



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GLEIDSON SILVA FIGUEIREDO

**ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS OCASIONADOS POR RESÍDUOS DE
MALTE ORIUNDOS DE UMA CERVEJARIA: UM ESTUDO DE CAMPO EM UMA
EMPRESA LOCALIZADA NO NORTE DO BRASIL**

FLORIANÓPOLIS – SC

2023

GLEIDSON SILVA FIGUEIREDO

**ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS OCACIONADOS POR RESÍDUOS DE
MALTE ORIUNDOS DE UMA CERVEJARIA: UM ESTUDO DE CAMPO EM UMA
EMPRESA LOCALIZADA NO NORTE DO BRASIL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Catarina, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

FLORIANÓPOLIS – SC

2023

Figueiredo, Gleidson Silva

ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS OCASIONADOS POR RESÍDUOS DE
MALTE ORIUNDOS DE UMA CERVEJARIA: UM ESTUDO DE CAMPO EM UMA
EMPRESA LOCALIZADA NO NORTE DO BRASIL / Gleidson Silva

Figueiredo, João Carlos Espíndola Ferreira, 2023.

123 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). 3.
Resíduo de malte. 4. Cerveja. 5. Energia térmica. I. Ferreira,
João Carlos Espíndola. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Gleudson Silva Figueiredo

**ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS OCASIONADOS POR RESÍDUOS DE
MALTE ORIUNDOS DE UMA CERVEJARIA: UM ESTUDO DE CAMPO EM UMA
EMPRESA LOCALIZADA NO NORTE DO BRASIL**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. André Ogliari, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Antônio Carlos Valdiero, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Profa. Marina Bouzon, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Henrique Simas, Ph.D.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
Orientador

Florianópolis, junho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Dedico essa conquista aos meus pais, fonte inesgotável de inspiração e sabedoria.

*“Cada um de nós compõe a sua história
E cada ser em si
Carrega o dom de ser capaz
E ser feliz”*

(Almir Sater, 1992)

RESUMO

A cerveja é uma bebida de ampla produção e consumo mundial, sendo cada vez mais apreciada e popularizada ao longo das gerações sociais. O potencial gerador de resíduos no seu processo produtivo pode representar impactos ambientais significativos, principalmente se o tratamento e a destinação não forem adequados, podendo oportunizar também, em contrapartida, uma redução nos custos industriais quando bem reaproveitados. Assim, o presente estudo teve como objetivo quantificar e analisar o volume de resíduo de malte produzido e gerenciado por uma cervejaria localizada na região norte do Brasil, com o escopo de mensurar os impactos ambientais ocasionados pelo seu descarte incorreto, além de propor a viabilidade de reaproveitamento deste resíduo como uma fonte energética, alternativa e econômica na fabricação de cerveja, uma vez que a empresa analisada possui grandes dispêndios com o uso de Gás de Petróleo Liquefeito (GLP) na alimentação das caldeiras em seu processo industrial. Para calcular a viabilidade de utilização energética do resíduo de malte, foi realizada uma caracterização físico-química de algumas amostras fornecidas pela cervejaria. Em relação aos danos ecossistêmicos, optou-se em realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do processo produtivo da cerveja para viabilizar a quantificação dos impactos ambientais causados pelo processo de fabricação. Com relação à geração de energia térmica, estimou-se que a quantidade de bagaço de malte seco gerada pela cervejaria é capaz de suprir aproximadamente 60% do atual gasto energético em seu ciclo industrial. No que tange os impactos ambientais, o resíduo de malte gerado na produção de cerveja pode causar impactos ambientais como a contaminação do solo e da água, e a emissão de gases de efeito estufa, como o metano. Além disso, o resíduo pode contribuir para a eutrofização de corpos d'água, o que pode levar ao desequilíbrio do ecossistema aquático e à redução da qualidade da água. No entanto, a reutilização do resíduo de malte pode ser uma alternativa para reduzir esses impactos, por meio da compostagem, produção de ração animal e geração de energia térmica.

Palavras-Chave: Produção sustentável; Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Cerveja; Resíduo de malte; Impactos ambientais; Energia térmica.

ABSTRACT

Beer is a drink widely produced and consumed worldwide, being increasingly appreciated and popularized throughout social generations. The potential generation of waste in its production process can represent significant environmental impacts, especially if treatment and disposal are not adequate. On the other hand, it may provide opportunities for reducing industrial costs when properly reused. Thus, the present study aimed to quantify and analyze the volume of malt waste produced and managed by a brewery located in the northern region of Brazil, with the scope of measuring the environmental impacts caused by its incorrect disposal. Also, it is proposed the feasibility of reuse of this waste as an energy source, alternative and economical in the manufacture of beer, since the analyzed company has large expenses with the use of Liquefied Petroleum Gas (LPG) in feeding the boilers in its industrial process. In order to calculate the viability of energy use of malt residue, a physical-chemical characterization of some samples provided by the brewery was carried out. Regarding ecosystem damage, it was decided to carry out the Life Cycle Assessment (LCA) of the beer production process to enable the quantification of the environmental impacts caused by the manufacturing process. Regarding the generation of thermal energy, it is estimated that the amount of dry malt bagasse generated by the brewery is capable of supplying approximately 60% of the current energy expenditure in its industrial cycle. With regard to environmental impacts, the malt residue generated in the production of beer can cause environmental impacts such as soil and water contamination, and the emission of greenhouse gases, such as methane. In addition, the residue can contribute to the eutrophication of water bodies, which can lead to an imbalance in the aquatic ecosystem and a reduction in water quality. However, the reuse of malt residue can be an alternative to reduce these impacts, through composting, production of animal feed and generation of thermal energy.

Keywords: Sustainable production; Life Cycle Assessment (LCA); Beer; Malt residue; Environmental impacts; Thermal energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Cevada de duas fileiras; (b) Cevada de seis fileiras	20
Figura 2: Resumo do processo cervejeiro	22
Figura 3: Diagrama Borbolet	34
Figura 4: Etapas para a construção da ACV	41
Figura 5: Relação inventário x impactos gerados	42
Figura 6: Forno mufla	53
Figura 7: Analisador elementar	54
Figura 8: Bomba Calorimétrica C-200	54
Figura 9: Produção de cerveja e resíduo de malte no ano de 2021	65
Figura 10: Secador de tambor rotativo	70
Figura 11: Caldeira FAM	70
Figura 12: Relação entre as propostas de uso dos combustíveis e o uso atual	71
Figura 13: Relação entre as propostas de uso dos combustíveis e a quantidade de biomassa seca produzida pela empresa	72
Figura 14: Limites do sistema ACV	79
Figura 14: Resultados de impactos por processos	89
Figura 15: Contribuição do esgotamento abiótico	90
Figura 16: Contribuição do esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	91
Figura 17: Contribuição com aquecimento global	91
Figura 18: Contribuição para a depleção da camada de ozônio	92
Figura 19: Contribuição para oxidação fotoquímica	93
Figura 20: Contribuição para acidificação	94
Figura 21: Contribuição para eutrofização	95
Figura 22: Contribuição dos impactos do processo de maltagem	97
Figura 23: Contribuição para o processo de cozimento	99
Figura 24: Contribuição de impacto do processo de fermentação	100
Figura 25: Contribuição de impacto do processo de maturação	102
Figura 26: Contribuição de impacto do processo de filtração	103
Figura 27: Contribuição de impacto para o processo de envase	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Categorias e uso de botijões de GLP	56
Tabela 2: Análise imediata do bagaço de malte	61
Tabela 3: Análise imediata de resíduos da agroindústria	63
Tabela 4: Análise elementar do bagaço de malte seco in natura	63
Tabela 5: Comparação entre o teor de voláteis e o PCS do bagaço de malte e outras biomassas	64
Tabela 6: Produção de cerveja de bagaço de malte por mês	66
Tabela 7: Consumo e custos mensais de GLP	67
Tabela 8: Massa de vapor produzida a partir da queima de GLP	68
Tabela 9: Simulação da quantidade de biomassa necessária para suprir o gasto energético da empresa (2021)	68
Tabela 10: Gasto com GLP utilizando a proposta 1	73
Tabela 11: Gasto com GLP de acordo com a proposta 2	73
Tabela 12: Preço do equipamento	74
Tabela 13: Amortização da proposta 1	74
Tabela 14: Amortização da proposta 2	74
Tabela 15: Dados para o cálculo do payback descontado do secador rotativo.....	75
Tabela 16: Payback descontado do secador rotativo	77
Tabela 17: Inventário de malte de cevada baseado em 0,10 kg de malte.....	83
Tabela 18: Inventário de cozimento baseado em 0,60 kg de mosto	84
Tabela 19: Inventário de fermentação baseado em 0,55 kg da primeira cerveja.....	85
Tabela 20: Inventário de maturação baseado em 0,52 kg da primeira cerveja.....	85
Tabela 21: Inventário de filtração baseado em 0,32 kg de cerveja filtrada	86
Tabela 22: Inventário de fermentação baseado em 0,33 kg de cerveja embalada.....	86
Tabela 23: Fatores de caracterização e unidades de impacto	87
Tabela 24: Resultados da caracterização global da ACV	88
Tabela 25: Resultados de caracterização para 0,12 kg de cevada	96
Tabela 26: Resultados de caracterização do processo de maltagem de cevada para a produção de 0,10 kg de malte.....	96
Tabela 27: Resultados de caracterização de 0,60 kg de mosto.....	98
Tabela 28: Resultados de caracterização de 0,55 kg da primeira cerveja	99
Tabela 29: Resultados de caracterização de 0,52 kg de cerveja maturada	100
Tabela 30: Resultados de caracterização de 0,31 kg de cerveja filtrada	103
Tabela 31: Resultados de caracterização de 0,33 kg de cerveja envasada	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Questionário sobre o descarte do resíduo.....	55
Quadro 2: Propostas de configuração energética	57

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

CFC - Clorofluorocarbono

GEE - Gás de Efeito Estufa

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

HCFC - Hidroclorofluorocarbonos

LACBIO - Laboratório de Caracterização de Biomassa

PCI - Poder Calórico Inferior

PCS - Poder Calórico Superior

RUC - Resíduo mido de Cervejaria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMÁTICA	17
1.2 JUSTIFICATIVA	18
1.3 OBJETIVOS	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 CEVADA	20
2.2 CEVADA PARA A PRODUÇÃO DO MALTE	20
2.3 DETALHAMENTO DA PRODUÇÃO DE CERVEJA	21
2.3.1 Matéria-prima	22
2.3.2 Moagem	23
2.3.2.1 Fundamentos da moagem	23
2.3.2.2 Tipos de moinhos	23
2.3.2.3 Tamanho de moagem	23
2.3.2.4 Efeitos da moagem na cerveja	24
2.3.3 Mosturação	24
2.3.3.1 Fundamentos da mosturação	24
2.3.3.2 Fases da mosturação	24
2.3.3.3 Parâmetros da mosturação	25
2.3.3.4 Efeitos da mosturação na cerveja	25
2.3.4 Filtração	26
2.3.5 Fervura	27
2.3.5.1 Tempo de fervura	27
2.3.5.2 Temperatura de fervura	27
2.3.5.3 Adição de lúpulo	27
2.3.5.4 Evaporação	27
2.3.6 Resfriamento	28
2.3.6.1 Temperatura de resfriamento	28
2.3.6.2 Velocidade de resfriamento	28
2.3.6.3 Contaminação	28
2.3.7 Fermentação	28
2.3.7.1 Tipo de levedura	29
2.3.7.2 Temperatura	29
2.3.7.3 Tempo de fermentação	29
2.3.8 Maturação	29

