência. Determinam-se os KPIs (*Key Performance Indicators*), por exemplo, a quantidade de energia utilizada por metro quadrado ou por volume de produção.
- Avaliação prática: inspeção de cada um dos sistemas que utilizam energia. Normalmente se inclui uma avaliação dos dados de consumo de energia para analisar padrões de consumo bem como fornecer comparações com outras indústrias de mesmo porte. Pode fornecer estimativas de economias de baixo custo através de melhoria nas operações e nas práticas de manutenção.
- Auditoria padrão: análise mais detalhada de equipamentos, sistemas e características operacionais para determinar as eficiências energéticas e custos de economia baseados em melhorias e mudanças de cada sistema ou equipamento.
- Simulação computadorizada: compreende uma avaliação altamente detalhada dos gastos energéticos da empresa, incluindo variáveis do edifício e do clima

local durante todo o ano para prever o uso de energia. O objetivo do auditor é construir uma base de dados com as informações do estado atual da companhia e comparar com o estado futuro já com as mudanças implementadas.

2.8 RESUMO DO REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo revisou-se os principais conceitos que tangem a produção de cerveja artesanal, desde os processos de fabricação, matérias-primas, resíduos produzidos e as principais alternativas e boas-práticas que podem ser implementadas para aumentar a eficiência produtiva através da redução do uso de energia e matérias primas. Nota-se que existem diversas diferenças no processo produtivo e nas oportunidades de melhoria entre grandes e pequenas cervejarias, sendo necessário avaliar corretamente o que pode e o que não pode ser implementado, segundo as características particulares e níveis de produção de cada cervejaria.

A água é a matéria-prima principal da produção de cerveja, sendo utilizada em praticamente todas as etapas do processo produtivo, tanto no processo quanto na limpeza de equipamentos. Os resíduos de cervejarias são altamente biodegradáveis e não são tóxicos, porém se seu volume for excessivo, pode causar alterações no local em que são descartados, como aumento no pH do solo e redução de oxigênio na água. Dessa maneira, a maioria do resíduo sólido orgânico é facilmente reutilizado como alimento para animais ou como fertilizante. No entanto, a produção de cerveja consome uma grande quantidade de energia térmica para o aquecimento de água, e elétrica para manter, principalmente, os processos de resfriamento, sendo que as melhores oportunidades de melhoria do processo envolvem um melhor aproveitamento de energia.

Portanto, para se aproveitar as oportunidades de melhorias apresentadas, é fundamental que se realize através de uma auditoria energética, um registro apurado do uso de energia e matérias-primas. Com isso, é possível fazer uma comparação com o *benchmark* e determinar quais melhorias podem ser implementadas, a maneira como deve ser feita e o retorno financeiro esperado, impulsionando a melhoria contínua reduzindo custos de produção e impactos ambientais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata da metodologia para atingir o objetivo desse estudo. A metodologia apresentada é composta pelas seções: Classificação metodológica da pesquisa e Procedimentos e condução da pesquisa.

3.1 CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA

Quanto à natureza, esse estudo se classifica como aplicado e faz uso do método científico indutivo. Estudo aplicado pois objetiva a produção de conhecimentos para aplicações práticas à solução de problemas que envolvem interesses locais, existindo relação entre as informações coletadas e o ambiente real analisado. O método científico é classificado como indutivo pois o raciocínio indutivo deriva de observações de casos da realidade e envolvem verificações particulares que objetivam conclusões gerais (GIL, 2002; PRODANOV; FREITAS, 2013).

A abordagem da pesquisa será quantitativa, pois haverá a explanação das causas por meio da análise de hipóteses e de medidas objetivas, utilizando métodos de quantificação. Quanto ao objetivo, a pesquisa se classifica como exploratória pois tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito ou criando hipóteses (GIL, 2002).

Quadro 5 - Enquadramento metodológico.

Categorias	Classificação
Natureza	Aplicado
Método Científico	Indutivo
Abordagem	Quantitativa
Objetivo	Exploratória
Procedimentos	Estudo de caso e bibliográfico

Fonte: Autor.

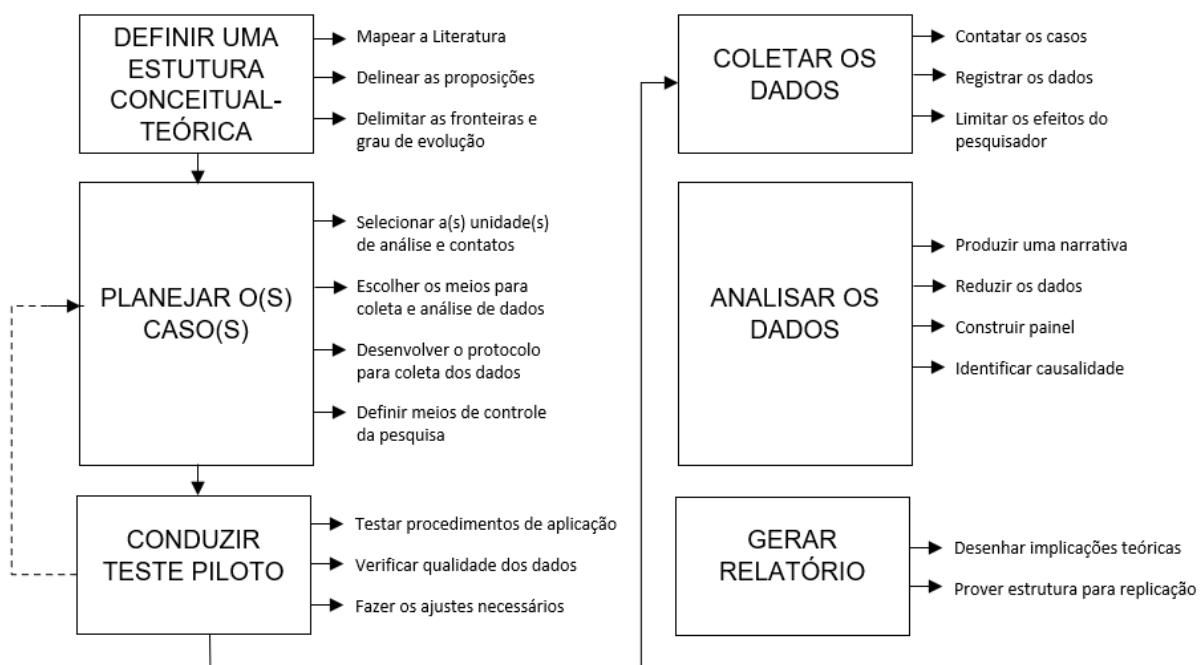
O procedimento utilizado será um estudo de caso que é um trabalho de caráter empírico que investiga um fenômeno dentro de um contexto real por meio de análise aprofundada de um ou mais casos. Além disso, realizou-se o levantamento

bibliográfico para fundamentação da pesquisa, baseado em publicações científicas no formato de artigos, livros e periódicos (PRODANOV; FREITAS, 2013).

3.2 PROCEDIMENTOS DE CONDUÇÃO DA PESQUISA

Os procedimentos para realização da pesquisa consistem na realização da revisão da literatura, coleta de dados e geração de relatório final. Para que o estudo de caso tenha resultados satisfatórios, foi conduzido de acordo com as informações apresentadas na Figura 6.

Figura 6 - Procedimentos para condução do estudo de caso.



Fonte: (CAUCHICK et al., 2018).

3.2.1 Definição da estrutura conceitual-teórica

O primeiro passo consiste na definição da estrutura conceitual-teórica, realizando o levantamento da literatura sobre o tema em questão. A partir da busca e organização bibliográfica é possível identificar lacunas que representam um conceito a ser verificado (CAUCHICK et al., 2018). Inicialmente foi realizado uma revisão exploratória sobre o mercado cervejeiro do Brasil com o intuito de identificar a abrangência do estudo. Na sequência se analisou o processo produtivo da cerveja,

padrão de consumo de recursos naturais, resíduos e emissões geradas. A partir desse entendimento, fez-se um levantamento teórico das melhores práticas e oportunidades de melhoria existentes e organizou-se um *Benchmark* para ter como base de comparação com os dados coletados do estudo de caso.

3.2.2 Planejamento do(s) caso(s)

O planejamento do(s) caso(s) inicia definindo-se o tipo, se retrospectivo ou longitudinal, sendo o primeiro uma investigação do passado através da coleta de dados históricos e o segundo uma investigação do presente. Outro fator que deve ser determinado é a quantidade de casos, único ou múltiplos casos. A utilização de somente um caso permite aprofundar e ter maior riqueza na coleta de dados, havendo como contraponto uma limitação no grau de generalização. Na adoção de múltiplos casos pode-se alcançar maior grau de generalização dos resultados, porém com uma profundidade menor na avaliação (CAUCHICK et al., 2018).

Este estudo contempla os dois tipos, tanto o retrospectivo como o longitudinal, visto que é realizada uma coleta de dados históricos de consumo de insumos, energia e produção, e é analisado um processo atual onde são calculados e estimados o consumo desses mesmos itens. Quanto ao número de casos, para se ter maior aprofundamento e riqueza na coleta de dados, analisou-se uma cervejaria de pequeno porte.

Desenvolveu-se um protocolo de pesquisa, que deve conter procedimentos e regras gerais da pesquisa para sua condução, assim como a indicação das fontes de origem da informação (CAUCHICK et al., 2018). O protocolo de pesquisa desenvolvido para esse trabalho encontra-se no APÊNDICE A – PROTOCOLO DE PESQUISA.

3.2.3 Condução do teste piloto

De acordo com CAUCHICK et al. (2018), é necessária a realização de um teste piloto no estudo de caso de modo a verificar se a qualidade dos dados obtidos está condizente com o objetivo da pesquisa.

Criou-se um roteiro para verificação dos itens necessários para a condução do estudo de caso, sendo ele dividido em duas partes:

- Coleta de documentos como contas de energia elétrica, água, insumos e históricos de produção de cerveja;
- Dados e observações do processo produtivo conduzidos através de um *Checklist* com o uso de matérias-primas, relato de execução das tarefas, planta-baixa simplificada com especificações dos equipamentos, perguntas mais importantes, tempos de ciclo, quantidade e destinação dos resíduos produzidos entre outras observações.

Com esses documentos foi realizado um teste de acompanhamento da produção em uma cervejaria no qual foram realizadas alterações e melhorias no roteiro. Ele pode ser verificado no APÊNDICE B – ROTEIRO PARA COLETA DE DADOS.

3.2.4 Coleta de dados

Segundo CAUCHICK et al. (2018), a coleta deve seguir o roteiro criado previamente, sendo as anotações de campo extremamente relevantes, devendo ser feitas quando ocorrem ou o mais breve possível após a ocorrência do evento. A sequência de eventos deve ser planejada e o pesquisador deve ter a capacidade de fazer questões adequadas aos objetivos do trabalho e interpretar as respostas, por isso a necessidade de estar muito bem embasado teoricamente. A coleta de dados é concluída quando novos dados não acrescentam informações relevantes.

Para iniciar a coleta de dados, mapeou-se as cervejarias do Vale do Itajaí e 3 foram visitadas. Conversou-se com os gerentes dos locais e uma rápida visita foi conduzida, na qual explicou-se os objetivos e a metodologia da pesquisa, salientando as vantagens para a cervejaria. Tendo em vista a facilidade de acesso, proximidade geográfica e interesse do gestor, selecionou-se uma cervejaria e agendou-se uma visita para acompanhar uma brassagem na qual foi conduzido o teste piloto com a coleta de dados.

3.2.5 Análise dos dados e geração de relatório de pesquisa

O objetivo final da análise é tratar as evidências de maneira coerente, produzir conclusões analíticas e irrefutáveis e eliminar interpretações alternativas. Segundo TURRIONI; MELLO (2012) uma das estratégias para alcançar esse objetivo é através

de uma descrição do caso, a fim de organizar o estudo de caso. Essa abordagem ajuda a identificar as ligações causais apropriadas a serem analisadas, mesmo que de forma quantitativa.

Para (CAUCHICK et al. (2018), a partir dos dados coletados, considerando as múltiplas fontes de evidência, o pesquisador deve produzir uma espécie de narrativa geral do caso, fazendo uma redução dos dados de forma que seja incluído somente aquilo que é essencial e que tem ligação com os objetivos da pesquisa. Dados secundários de caracterização da empresa devem ser incluídos. Em seguida, uma análise mais detalhada e consistente pode ser elaborada, explicando as evidências que podem ser generalizáveis, convergindo para as conclusões lógicas. Ao mesmo tempo, as conclusões são comparadas com a teoria para que seja feita a verificação dos dados, buscando enquadrar os resultados na literatura. Todas as informações mencionadas devem ser sintetizadas em um relatório.

O estudo deve ser pautado em critérios para julgar a qualidade da pesquisa, sendo eles a confiabilidade e validade (YIN, 2003). No Quadro 6 se encontram as técnicas recomendadas para garantir a qualidade do estudo de caso em cada uma das fases da pesquisa.

Quadro 6 - Técnicas para garantir a qualidade do estudo de caso.

Teste	Atividade Operacional	Etapa da Pesquisa
Validade do constructo	Uso de múltiplas fontes de evidência	Coleta de dados
	Estabelecer um encadeamento de evidências	
	Revisão do relatório pelos respondentes	Análise dos dados
Validade interna	Desenvolver padrão de convergência e de construção da explanação/narrativa	Análise dos dados
	Fazer análise de séries temporais	
Validade externa	Usar a lógica de replicação em múltiplos estudos de caso	Planejamento da pesquisa (casos)
Confiabilidade	Usar protocolo de pesquisa no estudo de caso	Coleta de dados
	Desenvolver base de dados para o estudo de caso	

Fonte: (CAUCHICK et al., 2018).

Em síntese, procurando uma maior qualidade do estudo de caso, foram adotadas algumas técnicas. Para validade do constructo foram utilizadas múltiplas

fontes de evidência como acesso à documentação da empresa, entrevista semiestruturada, observação em caráter não participante e conversas por aplicativo de mensagens instantâneas.

Quanto ao teste de validade interna, adotou-se o uso do Padrão de convergência, onde os resultados do estudo de caso são comparados com os dados teóricos. Para o teste de validade externa realizou-se o estudo de caso em 3 cervejarias. Por fim, buscando uma maior confiabilidade, desenvolveu-se um protocolo de pesquisa com os itens e requisitos para a execução do estudo de caso.

3.3 DESCRIÇÃO GERAL DO MÉTODO

Buscando dar mais clareza a metodologia escolhida para a condução desse estudo, no Quadro 7 estão descritas as etapas, fases e resultados esperados.

Quadro 7 - Etapas, fases e resultados esperados da pesquisa.

(continua)

Etapas	Fases (F)	Resultados esperados
Definição da estrutura teórico conceitual	F1 - Revisão exploratória sobre o mercado cervejeiro do Brasil	Caracterização do setor, justificativa, relevância e potencial de abrangência da pesquisa
	F2 - Revisão bibliográfica do processo produtivo da cerveja	Identificação dos processos e suas particularidades.
	F3 - Revisão bibliográfica dos padrões de consumo de recursos naturais, formação de resíduos e emissões.	Identificação dos agentes que impactam a produção
	F4 - Revisão bibliográfica das melhores práticas e oportunidades	Orientação para busca de resultados
	F5 - Benchmark	Organização de base para comparação de resultados
Planejamento dos casos	F6 - Planejamento dos casos, seleção das unidades de análise, definição dos meios de coleta, desenvolvimento do protocolo, definição dos meios de controle da pesquisa.	Definição das unidades de análise, definição dos meios de coleta e do protocolo e roteiro de pesquisa.

Quadro 8 - Etapas, fases e resultados esperados da pesquisa.

(conclusão)

Teste Piloto	F7 - Teste Piloto	Teste de procedimentos de aplicação, verificação da qualidade dos dados, melhor compreensão sobre os temas, reformulação da revisão bibliográfica, validação e ajustes do questionário.
Coleta de dados	F8 - Coletar dados	Contato com cervejarias, realização de reuniões, aplicação de questionário da pesquisa e registro dos dados
Análise de resultados	F9 - Análise dos casos	Produção da narrativa e redução dos dados.
Relatório	F10 - Relatório	Apresentação da síntese dos resultados através de relatório de pesquisa.

Fonte: Autor.

3.4 METODOLOGIA DE CÁLCULOS

Utilizou-se 27°C (300 K) para todos os cálculos que envolvem a temperatura ambiente, visto que essa foi a temperatura média registrada no dia que a coleta de dados foi feita. Como os equipamentos e sistemas estão sujeitos a diversas variações na temperatura ambiente, ventilação de ambientes, incidência do sol, perdas de energia, ineficiência de processos, tempo de uso e até mesmo diferenças construtivas nos componentes dos equipamentos, associou-se uma faixa de tolerância baseada em informações dos fabricantes dos equipamentos e estimativas do impacto dos fatores físicos e ambientais. Fabricantes de resistências elétricas afirmam que, por exemplo, pode haver uma diferença entre a potência teórica da resistência e a real de até 10% devido a variações construtivas e de material (“SPWATTS,” 2022). Na época em que a coleta de dados foi realizada, em média, há uma variação de 9°C durante o dia na cidade de Itajaí (“Wetherspark,” 2022). Calculou-se que essa variação na temperatura ambiente pode modificar em até 14% o consumo de energia na câmara fria. Portanto, aplicou-se ao consumo geral dos sistemas, uma variação de 9% para mais e para menos a fim de melhor representar essas incertezas.

Para calcular o consumo de energia dos processos utilizou-se a Equação 1,

$$Q = P * t \quad (1)$$

Onde:

Q = Consumo de energia [kJ]

P = Potência do equipamento [kW]

t = Tempo de uso [s]

Para o processo de mostura foram anotados os tempos e as temperaturas de cada uma das rampas, como pode ser visualizado na Figura 7. Com isso, calculou-se o consumo durante as etapas de aquecimento da água e do mosto utilizando-se a Equação 1, visto que durante essas etapas a resistência encontra-se plenamente ativada.