2.3.8.1 Tipo de tanque	30
2.3.8.2 Temperatura.....	30
2.3.8.3 Tempo de maturação	30
2.3.8.4 Processos de clarificação e carbonatação	30
2.3.9 Envase.....	31
2.3.9.1 Tipos de recipientes	31
2.3.9.2 Higienização	31
2.3.9.3 Carbonatação	31
2.3.9.4 Controle de qualidade.....	32
2.4 SUBPRODUTO DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA	32
2.5 ECONOMIA CIRCULAR	33
2.5.1 Butterfly Diagram.....	34
2.5.2 Economia circular em cervejarias.....	37
2.5.2.1 Resíduo de malte como energia térmica na economia circular em cervejarias	38
2.6 RESÍDUO DE MALTE: REAPROVEITAMENTO COMO BIOCOMBUSTÍVEL	39
2.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	40
2.7.1 Conceito.....	40
2.7.2 Fases da ACV	40
2.7.3 Categorias de impacto	42
2.7.3.1 Esgotamento abiótico	43
2.7.3.2 Aquecimento global.....	44
2.7.3.3 Depleção da camada de ozônio	44
2.7.3.4 Oxidação fotoquímica.....	45
2.7.3.5 Acidificação.....	45
2.7.3.6 Eutrofização.....	45
2.7.4 ACV aplicada na produção de cerveja	46
2.8 IMPACTOS AMBIENTAIS DO RESÍDUO DE MALTE NO PROCESSO CERVEJEIRO	47
2.8.1 Emissão de gases de efeito estuda	47
2.8.2 Eutrofização.....	48
2.8.3 Contaminação do solo	48
2.8.4 Estudos aplicados	49
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1 TIPO DE ESTUDO	51
3.2 PROCESSO DE COLETA DE DADOS.....	51

3.3 MATÉRIA-PRIMA	52
3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO DE MALTE	52
3.4.1 Análise imediata	52
3.4.2 Análise Elementar da Biomassa	53
3.4.3 Poder Calorífico Superior (PCS)	54
3.5 VOLUME DE RESÍDUOS DE MALTE E FORMA DE DESCARTE	54
3.5.1 Cálculo da geração de resíduos de malte.....	54
3.5.2 Forma de descarte.....	55
3.6 VIABILIDADE DA REUTILIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MALTE NA PRODUÇÃO DE CERVEJA.....	55
3.6.1 Configuração energética atual	56
3.6.2 Configuração energética proposta	56
3.6.3 Cálculo da transferência de calor entre a fornalha e caldeira.....	57
3.6.4 Cálculo do Poder Calorífico Inferior do Bagaço de Malte.....	58
3.6.5 Cálculo da geração de bagaço de malte seco.....	58
3.6.6 Cálculo do consumo de bagaço de malte seco	58
3.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CERVEJA.....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO BAGAÇO DE MALTE	61
4.2 ANÁLISE ELEMENTAR DO BAGAÇO DE MALTE	63
4.3 PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO BAGAÇO DE MALTE <i>IN NATURA</i>	64
4.3.1. Poder calorífico inferior do bagaço de malte.....	64
4.4. ESTUDO DA VIABILIDADE ENERGÉTICA.....	65
4.4.1 Produção de cerveja e bagaço de malte úmido.....	65
4.4.2. Consumo de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP).....	66
4.4.3. Geração de bagaço seco.....	67
4.4.4 Massa de vapor produzida pela queima de GLP	68
4.4.5. Consumo de bagaço de Malte seco.....	68
4.5 PROPOSTA PARA O USO DO BAGAÇO DE MALTE	69
4.5.1 Proposta de uso dos combustíveis	70
4.6 VIABILIDADE DE EXECUÇÃO DO PROJETO	73
4.6.1 Payback Descontado.....	75
4.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL	78
4.7.1 Objetivos e escopo.....	78
4.7.1.1 Objetivos.....	78

4.7.1.2 Escopo	78
4.7.1.3 Descrição do processo geral de fabricação da cerveja	78
4.7.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida	82
4.7.2.1 Descrição dos dados do inventário	83
4.7.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	87
4.7.3.1 Seleção das categorias de impacto.....	87
4.7.3.2 Resultados da caracterização por categoria de impacto	88
5 CONCLUSÃO.....	106
5.1 VIABILIDADE DO BAGAÇO DE MALTE COMO ENERGIA TÉRMICA.....	106
5.2 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA CERVEJA.....	106
5.3 ECONOMIA CIRCULAR	107
5.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DO RESÍDUO DE MALTE	108
5.5 GERENCIAMENTO ADEQUADO DO RESÍDUO	109
5.6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	110
REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

A cerveja é considerada uma bebida milenar que retém uma grande relevância econômica, política, religiosa, social, cultural e gastronômica, ao longo da história humana (SOARES, 2017). No Brasil, ela é definida e regulamentada pela Lei Federal nº 8.918/94 e pelo Decreto 2.314/978 9, como uma bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro, oriundo este do malte de cevada e água potável, por ação da levedura, com adição de lúpulo (BRASIL, 1977).

Em 2020, o Brasil chegou a mais de 1.300 cervejarias registradas, distribuídas por todas unidades da federação, um crescimento de 14,4% em relação a 2019. Juntamente ao aumento do número de cervejarias, houve o crescimento do mercado de matérias-primas associadas à cerveja no país, que, com a importação de maltes e lúpulos, aumentou a gama de insumos à disposição dos cervejeiros e as possibilidades de lançamento de novos sabores de cerveja (MAPA, 2020).

A indústria cervejeira destaca-se no setor de bebidas por contribuir de forma significativa para o crescimento econômico nacional. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (ABRACERVA, 2021), a produção nacional é de aproximadamente 14 bilhões de litros por ano, e representa 1,6% do Produto Interno Bruto (PIB), com faturamento de R\$ 100 bilhões/ano e geração de 2,7 milhões de empregos.

Outro aspecto a ser observado é o crescimento na cultura de fabricação de cervejas artesanais e pequenas cervejarias no Brasil, aliado ao crescimento do mercado consumidor deste tipo de bebida no país (ARAÚJO, 2019). Tendo em vista esta tendência de valorização e crescimento do mercado de cervejas artesanais, surgem diversas possibilidades de abertura de negócios relacionados a este nicho de mercado.

1.1 PROBLEMÁTICA

A indústria cervejeira produz o líquido em grandes escalas para atender o mercado consumidor, gerando grandes quantidades de resíduos. Dentre os resíduos úmidos de cervejarias (RUC) industriais, o bagaço de malte representa 85% do total de subprodutos gerados, sendo considerado o mais importante do processo de fabricação da cerveja (AZEVEDO, 2015).

O mau gerenciamento e descarte do resíduo de malte pelas cervejarias é um problema ambiental significativo. O resíduo de malte é gerado durante o processo de produção de cerveja,

e é composto principalmente por cascas de grãos e outros materiais vegetais. Este resíduo tem um elevado teor de umidade e é altamente perecível, o que pode torná-lo um desafio para o armazenamento e descarte adequado.

Se o resíduo de malte não for gerenciado adequadamente, ele pode causar impactos negativos ao meio ambiente. Por exemplo, se ele for descartado em aterros sanitários, o elevado teor de umidade do resíduo pode contribuir para a produção de chorume, um líquido poluente que pode contaminar solos e corpos d'água próximos. Outro problema é que, se descartado inadequadamente, ele pode se decompor e produzir metano, um gás de efeito estufa mais potente que o dióxido de carbono, contribuindo para o aquecimento global e a mudança climática (SOUZA, 2017).

Além dos problemas com o mau gerenciamento desse resíduo, Gilson (2018) descreve que há a questão do uso do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) nas cervejarias, o que pode causar problemas tanto econômicos quanto ambientais. Em relação aos custos, o GLP é uma fonte de energia cara, cujos preços podem sofrer flutuações significativas no mercado. Isso pode impactar diretamente os custos de produção das cervejarias, que utilizam o GLP como fonte de energia para as caldeiras que produzem o vapor utilizado no processo de fabricação da cerveja.

As cervejarias também podem enfrentar problemas de fornecimento de GLP em momentos de alta demanda, o que pode afetar a continuidade do processo de produção. Em relação ao meio ambiente, a queima do GLP gera emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, que contribuem para o aquecimento global. Além disso, a extração e produção de GLP envolvem processos que podem gerar impactos ambientais negativos, como a contaminação do solo e da água.

1.2 JUSTIFICATIVA

A indústria de cervejaria é uma das maiores geradoras de resíduos de malte, com estimativas indicando que são produzidas aproximadamente 6 milhões de toneladas de resíduos de malte por ano em todo o mundo (BREWERS ASSOCIATION, 2020). A importância de alternativas sustentáveis para o descarte do resíduo de malte pelas cervejarias está diretamente relacionada ao impacto ambiental causado pelo mau gerenciamento desses resíduos. De acordo com Silva et al. (2020), o descarte inadequado de resíduos de malte pode contribuir para a poluição do solo e da água, bem como para a emissão de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, é fundamental que as cervejarias encontrem alternativas sustentáveis para o descarte do resíduo de malte, a utilização do malte como fonte biocombustível. Segundo Johnson e Taconi (2018), o uso do malte como fonte de energia renovável surge como uma alternativa viável, podendo gerar benefícios econômicos e ambientais para as cervejarias. Ao utilizar o bagaço de malte como biocombustível, as cervejarias podem reduzir significativamente seus custos com gás liquefeito de petróleo (GLP), que é amplamente utilizado como fonte de energia para as caldeiras no processo de fabricação da cerveja.

Mais ainda, a utilização do bagaço de malte como biocombustível pode contribuir para a redução do impacto ambiental das cervejarias. De acordo com um estudo realizado por Smith e Jones (2019), a queima de GLP é responsável por 25% das emissões de gases de efeito estufa das cervejarias. Portanto, ao substituir o GLP pelo bagaço de malte como fonte de energia, há um potencial de redução nas emissões desses gases.

Assim, este estudo justifica-se pela importância de buscar alternativas sustentáveis ao descarte do resíduo de malte pelas cervejarias, a fim de minimizar o impacto ambiental negativo causado pelo mau gerenciamento desses resíduos, bem como gerar oportunidades de inovação e negócios na economia circular.