Durante as etapas em que a temperatura se manteve constante, calculou-se a taxa de energia perdida para o ambiente através da convecção na parte superior da panela por meio da Equação 2,

$$\dot{Q} = h * A * (T_{\infty} - T) \quad (2)$$

Onde:

\dot{Q} = Taxa de energia perdida [W]

h = Coeficiente de transmissão de calor por convecção do ar [W/m²*K]

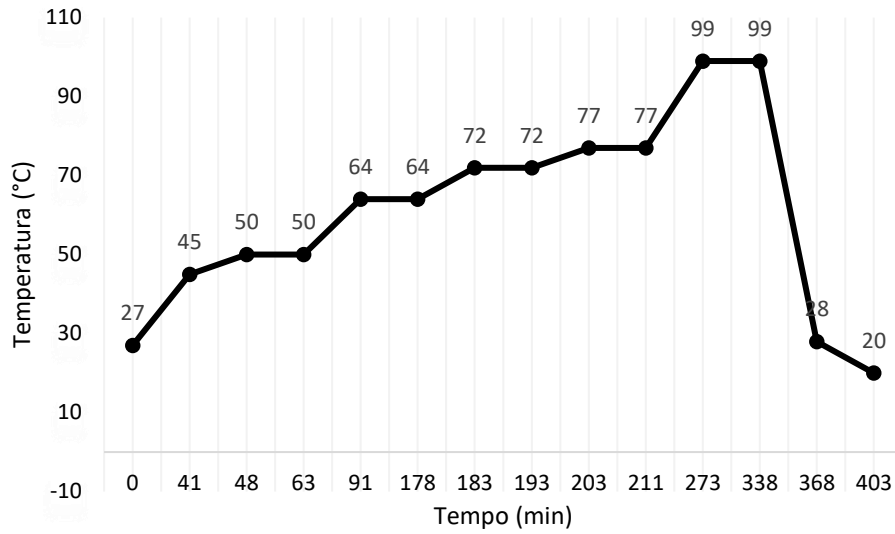
A = Área de abertura da panela [m²]

T_∞ = Temperatura do ar ambiente [K]

T = Temperatura do mosto [K]

Na sequência, para encontrar a energia perdida para o ambiente utilizou-se a Equação 1, substituindo-se em t o tempo em que a temperatura se manteve constante. Como existem outras perdas de energia pelas tubulações e bombas que estão conectadas a panela de mostura e que não se encontram isoladas, acrescentou-se uma margem de 15% ao resultado. Por haver uma camada de aproximadamente 100 mm de lã de rocha nas laterais e no fundo da panela, desprezou-se que a perda por condução nessas regiões.

Figura 7 - Rampas de temperatura do mosto durante a brassagem.



Fonte: Autor.

Para calcular a quantidade de energia consumida durante os ciclos de aquecimento ou resfriamento dos líquidos, utilizou-se a Equação 3,

$$Q = m * c_p * \Delta T \quad (3)$$

Onde:

Q = Energia consumida [kJ]

m = Massa de líquido aquecido [kg]

c_p = Calor específico da água [kJ/kg*K]

ΔT = Diferença de temperatura final e inicial do líquido [K]

Para calcular o consumo de energia na fervura, utilizou-se a Equação 4,

$$Q = m * c_v \quad (4)$$

Onde:

Q = Energia consumida [kJ]

m = Massa de líquido evaporado [kg]

c_v = Coeficiente de evaporação da água [kJ/kg]

Para calcular a massa de mosto quando se tinha a informação de volume, utilizou-se a Equação 5,

$$m = \rho * v \quad (5)$$

Onde:

m = Massa de mosto [kg]

ρ = Densidade do mosto [kg/L]

v = Volume do mosto [L]

Os cálculos para determinar a quantidade de energia consumida pelo banco de frio durante o resfriamento do mosto foram feitos em 2 etapas: determinar a temperatura final do mosto após a primeira etapa de resfriamento; determinar a quantidade de energia necessária para reduzir a temperatura do mosto na saída do primeiro trocador de calor até 27°C.

Para isso, calculou-se a efetividade do trocador de calor com o método ϵ/NUT , no qual o valor de C_r é encontrado através da Equação 6,

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (6)$$

Onde:

C_r = Constante

$C_{min} = C_{max}$ = Condutividade térmica [W/K]

Os valores de C_{min} e C_{max} são calculados através da Equação 7

$$C = \dot{m} * cp \quad (7)$$

Onde:

\dot{m} = Vazão do fluido analisado [kg/s]

cp = Calor específico do fluido analisado [kJ/kg*K]

O fator NUT é calculado através da Equação 8,

$$NUT = \frac{U * A}{C_{min}} \quad (8)$$

Onde:

NUT = Constante

U = Coeficiente global de transferência de calor [W/m²K]

A = Área de troca térmica do trocador de calor [m²]

C_{min} = Condutividade térmica [W/K]

Necessitou-se calcular o valor de U, pois o fabricante do trocador de calor não divulgou esse valor na documentação que acompanha o equipamento, portanto, para encontrar o valor de U, utiliza-se a Equação 9,

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{s}{\gamma} + \frac{1}{h_2}} \quad (9)$$

Onde:

U = Coeficiente global de transferência de calor [W/m²*K]

h₁ = Coeficiente convectivo fluido quente [W/m²*K]

h₂ = Coeficiente convectivo fluido frio [W/m²*K]

s = Espessura do tubo do trocador de calor [m]

γ = Condutividade térmica do material do tubo do trocador de calor [W/m*K]

10 A área de troca térmica do trocador de calor foi calculada, através da Equação

$$A = 2 * \pi * r * l * n \quad (10)$$

Onde:

A = Área de troca térmica do trocador de calor [m²]

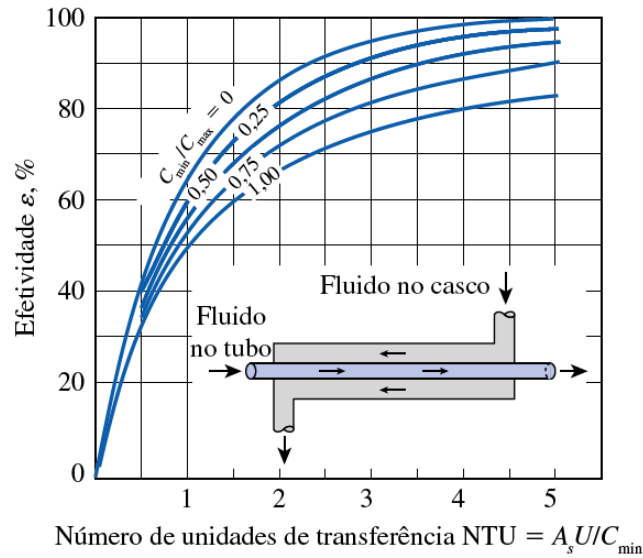
d = Diâmetro do tubo [m]

l = Comprimento do tubo [m]

n = Quantidade de tubos do trocador de calor

Com os valores de ε e NUT, analisa-se a Figura 8 com os valores correspondentes e encontra-se a efetividade do trocador de calor.

Figura 8 - Efetividade do trocador de calor com o método ϵ /NUT.



Fonte: (ÇENGEL, 2012).

Através da Equação 11 calcula-se a temperatura de saída do fluido em análise.

$$T_{saída,1} = T_{entrada,1} - \frac{\dot{q}}{C_1} \quad (11)$$

Onde:

$T_{saída,1}$ = Temperatura de saída do fluido quente [K]

$T_{entrada,1}$ = Temperatura de entrada do fluido quente [K]

\dot{q} = Fluxo de energia entre fluidos no trocador de calor [W]

C_1 = Condutância Térmica do fluido quente [W/K]

Para calcular o fluxo de energia entre fluidos no trocador de calor, utiliza-se a Equação 12,

$$\dot{q} = \epsilon * C_{min} * (T_{entrada,1} - T_{entrada,2}) \quad (12)$$

Onde:

\dot{q} = Fluxo de energia entre fluidos no trocador de calor [W]

ϵ = Eficácia do trocador de calor

C_{min} = Menor condutância Térmica entre os fluidos analisados [W/K]

$T_{entrada,1}$ = Temperatura de entrada do fluido quente [K]

$T_{entrada,2}$ = Temperatura de entrada do fluido frio [K]

Com a temperatura de saída do fluido quente, calcula-se através da Equação 13 a quantidade de energia requerida para atingir 27°C, obtendo como resultado o consumo energético no banco de frio.

$$Q = m * cp * \Delta T \quad (13)$$

Onde:

Q = Energia consumida [kJ]

m = Massa de líquido aquecido [kg]

cp = Calor específico da água [kJ/kg*K]

ΔT = Diferença de temperatura final e inicial do líquido [K]

O processo fermentativo da cerveja produz calor, em média 586,6kJ/kg. Esse valor é para cada quilo de extrato dissolvido no mosto, ou seja, é a concentração de açúcar dissolvido no mosto. Para isso, é feita uma correlação da densidade com °Plato para encontrar a concentração de açúcar no mosto. Multiplica-se o resultado da concentração de açúcar no mosto pela massa do mosto e encontra-se a massa de extrato, podendo assim calcular a quantidade de energia produzida durante a fermentação através da Equação 14.

$$Q = m_{extrato} * Q_{fermentação} \quad (14)$$

Onde:

Q = Quantidade de energia [kJ]

$m_{extrato}$ = Massa de extrato [kg]

$Q_{fermentação}$ = Calor produzido pelo processo de fermentação [kJ/kg]

Para o cálculo de consumo de energia da câmara fria, calculou-se a carga térmica total do equipamento. Calculou-se inicialmente a carga de transmissão pelas paredes através da Equação 15.

$$Q = U * A * \Delta T \quad (15)$$

Onde:

Q = Calor transmitido através das paredes da câmara fria [W].

U = Coeficiente de convecção das paredes da câmara [W/m²*K]

A = Área das paredes internas da câmara [m²]

ΔT = Diferença de temperatura interna e externa [K]

Através da Equação 16 calculou-se a quantidade de calor provindo da circulação de pessoas dentro da câmara fria

$$Q = n * t * c \quad (16)$$

Onde:

Q = Calor da circulação de pessoas na câmara fria [kWh]

n = número de pessoas

t = tempo de circulação por dia [h]

c = perda de calor por pessoa [W]

Com a Equação 17 calculou-se a infiltração de calor na câmara fria

$$Q = \frac{n * v * e * \Delta T}{3600} \quad (17)$$

Onde:

Q = Calor de infiltração [kWh/dia]

n = Número de renovações de ar na câmara fria

v = volume de ar na câmara fria [m³]

e = Capacidade térmica volumétrica do ar [kJ/m³*K]

ΔT = Diferença de temperatura entre o interior e o exterior da câmara fria [K]

Os cálculos podem ser conferidos no APÊNDICE D – CÁLCULOS DE CONSUMO ENERGÉTICO.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A cervejaria selecionada para este estudo está localizada na cidade de Itajaí – SC, em atividade desde 2018 e classifica-se como microempresa. A empresa encontra-se devidamente registrada no MAPA e possui o alvará de funcionamento ativo. No mesmo local em que é feita a fabricação, há também um bar que comercializa as cervejas e realiza eventos de música ao vivo, classificando-se, portanto, como um *Brewpub*. É gerenciada por uma única pessoa que elabora as receitas, fabrica a cerveja e administra o *Brewpub*, contando com a ajuda de dois funcionários para fazer a fabricação e distribuição da cerveja nos pontos de venda, e outros dois que auxiliam no bar fazendo o atendimento aos clientes. A comida vendida no local é terceirizada através de um acordo com uma empresa parceira que monta seu estande no pátio da cervejaria e comercializa os itens do seu cardápio. O bar atende ao público nas quintas-feiras das 15:00 às 19:00, nas sextas-feiras das 15:00 às 22:00 e aos sábados das 16:00 às 22:00.

O prédio onde o *Brewpub* está localizado é em uma área residencial e compartilha o terreno com uma casa. Apesar de estarem localizados no mesmo terreno, há uma divisão entre a casa e o *Brewpub*, não permitindo acesso dos clientes à casa. Da mesma maneira o registro de entrada de energia elétrica também é separado, não havendo qualquer ligação entre os dois. A água provém de um poço local, não havendo qualquer registro ou ponto de acesso a água da distribuidora local.

A empresa vem expandindo sua capacidade de produção e diversas mudanças foram feitas devido à pandemia da COVID-19. A ideia de abrir o bar junto à cervejaria surgiu da necessidade de escoar a produção que ficou armazenada durante os meses em que os bares permaneceram fechados.

No final de 2021, a cervejaria fez um grande investimento na instalação de um sistema fotovoltaico, suprimindo toda a necessidade energética da produção. As painéis de mostura e fervura são totalmente elétricas bem como todo o restante dos equipamentos da fábrica, havendo, dessa maneira, um alto consumo de energia elétrica. Esse investimento foi feito através de financiamento e será quitado em até 6 anos.

Em fevereiro de 2022, a cervejaria expandiu a sua capacidade de produção com a compra de um novo fermentador. Essa expansão deve continuar com a substituição de fermentadores de menor volume por outros com volume maior.

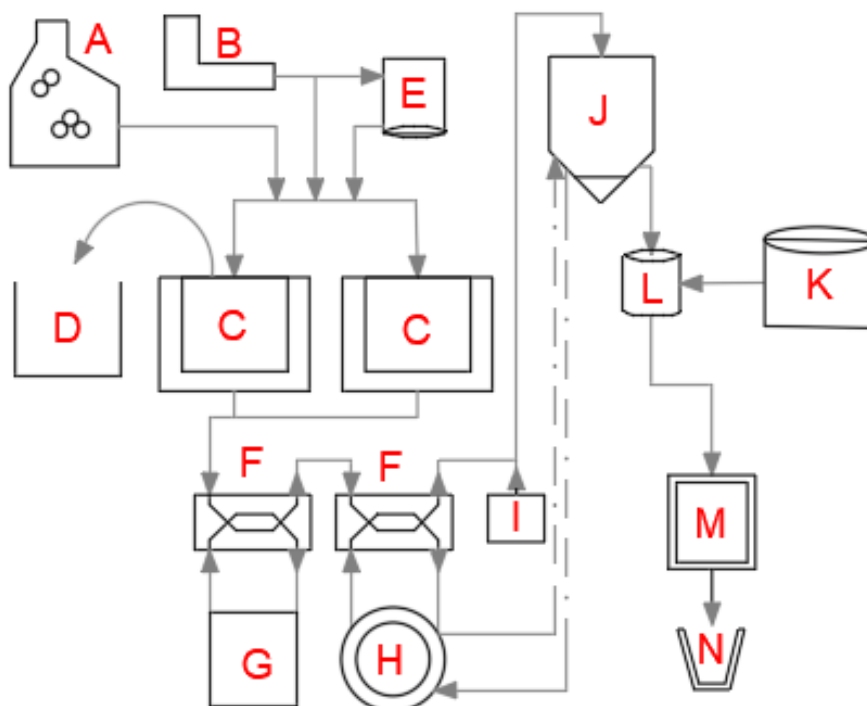
A cervejaria produz em média 1800 litros de cerveja ao mês e maior parte da produção é armazenada em barris, enquanto uma pequena quantidade é envasada em garrafas PET e *longnecks* para serem vendidas no próprio bar.

4.2 COLETA DE DADOS

4.2.1 Descrição do processo

Para auxiliar na compreensão, a planta baixa da cervejaria pode ser encontrada no APÊNDICE C – PLANTA BAIxada SIMPLIFICADA DA CERVEJARIA e um esquema do processo produtivo pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema do processo produtivo da cervejaria analisada. A – Moedor de grãos; B – Filtros de água; C – Panela Single Vassel 750 L; D – Cesto de grãos; E – Panela de aquecimento da água de lavagem; F – Trocador de calor casco tubular; G – Tanques de água 1000L; H – Unidade de frio; I – Aerador; J – Fermentador; K – Limpador de barris; L – Barris; M – Câmara fria; N – Consumidor.



Fonte: Autor.

A coleta de dados ocorreu no dia 15 de fevereiro de 2022 e o processo iniciou por volta das 6:35h quando uma das painéis de mostura foi ligada para iniciar o aquecimento da água. No dia anterior cada uma das duas painéis foi enchida com 650 litros de água filtrada em um conjunto de filtros de papel grosso, carvão ativado e papel fino. Adjuntos como 120 kg de *pitaya* foram descascados, cortados e armazenados em sacos plásticos e 0,5 kg de manjeriço foi separado e limpo. A cerveja produzida foi uma *Cream Ale* com *pitaya* e manjeriço, tradicional na cervejaria.

Enquanto a água aquecia, um dos funcionários separou 116kg de cevada para serem moídos e o gerente iniciou a separação de sulfato de cálcio, ácido fosfórico e cloreto de cálcio para fazer a correção da água. O processo de moagem foi feito em um moedor de 3 rolos e o malte moído foi armazenado em bombonas de 200 litros. Quando a água corrigida atingiu 45°C, o malte foi colocado na panela de mostura para iniciar a primeira rampa de temperatura.

As painéis de mostura eram do tipo *single vessel* (mostura e fervura são feitas na mesma panela), com uma capacidade máxima de 750 litros, 1,2 m de diâmetro, 0,6 m de profundidade, 70 mm de espessura com isolamento em lã de rocha e aquecimento elétrico. Existia somente um cesto de grãos para as duas painéis, sendo que o processo era feito em sequência, ou seja, quando a primeira panela encerrava a mostura e iniciava o aquecimento para fazer a fervura, o cesto era retirado, limpo e colocado na segunda panela. Para realizar a movimentação do cesto era utilizado um guincho elétrico montado em uma estrutura de aço. Enquanto a panela estava aquecendo o mosto, este era recirculado por uma motobomba, e a cada 20 minutos, aproximadamente, a bomba era desligada e a tampa do cesto removida para que os grãos fossem mexidos com uma colher cervejeira.

Alguns minutos antes de finalizar a mostura, 110 litros de água foram aquecidos em uma panela elétrica secundária até 77°C para fazer a lavagem dos grãos e a segunda panela de mostura foi ativada para iniciar o aquecimento da água. A última rampa de temperatura da mostura se encerrou aproximadamente às 10:08 quando o cesto foi elevado para escorrer o mosto dos grãos, ao mesmo tempo que a água de lavagem de grãos era adicionada.

Ao fim da lavagem dos grãos, o cesto foi removido de cima da panela e com a ajuda de pás, os grãos foram retirados do cesto, colocados nos sacos de malte e separados para serem destinados para alimentação animal.

Durante a fervura foram adicionados os lúpulos e 15 minutos antes do fim da fervura, a *pitaya* foi colocada em um saco filtrante e submergida no mosto. Ao fim da fervura, as *pitayas* foram removidas e separadas junto com o bagaço de malte para alimentação animal. A bomba foi ligada na velocidade máxima para fazer o *whirlpool* enquanto o fermentador e os equipamentos utilizados para fazer o resfriamento do mosto eram preparados.

Figura 10 - Panela de mostura. *single vassel*.



Fonte: Autor

O resfriamento foi feito em duas etapas, um pré-resfriamento com água a temperatura ambiente e o resfriamento com álcool etílico a -7°C para atingir a

temperatura média de 28°C. O restante do resfriamento, para em torno e 20°C foi feito diretamente no tanque de fermentação. O pré-resfriamento ocorreu em um sistema fechado que bombeava água armazenada em um reservatório de 1000 litros no lado externo da cervejaria para um trocador casco tubular. Na segunda etapa, o álcool etílico que resfria os fermentadores foi temporariamente desviado para um segundo resfriador casco tubular conectado em série com o primeiro realizando o resfriamento até a temperatura de 28°C. Na saída do segundo resfriador existia um equipamento que dissolvia oxigênio no mosto realizando o processo de aeração. Na sequência, o mosto foi transferido para o fermentador através de uma mangueira para finalizar o resfriamento e iniciar a fase de fermentação.

Figura 11 - Resfriadores casco-tubulares usados no resfriamento do mosto. O resfriador inferior é o de entrada com circulação de água, e o superior com circulação de etanol a -7°C.



Fonte: Autor

O *trub* foi descartado diretamente na rede de esgoto ao fim da fervura, ao mesmo tempo que se iniciou a limpeza da panela com um enxague para retirada das matérias mais pesadas e outra etapa com um lava-jato, esponja e detergente.

O processo ocorrido na segunda panela seguiu o mesmo padrão já descrito anteriormente. Ao finalizar a fervura o mosto foi transferido para o fermentador que atingiu o volume máximo de 1300 litros. O restante dos equipamentos como o cesto

de grãos, tubulações, bombas e utensílios, foram lavados manualmente com esponja e detergente, assim como o chão. A cada 6 meses as panelas passam por um processo de sanitização com soda, peróxido de hidrogênio e ácido peracético.

Ao atingir a temperatura de 20°C, adicionou-se ao mosto 1 kg de levedura e o processo foi finalizado. A fermentação durou 7 dias, nos quais o fermentador manteve a temperatura na média de 20°C. Na sequência a cerveja passou por um processo de maturação que durou 20 dias a uma temperatura de 0°. Os resíduos foram descartados diretamente na rede de esgoto e a cerveja foi carbonatada diretamente no fermentador. O envase ocorreu em barris de inox e *polikegs* de PET com 20, 30 e 50 L, que foram armazenados na câmara fria. Para fazer a limpeza dos barris foi utilizada uma máquina automática onde o barril é acoplado e recebe jatos de uma solução de soda cáustica. Ao fim de todo o processo, o fermentador passa por uma limpeza CIP com *sprayball* utilizando soda e peróxido de hidrogênio.

Durante a coleta de dados, foram observados como os processos eram feitos, as especificações técnicas dos equipamentos, entradas de insumos, saídas de subprodutos e o consumo energético. Essas informações podem ser verificadas no Quadro 9 e acompanhadas no esquema do processo da

Figura 9.

O consumo de água foi calculado através da soma das entradas de água no processo produtivo, totalizando 3200 litros. É importante ressaltar que se acompanhou o consumo de água somente de parte do processo produtivo, não havendo registros em diversos outros equipamentos e processos, como o banco de frio, armazenamento, filtração, limpeza, uso de banheiros, louças, entre outros.

Calculou-se o consumo de energia elétrica para este lote de cerveja onde não estão inclusos os consumos com iluminação, setor administrativo, bar e refrigeração de ambientes. Um resumo pode ser acompanhado no Quadro 8.

Quadro 8 - Entradas e saídas do processo produtivo acompanhado no estudo de caso.

	Item	Qtd.	Qtd. por litros de cerveja produzida
Entradas	Água	3200 L	2,807 L
	Energia elétrica	802,55 – 961,35 kWh	0,70 – 0,84 kWh
	Malte	232 kg	0,204 kg
	<i>Pitaya</i> (adjunto)	120 kg	0,105 kg
	Lúpulo	150 g	0,132 g
	Levedura	1 kg	0,001 kg
	Barris de 30 L	42	-
	CO ₂	5,85 kg	0,005 kg
	Detergente	300 mL	0,263 mL
	Soda Cáustica	2 kg	0,002 kg
	Peróxido de Hidrogênio	-	-
	Peracético	-	-
Saídas	Água de descarte	1800 L	1,579 L
	Bagaço de malte	287,38 kg	0,252 kg
	<i>Pitaya</i> (adjunto)	144 kg	0,126 kg
	<i>Trub</i>	60 L	0,053 L
	Resíduo de fermentação	60 L	0,053 L
	CO ₂	42,18 kg	0,037 kg
	Cerveja produzida	1140 L	-

Fonte: Autor.

Quadro 9 - Resumo das observações realizadas no processo de produção na cervejaria. A coluna de Equipamento está relacionada com a Figura 9.

(continua)

Equipamento	Processo	Descrição do equipamento	Observações e descrições do processo	Entradas	Saídas	Consumo (kJ) kWh
A	Moagem	3 rolos, motor 1,5 cv.	Funcionário colocou o malte no moedor e uma bombona de 200 litros na saída para coletar os grãos moídos. Não houve desperdício significativo com farinha em suspensão. Tempo para moer 232 kg de malte: 22 min;	232 kg de malte	232 kg de malte moído	(1324,92 - 1587,00) 0,36 – 0,44
B, C	Tratamento da água	Filtro de papel grosso, carvão ativado e filtro de papel fino. Bomba poço artesiano 1 cv com vazão de 45 L/min.	Água saiu do poço artesiano, passou pelos filtros e foi colocada diretamente na panela de mostura. Ao iniciar o aquecimento da água, foi feita a correção da água adicionando-se sulfato de cálcio, ácido fosfórico e cloreto de cálcio.	1380 litros de água	1380 litros de água filtrada e corrigida	(1228,52 - 1471,53) 0,34 - 0,41
C,D	Mostura	2 panelas <i>single vassel</i> , 750 L, aquecimento elétrico com serpentinas 30 kW, sem tampa, INOX, isolamento em lã de rocha somente nas panelas, 2 bombas sanitárias 1 cv, controlador de temperatura e tempo automáticos, controle de velocidade das bombas, cesto em INOX com tampa removível e vedações.	A cada 20 minutos bomba e aquecimento eram desligados para retirar tampa do cesto de grãos e mexer os grãos com a ajuda de uma colher cervejeira. A bomba de recirculação permanecia ligada na velocidade mais baixa sempre que a resistência era ativada. Resistência ligada na maior potência. Rampas de aquecimento Figura 7.	1380 litros de água filtrada e corrigida	278,38 kg de bagaço de malte	(309156,12 – 370307,88) 85,87 – 102,86
				232 kg de malte moído	1224 litros de mosto	

Quadro 11 - Resumo das observações realizadas durante o processo de produção na cervejaria. A coluna de Equipamentos está relacionada com a Figura 9.

(continuação)

B, C, E	Lavagem de grãos	Panela de aquecimento elétrico, 110 L, 6,5 kW, INOX, sem isolamento.	Água de lavagem é aquecida a 77°C. Cesto é içado com talha e mosto escorre dos grãos. Funcionário molha os grãos usando a água de lavagem com cesto içado.	220 litros de água filtrada	220 litros de água filtrada e aquecida	(45232,38 - 54179,45) 12,56 - 15,05
C	Fervura	2 panelas <i>single vassel</i> , 750 l, aquecimento elétrico com serpentinas 30 kW, sem tampa, INOX, isolamento em lã de rocha somente nas panelas, 2 bombas sanitárias 1 cv, controlador de temperatura e tempo automáticos, controle de velocidade das bombas.	Processo realizado com a panela aberta. Faltando 15 min para o fim da fervura, 60 kg de <i>pitaya</i> e 250 gramas de manjerição foram submersos no mosto com um saco filtrante.	120 kg de <i>pitaya</i>	144 kg de <i>pitaya</i>	(532688,05 – 638054,9) 147,96 – 177,23
				150 gramas de lúpulo	100 litros de <i>trub</i>	
				1444 litros de mosto	1300 litros de mosto fervido	
F, G, H, I	Resfriamento do mosto	2 resfriadores casco tubulares em série, bomba do tanque de água 3/4 cv, banco de frio 1,5 cv 1500 l.	O fluido refrigerante do banco de frio é desviado dos fermentadores para 1 dos resfriadores. Primeira etapa resfriamento água a temp. ambiente. Segunda etapa resfriamento com fluido refrigerante (álcool alimentício) a -7°C. 56 minutos	Mosto 99°C	Mosto 28°C aerado.	(77444,64 - 92763,36) 21,51 - 25,77
J	Fermentação	2 tanques de 600 l, 2 tanques de 1200 l, 1 tanque de 1600 l.	7 dias a 20°C, 20 dias a 0°C, temperatura ambiente 27°C.	1300 litros de mosto aerado	1140 litros de cerveja carbonatada	(433414,8 - 519145,2) 120,40 - 144,21
				1 kg de levedura	60 litros de resíduos de fermentação	
				5,85 kg de CO ₂	42,18 kg de CO ₂	

Quadro 11 - Resumo das observações realizadas durante o processo de produção na cervejaria. A coluna de Equipamentos está relacionada com a Figura 9.

(continuação)

K, L	Embalagem	Mangueira atóxica	Envase é feito diretamente do fermentador para os barris. Envasa em barris de INOX e Polikeg nos volumes de 20, 30 e 50 litros. 70% da produção embalada em INOX e 30% em polikeg.	1140 litros de cerveja carbonatada	42 barris de 30 litros envasados.	-
				42 barris de 30 litros		
C	Limpeza	Panela de mostura	Sequência de limpeza: enxague com água para retirar partículas maiores, limpeza com esponja e detergente, lava a jato e enxague final. A cada 6 meses faz limpeza profunda com recirculação de 1 kg de soda dissolvido em 50 litros de água e enxague com 50 L de água.	280 litros de Água	280 litros de água de descarte	(229,32 - 274,68) 0,06 - 0,08
				100 ml Detergente		
D	Limpeza	Cesto de grãos	Sequência de limpeza: remoção dos grãos com pás, enxague com água para retirar partículas maiores, limpeza com esponja e detergente, lava a jato e enxague final.	100 litros de Água	100 litros de água de descarte	(65,52 - 78,48) 0,02 - 0,03
				100 ml Detergente		
Setas	Limpeza	Tubulações/bombas	Sequência de limpeza parte externa: enxague com água, limpeza com esponja e detergente, lava a jato e enxague final. Parte interna: recirculação de água	120 litros de água	120 litros de água de descarte	(98,28 - 117,72) 0,03 - 0,04
				100 ml Detergente		

Quadro 11 - Resumo das observações realizadas durante o processo de produção na cervejaria. A coluna de Equipamentos está relacionada com a Figura 9.

(conclusão)

K, L		Limpador de barris 50 L, bomba 0,5 cv, potência de aquecimento 7kW	Solução de 50 litros de água e 1 kg de soda. Limpa barris de INOX e Polikegs. Barris de INOX 60°C e Polikegs 40°C. Tempo de ciclo de 8 min por barril. Limpa aproximadamente 50 barris até trocar solução.	42 barris de 30 litros	42 barris de 30 litros limpos e sanitizados.	(22211,28 - 26604,72) 6,17 - 7,39
				50 litros de água		
				1 kg de soda	50 litros de água de descarte	
J		Fermentadores	Feita com <i>sprayball</i> através da bomba CIP. Sequência de limpeza: Água, descarte, soda, descarte, água, descarte, peróxido de hidrogênio, descarte.	250 litros de água	250 litros de água de descarte	(196,56 - 235,44) 0,05 - 0,06
				1 kg de soda		
				Peróxido de hidrogênio		
-		Chão	Feita com esfregão e rodo.	800 litros de água	800 litros de água de descarte	(687,96 - 824,04) 0,19 - 0,23
M	Armazenamento	Câmara fria para armazenamento dos barris de inox e polikegs. Dois compressores de 1 cv cada, 4 ventiladores internos de 200 W cada. 5 x 4 x 3 m mantendo a temperatura interna em 2°C.	Armazenam barris de aço inox e polikegs. Câmara possui Dois compressores com motores de 1 cv cada, 4 ventiladores internos 200 W. Ligados em média 14 horas por dia.	-	-	(1458522,52 - 1747021,48) 405,14 - 485,28 por mês
-	Exaustão	2 exaustores de 130 W	Funcionamento durante todo o processo de mostura, em torno de 8 horas;	-	-	(6814,08 - 8161,92) 1,89 - 2,27

Fonte: Autor.

4.2.2 Históricos

No Quadro 11 vê-se os dados coletados de água, energia elétrica, grãos, lúpulos, levedura, CO₂ e produção da cervejaria de outubro de 2019 a fevereiro de 2022. Os dados de insumos e da produção provêm dos registros das receitas produzidas até então. A água que abastece a cervejaria provém de um poço e não existe um hidrômetro para contabilizar o volume consumido, desta forma não há nenhum registro de consumo de água para se fazer a análise histórica. Também não há consumo de nenhum tipo de combustível pois a matriz de produção é totalmente elétrica. Dados de energia elétrica foram obtidos através do histórico de contas e o consumo de CO₂ foi estimado através das informações passadas pelo gestor, o qual afirmou que há um consumo médio de 4 a 5 kg de CO₂ para cada 1000 litros de cerveja produzida.

Para realizar a comparação entre os dados da cervejaria e os encontrados na literatura, utilizou-se como base a soma anual de produção de 2021 por ser o ano em que há dados completos e que há menos distorção na produção por conta da pandemia de COVID-19. Como pode ser visto Quadro 11, no ano de 2021 a soma anual de produção foi de 32.530 litros de cerveja. Os dados disponíveis na literatura podem ser vistos no Quadro 4, pág. 44, o qual exibe dados de cervejarias com produções entre 10.000 e 100.000 e 0 e 100.000 litros por ano.

Por possuir toda a planta de produção elétrica, os dados de energia térmica e elétrica do *benchmark* foram somados para realizar a comparação. Um resumo com os dados *benchmark* do Quadro 4 pode ser visto no Quadro 10.

Quadro 10 - Resumo dos dados de *benchmark* para comparação.

Níveis de produção		Consumo específico							Referências
Produção (L/ano)		Energia Térmica e Elétrica (kJ/L / kWh/L)		Água (L/L)		Malte (kg/L)		CO ₂ (kg/L)	
10.000	100.000	5328 / 1,48		8,61		0,306		0,022	Brewers Association (2015)
0	100.000	3132 / 0,87	3384 / 0,94	7,8	10	0,28	0,316	-	Beloborodko et al. (2014); Sturm et al. (2012)

Fonte: Adaptado de diversas fontes.

Através da comparação entre os dados teóricos e os coletados na cervejaria, percebe-se que a média total do consumo de energia elétrica da cervejaria (1,25 kWh/l) é 15% menor que o *benchmark* registrado nos EUA (1,48 kWh/l) e 33% maior que o registrado em cervejarias da Europa (0,94 kWh/l). Já o consumo de malte da cervejaria (0,21 kg/l) se manteve abaixo dos padrões registrados na Europa (0,316 kg/l).

Segundo os dados da literatura, o consumo de lúpulo é em média 1 g/l, enquanto na cervejaria se consumiu em média 2,92 g/l. Porém, esse dado pode variar muito devido ao tipo de cerveja que é produzido. Na cervejaria analisada, em cervejas do tipo IPA se utiliza até 16 vezes mais lúpulo que em cervejas do tipo Pilsen.

A literatura também traz que em média se utiliza de 0,01 a 0,1 litros de levedura para cada litro de cerveja produzida, ou seja, se utiliza de 1 a 10% de levedura sobre o volume de cerveja produzido. A média total de levedura utilizada na cervejaria analisada é de 1,55 g/litro de cerveja produzido, ou seja, levando-se em conta que a média de densidade da cerveja seja de 1.010 g/l, temos que a proporção de levedura utilizada é de 0,015% do volume de cerveja produzido. Isso resulta em uma utilização 10 vezes menor de levedura que a literatura.

Como toda a produção da cervejaria analisada é envasada em barris, e somente uma parte muito pequena é posteriormente envasada em garrafas PET e *longnecks*, estima-se que a cervejaria utilize de 2 a 3 vezes menos gás carbônico que uma cervejaria que faz todo o envase em garrafas. Isso porque para realizar o envase em garrafas, se utiliza o processo de contrapressão que gasta de 2 a 3 volumes de CO₂ para cada volume envasado.

Quadro 11 - Histórico de consumo de matérias-primas e produção da cervejaria.

(continua)

Consumo												
Data	Água (m³)	Energia elétrica (kWh)	Energia elétrica por litro produzido (kWh/l)	Grãos (kg)	Gãos por litro produzido (kg/l)	Lúpulos (g)	Lúpulo por litro produzido (g/l)	Levedura (g)	Levedura por litro produzido (g/l)	CO ₂ (kg)	CO ₂ por litro (kg/l)	Produção (litros)
out/19	-	-	-	149,00	0,28	400,00	0,75	500,00	0,94	2,3850	0,0045	530,00
nov/19	-	3140,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,0000	0,0045	0,00
dez/19	-	3040,00	2,73	228,00	0,20	3350,00	3,00	1500,00	1,35	5,0175	0,0045	1115,00
Soma anual	0,00	6180,00	2,73	377,00	0,49	3750,00	3,76	2000,00	2,29	7,4025	0,0135	1645,00
Média mensal	-	3090,00	2,73	125,67	0,24	1250,00	1,88	666,67	1,14	2,4675	0,0045	548,33
jan/20	-	2937,00	2,80	273,00	0,26	1450,00	1,38	1700,00	1,62	4,7250	0,0045	1050,00
fev/20	-	2962,00	5,59	125,00	0,24	750,00	1,42	600,00	1,13	2,3850	0,0045	530,00
mar/20	-	2861,00	5,40	150,00	0,28	5000,00	9,43	1000,00	1,89	2,3850	0,0045	530,00
abr/20	-	2038,00	3,61	108,00	0,19	150,00	0,27	1000,00	1,77	2,5425	0,0045	565,00
mai/20	-	1457,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,0000	0,0045	0,00
jun/20	-	925,00	0,37	574,00	0,23	10660,00	4,26	4000,00	1,60	11,2635	0,0045	2503,00
jul/20	-	1703,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,0000	0,0045	0,00
ago/20	-	918,00	1,84	136,00	0,27	850,00	1,70	1000,00	2,00	2,2500	0,0045	500,00
set/20	-	1576,00	-	0,00	-	0,00	-	0	-	0,0000	0,0045	0,00
out/20	-	1446,00	-	0,00	-	0,00	-	0	-	0,0000	0,0045	0,00
nov/20	-	2003,00	0,73	606,00	0,22	10650,00	3,86	5000,00	1,81	12,4200	0,0045	2760,00
dez/20	-	2165,00	0,47	912,00	0,20	10825,00	2,37	7700,00	1,68	20,5785	0,0045	4573,00
Soma anual	0,00	22991,00	20,80	2884,00	1,89	40335,00	24,68	22000,00	13,50	58,5495	0,0540	13011,00
Média mensal	-	1915,92	2,60	240,33	0,24	3361,25	3,09	1833,33	1,69	4,8791	0,0045	1084,25

Quadro 16 - Histórico de consumo de matérias-primas e produção da cervejaria.