1.3 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo geral investigar os impactos ambientais decorrentes do resíduo de malte gerado no processo produtivo de uma cervejaria localizada no norte do Brasil. Além do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar a viabilidade de reutilização do bagaço de malte como fonte de energia térmica, visando à sua utilização como uma alternativa sustentável e econômica;
- Realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da cerveja tipo Lager, analisando todas as etapas do processo produtivo, desde a produção da matéria-prima até o descarte do resíduo final, a fim de identificar e quantificar os potenciais danos ambientais associados;
- Identificar a forma atual de descarte do resíduo de malte e propor alternativas viáveis para o seu reuso, visando a redução do impacto ambiental e à promoção da economia circular.
- Realizar a análise imediata e determinar o Poder Calorífico Superior (PCS) do bagaço de malte in natura, a fim de avaliar suas propriedades como fonte de geração de calor;
- Propor um regime produtivo mais econômico para a cervejaria, por meio da substituição parcial do gás liquefeito de petróleo (GLP) pelo bagaço de malte como fonte de geração de calor, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

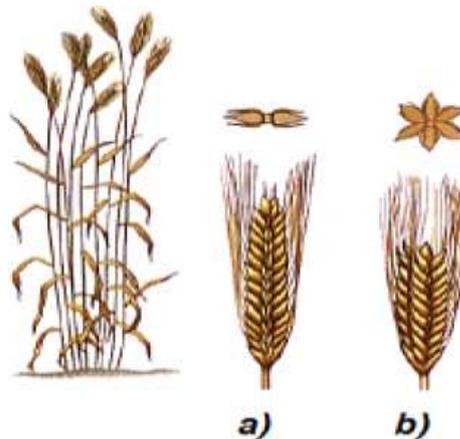
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CEVADA

A cevada é uma gramínea cerealífera, que pertence à espécie *Hordeum vulgare*, e divide-se em grupos de duas e seis fileiras (Figura 1). Nas cevadas de seis fileiras, todas as flores de cada nó do ráquis são férteis, enquanto que nas de duas fileiras, apenas a flor da espiguetta central é fértil e as laterais são estéreis (SILVA, 2016).

As cevadas de seis fileiras são consideradas forrageiras, ou seja, produzem abundantemente massa verde e seus grãos apresentam normalmente maiores teores de proteínas, tornando-as apropriadas para a alimentação animal. Globalmente, 70% da produção de cevada é usada como forragem animal, enquanto 30% se destina como fonte de material fermentável para a produção de cervejas e algumas bebidas destiladas, como o uísque e a vodka (BONOMO, 2017).

Figura 1: (a) Cevada de duas fileiras; (b) Cevada de seis fileiras



Fonte: Geller, 2014.

2.2 CEVADA PARA A PRODUÇÃO DO MALTE

A cevada é o quarto cereal mais importante no mercado, depois do trigo, milho e arroz. A área plantada de cevada no Brasil é de aproximadamente 131 mil hectares (CONAB, 2020). Embora tenha diversas finalidades, os grãos de cevada têm sido destinados principalmente à indústria cervejeira, no preparo do malte, onde alcançam os melhores preços, já que reúnem várias características que justificam sua utilização: rica em amido, contém enzimas, possui uma casca que confere proteção ao grão durante a malteação, e dá o aroma e sabor característicos do produto (ZUPPARDO, 2010).

Quando a cevada é recebida na maltaria, são realizados procedimentos de controle de qualidade manuais (verificação da cor, cheiro, aspecto da casca e presença de impurezas) e laboratoriais (calibragem, peso hectolítrico, teor de umidade, capacidade germinativa), assim como procedimentos de preparação para produção, nomeadamente remoção de impurezas/contaminantes (e.g. poeiras, areia, objetos metálicos, sementes de ervas daninhas), classificação dos grãos com base no tamanho, secagem e armazenagem até a sua utilização (MAYER, 2017).

Além disso, o grão é utilizado na industrialização de bebidas destiladas, na composição de farinhas ou flocos para panificação, na produção de medicamentos e na formulação de produtos dietéticos e de substitutos de café. A cevada é ainda empregada em alimentação animal como forragem verde e na fabricação de ração. No Brasil, a malteação é o principal uso econômico da cevada, já que o país produz apenas 30% da demanda da indústria cervejeira (VIEIRA e BRAZ, 2019).

A cevada cultivada com objetivo comercial é dividida em dústicas e hexásticas. A primeira apresenta duas carreiras de grãos, e a segunda tem uma espiga de seis carreiras de grãos, sendo a dústica a mais utilizada pela indústria cervejeira, pois apresenta maior conteúdo de amido (SILVA NETO et al., 2016).

Com isso, a cevada torna-se efetivamente ingrediente da indústria cervejeira após o processo de malteação, originando o malte. A malteação é um processo controlado de germinação da cevada, em que o grão é embebido em água e mantido a 10-12°C, produzindo um complexo de enzimas capazes de converter o amido do cereal em açúcares fermentescíveis, além de fornecer aminoácidos em quantidades adequadas e outros nutrientes para a ação da levedura (ALENCAR et al., 2017).

2.3 DETALHAMENTO DA PRODUÇÃO DE CERVEJA

O processo produtivo da cerveja envolve a moagem dos grãos de cevada, a mistura com água quente na mostura, a filtração, a fervura com lúpulo, o resfriamento, a fermentação com leveduras, a maturação, a carbonatação, a filtração e envase em garrafas, latas ou barris (Figura 2). Variações podem ocorrer no processo de acordo com o tipo de cerveja produzido e as preferências do cervejeiro. Essas etapas são complexas e exigem conhecimentos técnicos específicos para sua realização adequada (OLIVEIRA, 2013).

Figura 2: Resumo do processo cervejeiro



Fonte: Oliveira, 2013

2.3.1 Matéria-prima

A cerveja é produzida a partir de quatro ingredientes básicos: água, malte, lúpulo e levedura. A água é um dos principais componentes da cerveja e é responsável por 90% da bebida final. A qualidade da água é um fator fundamental na produção de cerveja, pois afeta diretamente o sabor, aroma e aparência da bebida (AMERICAN SOCIETY OF BREWING CHEMISTS, 2019).

O malte é o ingrediente responsável pela cor, aroma e sabor da cerveja. É produzido a partir da cevada, que é germinada e seca em um processo conhecido como malteação. Durante esse processo, as enzimas presentes no malte convertem o amido em açúcares fermentáveis, que serão utilizados posteriormente pela levedura durante a fermentação (KUNZE, 2018).

O lúpulo é utilizado na produção de cerveja como um agente de amargor e aroma. Além disso, o lúpulo possui propriedades antibacterianas e antioxidantes, que ajudam a conservar a cerveja (BAMFORTH, 2018).

Por fim, a levedura é responsável pela fermentação do açúcar presente no mosto, transformando-o em álcool e dióxido de carbono. Existem dois tipos principais de leveduras utilizadas na produção de cerveja: a *Saccharomyces cerevisiae*, utilizada na produção de

cervejas tipo *Ale*, e a *Saccharomyces pastorianus*, utilizada na produção de cervejas tipo *Lager* (SPEIGHT, 2019).

2.3.2 Moagem

A moagem é uma etapa importante no processo de fabricação de cerveja, que consiste em reduzir o tamanho dos grãos de malte a fim de aumentar a eficiência da extração dos açúcares fermentáveis durante a brassagem (KOSTRZEWA, 2012).

2.3.2.1 Fundamentos da moagem

A moagem é um processo mecânico que tem como objetivo reduzir o tamanho dos grãos de malte de forma a expor o endosperma, onde se encontra o amido, e aumentar a superfície de contato com a água durante a brassagem. A moagem também ajuda a liberar enzimas do malte que irão hidrolisar o amido em açúcares fermentáveis (FANG, 2016).

O tamanho dos grãos de malte influencia na eficiência da extração dos açúcares fermentáveis, e uma moagem adequada é essencial para atingir uma boa eficiência de brassagem. No entanto, a moagem excessiva pode resultar em uma extração excessiva de compostos indesejados, como taninos e fenóis, que podem afetar o sabor e a qualidade da cerveja (BIEHL, 2018).

2.3.2.2 Tipos de moinhos

Existem dois tipos principais de moinhos utilizados na moagem do malte na produção de cerveja: o moinho de rolos e o moinho de martelos. O moinho de rolos é mais comum, e consiste em dois rolos que giram em velocidades diferentes para quebrar e moer os grãos. Já o moinho de martelos utiliza uma série de martelos que giram em alta velocidade para quebrar os grãos (TONIOLO, 2016).

2.3.2.3 Tamanho de moagem

O tamanho ideal de moagem depende do tipo de malte utilizado e do tipo de cerveja que se deseja produzir. Geralmente, o tamanho de moagem varia entre 0,5 e 1,5 mm para o malte base, e entre 1,5 e 3,0 mm para o malte especial. A moagem muito fina pode resultar em uma extração excessiva de compostos indesejados, enquanto a moagem muito grossa pode resultar em uma baixa eficiência de brassagem (FANG, 2016).

2.3.2.4 Efeitos da moagem na cerveja

A moagem pode afetar vários parâmetros da cerveja, incluindo a eficiência de brassagem, a qualidade do mosto, o teor de açúcares fermentáveis, a cor, o sabor e a estabilidade da cerveja. Uma moagem inadequada pode resultar em uma extração insuficiente ou excessiva de açúcares fermentáveis, o que pode afetar o teor alcoólico e o sabor da cerveja (BIEHL, 2018).

Além disso, a moagem inadequada pode afetar a qualidade do mosto, levando a problemas como entupimento do filtro, baixa clarificação e turbidez da cerveja. A moagem excessiva pode aumentar a extração de compostos indesejados, como taninos e fenóis, que podem afetar o sabor e a qualidade da cerveja (FANG, 2016).

2.3.3 Mosturação

A mosturação é a etapa do processo de fabricação de cerveja que consiste na mistura do malte moído com água quente, a fim de hidrolisar os açúcares fermentáveis presentes no malte e formar o mosto, que será fermentado para produzir a cerveja (SILVA, 2017).

2.3.3.1 Fundamentos da mosturação

Durante a mosturação, o malte moído é misturado com água quente em uma cuba de mosturação, formando uma mistura conhecida como mosto. Nessa etapa ocorrem reações enzimáticas que convertem o amido presente no malte em açúcares fermentáveis, como a maltose e a glicose (KUNZE, 2013).

Os principais tipos de enzimas envolvidos na mosturação são as amilases, que hidrolisam o amido em açúcares fermentáveis. A temperatura e o pH da mistura são fatores críticos para a atividade dessas enzimas, sendo que diferentes faixas de temperatura são adequadas para diferentes tipos de amilases (BRIGGS, 2019).

2.3.3.2 Fases da mosturação

A mosturação é geralmente dividida em três fases principais: a sacarificação, a clarificação e a lavagem. Na fase de sacarificação, a temperatura da mistura é mantida em um intervalo adequado para a atividade das amilases, geralmente entre 62°C e 72°C, dependendo do tipo de cerveja que se deseja produzir. Nessa fase ocorre a conversão do amido em açúcares fermentáveis (KUNZE, 2013).

Na fase de clarificação, a temperatura é elevada para cerca de 76°C, a fim de inativar as enzimas e favorecer a sedimentação dos resíduos sólidos presentes na mistura. Nessa fase é

importante manter a mistura em repouso por um período suficiente para que os sólidos sedimentem (KUNZE, 2013).

Na fase de lavagem, a mistura é filtrada para separar o mosto dos resíduos sólidos e lavar o malte residual com água quente, a fim de extrair o máximo de açúcares fermentáveis e obter um mosto com maior eficiência (KUNZE, 2013).

2.3.3.3 Parâmetros da mosturação

Os principais parâmetros da mosturação são a temperatura, o pH, a relação água/malte e o tempo de repouso. A temperatura e o pH são importantes para a atividade das enzimas e a conversão do amido em açúcares fermentáveis, enquanto a relação água/malte e o tempo de repouso afetam a eficiência de extração dos açúcares fermentáveis (PRIEST, 2017).