(conclui)

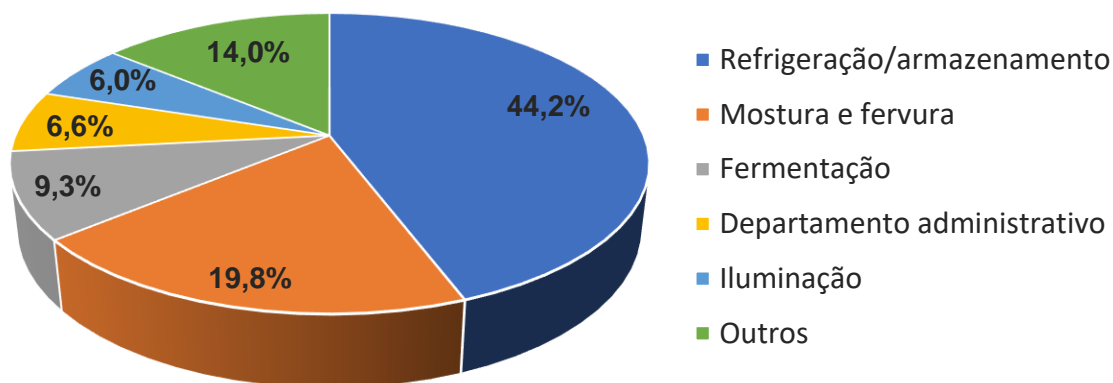
jan/21	-	3107,00	1,42	555,00	0,25	16050,00	7,31	3000,00	1,37	9,8775	0,0045	2195,00
fev/21	-	2526,00	2,24	198,00	0,18	400,00	0,35	2000,00	1,77	5,0850	0,0045	1130,00
mar/21	-	2450,00	2,24	258,00	0,24	3750,00	3,42	1500,00	1,37	4,9275	0,0045	1095,00
abr/21	-	2183,00	1,32	339,00	0,21	1150,00	0,70	3000,00	1,82	7,4250	0,0045	1650,00
mai/21	-	2142,00	1,26	315,00	0,19	3650,00	2,15	2500,00	1,47	7,6275	0,0045	1695,00
jun/21	-	1959,00	0,71	618,00	0,22	12730,00	4,59	4500,00	1,62	12,4875	0,0045	2775,00
jul/21	-	2340,00	0,69	731,00	0,22	17100,00	5,07	4000,00	1,19	15,1875	0,0045	3375,00
ago/21	-	2517,00	0,90	569,00	0,20	2300,00	0,82	5000,00	1,79	12,5550	0,0045	2790,00
set/21	-	2067,00	0,46	932,00	0,21	18100,00	4,03	6000,00	1,34	20,2050	0,0045	4490,00
out/21	-	2884,00	1,24	494,00	0,21	1880,00	0,81	4000,00	1,72	10,4625	0,0045	2325,00
nov/21	-	2361,00	0,52	870,00	0,19	9850,00	2,19	6550,00	1,45	20,2725	0,0045	4505,00
dez/21	-	2383,00	0,53	870,00	0,19	9850,00	2,19	7000,00	1,55	20,2725	0,0045	4505,00
Soma anual	0,00	28919,00	13,53	6749,00	2,50	96810,00	33,63	49050,00	18,46	146,3850	0,0540	32530,00
Média mensal	-	2409,92	1,13	562,42	0,21	8067,50	2,80	4087,50	1,54	12,1988	0,0045	2710,83
jan/22	-	2302,00	0,76	606,00	0,20	7320,00	2,42	5000,00	1,65	13,6125	0,0045	3025,00
fev/22	-	2099,00	1,24	328,00	0,19	3550,00	2,09	2500,00	1,47	7,6275	0,0045	1695,00
Soma anual	0,00	4401,00	2,00	934,00	0,39	10870,00	4,51	7500,00	3,13	21,2400	0,0090	4720,00
Média mensal	-	2200,50	1,00	467,00	0,20	5435,00	2,26	3750,00	1,56	10,6200	0,0045	2360,00
Soma total	0,00	62491,00	39,05	10944,00	5,27	151765,00	66,59	80550,00	37,38	233,58	0,13	51906,00
Média total	-	2231,82	1,25	377,38	0,21	5233,28	2,92	2777,59	1,55	8,0544	0,0045	1789,86

Fonte: Autor

4.3 CONSUMO DE ENERGIA

Através dos históricos de consumo de energia e os calculados no estudo de caso, fez-se uma análise do consumo por setores e processos como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Principais formas de consumo de energia elétrica da cervejaria analisada.



Fonte: Autor.

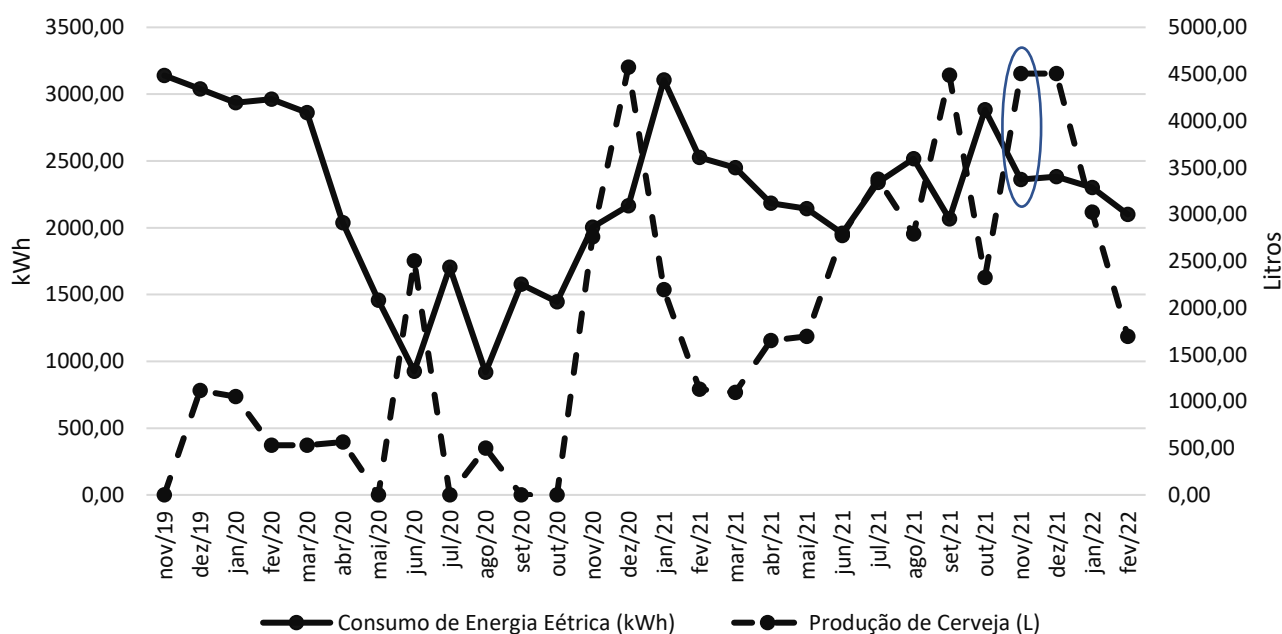
O estudo de caso foi realizado durante o verão, portanto, as temperaturas estavam mais elevadas que a média anual. Desta forma, percebeu-se um grande consumo de energia elétrica nos sistemas de refrigeração e armazenamento como a câmara fria e as geladeiras. A câmara fria é o elemento que possui o maior consumo, principalmente nos meses de verão onde a diferença de temperatura entre o ambiente e o interior da câmara pode chegar a mais de 35°C. Grande parte da energia consumida é para suprir a perda de calor pelas paredes do elemento e para alimentar os ventiladores no interior da câmara, consumindo em média 15 kWh por dia.

Os fermentadores também são elementos que consomem uma parte significativa de energia, em torno de 9,4 kWh por dia, representando cerca de 9,3% do consumo total. Nos processos de mostura e fervura se tem o segundo maior consumo de energia elétrica na cervejaria, em média 140 kWh por panela em cada brassagem. O consumo com iluminação é representativo devido ao bar que existe associado à cervejaria. Como pode ser visto no Apêndice C, existe uma grande

quantidade de lâmpadas decorativas que ficam acesas durante todo o período de funcionamento do bar, representando em média 6% do consumo de energia da cervejaria. Climatização de ambientes, equipamento de som, computadores e outros equipamentos estão representados em outros.

Na Figura 13 tem-se um gráfico do histórico de consumo de energia e de produção durante todos os meses de operação da cervejaria. Observa-se uma grande distorção na produção de cerveja entre os meses de março e novembro de 2020, período mais restrito da pandemia de COVID-19, com alguns meses sem produção. Esse evento afetou de maneira significativa a eficiência produtiva da cervejaria, pois durante todo esse período não houve escoamento da produção que precisou ficar estocada na câmara fria, aumentando o consumo específico de energia elétrica.

Figura 13 - Histórico de consumo energético e produção. Em azul está circulado o mês em que o sistema fotovoltaico foi instalado.



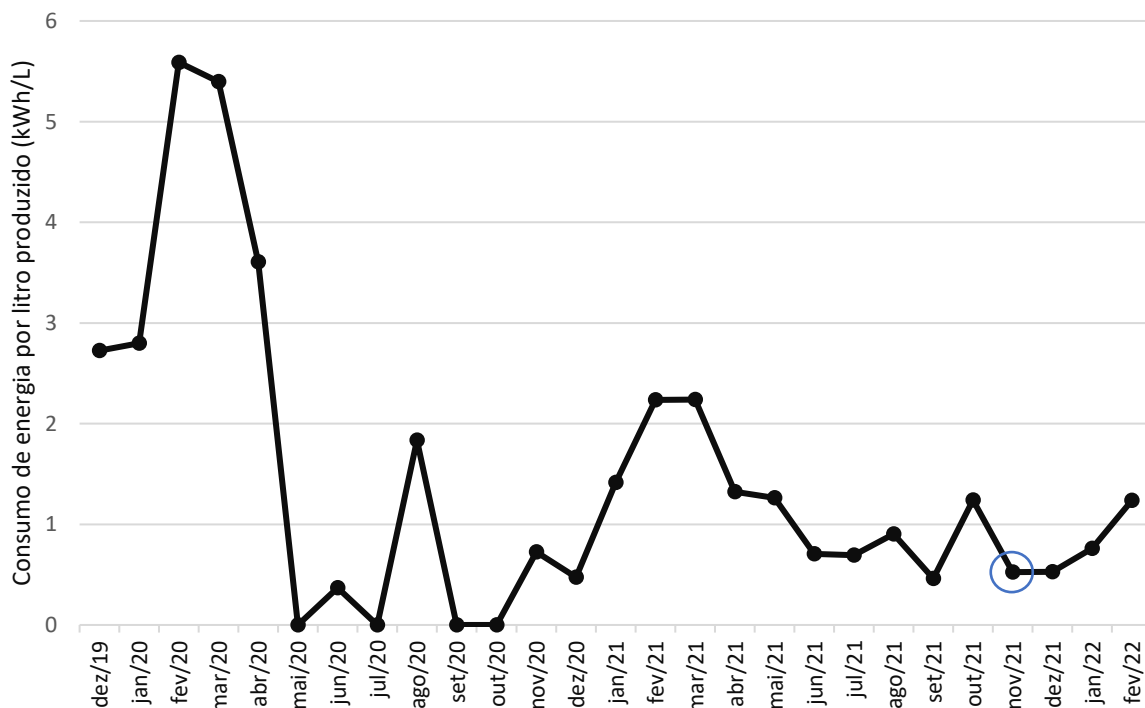
Fonte: Autor.

No mês de novembro de 2021, a cervejaria instalou um sistema fotovoltaico e percebe-se no gráfico da Figura 13 uma estabilização e até mesmo um declínio no consumo de energia nos meses subsequentes mesmo que a produção tenha aumentado. Isso acontece porque quando o sistema fotovoltaico está em operação,

fornece de forma imediata a energia para o funcionamento dos equipamentos da fábrica, não demandando energia da rede. Dessa forma, a energia produzida pelo sistema solar que é imediatamente consumida, não é registrada, havendo uma distorção nos dados para esses meses. Portanto, qualquer análise futura deve-se levar em conta essa distorção nos dados coletados das contas de energia elétrica da concessionária.

Durante os primeiros meses de operação da cervejaria percebe-se um grande consumo de energia elétrica e uma baixa produção de cerveja, resultando em um alto consumo específico de energia elétrica, como pode ser visto na Figura 14. No entanto, a partir do ano de 2021 esse valor reduziu mais de duas vezes o valor máximo registrado anteriormente, e a partir de abril de 2021 manteve-se em uma faixa linear entre 0,5 e 1,5 kWh/L, indicando uma melhoria expressiva na eficiência da produção, obtida através do amadurecimento dos processos, substituição dos equipamentos por outros mais eficientes e mais automatizados.

Figura 14 - Histórico do consumo específico de energia elétrica.



Fonte: Autor.

4.4 PRINCIPAIS PERDAS DE ENERGIA E ALTERNATIVAS DE MELHORIAS

4.4.1 Resfriamento do mosto e recuperação de calor

Nesta etapa ocorre troca de calor entre o mosto quente e a água de resfriamento, que no caso da cervejaria analisada, fica armazenada em um tanque de 1000 litros do lado externo da cervejaria. Ao realizar a troca térmica com o mosto, a água retorna aquecida para o tanque onde perde calor para o ambiente até que haja o equilíbrio térmico, havendo um grande desperdício de energia.

Desta forma, calculou-se a quantidade de energia que pode ser recuperada durante esse processo. Com uma vazão de 0,38 L/s de água a 27°C, trocando calor com o mosto a 99°C e vazão de 0,377 L/s, tem-se como resultado 690 litros de água aquecida a 79°C e 650 litros de mosto a 41°C. O tempo para realizar esse processo é de 30 minutos, o mesmo registrado durante as observações no estudo de caso.

Acumulando essa água em um tanque térmico ideal sem perda de calor e reutilizando-a em uma brassagem subsequente, tem-se uma economia de até 150122 kJ (41,70 kWh). Essa economia é quase metade do consumo de energia durante todo o processo de mostura.

4.4.2 Painela aberta

A brassagem do mosto com a painela aberta desde o início do processo, faz com que se tenha maior perda por evaporação da água e por calor cedido ao ambiente do que se o mesmo processo acontecesse em um recipiente fechado. Estima-se que 9558,67 kJ (2,65 kWh) são perdidos para o ambiente em cada painela de mostura por realizar o cozimento do mosto até o início da fervura em recipiente aberto, representado aproximadamente 2,5% do total de energia utilizada durante essa etapa do processo.

Durante o processo de fervura existe uma grande perda de energia por evaporação da água, já que todo o vapor do mosto evaporado é perdido para o ambiente. Cervejarias de pequeno porte geralmente não fazem reaproveitamento dessa energia, pois muitas não possuem a tecnologia e os equipamentos necessários

para realizar esse procedimento de maneira segura, visto que o retorno de vapor para o mosto pode reter algumas substâncias voláteis como o dimetilsulfureto (DMS), que são prejudiciais para a qualidade da cerveja. No entanto, se essa fosse uma prática usual e de simples aplicabilidade, poderia ser utilizada para reaproveitar o calor do vapor e a água quente de condensação, trazendo uma grande economia de energia uma vez que, em média, 50 kWh são utilizados nesse processo por brassagem, o dobro usado em toda a mostura.

Uma das alternativas para melhorar esse processo seria a implementação de uma tampa com pá giratória automatizada ou a substituição das painéis de mostura atuais por outras que já possuam essas características, o que reduziria a taxa de evaporação do mosto e conseqüentemente o consumo de eletricidade. A implementação dessa alternativa se torna mais viável economicamente quando estes equipamentos estiverem depreciados ou sua capacidade produtiva não suprir mais a demanda.

4.4.3 Câmara fria

A câmara fria é o elemento que mais consumiu energia no estudo de caso realizado. Algumas boas práticas podem ser implementadas para melhorar o desempenho da câmara fria, como limpar os evaporadores para facilitar a troca térmica para reduzir o consumo de energia, fazer a instalação em local ventilado e protegido do sol, regular corretamente bombas de circulação do fluido refrigerante e melhorar controles para otimizar o uso de energia.

4.4.4 Cerveja de alta gravidade

Segundo a gerência da cervejaria, essa prática já foi adotada para produzir cervejas do tipo Pilsen e trouxe bons resultados, reduzindo o tempo de brassagem e o consumo de energia, sem, no entanto, saber informar a quantidade de energia que foi economizada. Porém, ao se questionar como a prática era feita, o gerente comentou que ao fim da fervura adicionava-se água até que a cerveja atingisse a densidade desejada, se caracterizando, portanto, não como uma produção de cerveja de alta gravidade, mas sim como um ajuste da densidade. A produção de cerveja de

alta gravidade se caracteriza por produzir o mosto e fermentá-lo a uma densidade mais alta, reduzindo ao máximo o consumo de energia por aquecer e resfriar uma quantidade menor de líquido. Ao fim da fermentação se adiciona água para deixar a cerveja nos padrões desejados.

Estima-se que seja possível reduzir entre 68,4 e 108,3 kWh por brassagem, representando aproximadamente 10% da quantidade de energia elétrica utilizada em cada brassagem.

4.5 REUSO DE RESÍDUOS

4.5.1 Reutilização de leveduras

Atualmente a cervejaria reutiliza uma vez as leveduras usadas na fabricação de cervejas Pilsen, pois é o estilo que possui maior volume de consumo e é produzida com mais frequência. Porém, não se faz reuso de leveduras em outras cervejas produzidas com menor frequência, pois segundo o gerente, se a levedura reutilizada não for inoculada no mesmo tipo de mosto, pode haver alterações nas características da cerveja como a coloração e aroma. Muitas vezes um mesmo estilo de cerveja pode demorar meses até ser produzida novamente, por isso se prefere usar leveduras novas e não correr o risco de perder um lote de produção por contaminação ou alterações nas suas características.

No entanto, pode-se reutilizar a mesma levedura por até 5 vezes, trazendo uma grande economia quando se trata de um volume maior de produção. Essa, portanto, é uma alternativa de melhoria no processo que pode ser implementada sem grande esforço ou custos.

4.5.2 Reuso do bagaço de malte e adjuntos

Todo o bagaço de malte e adjuntos utilizados na produção da cervejaria são destinados para alimentação animal, sendo essa a forma mais comum de reuso desse resíduo. Ao fim da mostura, o bagaço é colocado novamente nas sacas e o produtor rural faz o transporte desse resíduo até a sua propriedade.

5 DISCUSSÃO

A cervejaria analisada foi fundada em 2019, sofreu os impactos econômicos da pandemia de COVID-19 e teve êxito de seguir em funcionamento até o ano desse estudo, realizando importantes melhorias e expansões no processo produtivo que contribuíram para os resultados apresentados. O ambiente de produção é organizado, limpo, com boa luminosidade natural, ventilação e infraestrutura. O processo produtivo não requer significativas adaptações e improvisações, os equipamentos são novos, produzidos em INOX e a maioria possui sua operação automatizada, necessitando pouco contato direto e trabalho manual.

A escolha de construir uma planta de produção totalmente elétrica trouxe diversos benefícios como maior facilidade de automatização dos processos, menor risco de acidentes por não trabalhar com combustíveis inflamáveis, menor impacto ambiental e facilidade em usar fontes alternativas de energia como a fotovoltaica.

Todas essas características permitiram obter um controle muito maior sobre o processo e aumentar a eficiência energética da cervejaria. Observou-se que um ambiente de produção organizado e limpo, com equipamentos automatizados e pouco contato direto com o produto, permitem que haja menos risco de contaminação e de erros na produção, reduzindo a perda de produto e o consumo excessivo de insumos. Boa luminosidade e ventilação reduzem o uso de energia elétrica e proporcionam um ambiente de trabalho de melhor qualidade. Todos esses fatores auxiliam a aumentar a qualidade do produto e a eficiência de produção, tornando a cervejaria mais sustentável e competitiva.

Atualmente, a expansão da produção está baseada no aumento da quantidade ou do volume dos fermentadores, no entanto, o espaço disponível para acomodação desses equipamentos é limitado e demandará reformas significativas na planta atual da cervejaria.