2.3.3.4 Efeitos da mosturação na cerveja

A) Teor alcoólico

O teor alcoólico da cerveja está diretamente relacionado ao teor de açúcares fermentáveis presentes no mosto. Durante a mosturação, as enzimas convertem o amido presente no malte em açúcares fermentáveis, como a maltose e a glicose. Um mosto com alto teor de açúcares fermentáveis resultará em uma cerveja com maior teor alcoólico (OLIVEIRA, 2016).

B) Cor

A cor da cerveja é influenciada pela presença de compostos conhecidos como melanoidinas, que são formados durante a reação de Maillard entre os açúcares e os aminoácidos presentes no malte. A temperatura e o tempo de mosturação podem afetar a formação de melanoidinas e, portanto, a cor da cerveja final (PRIEST, 2017).

C) Sabor e aroma

A mosturação pode afetar significativamente o sabor e o aroma da cerveja. Durante a mosturação, são formados compostos voláteis que contribuem para o aroma da cerveja. Além disso, a temperatura e o pH da mosturação podem afetar a atividade das enzimas e, portanto, a proporção de açúcares fermentáveis e não fermentáveis presentes no mosto. Isso pode afetar o sabor final da cerveja, tornando-a mais doce ou mais seca, por exemplo (OLIVEIRA, 2016).

D) Estabilidade

A estabilidade da cerveja é influenciada pela presença de proteínas e polissacarídeos presentes no mosto. Durante a mosturação ocorrem reações que podem levar à formação de polissacarídeos que podem afetar a estabilidade da cerveja, causando turbidez ou instabilidade coloidal. Além disso, a presença de proteínas pode afetar a formação de espuma e a estabilidade da cerveja ao longo do tempo (PRIEST, 2017).

Em resumo, a mosturação é uma etapa crítica na produção de cerveja que pode afetar vários aspectos da cerveja final, desde o teor alcoólico até a cor, o sabor, o aroma e a estabilidade. Por isso, é importante controlar cuidadosamente os parâmetros da mosturação, como temperatura, pH, relação água/malte e tempo de repouso, a fim de obter um mosto de alta qualidade e produzir uma cerveja excelente (PRIEST, 2017).

2.3.4 Filtração

Na filtração o mosto é clarificado e estabilizado, removendo-se as partículas sólidas indesejáveis e os resíduos do processo de mosturação. A filtração pode ser realizada em vários estágios do processo de produção de cerveja, incluindo logo após a fervura do mosto, após a fermentação ou após a maturação (KNIPE, 2018).

A filtração pode ser feita por diferentes métodos, como: por gravidade, por pressão, por vácuo e por centrifugação. Na filtração por gravidade, o mosto é passado por camadas de materiais filtrantes, como areia, cascalho, carvão ativado e papel de filtro, para remover as partículas sólidas suspensas (KOOP, 2014).

Na filtração por pressão, o mosto é forçado através de um meio filtrante, geralmente uma membrana ou placa, sob pressão. A filtração por vácuo usa vácuo para passar o mosto através do meio filtrante, enquanto a filtração por centrifugação usa a força centrífuga para separar as partículas sólidas do líquido (MARTINS, 2017).

A filtração na produção de cerveja tem vários objetivos, como melhorar a clareza da cerveja, remover as impurezas e os sabores indesejáveis, reduzir a turbidez, estabilizar a cerveja e prolongar a vida útil do produto final. Além disso, a filtração também ajuda a melhorar a eficiência do processo, reduzindo a perda de líquidos e aumentando o rendimento (KNIPE, 2018).

2.3.5 Fervura

A fervura é uma etapa que afeta diretamente a qualidade final da bebida. Nesta etapa, o mosto (solução açucarada de malte) é fervido com lúpulo, o que contribui para o desenvolvimento de sabor, aroma e amargor da cerveja, além de proporcionar a esterilização do mosto e a coagulação de proteínas (BASÍLIO, 2014).

A seguir estão discutidos os principais aspectos relacionados à fervura na fabricação de cerveja, incluindo a influência do tempo, da temperatura, da adição de lúpulo e da evaporação.

2.3.5.1 Tempo de fervura

O tempo de fervura é uma das variáveis mais importantes na produção de cerveja, uma vez que afeta diretamente o sabor, aroma e amargor da bebida. Geralmente, a fervura dura entre 60 e 90 minutos, dependendo do estilo de cerveja desejado. Durante esse tempo, ocorrem diversas reações químicas que contribuem para a formação de compostos de sabor e aroma, além da coagulação de proteínas e da esterilização do mosto (SCHMIDT, 2011).

2.3.5.2 Temperatura de fervura

A temperatura de fervura é outro fator crítico no processo de fabricação de cerveja. Normalmente, a fervura é realizada a uma temperatura entre 100°C e 105°C, dependendo da altitude do local onde a cerveja é produzida. A temperatura afeta diretamente o processo de evaporação, que por sua vez afeta a concentração de compostos de sabor e aroma no mosto (BASÍLIO, 2014).

2.3.5.3 Adição de lúpulo

A adição de lúpulo durante a fervura é uma das principais técnicas utilizadas para desenvolver o sabor, aroma e amargor da cerveja. O lúpulo contém compostos chamados de alfa-ácidos, que são responsáveis pelo amargor da cerveja, e compostos voláteis, que contribuem para o aroma. A adição de lúpulo é geralmente feita em duas etapas: uma adição inicial, que contribui para o amargor, e uma adição final, que contribui para o aroma (PEREIRA, 2013).

2.3.5.4 Evaporação

Durante a fervura, ocorre uma evaporação do mosto, o que aumenta a concentração de açúcares e compostos de sabor e aroma na solução. A evaporação também ajuda a concentrar os compostos de amargor do lúpulo, contribuindo para o equilíbrio entre o amargor e o sabor

da cerveja. No entanto, é importante controlar a evaporação para garantir que a concentração de açúcares no mosto seja adequada para a fermentação (PEREIRA, 2013).

2.3.6 Resfriamento

O resfriamento afeta diretamente a qualidade final da bebida. Nesta etapa, o mosto (solução açucarada de malte) é resfriado após a fervura para que possa ser fermentado pelas leveduras (NASCIMENTO, 2020).

2.3.6.1 Temperatura de resfriamento

A temperatura de resfriamento é uma das variáveis mais importantes no processo de fabricação de cerveja, uma vez que afeta diretamente a fermentação. A temperatura de resfriamento ideal depende do estilo de cerveja desejado e do tipo de levedura utilizada. Geralmente, a temperatura de resfriamento é mantida entre 10°C e 15°C, mas pode variar de acordo com o estilo de cerveja (TAKAGI, 2011).

2.3.6.2 Velocidade de resfriamento

A velocidade de resfriamento também é importante no processo de fabricação de cerveja. Um resfriamento rápido pode ajudar a evitar a contaminação do mosto por micro-organismos indesejados e a melhorar a clarificação do mosto. No entanto, um resfriamento muito rápido pode levar à formação de "flocos de frio" no mosto, o que pode afetar negativamente a qualidade final da cerveja. Por outro lado, um resfriamento lento pode aumentar o risco de contaminação e afetar a qualidade da fermentação (TAKAGI, 2011).

2.3.6.3 Contaminação

A contaminação do mosto durante o resfriamento é um risco significativo na produção de cerveja. É importante garantir que o equipamento utilizado no resfriamento esteja limpo e livre de micro-organismos indesejados. O mosto também deve ser resfriado o mais rapidamente possível para minimizar o tempo em que está exposto ao ambiente e evitar a proliferação de bactérias ou fungos (NASCIMENTO, 2020).

2.3.7 Fermentação

Na fermentação os açúcares presentes no mosto são convertidos em álcool e dióxido de carbono pela ação das leveduras. Nesta etapa, as características da cerveja são determinadas, como o teor alcoólico, o sabor, o aroma e a textura (GALLONE, 2017). A seguir serão

discutidos os principais aspectos relacionados à fermentação na fabricação de cerveja, incluindo o tipo de levedura, a temperatura, o tempo de fermentação.

2.3.7.1 Tipo de levedura

Existem diversos tipos de leveduras utilizadas na fabricação de cerveja, cada uma com suas características específicas. As leveduras podem ser divididas em dois grupos: as de baixa fermentação (*Saccharomyces pastorianus*) e as de alta fermentação (*Saccharomyces cerevisiae*). As leveduras de baixa fermentação produzem cervejas mais leves e com menor teor alcoólico, enquanto as de alta fermentação produzem cervejas mais encorpadas e com maior teor alcoólico (FARIA, 2017).

2.3.7.2 Temperatura

A temperatura de fermentação é um dos principais fatores que afetam o processo fermentativo e, conseqüentemente, a qualidade final da cerveja. A temperatura ideal para a fermentação depende do tipo de levedura utilizada e do estilo de cerveja desejado. Em geral, as leveduras de baixa fermentação trabalham em temperaturas mais baixas, entre 7°C e 13°C, enquanto as de alta fermentação trabalham em temperaturas mais altas, entre 18°C e 24°C (MARQUES, 2010).

2.3.7.3 Tempo de fermentação

O tempo de fermentação é um fator importante na fabricação de cerveja, pois afeta diretamente a qualidade final da bebida. O tempo de fermentação varia de acordo com o estilo de cerveja desejado e a temperatura de fermentação utilizada. Em geral, as cervejas de baixa fermentação requerem mais tempo de fermentação, devido às temperaturas mais baixas, enquanto as de alta fermentação requerem menos tempo (MARQUES, 2010).

2.3.8 Maturação

A maturação é uma etapa que ocorre após a fermentação, na qual a cerveja é armazenada em temperaturas baixas por um período de algumas semanas a alguns meses, dependendo do estilo de cerveja desejado. Durante a maturação, ocorrem diversas reações químicas que ajudam a aprimorar as características organolépticas da cerveja, como o aroma, sabor, textura e aparência (BITTENCOURT, 2014).

A seguir serão discutidos os principais aspectos relacionados à maturação na fabricação de cerveja, incluindo o tipo de tanque utilizado, a temperatura, o tempo de maturação e os processos de clarificação e carbonatação.

2.3.8.1 Tipo de tanque

O tipo de tanque utilizado na maturação pode influenciar na qualidade final da cerveja. Existem basicamente dois tipos de tanques de maturação: os de aço inoxidável e os de madeira. Os tanques de aço inoxidável são mais comuns e oferecem maior controle sobre a temperatura e a pressão. Já os tanques de madeira podem adicionar características sensoriais específicas à cerveja, como notas de baunilha, madeira e especiarias (RODRIGUES, 2012).

2.3.8.2 Temperatura

A temperatura de maturação é um fator crucial para o desenvolvimento das características organolépticas da cerveja. A temperatura ideal para a maturação depende do estilo de cerveja desejado e pode variar de alguns graus abaixo de zero para cervejas tipo *lager*, a temperaturas mais elevadas para cervejas tipo *ale*. Em geral, quanto mais baixa a temperatura, mais lento será o processo de maturação e mais limpa será a cerveja resultante (BITTENCOURT, 2014).

2.3.8.3 Tempo de maturação

O tempo de maturação varia de acordo com o estilo de cerveja desejado e pode variar de algumas semanas a alguns meses. Durante esse período, ocorrem diversas reações químicas que ajudam a aprimorar as características organolépticas da cerveja. Quanto mais tempo a cerveja é maturada, mais suave e equilibrada ela se torna (RODRIGUES, 2012).