A análise da cervejaria ocorreu no mês de fevereiro de 2022, sendo observado um consumo maior de energia que a média anual por conta da temperatura ambiente mais elevada e a maior demanda por cerveja. O consumo mais elevado se deve, principalmente, aos sistemas de refrigeração que se mantêm ligados por mais tempo, tanto para refrigerar a cerveja como também os ambientes. A média histórica do consumo de energia elétrica foi de 1,25 kWh/L, sendo esse valor 18% menor que o

benchmark americano e 30% maior que o europeu. No entanto, o registro histórico leva em conta o consumo total da cervejaria, no qual está incluso o consumo de energia do bar. Desta forma, calculou-se o consumo de energia somente do processo produtivo para tornar a análise mais precisa, resultando em um consumo entre 0,71 e 0,85 kWh/L. Este resultado é similar ao encontrado em cervejarias europeias que possuem a maior eficiência produtiva do *benchmark*.

Insumos como lúpulo, levedura, cereais e CO₂ não sofreram variação significativa em relação ao *benchmark* e a literatura, sendo que o uso desses insumos varia dependendo do tipo de cerveja produzido. Já o consumo de água não pôde ser devidamente avaliado, pois não havia registro ou histórico de consumo. A falta desse controle afeta de maneira direta as decisões que têm como fator determinante o uso de água, como por exemplo, o processo de expansão da cervejaria. Isso dificulta uma avaliação de custo e da demanda de água e perde-se o conhecimento adquirido ao implementar melhorias que foram observadas através dos históricos de consumo.

A cervejaria iniciou suas atividades realizando diversos processos de forma manual, utilizando fermentadores plásticos refrigerados em geladeiras e uma panela de mostura sem isolamento térmico. Nos últimos 3 anos, investiu-se em melhores equipamentos, automatização de processos e infraestrutura, o que trouxe uma expressiva redução do consumo de energia elétrica, como pode ser verificado na Figura 14. Desta forma, para que uma cervejaria se desenvolva e aumente seu volume de produção de maneira competitiva, é fundamental investir em equipamentos que facilitem a automatização de processos e que sejam de fácil manipulação. Uma panela elétrica para aquecimento de água, apesar de mais cara que a de chama direta, oferece maiores vantagens operacionais.

Por meio de conversas com o gestor da cervejaria, verificou-se que uma de suas grandes dificuldades era organizar e tabelar os dados do processo de produção. Comentou-se que havia a intensão de organizar os históricos em uma planilha, porém não houve tempo ou disponibilidade para concluir a tarefa. O Quadro 11 pode ser usado como exemplo para realizar uma análise preliminar, podendo fornecer *insights* importantes que irão guiar para uma análise mais aprofundada. Da mesma maneira que é importante contabilizar e planilhar o consumo de energia e de insumos, é importante controlar e registrar a perda de produto, indicando a quantidade, local e

motivo que levou ao desperdício. Esse controle irá permitir agir diretamente onde ocorrem as falhas, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência de produção. Portanto, o registro histórico de consumo de insumos, energia e perdas de produto irão evidenciar as ineficiências do processo que serão corrigidas com investimentos, principalmente, em equipamentos e automatização de processos.

Adotou-se algumas boas ações de reuso de recursos naturais e melhorias que vão a favor do meio ambiente. Todos os resíduos orgânicos gerados, tais como, o bagaço de malte, lúpulo e as frutas, foram destinados para a alimentação animal. A cerveja Pilsen, cujo volume produzido é maior, é feita através de um processo que se assemelha ao de alta gravidade, reduzindo a quantidade de energia consumida. No entanto, recomenda-se realizar um estudo mais aprofundado de como é feito o processo de produção de cerveja a alta gravidade para que seja aproveitado o máximo potencial dessa prática. Devido a uma escolha pessoal do gestor, que buscava evitar problemas de produção, as leveduras eram reaproveitadas somente uma vez nas cervejas Pilsen. Isso ajuda a reduzir o uso de insumos, porém os ganhos poderiam ser maiores visto que a levedura pode ser reaproveitada até 5 vezes. A cervejaria também conta com um sistema fotovoltaico que produz, de maneira limpa e sustentável, toda a energia consumida nos processos produtivos e no funcionamento do bar, o que reduz custos e o impacto ambiental.

6 CONCLUSÃO

Com esse estudo, objetivou-se analisar o processo produtivo de pequenas cervejarias e coletar informações que auxiliassem gestores a observar ineficiências produtivas e procurar melhorias. Dessa maneira, buscou-se na literatura informações sobre os processos produtivos, matérias-primas, resíduos, melhores práticas e oportunidades para aumentar a eficiência de produção de pequenas cervejarias. Conduziu-se um estudo de caso para levantar dados de consumo de energia elétrica, água e insumos, e realizou-se a verificação dos dados coletados com o *benchmark*. A partir desses resultados, sugeriu-se melhorias e estratégias que podem ser implementadas por pequenas cervejarias para aumentar a eficiência produtiva.

Através dos cálculos energéticos dos equipamentos observou-se que as principais perdas de energia se encontram no não reaproveitamento do calor de

resfriamento do mosto e na perda energética por realizar o cozimento com a panela aberta. A melhor prática que pode ser implementada para reduzir o consumo de energia elétrica é a produção de cerveja por alta gravidade, podendo reduzir entre 68,4 e 108,3 kWh, o que representa em média 10% do consumo de energia elétrica na brassagem.

Para melhorar a eficiência produtiva da cervejaria e implementar algumas das medidas que tornam viável, por exemplo, reutilizar o calor de resfriamento do mosto, é necessário aumentar a produção. Atualmente são feitas em média 3 a 6 brassagens por mês, ou seja, a panela de mostura é usada em média uma vez por semana, tornando inviável, por exemplo, armazenar a água quente que sai do resfriador durante o resfriamento do mosto ou usá-la em sequência para fazer outra brassagem.

Estima-se que com o *setup* atual da cervejaria, seria necessário produzir, pelo menos, 7000 litros de cerveja ao mês para que fosse possível fazer o reaproveitamento da água quente de resfriamento do mosto. No entanto, deve-se considerar que um aumento na produção acarreta diversos impactos na matriz de produção, pois será necessário um espaço maior de armazenamento, maior número de funcionários, maior consumo de matérias primas e maior volume de produto para movimentar. Portanto, esses aspectos devem ser analisados em conjunto para planejar a expansão da produção e traçar a melhor estratégia.

O baixo volume de produção também afeta o reuso de levedura, pois um mesmo tipo de cerveja pode demorar semanas até ser produzida novamente, afetando a qualidade das células de levedura. Da mesma forma, a levedura deve ser usada no mesmo tipo de cerveja para evitar alterações na coloração e sabor.

Algumas das maiores dificuldades de pequenas cervejarias é conhecer quais medidas podem ser tomadas para melhorar a eficiência produtiva. Para isso, é necessário ter disponibilidade de dados e informações para tomar decisões que guiem a cervejaria a melhorar seus processos produtivos. Portanto, apesar de não ser contabilizado o custo da água na cervejaria, é necessário que se tenha um histórico do consumo para que, futuramente, com o aumento da produção e expansão das instalações, seja possível identificar ineficiências, perdas e planejar melhorias.

Apesar das limitações e ineficiências do processo produtivo da cervejaria, o desempenho no uso de energia elétrica e térmica é comparável ao de cervejarias da

Europa e dos EUA, o que a posiciona em um patamar de alto desempenho. Desta forma, visando a melhoria contínua dos processos, as próximas etapas para reduzir consumo são: aumentar a escala de produção para poder implementar medidas de reuso de calor do resfriamento do mosto, instalar um hidrômetro para registrar o consumo de água e organizar em planilhas os dados de produção.

De maneira geral, cervejarias de pequeno porte, para melhorar a eficiência dos processos produtivos, devem: registrar e controlar históricos do consumo de insumos, energia e água; registrar quantidade, motivo e local de desperdícios de cerveja e automatizar processos e equipamentos.

Os fatores limitantes desse estudo foram: falta de hidrômetros e dados históricos do consumo de água, dificultando uma análise aprofundada dos padrões de uso desse recurso natural; falta de instrumentos para registrar o consumo de energia durante o processo. Equipamentos como os *Dataloggers* poderiam ser usados para registrar com detalhes o consumo de energia dos equipamentos, o que tornaria o estudo mais preciso e detalhado; estudo de caso único. Coletar dados de cervejarias com plantas diferentes e escalas diferentes de produção enriqueceria o estudo, pois traria amplitude das alternativas para melhorar os processos produtivos.

Tendo em vista os fatores limitantes desse estudo, recomenda-se para estudos futuros criar uma planilha que auxilie os gestores no registro de históricos e gere gráficos e comparativos que ajudem na tomada de decisão por melhorias no processo. Promover uma análise em cervejarias que utilizem outras formas de aquecimento de água, como plantas de aquecimento à vapor ou chama direta. Da mesma forma, analisar plantas produtivas com escalas diferentes para perceber o efeito da economia de escala e quais os melhores níveis de produção para implementar medidas com a de recuperação de calor do mosto. Salienta-se, ainda, que a aplicação desse estudo em plantas de outros países com o intuito de conhecer detalhadamente o consumo em cada setor da cervejaria e as tecnologias empregadas, agregaria significativamente nas produções científicas e na performance de outras cervejarias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. . [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes>>.

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020. . [s.l: s.n.].

BÄR, R. M.; VOIGT, T. Analysis and Prediction Methods for Energy Efficiency and Media Demand in the Beverage Industry. **Food Engineering Reviews**, v. 11, n. 3, p. 200–217, 2019.

BOAN, M. et al. **Tecnologia cervejeira.** [s.l.] Sistema FIRJAN, 2014.

BOBOESCU, I. Z. et al. Revealing the factors influencing a fermentative biohydrogen production process using industrial wastewater as fermentation substrate. **Biotechnology for Biofuels**, v. 7, n. 1, p. 1–15, 2014.

BREWERS ASSOCIATION. **2015 Sustainability Benchmarking Report.** [s.l: s.n.].

BUTTRICK, P. Waterfor brewing. **Brewer & Distiller International**, n. October, p. 151–172, 2013.

CAUCHICK, P. A. et al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações by Paulo Augusto Cauchick.** 3^a ed. [s.l.] Elsevier Editora Ltda., 2018.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa : uma abordagem prática (4a. ed.).** [s.l.] Grupo A - AMGH, 2012.

CLEMENTZ, A. L. et al. Use of discards of bovine bone, yeast and carrots for producing second generation bio-ethanol. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, p. 101392, 2019.

COTES-PALOMINO, M. T. et al. Production of ceramic material using wastes from brewing industry. **Key Engineering Materials**, v. 663, p. 94–104, 2020.

CURI, R. Produção de cerveja utilizando cevada como adjunto de malte. **Aleph**, 2006.

DUDEK, M. et al. The Effect of Biochar Addition on the Biogas Production Kinetics from the Anaerobic Digestion of Brewers' Spent Grain. **Energies**, v. 12, n. 8, p. 1–22, 2019.

ESSLINGER, H. M. **Handbook of Brewing.** [s.l: s.n.]. v. 3

FERREIRA, A. et al. Biosourced Disposable Trays Made of Brewer's Spent. **Polymers**, v. 11, n. 5, p. 1–14, 2019.

FIGUEIREDO PAZETTO BRASÍLIA, R. **ANÁLISE E SELEÇÃO DE SOLUÇÃO PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL**. [s.l: s.n.].

FLANNERY NAGEL ENVIRONMENTAL LTDA. **Resource Efficiency Guidance for the Irish Microbrewing Sector**. [s.l: s.n.].

GALITSKY, C. et al. Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for breweries. **An ENERGY STAR® Guide for Plant and Energy Managers**, n. September, 2003a.

GALITSKY, C. et al. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Breweries. n. September, 2003b.

GALITSKY, C. et al. Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for breweries. **An ENERGY STAR® Guide for Plant and Energy Managers**, n. September, 2003c.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4^a ed. [s.l: s.n.].

GONÇALVES, C. et al. Utilization of brewery residues to produce granular activated carbon and bio-oil. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 908–916, 2017.

GROSS, M. S. et al. Catalytic deoxygenation of water: Preparation, deactivation, and regeneration of palladium on a resin catalyst. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 1, p. 81–88, 6 jan. 2010.

HULTBERG, M.; BODIN, H. Fungi-based treatment of real brewery waste streams and its effects on water quality. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 42, n. 8, p. 1317–1324, 1 ago. 2019.

HUSSAIN, Z. et al. Production of bacterial cellulose from industrial wastes : a review. **Cellulose**, v. 26, n. 5, p. 2895–2911, 2019.

JOSÉ DA ROCHA REIS, A. **Desenvolvimento de uma panela para a produção de cerveja**. [s.l: s.n.].

KARLOVIĆ, A. et al. **By-products in the malting and brewing industries-re-usage possibilities** Fermentation MDPI AG, , 2020.

KINČL, T. et al. High-gravity brewing without adjuncts – The effect on beer parameters. **LWT**, v. 148, 1 ago. 2021.

KLÍMEK, P. et al. Utilizing brewer's-spent-grain in wood-based particleboard manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 812–817, 2016.

KTENIOUDAKI, A. et al. Application of bioprocessing techniques (sourdough fermentation and technological aids) for brewer's spent grain breads. **Food Research International**, v. 73, p. 107–116, 2015.

KUBULE, A. et al. Highlights on energy efficiency improvements : a case of a small brewery. v. 138, 2016.

LODOLO, E. J. et al. The yeast *Saccharomyces cerevisiae* - The main character in beer brewing. **FEMS Yeast Research**, v. 8, n. 7, p. 1018–1036, 2008.

MAITI, S. et al. Two-phase partitioning detoxification to improve bio-butanol production from brewery industry wastes. **Chemical Engineering Journal**, 2017.

MALAKHOVA, D. V et al. The biotransformation of brewer ' s spent grain into biogas by anaerobic microbial communities. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, 2015.

MARCUSSO, E. F. AS MICROCERVEJARIAS NO BRASIL ATUAL: Sustentabilidade e Territorialidade. 2015.

MARCUSSO, E. F.; MÜLLER, C. V. A CERVEJA NO BRASIL: O ministério da agricultura informando e esclarecendo. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, p. 1–5, 2017.

MATA, T. M. et al. Sustainability and economic evaluation of microalgae grown in brewery wastewater. **Bioresource Technology**, v. 168, p. 151–158, 2014.

MELLO, L.; MALI, S. Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. **Industrial Crops & Products**, v. 55, p. 187–193, 2014.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. E A. **Anuário da Cerveja 2020**. [s.l: s.n.].

MUSTER-SLAWITSCH, B. et al. The green brewery concept - Energy efficiency and the use of renewable energy sources in breweries. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 13, p. 2123–2134, set. 2011.

NADOLNY, B. et al. Use of brewing industry waste to produce carbon- based adsorbents : Paracetamol adsorption study. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 0, n. 0, p. 1–10, 2020.

NETO, E. S. S. et al. **A produção de malte em pequena escala – uma alternativa aos cervejeiros artesanais**. Gramado: 2016.

NOCENTE, F. et al. Upcycling of brewers' spent grain by production of dry pasta with higher nutritional potential. **LWT - Food Science and Technology**, v. 114, n. 108421, p. 1–6, 2019.

NUNES DE SOUSA, M.; POLYDORO CASCAES, B.; JENISCH RODRIGUES, L. **ANÁLISE ECONÔMICA E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA UTILIZANDO O PROGRAMA TRNSYS PARA PEQUENA CERVEJARIA DE PORTO ALEGRE**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.tcpdf.org>.

OKEYINKA, O. M. et al. Investigation into the applicability of brewery sludge residue-ash as a base material for geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 28–32, 2019.

OLAJIRE, A. A. The brewing industry and environmental challenges. **Journal of Cleaner Production**, mar. 2012.

PATRICK, A.; MATIAS, A. **VIABILIDADE ECONÔMICA DE INSTALAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA NA CERVEJARIA BACURIM LTDA**. [s.l: s.n.].

PETTIGREW, L. et al. Optimisation of water usage in a brewery clean-in-place system using reference nets. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 583–593, 2015.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. Novo Hamburgo: [s.n.].

Resource efficiency in the UK brewing sector. . [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.wrap.org.uk>.

SARAIVA, B. R. et al. Waste from brewing (trub) as a source of protein for the food industry. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 54, n. 4, p. 1247–1255, 2019.

SMITH, R.; KIM, J. **Handbook of water and energy management**. [s.l: s.n.].

SOUZA, B. M. **Tecnologias Emergentes no Processo de Pasteurização da Cerveja: Uma Revisão**. [s.l: s.n.].

SPWATTS.

STURM, B. et al. The feasibility of the sustainable energy supply from bio wastes for a small scale brewery - A case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 39, p. 45–52, 2012.

STURM, B. et al. Opportunities and barriers for efficient energy use in a medium-sized brewery. **Applied Thermal Engineering**, v. 53, n. 2, p. 397–404, 2 maio 2013.

STWEART, G.; RUSSEL, I.; ANSTRUTHER, A. **Handbook of Brewing**. 3. ed. [s.l.] CRC Press, 2018.

SUSTAINABLE ENERGY AUTHORITY OF IRELAND. **Energy Audit Handbook**. [s.l: s.n.].

THE BREWERS ASSOCIATION OF CANADA. **Energy Efficiency Opportunities in the Canadian Brewing Industry**. [s.l: s.n.].

THUMANN, A.; NIEHUS, T.; YOUNGER, W. J. **Handbook of Energy Audits**. 9th. ed. [s.l: s.n.].

TOZETTO, L. M. Produção e caracterização de cerveja artesanal adicionada de gengibre (*Zingiber officinale*). **Dissertação de mestrado em Engenharia de Produção**, p. 80, 2017.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **METODOLOGIA DE PESQUISA EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. [s.l: s.n.].

URBAN, F.; GEALL, S.; WANG, Y. **Solar PV and solar water heaters in China: Different pathways to low carbon energy** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 1 out. 2016.

Wetherspark.

WHITE, C.; ZAINASHEFF, J. **Yeast: the practical guide to beer fermentation**. [s.l.] Brewers Publications, 2010.

WILKINSON, J.; CERDAN, C.; DORIGON, C. Geographical Indications and “Origin” Products in Brazil – The Interplay of Institutions and Networks. **World Development**, 2017.

WORRELL, E.; GALITSKY, C.; MARTIN, N. **Energy Efficiency Opportunities in the Brewery Industry**. [s.l: s.n.].

YIN, R. K. **Applications of Case Study Research**. 2^a ed. ed. [s.l: s.n.]. v. 34

APÊNDICE A – PROTOCOLO DE PESQUISA



PROTOCOLO DE PESQUISA

Este protocolo descreve os procedimentos que devem ser seguidos para os estudos de caso da pesquisa.

Preparação da Pré-visita e visita

Para ter mais facilidade de acesso a essas cervejarias, deve-se contatar inicialmente as associações locais de cervejeiros, explicar os objetivos e vantagens da pesquisa e pedir por indicação de cervejarias que tem interesse em participar.

A empresa pré-selecionada será contatada por telefone e será agendada uma visita ao local para conhecer as instalações e conversar com o gerente. Durante a visita ao local serão feitas perguntas para conhecer brevemente as características produtivas da cervejaria e será explicado o tema da pesquisa, as vantagens para a cervejaria, os dados que serão coletados e questionado o interesse em participar. Em caso de resposta afirmativa, solicitar para acompanhar uma brassagem para coletar os dados.

Coleta de dados no local

Durante a coleta de dados, deve-se seguir o roteiro de estudo de caso e estar atento a todas as etapas que compõem o processo, pedindo a pessoa que está executando as tarefas, explicações mais detalhadas sobre a execução e práticas que a cervejaria adota. Todas essas informações devem ser anotadas.

Solicitar para o gerente, no momento adequado, os documentos que compõem a primeira parte do roteiro. Além disso, deve-se colher informações sobre o contexto do negócio, história, experiências, parcerias, dificuldades, visão de futuro, estratégias e outras informações que possam ser relevantes para compreender o contexto em que a empresa está inserida.

Pós-visita

Após a realização da coleta de dados, deve-se manter contato com a cervejaria para tirar dúvidas que surjam durante a análise de dados e o relatório deve ser feito o mais breve possível para que os dados coletados não sejam perdidos ou esquecidos. Após a sua conclusão, deve-se agendar uma visita a cervejaria novamente para apresentar os resultados e conclusões a cerca da produção.

Observação importante

Salienar que as informações coletadas serão usadas somente para fins acadêmicos e que as cervejarias estudadas não serão identificadas.

APÊNDICE B – ROTEIRO PARA COLETA DE DADOS



ROTEIRO DE PESQUISA

Vagner Mateus Funck
Mestrando – PPGE/UFSM/Santa Maria

Mario Eduardo Santos Martins
Orientador – PPGE/UFSM/Santa Maria

Data: ___/___/____ Hora de início: _____ Hora de término: _____

Nome da cervejaria: _____

Nome do responsável: _____

Telefone: _____

E-mail: _____

PARTE I – COLETA DE DOCUMENTOS

1. ENERGIA ELÉTRICA

() Histórico

() Conta completa

2. ÁGUA

() Histórico

() Conta completa

3. GÁS

() Histórico

() Conta completa

4. INSUMOS

() Grãos () Lúpulo () Levedura () CO₂

5. PRODUÇÃO

() Histórico

6. EQUIPAMENTOS

() Fichas técnicas e especificações

PARTE II – DADOS E OBSERVAÇÕES DO PROCESSO

TRATAMENTO DA ÁGUA			
Equipamento	Volume/Capacidade:		
	Potência:		
	Descrição:		
Entradas	Item	Qtd.	Unidade
	ÁGUA NÃO-TRATADA		
Saídas	Item	Qtd.	Unidade
	ÁGUA TRATADA		
Tempo			
Observações e descrições do processo			

MOAGEM DE GRÃOS			
Equipamento	Volume/Capacidade:		
	Potência:		
	Descrição:		
Entradas	Item	Qtd.	Unidade
	MALTE		
Saídas	Item	Qtd.	Unidade
	MALTE MOÍDO		
	SACAS		
Tempo			
Observações e descrições do processo			

MOSTURA				
Equipamento	Volume/Capacidade:			
	Potência:			
	Descrição:			
Entradas	Item	Qtd.	Unidade	
	ÁGUA TRATADA			
	MALTE MOÍDO			
Saídas	Item	Qtd.	Unidade	
	BAGAÇO			
	MOSTO			
Tempo	Temperatura	Hora início	Hora fim	Descrição
	T ₀ =			
	T ₁ =			
	T ₂ =			
	T ₃ =			
	T ₄ =			
	T ₅ =			
	T ₆ =			
	T ₇ =			
	T ₈ =			
	T ₉ =			
	T ₁₀ =			
	T ₁₁ =			
T ₁₂ =				
Observações e descrições				

FERVURA			
Equipamento	Volume/Capacidade:		
	Potência:		
	Descrição:		
Entradas	Item	Qtd.	Unidade
	MOSTO		
	LÚPULO		
Saídas	Item	Qtd.	Unidade
	TRUB		
	MOSTO FERVIDO		
Tempo	Hora início:	Hora fim:	
Observações e descrições			

RESFRIAMENTO DO MOSTO	
Equipamento	Volume/Capacidade:
	Potência:
	Descrição:
Tempo	Hora início: Hora fim:
Observações e descrições	

LIMPEZA	
Painéis de mostura	Descrição:
	Consumo de água:
	Produtos de limpeza:
Tubulações/bombas	Descrição:
	Consumo de água:
	Produtos de limpeza:
Limpeza de barris	Descrição:
	Consumo de água:
	Produtos de limpeza:
Fermentadores	Descrição:
	Consumo de água:
	Produtos de limpeza:
Limpeza de embalagens	Descrição:
	Consumo de água:
	Produtos de limpeza:

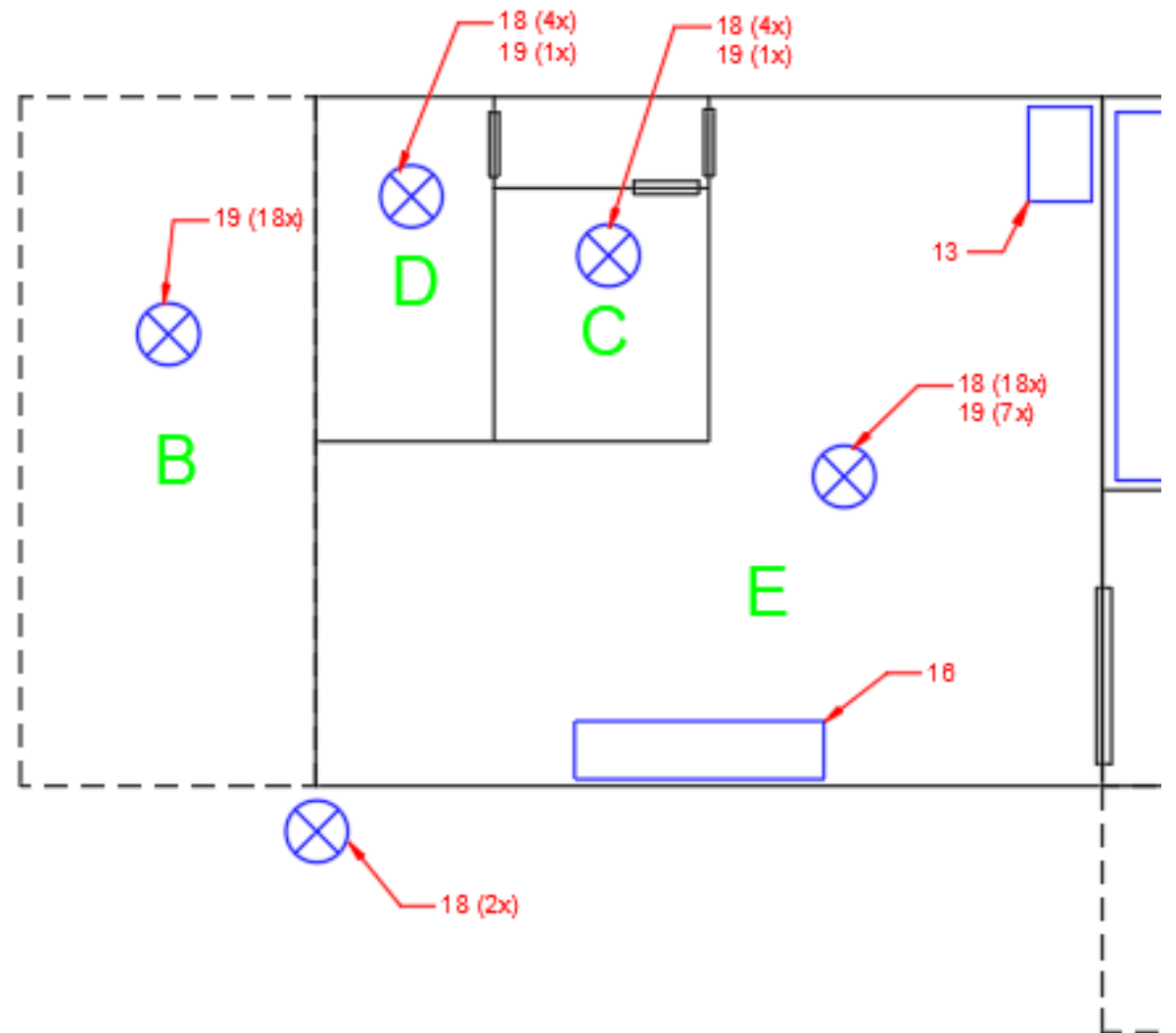
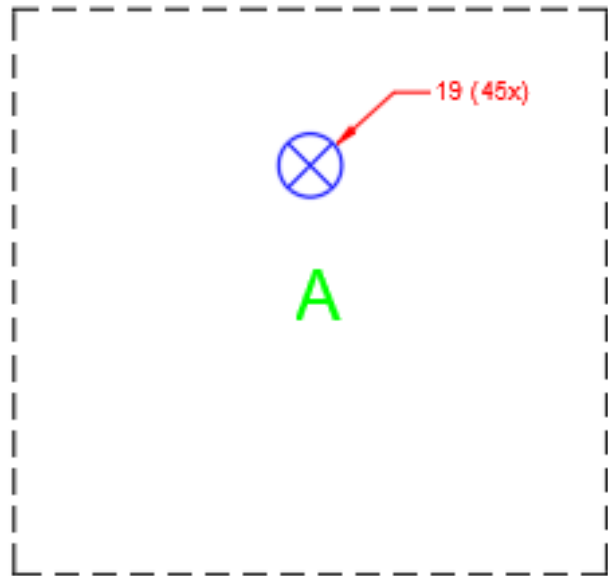
FERMENTAÇÃO			
Equipamento	Volume/Capacidade:		
	Potência:		
	Descrição:		
Entradas	Item	Qtd.	Unidade
	MOSTO FERVIDO		
	LÚPULO		
	LEVEDURA		
	CO ₂		
Saídas	Item	Qtd.	Unidade
	CERVEJA		
	LEVEDURAS		
Duração da fermentação			
Observações e descrições			

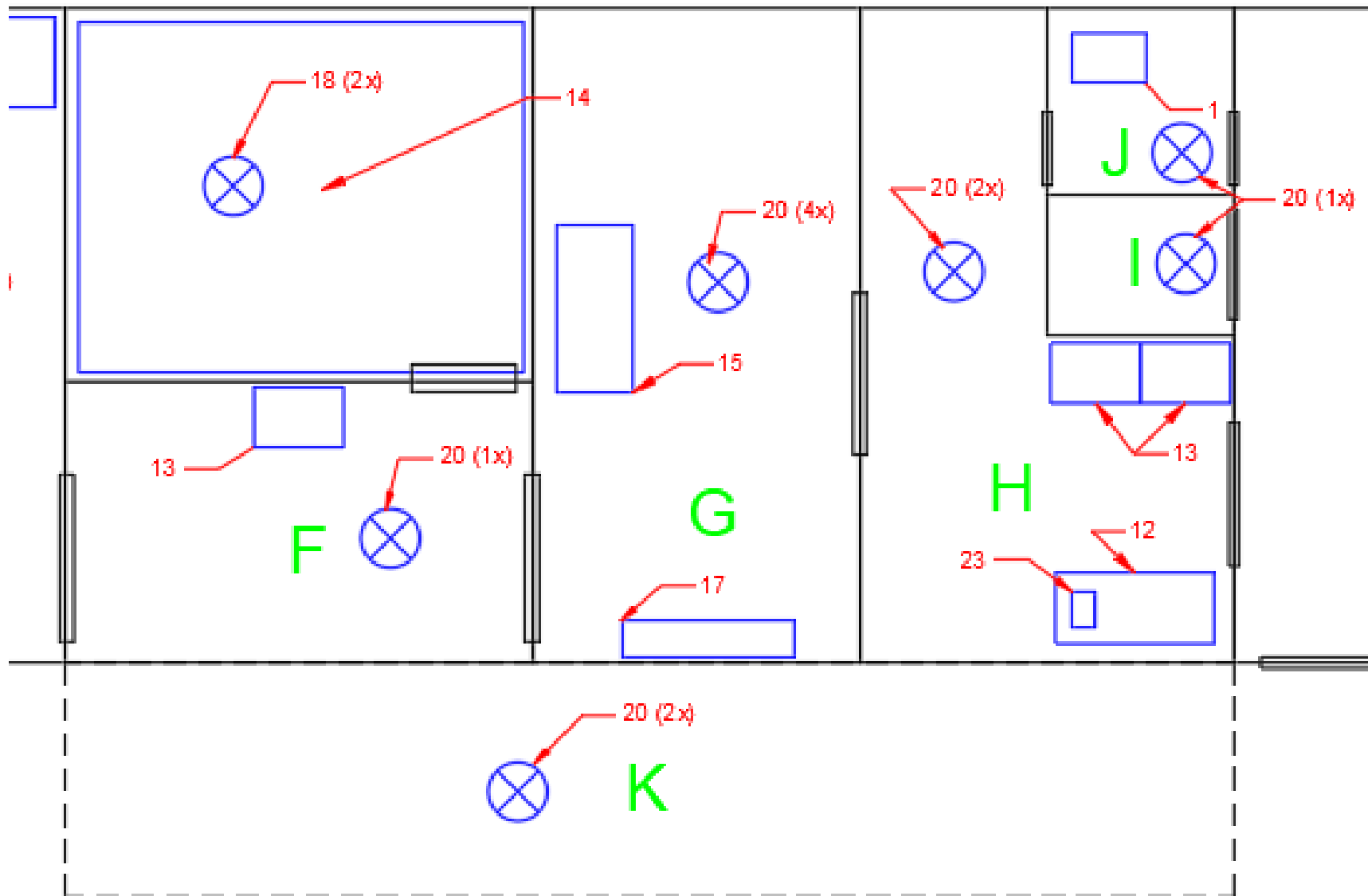
EMBALAGEM			
Equipamento	Volume/Capacidade:		
	Potência:		
	Descrição:		
Entradas	Item	Qtd.	Unidade
	CERVEJA		
	CO ₂		
	EMBALAGENS		
Saídas	Item	Qtd.	Unidade
	DESCARTE DE CERVEJA		
	DESCARTE DE EMBALAGENS		
Observações e descrições	Quantidade de CO ₂ usado na carbonatação:		

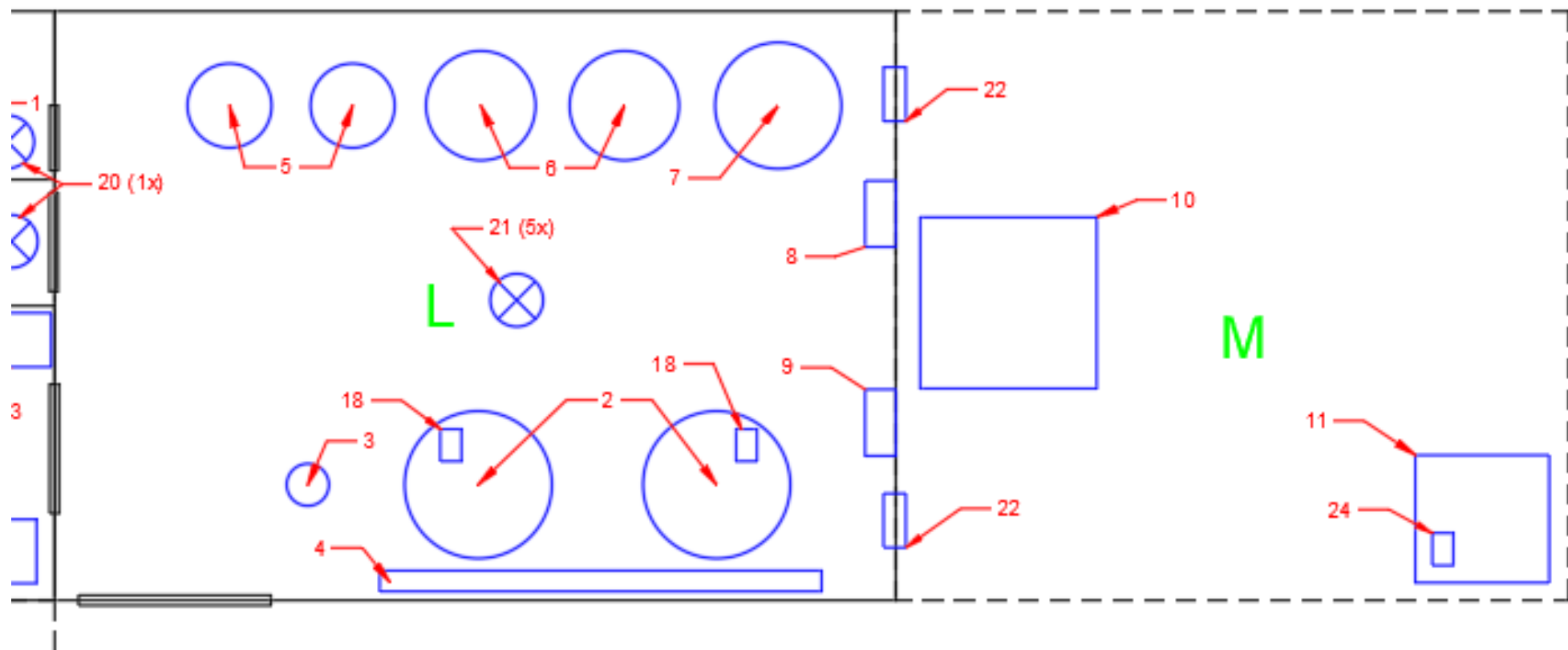
PASTEURIZAÇÃO			
Equipamento	Volume/Capacidade:		
	Potência:		
	Descrição:		
Entradas	Item	Qtd.	Unidade
	ÁGUA		
	CERVEJA		
Saídas	Item	Qtd.	Unidade
	ÁGUA		
	EMBALAGENS QUEBRADAS		
Observações e descrições			

APÊNDICE C – PLANTA BAIXADA SIMPLIFICADA DA CERVEJARIA

Letra	Local	N°	Equipamento	Qtd.
A	Barracão	19	Lâmpada 5w	45
B	Varanda	19	Lâmpada 5w	18
C	Banheiro masculino	19	Lâmpada 5w	1
		18	Lâmpada 40w	4
D	Banheiro feminino	19	Lâmpada 5w	1
		18	Lâmpada 40w	4
E	Bar	19	Lâmpada 5w	7
		18	Lâmpada 40w	18
		13	Geladeira	1
		16	Ar-condicionado 30000 btu	1
F	Loja	18	Lâmpada 40w	2
		20	Lâmpada 16w	1
		13	Geladeira	1
		14	Câmara fria	2
G	Escritório	20	Lâmpada 16w	4
		15	Computador	1
		17	Ar-condicionado 12000 btu	1
H	Limpeza de barris	20	Lâmpada 16w	2
		13	Geladeira	2
		12	Lavador de barris	1
		23	Bomba 0,5 cv	1
I	Almoxarifado	20	Lâmpada 16w	1
J	Sala de moagem	20	Lâmpada 16w	1
		1	Moedor	1
K	Varanda 2	20	Lâmpada 16w	4
L	Brassagem e fermentação	21	Lâmpada 100w	5
		2	Panela single vassel	2
		18	Bomba 1 cv	2
		3	Panela água de lavagem	1
		4	Trocador de calor	1
		9	Controlador de temp. das panelas e velocidade bombas	1
		8	Controlador de temp. fermentadores	1
		5	Fermentador 600 l	2
		6	Fementador 1200 l	2
		7	Fermentador 1600 l	1
		22	Exaustor	2
M	Central de frio	10	Central de frio	1
		11	Tanque 1000 l	2
		24	Bomba 3/4 cv	1







APÊNDICE D – CÁLCULOS DE CONSUMO ENERGÉTICO

1. Moagem

Moedor com motor de 1,5 cv (1,103 kW) em uso por 22 minutos ou 1320 segundos

$$Q [kJ] = P [kW] * t [s]$$

$$Q [kJ] = 1,103 [kW] * 1320 [s]$$

$$Q = 1455,96 kJ = 0,404 kWh \pm 9\%$$

$$Q = 1455,96 kJ = 0,404 kWh$$

2. Tratamento da água

Bombeamento de 1380 litros de água com bomba de 1 cv (0,735 kW) e vazão de 45 l/min. Para bombear 1380 litros de água, a bomba fica em uso por 30,66 minutos ou 1840 segundos, portanto:

$$Q [kJ] = P [kW] * t [s]$$

$$Q [kJ] = 0,735 [kW] * 1840 [s]$$

$$Q = 1352,4 kJ = 0,375 kWh$$

3. Brassagem

O processo de Brassagem é composto pela Mostura (Etapa 1 a 9), Lavagem de Grãos (Etapa 10), Fervura (Etapas 11 e 12) e Resfriamento (Etapas 13 e 14). Para o cálculo do consumo da bomba, definiu-se duas velocidades, baixa (40% do consumo) para recirculação do mosto e na transferência para o fermentador passando pelos resfriadores, e alta (100% do consumo) para fazer o *Whirlpool* ao fim da fervura. Desta forma, a bomba ficou ligada na velocidade alta na Etapa 13 e na velocidade baixa da Etapa 2 até a Etapa 9 e na Etapa 14.