2.3.8.4 Processos de clarificação e carbonatação

Durante a maturação, ocorre a clarificação da cerveja, que é o processo de remover as partículas em suspensão na bebida, deixando-a mais limpa e transparente. Isso pode ser feito por processos físicos, como decantação, filtração ou centrifugação, ou por processos químicos, como adição de clarificantes (CAVALLINI, 2016).

A carbonatação é outro processo importante que ocorre durante a maturação, e é responsável por adicionar o gás carbônico à cerveja, proporcionando a efervescência e a formação de espuma. Existem dois principais métodos de carbonatação: o natural, em que a

cerveja é carbonatada naturalmente por meio da adição de açúcares e leveduras, e o artificial, em que o gás carbônico é adicionado diretamente à cerveja (NUNES, 2018).

2.3.9 Envase

O envase é a última etapa da fabricação de cerveja antes da distribuição ao consumidor final. É a fase em que a cerveja é embalada em recipientes que variam desde garrafas e latas até barris, *kegs* e *growlers*. Nesta etapa é importante garantir que a cerveja esteja livre de qualquer contaminação, e que mantenha suas características organolépticas intactas (CUNHA, 2013).

2.3.9.1 Tipos de recipientes

Os tipos de recipientes mais comuns para o envase de cerveja são garrafas, latas e barris. Garrafas e latas são ideais para o consumo individual, enquanto que os barris são mais utilizados em bares e eventos que exigem grande quantidade de cerveja. O uso de barris tem crescido em popularidade nos últimos anos devido à facilidade de manuseio e ao menor custo em comparação às garrafas e latas (KOMMEL, 2018).

2.3.9.2 Higienização

A higienização é um aspecto fundamental na fase de envase, pois qualquer contaminação pode prejudicar a qualidade da cerveja e colocar em risco a saúde do consumidor. Os equipamentos utilizados no envase, incluindo os recipientes, devem ser limpos e sanitizados adequadamente para garantir que estejam livres de microrganismos indesejáveis. Para isso, podem ser utilizados produtos químicos específicos, como soluções de ácido peracético ou hipoclorito de sódio, além de equipamentos de limpeza, como jatos de água pressurizada (KOMMEL, 2018).

2.3.9.3 Carbonatação

A carbonatação é um processo importante no envase, pois é responsável por garantir a efervescência e a formação de espuma da cerveja. Existem dois principais métodos de carbonatação: a carbonatação natural, em que a cerveja é carbonatada naturalmente por meio da adição de açúcares e leveduras, e a carbonatação forçada, em que o gás carbônico é adicionado diretamente à cerveja. O método utilizado dependerá do tipo de cerveja, do volume de produção e do equipamento disponível.

2.3.9.4 Controle de qualidade

O controle de qualidade é um aspecto importante na fase de envase, pois garante que a cerveja esteja livre de qualquer contaminação e que mantenha suas características organolépticas intactas. Para isso, são realizados testes sensoriais e físico-químicos em amostras de cerveja retiradas aleatoriamente durante o processo de envase. Esses testes incluem análises de cor, aroma, sabor, acidez e teor alcoólico, entre outros (KRANZ, 2019).

2.4 SUBPRODUTO DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

De acordo com a Zamboni (2014), no processo cervejeiro os resíduos sólidos são gerados principalmente nas etapas de filtração, envase e tratamento de água e efluentes líquidos. Os principais resíduos gerados são: grãos, excessos de leveduras, pasta celulósica e garrafas violadas ou quebradas na etapa final do envase.

Em relação aos grãos, esses são os resíduos de maior quantidade. São resíduos oriundos do aproveitamento do conteúdo dos grãos de malte, constituídos de restos de casca e polpa dos grãos, misturados em suspensão ou dissolvidos no mosto. Embora de origem semelhante, dependendo da etapa em que são retirados do mosto, possuem características físicas e composição distintas e, portanto, são separados em três tipos: bagaço de malte, trub grosso e trub fino (COSTA, 2014).

De acordo com o primeiro levantamento de safra de grãos 2019/2020, realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), a produção brasileira está estimada em 245,8 milhões de toneladas, um aumento de 1,6%, ou seja, 3,9 milhões de toneladas a mais em relação à safra 2018/2019. Dentre esses grãos destaca-se a cevada (*Hordeum vulgare*), sendo um dos cereais mais cultivados no mundo, considerado o quinto em importância. Assim, o resíduo de cervejaria (cevada) apresenta destaque devido à abundância de oferta em razão do aumento da produção de cerveja no Brasil, que passou de 6,6 milhões de toneladas em 1997 para 7,3 milhões em 2007 (VIEIRA e BRAZ, 2019).

O bagaço de malte é gerado na filtração do mosto após a caldeira de mostura, antes da fervura. O trub grosso é retirado do *whirlpool*, na primeira filtração após o cozimento, composto de gordura vegetal e proteínas coaguladas. O *whirlpool* é o recipiente para onde é transferido o mosto fervido, após a fervura do mosto e antes da etapa da fermentação. Já o trub fino é um resíduo obtido na segunda filtração, composto de gordura vegetal, que sai misturado à terra diatomácea e parcelas de levedo (COSTA, 2014).

Tanto o trub fino como o trub grosso possuem excelentes características nutricionais e, por esta razão, são exclusivamente usados na fabricação de ração animal. Em alguns casos, estes são misturados ao bagaço de malte e, em algumas fábricas, são utilizados no preparo de novas bateladas de mosto (VALE, 2016).

Em relação ao excesso de leveduras, esses resíduos são gerados no processo de fermentação, em que essas leveduras se reproduzem, obtendo-se ao final do processo mais leveduras do que se utilizará na próxima batelada. Parte desse resíduo é utilizado no preparo de nova batelada, e o restante é vendido para a indústria alimentícia (VALE, 2016).

Durante o processo de envase são gerados dois tipos de resíduos: a pasta celulósica e as garrafas quebradas. O primeiro resíduo mencionado é resultado da remoção dos rótulos na lavagem das garrafas retornáveis, e é vendido a empresas de reciclagem de papel. Já as garrafas são vendidas para empresas de reciclagem. Nesse sentido, o bagaço de malte é o resíduo quantitativamente mais expressivo do processo cervejeiro, sendo gerados de 14 a 20 kg a cada 100 litros de cerveja produzida, e não possui um destino fixo e adequado (SANTOS et al., 2015).

2.5 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular é um modelo econômico que visa maximizar a utilização dos recursos naturais e minimizar a produção de resíduos por meio do reaproveitamento de materiais e energia, em ciclos fechados de produção e consumo. Segundo a Ellen MacArthur Foundation (2013), deve-se ter como objetivo acelerar a transição para a economia circular, tendo em vista que a economia linear atual, baseada em extração de recursos, produção, consumo e descarte, é insustentável em longo prazo.

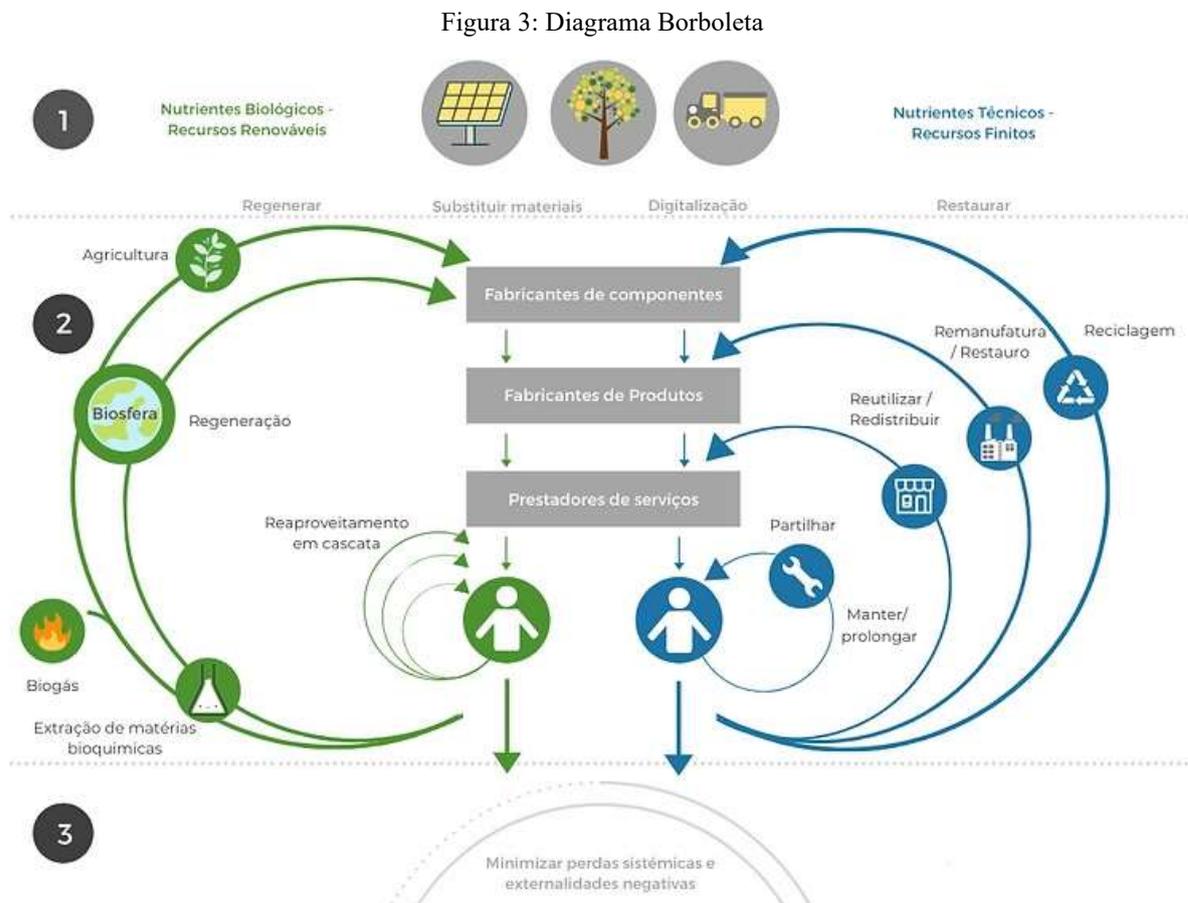
A economia circular propõe um novo paradigma de produção e consumo, em que os materiais são mantidos em ciclos de utilização, evitando a sua perda e a necessidade de extrair novos recursos. Nesse modelo, os resíduos são vistos como recursos e a sua valorização é um dos principais objetivos. A reciclagem, reutilização e remanufatura são exemplos de estratégias para maximizar a valorização dos materiais e minimizar a sua perda (BIZZO, 2014).

Além da gestão de resíduos, a economia circular envolve a otimização do uso de energia, a utilização de fontes renováveis, o projeto de produtos duráveis e reparáveis, a implementação de modelos de negócio baseados em serviços, e a adoção de sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis (ASSUMPÇÃO, 2019).

A economia circular é um conceito em constante evolução, e pode ser aplicado em diferentes setores e níveis, desde a escala individual até a escala global. É uma abordagem interdisciplinar que envolve a participação de diferentes atores, como empresas, governos, academia e sociedade civil, e exige uma mudança de mentalidade em relação ao consumo e produção de bens e serviços. A sua implementação pode gerar benefícios econômicos, sociais e ambientais, contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável (BIZZO, 2014).

2.5.1 Butterfly Diagram

O *Butterfly Diagram* ou Diagrama Borboleta (Figura 3), popularizado pela Ellen MacArthur Foundation, é uma representação visual crucial para entender a economia circular. Com a forma de uma borboleta, o diagrama divide-se em dois lados: os ciclos biológicos à esquerda e os ciclos técnicos à direita.