Quadro 12 - Descrição das etapas de cozimento do mosto.

Etapa	Descrição
1	Aquecimento de 690 kg de água de 27°C até 45°C

2	Acrescentado 116 kg de grãos de cevada aos 45°C e aquecido até os 50°C
3	Mantida temperatura de 50°C por 15 min
4	Aquecimento de 50°C até 64°C
5	Mantida temperatura de 64°C por 87 min
6	Aquecimento de 64°C até 72°C
7	Mantida temperatura de 72°C por 10 min
8	Aquecimento de 72°C até 77°C
9	Mantida temperatura de 77°C por 8 min
10	Retirada de 139,19 kg de bagaço de malte, acréscimo de 110 litros de água a 77°C.
11	Aquecimento de 747,27 kg do mosto de 77°C até 99°C.
12	Fervura por 60 min e evaporação de 78,66 kg de mosto
13	<i>Whirlpool</i>
14	Resfriamento do mosto de 99°C para 28°C

Fonte: Autor.

Quadro 13 - Variáveis de cálculo da brassagem.

Tempo etapa 1	$t_1 = 2460 \text{ s}$
Tempo etapa 2	$t_2 = 420 \text{ s}$
Tempo etapa 3	$t_3 = 900 \text{ s}$
Tempo etapa 4	$t_4 = 1680 \text{ s}$
Tempo etapa 5	$t_5 = 5220 \text{ s}$
Tempo etapa 6	$t_6 = 300 \text{ s}$
Tempo etapa 7	$t_7 = 600 \text{ s}$
Tempo etapa 8	$t_8 = 600 \text{ s}$
Tempo etapa 9	$t_9 = 480 \text{ s}$
Tempo etapa 11	$t_{11} = 3720 \text{ s}$
Tempo etapa 12	$t_{12} = 3600 \text{ s}$
Tempo etapa 13	$t_{13} = 600 \text{ s}$
Tempo etapa 14	$t_{14} = 1800 \text{ s}$
Temperatura ambiente	$T_\infty = 300 \text{ K}$
Temperatura etapa 3	$T_3 = 323 \text{ K}$
Temperatura etapa 5	$T_5 = 337 \text{ K}$
Temperatura etapa 7	$T_7 = 345 \text{ K}$
Temperatura etapa 9	$T_9 = 350 \text{ K}$
Temperatura etapa 12	$T_{12} = 372 \text{ K}$
Potência da resistência	$P = 30 \text{ kW}$

Potência da bomba 40%	$P_{b40} = 0,294 \text{ kW}$
Potência da bomba 100%	$P_{b100} = 0,735 \text{ kW}$
Coeficiente de convecção do ar a 300 K	$h_{ar} = 9,98 \text{ W/m}^2\text{K}$
Raio interno da panela de mostura	$r_i = 0,6 \text{ m}$
Densidade do mosto na etapa 12	$\rho_{12} = 1,035 \text{ kg/l}$
Volume de mosto na etapa 12	$V_{12} = 76 \text{ l}$
Coeficiente de evaporação da água	$cv = 2259,36 \text{ kJ/kg}$
Calor específico da água	$cp_{\text{água}} = 4,184 \text{ kJ/kgK}$
Calor específico do mosto	$cp_{\text{mosto}} = 3,860 \text{ kJ/kgK}$
Consumo de energia de aquecimento	$Q_n \text{ [kJ]}$
Consumo de energia de bombeamento	$Q_b \text{ [kJ]}$

Fonte: Autor.

3.1. Mostura

O consumo de energia das panelas de mostura é composto pela energia de aquecimento da água fornecida pela resistência elétrica de 30 kW, e pela bomba de 1 cv (0,735 kW) de recirculação do mosto. Os cálculos foram realizados para somente uma panela e ao fim o resultado foi multiplicado por 2 para encontrar o consumo de duas panelas. Considerou-se Mostura da Etapa 1 a 9, Fervura nas Etapas 10 e 11, e Resfriamento nas Etapas 12 e 13.

ETAPA 1

$$Q_1 = P * t_1$$

$$Q_1 = 30 * 2460$$

$$Q_1 = 73800 \text{ kJ}$$

ETAPA 2

$$Q_2 = P * t_2$$

$$Q_2 = 30 * 420$$

$$Q_2 = 12600 \text{ kJ}$$

$$Q_{b,2} = P_{b40} * t_2$$

$$Q_{b,2} = 0,294 * 420$$

$$Q_{b,2} = 123,54 \text{ kJ}$$

ETAPA 3

$$\dot{Q} = h_{ar} * A * (T_3 - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_3 - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = 9,98 * \pi * 0,6^2 * (323 - 300)$$

$$\dot{Q} = 259,6 \text{ W}$$

$$Q_3 = \dot{Q} * t_3$$

$$Q_3 = \frac{259,6 * 900}{1000}$$

$$Q_3 = 233,64 \text{ kJ} + 15\%$$

$$Q_3 = 268,69 \text{ kJ}$$

$$Q_{b,3} = P_{b40} * t_3$$

$$Q_{b,3} = 0,294 * 900$$

$$Q_{b,3} = 264,74 \text{ kJ}$$

ETAPA 4

$$Q_4 = P * t_4$$

$$Q_4 = 30 * 1680$$

$$Q_4 = 50040 \text{ kJ}$$

$$Q_{b,4} = P_{b40} * t_4$$

$$Q_{b,4} = 0,294 * 1680$$

$$Q_{b,4} = 494,18 \text{ kJ}$$

ETAPA 5

$$\dot{Q} = h_{ar} * A * (T_5 - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_5 - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = 9,98 * \pi * 0,6^2 * (337 - 300)$$

$$\dot{Q} = 417,62 \text{ W}$$

$$Q_5 = \dot{Q} * t_5$$

$$Q_5 = \frac{417,62 * 5220}{1000}$$

$$Q_5 = 2179,99 \text{ kJ} + 15\%$$

$$Q_5 = 2506,99 \text{ kJ}$$

$$Q_{b,5} = P_{b40} * t_5$$

$$Q_{b,5} = 0,294 * 5220$$

$$Q_{b,5} = 1535,51 \text{ kJ}$$

ETAPA 6

$$Q_6 = P * t_6$$

$$Q_6 = 30 * 300$$

$$Q_6 = 9000 \text{ kJ}$$

$$Q_{b,6} = P_{b40} * t_6$$

$$Q_{b,6} = 0,294 * 300$$

$$Q_{b,6} = 88,24 \text{ kJ}$$

ETAPA 7

$$\dot{Q} = h_{ar} * A * (T_7 - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_7 - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = 9,98 * \pi * 0,6^2 * (345 - 300)$$

$$\dot{Q} = 507,92 \text{ W}$$

$$Q_7 = \dot{Q} * t_7$$

$$Q_7 = \frac{507,92 * 600}{1000}$$

$$Q_7 = 304,75 \text{ kJ} + 15\%$$

$$Q_7 = 350,46 \text{ kJ}$$

$$Q_{b,7} = P_{b40} * t_7$$

$$Q_{b,7} = 0,294 * 600$$

$$Q_{b,7} = 176,5 \text{ kJ}$$

ETAPA 8

$$Q_8 = P * t_8$$
$$Q_8 = 30 * 600$$
$$Q_8 = 18000 \text{ kJ}$$

$$Q_{b,8} = P_{b40} * t_8$$
$$Q_{b,8} = 0,294 * 600$$
$$Q_{b,8} = 176,5 \text{ kJ}$$

ETAPA 9

$$\dot{Q} = h_{ar} * A * (T_9 - T_{\infty})$$
$$\dot{Q} = h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_9 - T_{\infty})$$
$$\dot{Q} = 9,98 * \pi * 0,6^2 * (350 - 300)$$
$$\dot{Q} = 564,36 \text{ W}$$

$$Q_9 = \dot{Q} * t_9$$
$$Q_9 = \frac{564,36 * 480}{1000}$$
$$Q_9 = 270,89 \text{ kJ} + 15\%$$
$$Q_9 = 311,52 \text{ kJ}$$

$$Q_{b,9} = P_{b40} * t_9$$
$$Q_{b,9} = 0,294 * 480$$
$$Q_{b,9} = 141,2 \text{ kJ}$$

TOTAL MOSTURA

$$Q_{mostura} = \sum_{n=1}^9 (Q_n + Q_{b,n})$$

$$Q_{mostura} = 73800 + 12600 + 123,54 + 268,69 + 264,74 + 50040 + 494,18$$
$$+ 2506,99 + 1535,51 + 9000 + 88,24 + 350,46 + 176,5$$
$$+ 18000 + 176,5 + 311,52 + 141,2$$
$$Q_{mostura} = 169878,07 \text{ kJ} * 2$$

$$Q_{mostura} = 339756,14 \text{ kJ}$$

$$Q_{mostura} = \frac{339756,14}{3600}$$

$$Q_{mostura} = 94,37 \text{ kWh}$$

3.2. Lavagem de Grãos

ETAPA 10

110 litros (110 kg) de água aquecida de 27°C (300 K) para 77°C (350 K) em panela elétrica de 6,5kW. Multiplicado por 2 para duas receitas e considerando 8% em perdas, tem-se:

$$Q_{10}[\text{kJ}] = m [\text{kg}] * cp \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] * \Delta T [\text{K}]$$

$$Q_{10}[\text{kJ}] = 110 [\text{kg}] * 4,184 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] * (350 - 300) [\text{K}]$$

$$Q_{10} = 23012 \text{ kJ} + 8\%$$

$$Q_{10} = 24852,96 \text{ kJ} * 2$$

$$Q_{10} = 49705,92 \text{ kJ} = 13,807 \text{ kWh}$$

3.3. Fervura

Aquecimento de mosto de 77°C até 99°C e fervura até evaporação de 76 litros.

ETAPA 11

$$Q_{11} = P * t_{11}$$

$$Q_{11} = 30 * 3720$$

$$Q_{11} = 111600 \text{ kJ}$$

ETAPA 12

$$Q_{12,a} = m * cv$$

$$Q_{12,a} = \rho_{12} * v_{12} * cv$$

$$Q_{12,a} = 1,035 * 76 * 2259,36$$

$$Q_{12,a} = 177721,26 \text{ kJ}$$

$$\dot{Q} = h_{ar} * A * (T_{12} - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_{12} - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = 9,98 * \pi * 0,6^2 * (372 - 300)$$

$$\dot{Q} = 812,67 \text{ W}$$

$$Q_{12,b} = \dot{Q} * t_{12}$$

$$Q_{12,b} = \frac{812,67 * 3600}{1000}$$

$$Q_{12,b} = 2925,62 \text{ kJ} + 15\%$$

$$Q_{12,b} = 3364,46 \text{ kJ}$$

TOTAL NA FERVURA

$$Q_{fervura} [kJ] = Q_{11} + Q_{12,a} + Q_{12,b}$$

$$Q_{fervura} [kJ] = 111600 + 177721,26 + 3364,46$$

$$Q_{fervura} = 292685,72 \text{ kJ} * 2$$

$$Q_{fervura} = 585371,44 \text{ kJ} = 162,6 \text{ kWh}$$

4. Resfriamento do Mosto

Whirlpool, bombeamento e calor retirado pelo banco de frio. O Resfriamento do mosto é feito em duas etapas, com circulação de água a 27°C de um tanque externo e na sequência com o banco de frio onde circula álcool etílico alimentício a -7°C. Calculou-se a temperatura de saída do mosto no trocador com água e na sequência a temperatura de saída do mosto no trocador com álcool etílico. Com essas informações, calculou-se a quantidade de energia que o banco de frio terá que retirar do mosto.

ETAPA 13

Bombeamento do Whirlpool:

$$Q_{b,13} = P_{b100} * t_{13}$$

$$Q_{b,13} = 0,735 * 600$$

$$Q_{b,13} = 441,24 \text{ kJ}$$

ETAPA 14

Bombeamento da transferência do mosto para o fermentador (1/2 cv):

$$Q_{b,14} = P_{b40} * t_{14}$$

$$Q_{b,14} = 0,294 * 1800$$

$$Q_{b,14} = 529,48 \text{ kJ}$$

Bombeamento dos tanques de água de resfriamento para o trocador de calor (3/4 cv):

$$Q_{b,\acute{a}gua,14} [kJ] = P_{b,\acute{a}gua14} [kW] * t_{14} [s]$$

$$Q_{b,\acute{a}gua,14} = 0,551 [kW] * 1800 [s]$$

$$Q_{b,\acute{a}gua,14} = 991,8 \text{ kJ}$$

Bombeamento do banco de frio para o trocador de calor (3/4 cv):

$$Q_{b,frio} [kJ] = P_{b,frio} [kW] * t_{14} [s]$$

$$Q_{b,frio} = 0,551 [kW] * 1800 [s]$$

$$Q_{b,frio} = 991,8 \text{ kJ}$$

Determinando a efetividade do trocador de calor usando o método ϵ /NUT.

Vazão de mosto:

$$\dot{m}_{mosto} \left[\frac{kg}{s} \right] = \frac{\rho_{14} \left[\frac{kg}{l} \right] * v_{14} [l]}{t_{14} [s]}$$

$$\dot{m}_{mosto} \left[\frac{kg}{s} \right] = \frac{1,044 \left[\frac{kg}{l} \right] * 650 [l]}{1800 [s]}$$

$$\dot{m}_{mosto} = 0,377 \frac{kg}{s}$$

Determinação do parâmetro Cr:

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

$$C_{mosto} = \dot{m}_{mosto} \left[\frac{kg}{s} \right] * cp_{mosto} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$C_{mosto} = 0,377 \left[\frac{kg}{s} \right] * 3,860 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$C_{mosto} = C_{min} = 1455,22 \left[\frac{W}{K} \right]$$

$$C_{\acute{a}gua} = \dot{m}_{\acute{a}gua} \left[\frac{kg}{s} \right] * cp_{\acute{a}gua} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$C_{\acute{a}gua} = 1 \left[\frac{kg}{s} \right] * 4,184 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$C_{\acute{a}gua} = C_{max} = 4184 \left[\frac{W}{K} \right]$$

$$C_r = \frac{1455,22 \left[\frac{W}{K} \right]}{4184 \left[\frac{W}{K} \right]}$$

$$C_r = 0,347$$

Determinação do Coeficiente Global de transferência de calor:

$$U \left[\frac{W}{m^2K} \right] = \frac{1}{\frac{1}{h_{mosto} \left[\frac{W}{m^2K} \right]} + \frac{s \left[m \right]}{\gamma \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{1}{h_{\acute{a}gua} \left[\frac{W}{m^2K} \right]}}$$

$$U \left[\frac{W}{m^2K} \right] = \frac{1}{\frac{1}{5900 \left[\frac{W}{m^2K} \right]} + \frac{0,001 \left[m \right]}{16,3 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{1}{1000 \left[\frac{W}{m^2K} \right]}}$$

$$U = 812,452 \frac{W}{m^2K}$$

Para o cálculo da área de troca térmica, estimou-se que existem no trocador de calor, 20 tubos de 1" com comprimento de 2,5 metros, desta forma:

$$A[m^2] = 2 * \pi * r[m] * l[m] * n$$

$$A[m^2] = 2 * \pi * 0,0127 [m] * 2,5[m] * 20$$

$$A = 3,989 m^2$$

Determinação do parâmetro NUT:

$$NUT = \frac{U[\frac{W}{m^2K}] * A[m^2]}{C_{min} [\frac{W}{K}]}$$

$$NUT = \frac{812,452[\frac{W}{m^2K}] * 3,989[m^2]}{1455,22 [\frac{W}{K}]}$$

$$NUT = 2,22$$

Extraindo da Figura 8, tem-se que a efetividade (ϵ) é:

$$\epsilon = 0,8$$

Cálculo da temperatura de saída do mosto

$$\dot{q} [W] = \epsilon * C_{min}[\frac{W}{K}] * (T_{entrada,mosto} [K] - T_{entrada,\acute{a}gua} [K])$$

$$\dot{q} [W] = 0,8 * 1455,22[\frac{W}{K}] * (372[K] - 300[K])$$

$$\dot{q} = 83820,67 W$$

$$T_{saída,mosto} [K] = T_{entrada,mosto} [K] - \frac{\dot{q} [W]}{C_{mosto} [\frac{W}{K}]}$$

$$T_{saída,mosto} [K] = 372[K] - \frac{83820,67 [W]}{1455,22 [\frac{W}{K}]}$$

$$T_{saída,mosto} = 314,4 \text{ K} = 41,4^{\circ}\text{C}$$

Quantidade de calor necessária para reduzir a temperatura do mosto até 27°C:

$$Q_{14} [kJ] = \rho_{14} \left[\frac{kg}{l} \right] * v_{14} [l] * cp \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * \Delta T [K]$$

$$Q_{14} [kJ] = 1,044 \left[\frac{kg}{l} \right] * 650 [l] * 3,860 \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * (314 - 300) [K]$$

$$Q_{14} = 36671,544 \text{ kJ} + 8\%$$

$$Q_{14} = 39605,26 = 11,00 \text{ kWh}$$

TOTAL NO RESFRIAMENTO

$$Q_{resfriamento} [kJ] = Q_{b,13} + Q_{b,14} + Q_{b,água,14} + Q_{b,frio} + Q_{14}$$

$$Q_{resfriamento} [kJ] = 441,24 + 529,48 + 991,8 + 991,8 + 39605,26$$

$$Q_{resfriamento} = 42559,58 \text{ kJ} * 2$$

$$Q_{resfriamento} = 85119,16 \text{ kJ} = 23,64 \text{ kWh}$$

5. Fermentação

O processo de cálculo do consumo de energia do fermentador ocorre em 5 etapas: Resfriamento de 1300 litros de cerveja de 27°C para 20°C; Quantidade de calor produzido durante a fermentação; Calor perdido pelo fermentador para o ambiente durante 7 dias; Resfriamento do mosto de 20°C para 0°C; Calor perdido pelo fermentador para o ambiente durante 20 dias.