Fonte: Adaptado de MCDONOUGH et al, 2010

No processo de transição para a economia circular, é crucial considerar três princípios orientadores (SMITH, 2018). O primeiro princípio consiste em preservar o capital natural, garantindo uma utilização eficiente dos recursos limitados e equilibrando o aproveitamento dos

recursos renováveis (Figura 3, rótulo 1). O segundo princípio visa maximizar a utilidade dos produtos, componentes e materiais, permitindo que eles circulem na Economia pelo maior tempo possível (Figura 3, rótulo 2). Por fim, o terceiro princípio enfoca o desenvolvimento de sistemas eficazes que minimizem a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários e reduzam as externalidades negativas (Figura 3, rótulo 3).

1) Preservar o capital natural

Observando o topo do diagrama, percebe-se que existe uma distinção entre as matérias-primas que podem se renovar, chamadas de nutrientes biológicos, e aquelas que são finitas conhecidas como nutrientes técnicos. Nutrientes biológicos possuem a notável capacidade de decomposição ao serem reintegrados à natureza, exemplos incluem madeira, papel, cortiça e algodão (TURNER, 2017).

Por outro lado, nutrientes técnicos são finitos e não se decompõem, portanto, é essencial que o período de utilização desses materiais, como alumínio, ferro e plástico, seja estendido tanto quanto possível para preservar o valor que oferecem. Ao compreender essas diferenças entre nutrientes biológicos e técnicos, torna-se evidente a necessidade de gerir e conservar os recursos de maneira responsável para garantir a sustentabilidade do capital natural (JOHNSON, 2017).

Além disso, é essencial que os processos e produtos sejam concebidos e projetados para facilitar e maximizar esse modelo. O projeto dos produtos deve ser reavaliado para permitir a separação de cada um de seus componentes, de modo que possam ser encaminhados para o ciclo adequado, exigindo um projeto modular (TURNER, 2017).

A seleção dos materiais também é de extrema importância, pois componentes tóxicos devem ser eliminados para garantir a segurança, eficácia dos processos e proteção da saúde pública e do meio ambiente. A digitalização dos processos também desempenha um papel relevante, pois promove uma utilização mais eficiente dos recursos e das atividades realizadas (TAYLOR, 2015).

2) Potencializar a utilidade dos produtos, componentes e matérias-primas

Ao examinar os processos que ocorrem entre a extração de recursos e o comprador, observa-se uma distinção entre os fabricantes de componentes e os fabricantes de produtos finais. Essa divisão auxilia na padronização dos componentes, o que facilita sua reentrada contínua no sistema econômico. Interessante notar também que, ao invés de meros vendedores

de produtos, o que se observa são provedores de serviços, uma vez que esse modelo enfatiza negócios que buscam a otimização do uso dos recursos (WILLIAMS, 2019).

Existe também a diferenciação entre consumidor e usuário: os nutrientes biológicos são consumidos - como alimentos, roupas de fibras naturais, papel, entre outros; enquanto os nutrientes técnicos são usados, e esse uso pode ser compartilhado, como no caso de ferramentas, bicicletas, eletrodomésticos, entre outros (SMITH, 2018).

No que diz respeito aos nutrientes técnicos, é proposto um leque de alternativas com o objetivo de restaurar os estoques de recursos finitos. Primeiramente, devem ser incentivadas opções que facilitam a manutenção e reparo dos produtos, estendendo assim a sua vida útil. Além disso, é importante promover soluções que incentivem o uso compartilhado de recursos, aumentando a utilidade deles (TAYLOR, 2015).

Se um usuário não deseja mais um produto específico, é fundamental que existam meios para coletar, manter e redistribuir esse produto. Se o produto se torna obsoleto ou irreparável, deve ser encaminhado para ser desmontado e seus componentes reutilizados na fabricação de novos produtos. Caso nenhuma dessas opções seja possível, os recursos devem ser direcionados para os processos de reciclagem apropriados (TURNER, 2017).

Já para os nutrientes biológicos, uma solução eficaz é a reutilização em cascata, onde os recursos são reutilizados de forma cíclica para diferentes propósitos, dependendo de sua aplicabilidade. Isso pode ser observado em tecidos de origem natural, como o algodão, onde uma peça de roupa pode ser reutilizada para criar novas peças ou acessórios, que posteriormente podem ser usados para fabricar materiais de isolamento ou enchimento para almofadas. O mesmo conceito se aplica a materiais como cortiça e madeira (TAYLOR, 2015).

Além disso, das substâncias biológicas podem ser extraídas matérias bioquímicas para a produção de biogás. Os nutrientes restantes podem ser devolvidos à biosfera de maneira segura na forma de compostagem, aumentando a fertilidade do solo e completando o ciclo de nutrientes. Como complemento, é imperativo implementar estratégias que prolonguem o tempo em que cada componente permanece em seu ciclo, reduzindo a necessidade de produzir novos componentes e, assim, diminuindo a dependência de recursos não renováveis (SMITH, 2018).

3) Desenvolver sistemas eficazes que minimizam as externalidades negativas

Implementando de forma contínua, holística e estruturada este modelo, as indústrias e suas comunidades conseguem não só reduzir a quantidade de recursos que acabam em aterros sanitários, mas também mitigar os impactos negativos que emanam das operações industriais. É primordial focar na eficácia das iniciativas – agir de forma benéfica – e no desenvolvimento

de sistemas fortalecidos que, de maneira concreta, atendam as demandas das comunidades, promovendo seu progresso. Agir de forma benéfica significa criar valor para todos os envolvidos, abrangendo organizações, comunidades, seres vivos e o ambiente como um todo (SMITH, 2018).

Além disso, este enfoque holístico propicia uma visão de longo prazo, estimulando a inovação e a adaptação às mudanças. Isso implica não apenas em melhorias na eficiência, mas também em envolver-se ativamente na proteção e regeneração dos ecossistemas. O compromisso com o desenvolvimento sustentável não beneficia apenas o meio ambiente, mas contribui para a prosperidade social e econômica das comunidades, incentivando um senso de responsabilidade coletiva e cooperação (ANDERSON, 2015).

2.5.2 Economia circular em cervejarias

As cervejarias são um exemplo de indústria que pode se beneficiar da adoção da economia circular. No processo de produção de cerveja, há geração de uma variedade de resíduos, incluindo grãos, leveduras, pasta celulósica e garrafas quebradas. A gestão adequada desses resíduos pode reduzir os custos da empresa, gerar novas oportunidades de negócios e minimizar o impacto ambiental (SCHERER, 2018).

Um dos principais resíduos gerados pelas cervejarias é o bagaço de malte, que é constituído de restos de casca e polpa dos grãos de malte. O bagaço de malte é gerado na filtração do mosto após a caldeira de mostura, antes da fervura. Este resíduo pode ser utilizado na produção de biocombustíveis, como etanol ou biogás, ou como insumo para a produção de ração animal (KAHN, 2016).

Outro resíduo gerado durante o processo cervejeiro é o excesso de leveduras, que são produzidas durante a fermentação da cerveja. Parte desse resíduo pode ser utilizado no preparo de novas bateladas de cerveja, enquanto o restante pode ser vendido para a indústria alimentícia (PELLEGRINO, 2017).

As garrafas quebradas e a pasta celulósica são resíduos gerados durante o processo de envase. A pasta celulósica é resultado da remoção dos rótulos das garrafas retornáveis, e pode ser vendida para empresas de reciclagem de papel. Já as garrafas quebradas são vendidas para empresas de reciclagem (SCHERER, 2018).

Além disso, a água é um recurso fundamental no processo cervejeiro, e seu uso eficiente pode ser aprimorado por meio da economia circular. O tratamento dos efluentes líquidos pode

permitir que a água seja reutilizada no processo de produção de cerveja ou para outros fins industriais (ZAMORA, 2018).

2.5.2.1 Resíduo de malte como energia térmica na economia circular em cervejarias

A utilização do bagaço de malte como fonte de energia térmica em cervejarias é uma prática cada vez mais comum e eficiente para a redução do consumo de energia e a diminuição da pegada de carbono dessas empresas. A energia térmica gerada pelo bagaço de malte pode ser utilizada em diversas etapas do processo produtivo, como a secagem de grãos, aquecimento de água e do ambiente, entre outras (CAMPANA, 2015).

Além disso, a utilização do bagaço de malte como fonte de energia térmica permite a redução do custo de energia elétrica e a utilização de uma fonte de energia renovável e de reduzido impacto ambiental. De acordo com Martins et al. (2021), a utilização de resíduos de malte em cervejarias como fonte de energia térmica pode ser uma alternativa viável e sustentável para a redução do consumo de combustíveis fósseis.

Os autores realizaram um estudo de caso em uma cervejaria artesanal localizada no Brasil, em que o resíduo de malte foi utilizado como combustível em uma caldeira, gerando vapor para ser utilizado no processo produtivo da cerveja. O resultado da pesquisa mostrou que a utilização de resíduos de malte como fonte de energia térmica pode reduzir em até 36% o consumo de combustíveis fósseis na produção de cerveja.

Carvalho et al. (2021) também destacaram a viabilidade da utilização de resíduos de malte como fonte de energia térmica em cervejarias. Os autores realizaram um estudo de caso em uma cervejaria localizada em Portugal, em que o resíduo de malte foi utilizado como combustível em uma caldeira para gerar vapor. Os resultados mostraram que a utilização de resíduos de malte como fonte de energia térmica pode reduzir em até 33% o consumo de combustíveis fósseis na produção de cerveja, além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Assim, a economia circular em cervejarias envolvendo a utilização do bagaço de malte como fonte de energia térmica representa uma prática sustentável e eficiente para o gerenciamento de resíduos e a utilização consciente de recursos, contribuindo para a redução da pegada de carbono das empresas e a promoção de um modelo econômico mais circular e sustentável.

2.6 RESÍDUO DE MALTE: REAPROVEITAMENTO COMO BIOCOMBUSTÍVEL

O resíduo de malte possui um elevado teor de fibras, proteínas e carboidratos, e é considerado um subproduto valioso que pode ser utilizado em várias aplicações, incluindo o reaproveitamento como biocombustível. O reaproveitamento do resíduo de malte como biocombustível tem sido objeto de vários estudos nos últimos anos, devido à sua potencialidade como fonte de energia renovável e sustentável (CERVERA, 2017).

Para que esse resíduo seja utilizado como biocombustível, é necessário primeiro realizar o processo de secagem e compactação, para que ele tenha um teor de umidade adequado e uma densidade energética suficiente para a queima. Dentre as tecnologias utilizadas para a conversão do resíduo de malte em biocombustível, destaca-se a pirólise, que é um processo termoquímico que envolve a decomposição térmica da biomassa em ausência de oxigênio. Esse processo produz um bio-óleo, um gás e um carvão vegetal (RAO, 2017).

O bio-óleo produzido pode ser utilizado como um combustível líquido em motores de combustão interna ou em caldeiras para geração de calor, enquanto o gás pode ser utilizado como combustível em motores a gás ou em caldeiras de alta eficiência energética. Já o carvão vegetal pode ser utilizado como um combustível sólido em fornos industriais (KUMAR, 2015).

Além da pirólise, outras tecnologias como a gasificação e a fermentação anaeróbia também têm sido estudadas como alternativas para o reaproveitamento do resíduo de malte como biocombustível. A gasificação é um processo que envolve a queima da biomassa em presença de oxigênio, produzindo um gás rico em monóxido de carbono e hidrogênio, que pode ser utilizado como combustível em motores de combustão interna ou em caldeiras (FARIAS, 2015).

Já a fermentação anaeróbia é um processo biológico que envolve a degradação da biomassa por bactérias em um ambiente sem oxigênio, produzindo biogás, que é uma mistura de metano e dióxido de carbono, que pode ser utilizado como combustível em motores a gás ou em caldeiras de alta eficiência energética (FERREIRA, 2014).

Um estudo realizado por Silva et al. (2019) avaliou a viabilidade técnica e econômica da utilização do resíduo de malte como fonte de biocombustível por meio da tecnologia de pirólise. O estudo demonstrou que a pirólise do resíduo de malte produz um bio-óleo com teor energético de 30,31 MJ/kg e um rendimento de 45,8%, o que sugere que o resíduo de malte é uma fonte viável de biocombustível. Além disso, o estudo mostrou que o bio-óleo produzido pode ser utilizado como combustível em caldeiras, gerando uma economia de 16,75% em relação ao uso de óleo combustível.

Outro estudo conduzido por Oliveira et al. (2020) avaliou a utilização do resíduo de malte como fonte de biogás por meio da tecnologia de fermentação anaeróbia. O estudo mostrou que o resíduo de malte apresenta um potencial para produção de biogás de 521,6 m³/t, que corresponde a um potencial de energia de 11,75 MJ/kg. Além disso, o estudo mostrou que a utilização do resíduo de malte para produção de biogás pode gerar uma redução de 71,2% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com a destinação do resíduo para aterro sanitário.

2.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

2.7.1 Conceito

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de análise ambiental que permite avaliar os impactos ambientais de um produto ou processo em todas as fases de seu ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas até o descarte final dos resíduos. Essa ferramenta considera os impactos ambientais em diversas categorias, como consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa, uso da água, entre outros, e permite avaliar opções para melhorar o desempenho ambiental do produto ou processo (CARVALHO, 2018).

A ACV baseia-se em uma abordagem sistemática que considera todos os aspectos ambientais relevantes ao longo do ciclo de vida do produto ou processo, permitindo uma avaliação abrangente e consistente dos impactos ambientais associados. A ACV tem sido amplamente utilizada nos setores químico, de alimentos, de energia, entre outras, como uma ferramenta para orientar a tomada de decisão visando a sustentabilidade ambiental (BRITO, 2017).

2.7.2 Fases da ACV

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de análise ambiental que segue uma metodologia padronizada internacionalmente pela ISO 14040. A metodologia da ACV é composta por quatro fases distintas (Figura 4), que incluem:

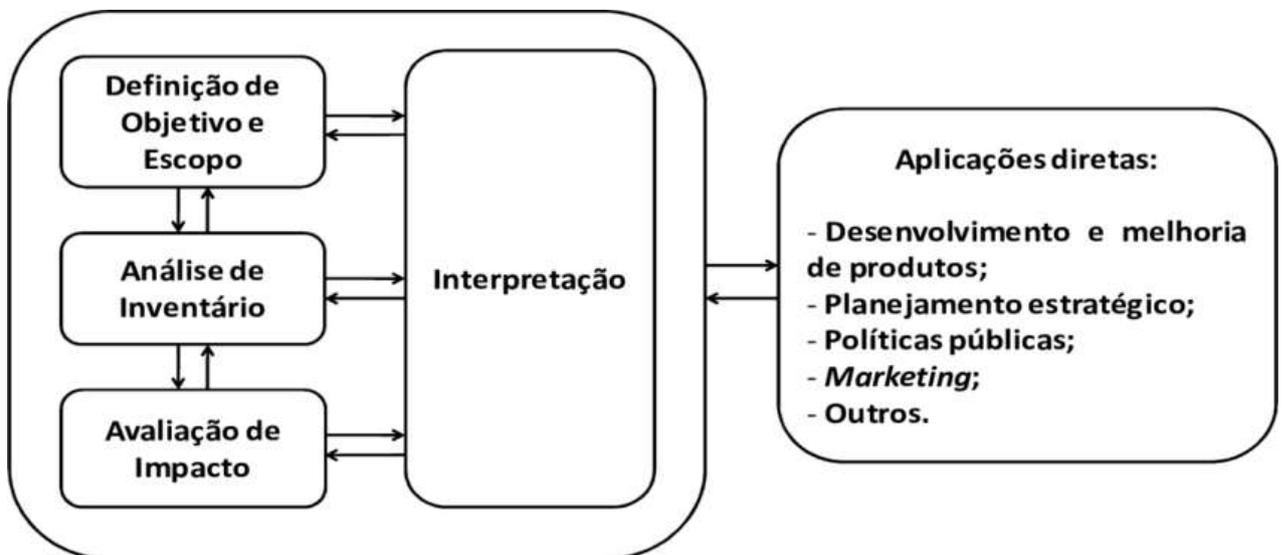
1) Definição do objetivo e escopo: Nesta fase define-se claramente o objetivo da avaliação, os limites do sistema a ser avaliado, as hipóteses e suposições a serem utilizadas, e as informações necessárias para realizar a avaliação. Nesta fase também é importante definir as unidades funcionais a serem utilizadas, que são a base de comparação entre as diferentes alternativas avaliadas;

2) Análise do inventário: Na fase de análise do inventário são coletadas todas as informações necessárias sobre as entradas e saídas do sistema avaliado. Essas informações incluem as matérias-primas, a energia, a água, os insumos e os resíduos gerados em todas as etapas do ciclo de vida do produto ou processo avaliado. As informações coletadas nesta fase são utilizadas para a construção do modelo do ciclo de vida, que representa graficamente todas as entradas e saídas do sistema;

3) Avaliação de impactos: Na fase de avaliação de impactos, as informações coletadas na fase anterior são utilizadas para avaliar os impactos ambientais do sistema avaliado em diversas categorias, como o uso da água, a emissão de gases de efeito estufa, a geração de resíduos, entre outros. Nesta fase são utilizados métodos padronizados para avaliar os impactos ambientais, que levam em conta as características específicas do sistema avaliado;

4) Interpretação: Na fase de interpretação os resultados da avaliação de impactos são analisados em relação ao objetivo e escopo definidos na fase inicial da avaliação. Nesta fase pode-se comparar os resultados de diferentes alternativas avaliadas, identificar as principais fontes de impacto ambiental, avaliar a robustez dos resultados obtidos e identificar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental do sistema avaliado.

Figura 4: Etapas para a construção da ACV



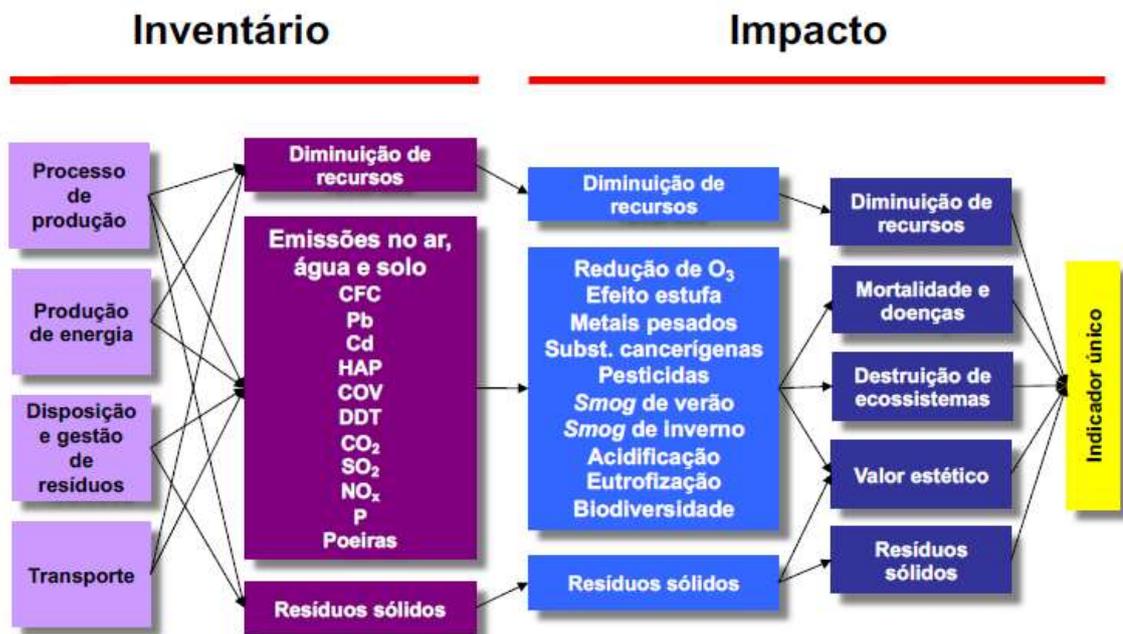
Fonte: Carvalho, 2018

2.7.3 Categorias de impacto

As categorias de impacto da Avaliação do Ciclo de Vida são usadas para avaliar os efeitos ambientais e de sustentabilidade dos dados coletados durante a fase de inventário. Cada categoria de impacto representa um tipo específico de impacto ambiental e pode ser usada para avaliar a magnitude e a relevância dos impactos ambientais e de sustentabilidade em diferentes aspectos, tais como mudança climática, esgotamento de recursos, acidificação, eutrofização, toxicidade humana e ecotoxicidade, uso da terra e uso da água (BRINGEZU, 2015).

A Figura 5 proporciona uma visão abrangente sobre a Avaliação do Ciclo de Vida, enfatizando como os diferentes componentes de um sistema de produção estão interligados e como eles contribuem para os impactos ambientais. A figura ilustra uma cadeia de eventos e interações que começa com o inventário dos componentes principais de um sistema de produção: o processo de produção em si, a produção de energia, o descarte e gestão de resíduos, e o transporte (NILSON, 2017).

Figura 5: Relação inventário x impactos gerados



Fonte: Nilson, 2017

O processo de produção é retratado como um elemento inicial que está intimamente ligado à diminuição de recursos naturais. Isso significa que, ao utilizar matérias-primas e energia para fabricar produtos, há uma consequente redução nos recursos disponíveis. Já a produção de energia, que é essencial para impulsionar os processos de produção e outras atividades, também está relacionada à diminuição de recursos (BRINGEZU, 2015).

Além disso, ela é fonte de diversas emissões que afetam o ar, a água e o solo, incluindo substâncias como CFCs, chumbo (Pb), dióxido de enxofre (SO₂), entre outras. Essas emissões têm efeitos adversos no meio ambiente, como a redução da camada de ozônio (O₃), o agravamento do efeito estufa, e a contaminação por metais pesados e pesticidas (NILSON, 2017).

Semelhantemente, a disposição e gestão de resíduos são elos cruciais nessa cadeia. Ao descartar e gerenciar resíduos provenientes de processos produtivos e de consumo, há também a contribuição para a diminuição de recursos e emissões nocivas. Esses resíduos podem conter substâncias químicas perigosas que, quando não manejadas corretamente, podem contaminar o meio ambiente (CARVALHO, 2018)

O transporte, outro componente crítico, tem um papel análogo ao dos demais elementos do inventário, contribuindo para a diminuição de recursos e para as emissões de poluentes. Ao transportar materiais e produtos, os veículos consomem energia e emitem gases e partículas que podem ser prejudiciais ao ambiente e à saúde humana (NILSON, 2017).