Resfriamento de 1300 litros de cerveja de 27°C para 20°C:

$$Q_1 [kJ] = \rho_{mosto} \left[\frac{kg}{l} \right] * v_{mosto} [l] * cp_{mosto} \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * \Delta T [K]$$

$$Q_1 [kJ] = 1,044 \left[\frac{kg}{l} \right] * 1300 [l] * 3,860 \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * (300 - 293) [K]$$

$$Q_1 = 36671,544 \text{ kJ} = 10,19 \text{ kWh}$$

Quantidade de calor produzido durante a fermentação:

Sabe-se que o processo fermentativo gera 586,6kJ/kg e que o mosto com densidade de 1,044 kg/l possui 0,11 graus PLATO, ou seja, 11% da massa total de mosto é extrato. Portanto, em 1357 kg de mosto existem 149 kg de extrato. Considerando que somente 2/3 do extrato é fermentado:

$$Q_2 [kJ] = m_{extrato} [kg] * Q_{fermentação} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$Q_2 [kJ] = 149 * 2/3 [kg] * 586,6 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$Q_2 = 58383,12 kJ = 16,22 kWh$$

Calor perdido pelo fermentador para o ambiente durante 7 dias:

$$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right] = \frac{1}{\frac{1}{h_{mosto} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]} + \frac{S_{inox} [m]}{\gamma_{inox} \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{S_{poli} [m]}{\gamma_{poli} \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{S_{inox} [m]}{\gamma_{inox} \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{1}{h_{ar} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]}}$$

$$U \left[\frac{W}{m^2 K} \right] = \frac{1}{\frac{1}{300 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]} + \frac{0,001 [m]}{15 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,07 [m]}{0,035 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,001 [m]}{15 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{1}{9,98 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]}}$$

$$U = 0,475 \frac{W}{m^2 K}$$

A área externa do fermentador foi encontrada através de um modelo do fermentador desenhado no Solidworks, cujo resultado foi 9,78 m².

$$\dot{Q}_3 [kW] = U \left[\frac{W}{m^2 K} \right] * A [m^2] * (T_{ambiente} - T_{fermentação}) [K]$$

$$\dot{Q}_3 [kW] = 0,475 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] * 9,78 [m^2] * (300 - 293) [K]$$

$$\dot{Q}_3 = 32,543 W$$

$$7 \text{ dias} = 604800 s$$

$$Q_3 = \dot{Q}_3 [w] * t [s]$$

$$Q_3 = \frac{32,543 * 604800}{1000}$$

$$Q_3 = 19682,11 \text{ kJ} = 5,46 \text{ kWh}$$

Resfriamento de 1300 litros de cerveja de 20°C para 0°C:

$$Q_4 [kJ] = \rho_{\text{cerveja}} \left[\frac{kg}{l} \right] * v_{\text{cerveja}} [l] * c_{p_{\text{cerveja}}} \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * \Delta T [K]$$

$$Q_4 [kJ] = 1,010 \left[\frac{kg}{l} \right] * 1300 [l] * 3,860 \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * (293 - 273) [K]$$

$$Q_4 = 101364 \text{ kJ} = 28,16 \text{ kWh}$$

Calor perdido pelo fermentador para o ambiente durante 20 dias.

$$\dot{Q}_5 [kW] = U \left[\frac{W}{m^2K} \right] * A [m^2] * (T_{\text{ambiente}} - T_{\text{maturação}}) [K]$$

$$\dot{Q}_5 [kW] = 0,475 \left[\frac{W}{m^2K} \right] * 9,78 [m^2] * (300 - 273) [K]$$

$$\dot{Q}_5 = 125,524 \text{ W}$$

$$20 \text{ dias} = 1728000 \text{ s}$$

$$Q_5 = \dot{Q}_5 [W] * t [s]$$

$$Q_5 = \frac{125,524 * 1728000}{1000}$$

$$Q_5 = 216904,9 \text{ kJ} = 60,25 \text{ kWh}$$

TOTAL NA FERMENTAÇÃO

$$Q_{\text{fermentação}} [kJ] = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

$$Q_{\text{fermentação}} [kJ] = 36671,544 + 58383,12 + 19682,11 + 101364 + 216904,9$$

$$Q_{fermentação} = 172628,48 \text{ kJ} = 132,30 \text{ kWh}$$

6. Limpeza

O consumo de energia associado a limpeza dos equipamentos é relacionado a bomba de água que necessita bombear água do poço para a caixa d'água. Bomba 1 cv cv (0,735 kW) e vazão de 45 l/min.

PANELA DE MOSTURA

Bombeamento de 280 litros de água em 6,22 minutos ou 373 segundos.

$$Q \text{ [kJ]} = P \text{ [kW]} * t \text{ [s]}$$
$$Q \text{ [kJ]} = 0,735 \text{ [kW]} * 373 \text{ [s]}$$
$$Q = 274,4 \text{ kJ} = 0,07 \text{ kWh}$$

CESTO DE GRÃOS

Bombeamento de 100 litros de água em 2,22 minutos ou 133 segundos.

$$Q \text{ [kJ]} = P \text{ [kW]} * t \text{ [s]}$$
$$Q \text{ [kJ]} = 0,735 \text{ [kW]} * 133 \text{ [s]}$$
$$Q = 98 \text{ kJ} = 0,02 \text{ kWh}$$

TUBULAÇÕES/BOMBAS

Bombeamento de 120 litros de água em 2,66 minutos ou 160 segundos.

$$Q \text{ [kJ]} = P \text{ [kW]} * t \text{ [s]}$$
$$Q \text{ [kJ]} = 0,735 \text{ [kW]} * 160 \text{ [s]}$$
$$Q = 117,6 \text{ kJ} = 0,03 \text{ kWh}$$

LIMPADOR DE BARRIS

São limpos dois tipos de barris, os Polikegs e os em INOX. Para envasar 1260 litros de cerveja, são necessários 42 barris de 30 litros, dos quais 13 são Polikegs e 29 de INOX. Considerou-se que ambos possuem a mesma área externa de 0,471 m².

O tanque de armazenamento de água de limpeza dos barris possui área externa de 1,335 m² e volume de 50 litros. Polikegs são limpos a 40°C e os de INOX a 60°C. Ciclo de limpeza por barril é de em média 8 minutos e a bomba é de ½ cv (0,367 kW).

Calculou-se: Consumo de bombeamento de 50 litros de água; Consumo de aquecimento de 50 litros de água de 27°C até 40°C; Perda de energia pelo tanque de armazenamento e Polikegs; Consumo de aquecimento de 50 litros de água de 40°C até 60°C; Perda de energia pelo tanque de armazenamento e barris de INOX; e bombeamento.

Bombeamento de 50 litros de água em 1,11 minutos ou 66,66 segundos.

$$Q_1[kJ] = P [kW] * t [s]$$

$$Q_1[kJ] = 0,735[kW] * 66,66 [s]$$

$$Q_1 = 49 kJ = 0,01 kWh$$

Consumo de aquecimento de 50 litros de água de 27°C até 40°C

$$Q_2[kJ] = m [kg] * cp \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * \Delta T [K]$$

$$Q_2[kJ] = 50 [kg] * 4,184 \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * (313 - 300) [K]$$

$$Q_2 = 2719,60 kJ + 5\%$$

$$Q_2 = 2855,58 kJ = 0,793 kWh$$

Perda de energia pelo tanque de armazenamento e Polikegs

$$\dot{Q}[W] = h_{ar} \left[\frac{W}{m^2K} \right] * (A_{tanque} + A_{barril})[m^2] * \Delta T [K]$$

$$\dot{Q}[W] = 9,98 \left[\frac{W}{m^2K} \right] * 1,81[m^2] * (313 - 300)[K]$$

$$\dot{Q} = 234,36 W$$

Para calcular o tempo, multiplicou-se o número de Polikegs (13) pelo tempo de ciclo (8 min / 480 s), sendo t = 6240 s.

$$Q_3[kJ] = \dot{Q}[W] * t[s]$$

$$Q_3[kJ] = \frac{234,36[W] * 6240[s]}{1000}$$

$$Q_3 = 1462,43 kJ = 0,41 kWh$$

Consumo de aquecimento de 50 litros de água de 40°C até 60°C:

$$Q_4[kJ] = m [kg] * cp \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * \Delta T [K]$$

$$Q_4[kJ] = 50 [kg] * 4,184 \left[\frac{kJ}{kgK} \right] * (333 - 313) [K]$$

$$Q_4 = 4184 kJ + 5\%$$

$$Q_4 = 4393,2 kJ = 1,22 kWh$$

Perda de energia pelo tanque de armazenamento e Polikegs

$$\dot{Q}[W] = h_{ar} \left[\frac{W}{m^2K} \right] * (A_{tanque} + A_{barril})[m^2] * \Delta T [K]$$

$$\dot{Q}[W] = 9,98 \left[\frac{W}{m^2K} \right] * 1,81[m^2] * (333 - 300)[K]$$

$$\dot{Q} = 594,92 W$$

Para calcular o tempo, multiplicou-se o número de barris de INOX (29) pelo tempo de ciclo (8 min / 480 s), sendo t = 13920 s.

$$Q_5[kJ] = \dot{Q}[W] * t[s]$$

$$Q_5[kJ] = \frac{594,92[W] * 13920[s]}{1000}$$

$$Q_5 = 8281,36 kJ = 2,3 kWh$$

Bombeamento

$$Q_6[kJ] = P [kW] * t [s]$$

$$Q_6 [kJ] = 0,367[kW] * 20160 [s]$$

$$Q_6 = 7398,72 kJ = 2,05 kWh$$

TOTAL LIMPADOR DE BARRIS

$$Q_{barris} [kJ] = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

$$Q_{barris} [kJ] = 49 + 2855,58 + 1462,43 + 4393,2 + 8281,36 + 7398,72$$

$$Q_{barris} = 24440,29 kJ = 6,78 kWh$$

FERMENTADORES

Bombeamento de 250 litros de água em 5,55 minutos ou 333 segundos.

$$Q [kJ] = P [kW] * t [s]$$

$$Q [kJ] = 0,735[kW] * 333 [s]$$

$$Q = 240 kJ = 0,06 kWh$$

CHÃO

Bombeamento de 800 litros de água em 17,77 minutos ou 1067 segundos.

$$Q [kJ] = P [kW] * t [s]$$

$$Q [kJ] = 0,735[kW] * 1067 [s]$$

$$Q = 784 kJ = 0,21 kWh$$

7. Exaustão

Dois exaustores de 130 W funcionando por 8 horas ou 28800 segundos.

$$Q [kJ] = P [kW] * t [s]$$

$$Q [kJ] = 0,260[kW] * 28800 [s]$$

$$Q = 7488 kJ = 2,08 kWh$$

8. Câmara fria

A câmara fria possui as seguintes dimensões: 3 metros de comprimento e largura, e 2 metros de altura, portanto, a área total interna é de 42 m². O coeficiente de convecção das paredes da câmara que são feitas em poliuretano é 0,28 W/m²K.

O cálculo da carga total foi feito através do somatório do calor cedido para o ambiente através das paredes, calor de transmissão de circulação de pessoas, consumo dos ventiladores e calor de infiltração.

PERDA DE CALOR PELAS PAREDES

$$\dot{q} [W] = U \left[\frac{W}{m^2 K} \right] * A [m^2] * \Delta T [K]$$

$$\dot{q} [W] = 0,28 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] * 42 [m^2] * (300 - 273) [K]$$

$$\dot{q} = 317,52 W$$

$$Q [kJ] = \dot{q} [kW] * t [s]$$

$$Q [kJ] = 0,31752 [kW] * 86400 [s]$$

$$Q = 27433 \frac{kJ}{dia} = 7,62 \frac{kWh}{dia}$$

CIRCULAÇÃO DE PESSOAS

Considerou-se que em média uma pessoa circula dentro da câmara fria por 1 hora por dia e que cada pessoa possui uma taxa de transmissão de calor de 270 W, assim,

$$Q [kWh] = \frac{n * t [h] * c [W]}{1000}$$

$$Q [kWh] = \frac{1 * 1 [h] * 270 [W]}{1000}$$

$$Q = 972 \frac{kJ}{dia} = 0,27 kWh/dia$$

VENTILADORES

Considerou-se 2 ventiladores de 200 W de potência funcionando por 14 horas diárias.

$$Q[kJ] = P[kW] * t[h] * n$$

$$Q[kJ] = 0,2[kW] * 14[h] * 2$$

$$Q = 20160 \frac{kJ}{dia} = 5,6 kWh/dia$$

INFILTRAÇÕES

Considerou-se que existe 5 trocas de ar na câmara fria por dia e o volume da câmara é de 18 m³. A capacidade térmica volumétrica do ar é 2 kJ/m³K.

$$Q \left[\frac{kWh}{dia} \right] = \frac{n * v[m^3] * e \left[\frac{kJ}{m^3K} \right] * \Delta T[K]}{3600}$$

$$Q \left[\frac{kWh}{dia} \right] = \frac{5 * 18[m^3] * 2 \left[\frac{kJ}{m^3K} \right] * (300 - 273)[K]}{3600}$$

$$Q = 4860 \frac{kJ}{dia} = 1,35 \frac{kWh}{dia}$$

TOTAL

$$Q \left[\frac{kWh}{dia} \right] = 7,62 + 0,27 + 5,6 + 1,35$$

$$Q = 14,84 \frac{kWh}{dia} = 53424 \frac{kJ}{dia}$$

$$Q = 445,2 \frac{kWh}{mes} = 1602,72 \frac{MJ}{mes}$$

APÊNDICE E – CÁLCULOS DAS PERDAS ENERGÉTICAS

Resfriamento do mosto e recuperação de calor

Para calcular a quantidade de energia que pode ser recuperada durante o resfriamento do mosto, é necessário calcular a temperatura de saída da água de resfriamento. Considerou-se que o tanque de água tem 1000 litros e que a troca térmica ocorre em 30 minutos (1800 segundos). Desta forma, a vazão de água é 0,555 l/s.

$$C_{\text{água}} = \dot{m}_{\text{água}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] * c_{p\text{água}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$$
$$C_{\text{água}} = 0,555 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] * 4,184 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$$
$$C_{\text{água}} = 2,32 \left[\text{kW/K} \right]$$

Sabendo-se que a taxa de troca térmica do trocador de calor calculada anteriormente é 83,82 kW, calculou-se a temperatura de saída da água

$$T_{\text{saída,água}} [\text{K}] = T_{\text{entrada,água}} [\text{K}] - \frac{\dot{q} [\text{kW}]}{C_{\text{água}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{K}} \right]}$$
$$T_{\text{saída,água}} [\text{K}] = 300 [\text{K}] + \frac{83,82 [\text{kW}]}{2,32 \left[\frac{\text{kW}}{\text{K}} \right]}$$
$$T_{\text{saída,água}} = 336,06 \text{ K} = 63 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q [\text{kJ}] = m [\text{kg}] * c_p \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] * \Delta T [\text{K}]$$
$$Q [\text{kJ}] = 1000 [\text{kg}] * 4,184 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] * (336 - 300) [\text{K}]$$
$$Q = 150877,2 \text{ kJ} = 41,91 \text{ kWh}$$

Panela aberta

Calculou-se a perda de calor das etapas 1 a 11 através da Equação 2. Para as etapas em que a temperatura estava aumentando, calculou-se a média entre a temperatura inicial e final da rampa.

ETAPAS 1 E 2

Aumento de temperatura de 27 para 50°C, temperatura média 38,5°C (311,65 K) por tempo de 2880 segundos.

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= h_{ar} * A * (T_m - T_{\infty}) \\ \dot{Q} &= h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_m - T_{\infty}) \\ \dot{Q} &= 9,98 * \pi * 0,6^2 * (311,5 - 300) \\ \dot{Q} &= 129,8 \text{ W} \\ Q &= \dot{Q} * t \\ Q &= \frac{129,8 * 2880}{1000} \\ Q &= 373,83 \text{ kJ}\end{aligned}$$

ETAPA 3

Já calculado com resultado de 268,69 kJ.

ETAPA 4

Aumento de temperatura de 50 para 64°C, temperatura média 57°C (330,15 K) por tempo de 1680 segundos.

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= h_{ar} * A * (T_m - T_{\infty}) \\ \dot{Q} &= h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_m - T_{\infty}) \\ \dot{Q} &= 9,98 * \pi * 0,6^2 * (330,15 - 300) \\ \dot{Q} &= 338,61 \text{ W} \\ Q &= \dot{Q} * t \\ Q &= \frac{338,61 * 1680}{1000} \\ Q &= 568,87 \text{ kJ}\end{aligned}$$

ETAPA 5

Já calculado com resultado de 2506,99 kJ.

ETAPA 6

Aumento de temperatura de 64 para 72°C, temperatura média 68°C (341,15 K) por tempo de 300 segundos.

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= h_{ar} * A * (T_m - T_{\infty}) \\ \dot{Q} &= h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_m - T_{\infty}) \\ \dot{Q} &= 9,98 * \pi * 0,6^2 * (341,15 - 300) \\ \dot{Q} &= 462,77 \text{ W} \\ Q &= \dot{Q} * t \\ Q &= \frac{462,77 * 300}{1000} \\ Q &= 138,83 \text{ kJ}\end{aligned}$$

ETAPA 7

Já calculado com resultado de 2506,99 kJ.

ETAPA 8

Aumento de temperatura de 72 para 77°C, temperatura média 74,5°C (347,65 K) por tempo de 600 segundos.

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= h_{ar} * A * (T_m - T_{\infty}) \\ \dot{Q} &= h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_m - T_{\infty}) \\ \dot{Q} &= 9,98 * \pi * 0,6^2 * (347,65 - 300) \\ \dot{Q} &= 536,14 \text{ W} \\ Q &= \dot{Q} * t \\ Q &= \frac{536,14 * 600}{1000} \\ Q &= 321,68 \text{ kJ}\end{aligned}$$

ETAPA 9

Já calculado com resultado de 311,52 kJ.

ETAPA 10

Aumento de temperatura de 77 para 99°C, temperatura média 88°C (361,15 K) por tempo de 3720 segundos.

$$\dot{Q} = h_{ar} * A * (T_m - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = h_{ar} * \pi * r_i^2 * (T_m - T_{\infty})$$

$$\dot{Q} = 9,98 * \pi * 0,6^2 * (361,15 - 300)$$

$$\dot{Q} = 688,51 \text{ W}$$

$$Q = \dot{Q} * t$$

$$Q = \frac{688,51 * 3720}{1000}$$

$$Q = 2561,27 \text{ kJ}$$

TOTAL PERDAS POR PANELA ABERTA

$$Q_{total} [kJ] = 373,83 + 268,69 + 568,87 + 2506,99 + 138,83 + 2506,99 \\ + 321,68 + 311,52 + 2561,27$$

$$Q_{total} [kJ] = 9558,67 \text{ kJ} = 2,65 \text{ kWh}$$