Todas essas interações e efeitos culminam em impactos mais abrangentes e profundos no ambiente, como a destruição de ecossistemas, o aumento de doenças e mortalidade em populações humanas e animais. A figura representa de forma eficiente como esses múltiplos aspectos estão interconectados e como suas consequências se acumulam (NILSON, 2017).

Por fim, toda essa cadeia complexa de eventos é condensada em um único indicador. Este indicador tem o objetivo de sintetizar a magnitude e a natureza dos impactos gerados ao longo do ciclo de vida do sistema de produção. Através dele, é possível ter uma visão holística e quantificável dos efeitos ambientais associados aos processos produtivos, o que auxilia na tomada de decisões para mitigação e gestão desses impactos (NILSON, 2017).

2.7.3.1 Esgotamento abiótico

O esgotamento abiótico é uma das categorias de impacto ambiental consideradas na análise do ciclo de vida (ACV). Essa categoria avalia o consumo de recursos naturais não renováveis, como minerais, combustíveis fósseis e metais, durante todo o ciclo de vida do produto, processo ou serviço em análise (OLIVEIRA, 2011).

Durante a fase de inventário da ACV são identificados os recursos abióticos consumidos e quantificados os fluxos de entrada desses recursos no processo produtivo. Em seguida, na fase de avaliação de impacto, o consumo desses recursos é convertido em uma unidade comum,

geralmente em kg de equivalente de petróleo (KEP) ou kg de equivalente de minério (KEM), permitindo a comparação com outros impactos ambientais (BERNARDES, 2018).

O esgotamento abiótico é um impacto ambiental importante, pois a extração e o uso excessivo de recursos não renováveis pode levar à escassez de matéria-prima e energia no futuro. Além disso, a extração e o uso desses recursos podem levar a impactos ambientais negativos, como a degradação do solo, erosão, poluição da água e do ar e danos à biodiversidade (PULLEN, 2018).

2.7.3.2 Aquecimento global

Trata-se de uma categoria tem como objetivo avaliar a quantidade de gases de efeito estufa (GEE) que são emitidos ao longo do ciclo de vida de um produto, processo ou serviço. Durante a fase de inventário da ACV, são identificadas e mensuradas as emissões de GEE, tais como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e outros gases fluorados. A presença desses gases na atmosfera contribui para o efeito estufa, que é responsável por aumentar a temperatura do planeta e causar as mudanças climáticas (CARNEIRO, 2013).

Na fase de avaliação de impacto, as emissões de GEE são convertidas em uma unidade comum, geralmente em kg de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), permitindo a comparação com outros impactos ambientais. A categoria de impacto do aquecimento global é calculada com base na quantidade de CO_2e emitido ao longo do ciclo de vida do produto (BERNARDINO, 2017).

2.7.3.3 Depleção da camada de ozônio

Esta categoria de impacto ambiental busca avaliar como um produto, processo ou serviço contribui para a diminuição da quantidade de ozônio na estratosfera da Terra. Para isso, durante a fase de inventário da ACV, são identificadas e quantificadas as emissões de substâncias que danificam a camada de ozônio, tais como clorofluorocarbonos (CFCs), hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) e outros compostos orgânicos halogenados. Essas substâncias são frequentemente utilizadas em sistemas de refrigeração, ar condicionado, extintores de incêndio e outros produtos industriais (PAVLOVIC, 2018).

Na fase de avaliação de impacto, as emissões de substâncias destruidoras da camada de ozônio são convertidas em uma unidade comum, geralmente em Potencial de Destruição do Ozônio (ODP), permitindo a comparação com outros impactos ambientais. A redução da camada de ozônio pode ter consequências negativas para a saúde humana e o meio ambiente, o

que torna essa categoria de grande importância para a avaliação dos impactos ambientais de um produto, processo ou serviço (KIM, 2019).

2.7.3.4 Oxidação fotoquímica

Este processo envolve a reação de compostos orgânicos voláteis (COVs) na presença de luz solar e oxigênio atmosférico, que pode levar à formação de ozônio troposférico (O_3) e outros poluentes atmosféricos. Durante a ACV, a oxidação fotoquímica pode ser considerada como um impacto ambiental potencial associado à emissão de COVs. É importante notar que a formação de ozônio troposférico pode ter efeitos negativos na qualidade do ar e na saúde humana, especialmente em áreas urbanas ou industriais com altos níveis de emissões de COVs (YU, 2019).

2.7.3.5 Acidificação

Esse impacto refere-se à liberação de gases ácidos na atmosfera durante a produção, uso ou descarte de um produto ou processo, que podem contribuir para a acidificação do solo e da água. Os principais gases ácidos considerados na ACV são dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x), que são emitidos principalmente por fontes industriais e de transporte (BONAN, 2011).

Esses gases podem reagir com outras substâncias na atmosfera, como a água, para formar ácidos, que podem ser depositados no solo e na água através da precipitação ou da deposição seca. A acidificação pode ter efeitos negativos na qualidade do solo e da água, afetando a flora e a fauna local e reduzindo a produtividade agrícola. Além disso, pode contribuir para a degradação de edifícios e monumentos históricos, que podem ser corroídos pelos ácidos presentes na chuva ácida (KONG, 2014).

2.7.3.6 Eutrofização

Esta categoria de impacto está relacionada ao aumento do crescimento de algas e outros organismos aquáticos devido ao aumento de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, em corpos d'água. A eutrofização pode ocorrer como resultado da descarga de efluentes industriais, esgotos domésticos, agricultura e outras atividades humanas (PEREIRA, 2017).

Quando esses nutrientes são liberados em corpos d'água, eles podem estimular o crescimento excessivo de algas e outros organismos, levando a uma diminuição na quantidade

de oxigênio disponível para outros organismos aquáticos. Isso pode levar à morte de peixes e outros animais, além de afetar a qualidade do pH da água (STROO, 2019).

Durante a ACV, a eutrofização é considerada como um impacto ambiental potencial associado à liberação de nutrientes em corpos d'água. A avaliação da eutrofização pode incluir a quantificação do potencial de liberação de nutrientes em corpos d'água e a avaliação do impacto no ecossistema aquático local (PEREIRA, 2017).

2.7.4 ACV aplicada na produção de cerveja

A avaliação do ciclo de vida da cerveja é uma abordagem importante para a compreensão do impacto ambiental desse produto desde a sua produção até o descarte do seu resíduo. Dessa forma, diversos estudos têm sido realizados para avaliar o ciclo de vida da cerveja, utilizando diferentes metodologias e categorias de impacto.

Um estudo realizado por Pires et al. (2015) avaliou o ciclo de vida da cerveja no Brasil, utilizando a metodologia da ACV e considerando as categorias de impacto de mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, acidificação e eutrofização. Os resultados mostraram que a produção da cevada e o uso de energia foram as etapas que mais contribuíram para o impacto ambiental da cerveja. Além disso, a fabricação de garrafas e latas e o transporte do produto para o mercado consumidor também apresentaram impactos significativos.

Llop et al. (2018) avaliaram o impacto ambiental da produção de cerveja na Espanha por meio da ACV. O estudo considerou as etapas de produção de matérias-primas, produção de cerveja e distribuição. Os resultados mostraram que as emissões de gases de efeito estufa são a principal categoria de impacto para a produção de cerveja, seguida pelo consumo de água e energia.

A etapa de produção de matérias-primas, especialmente o cultivo de cevada, foi responsável pela maior parte das emissões de gases de efeito estufa e consumo de água. Além disso, o estudo também avaliou o impacto da reciclagem de garrafas de vidro e latas de alumínio na produção de cerveja. Os resultados indicaram que a reciclagem de garrafas de vidro tem um impacto ambiental menor do que a reciclagem de latas de alumínio.

Um estudo realizado por Esteban et al. (2018) avaliou a sustentabilidade da produção de cerveja artesanal na Espanha, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. O objetivo do estudo foi identificar os impactos ambientais e sociais em todas as etapas do processo de produção da cerveja artesanal, desde a produção de insumos até o descarte final dos resíduos.

Os resultados mostraram que as etapas mais impactantes foram a produção de malte e a destilação, que contribuíram significativamente para as emissões de gases de efeito estufa e consumo de energia. O estudo também destacou a importância do gerenciamento adequado dos resíduos de malte, que foram responsáveis por impactos significativos no uso da terra e no consumo de água.

De acordo com os resultados, a reutilização do resíduo de malte como alimento animal e a utilização como biocombustível foram opções mais sustentáveis de gerenciamento de resíduos. Além disso, o estudo de Esteban et al. (2018) concluiu que a produção de cerveja artesanal pode ser mais sustentável se a produção de malte for feita localmente, reduzindo assim as emissões associadas ao transporte.

2.8 IMPACTOS AMBIENTAIS DO RESÍDUO DE MALTE NO PROCESSO CERVEJEIRO

O resíduo tem um potencial significativo de causar impactos ambientais se não for gerenciado adequadamente. Um dos principais impactos ambientais associados ao resíduo de malte é a poluição do solo e da água. Quando o resíduo é descartado de maneira inadequada, ele pode se decompor e liberar nutrientes e produtos químicos prejudiciais ao meio ambiente (LEONELLI, 2016).

2.8.1 Emissão de gases de efeito estuda

A relação entre o resíduo de malte e a emissão de gases de efeito estufa (GEE) é bastante complexa e depende de vários fatores, incluindo o método de descarte do resíduo, as condições climáticas e a eficiência do tratamento de resíduos.

O resíduo de malte é rico em matéria orgânica e nutrientes, o que o torna um excelente material para compostagem. Quando o resíduo de malte é compostado adequadamente, as emissões de GEE podem ser minimizadas, já que a decomposição ocorre em condições aeróbicas, o que limita a produção de metano (CH_4), um GEE com um potencial de aquecimento global muito elevado (LIMA, 2016).

No entanto, se o resíduo de malte for disposto inadequadamente, como em aterros sanitários, a decomposição pode ocorrer em condições anaeróbicas, levando à produção de CH_4 , sendo um GEE muito mais potente do que o dióxido de carbono (CO_2), com um potencial de aquecimento global cerca de 28 vezes maior (TAYLOR, 2010). Além disso, é importante destacar que a produção de cerveja em si também contribui para a emissão de GEE, especialmente durante a etapa de fermentação, que gera grandes quantidades de CO_2 . No entanto, o resíduo de malte representa apenas uma fração dessas emissões (LIMA, 2016).

2.8.2 Eutrofização

O resíduo de malte é composto principalmente por celulose, hemicelulose, lignina e proteínas. Devido à sua composição rica em nutrientes, o resíduo de malte pode causar a eutrofização de corpos d'água se descartado de forma inadequada. A eutrofização é um processo natural ou induzido pelo homem que ocorre quando há um acúmulo excessivo de nutrientes em um corpo d'água, como nitrogênio e fósforo (LI, 2018).

Isso pode ocorrer por meio de descarga de esgoto, uso excessivo de fertilizantes agrícolas, entre outros fatores. A consequência da eutrofização é o aumento da biomassa de algas e plantas aquáticas, que podem consumir o oxigênio da água e levar a um processo conhecido como hipóxia, que é a falta de oxigênio dissolvido na água, podendo levar à morte de peixes e outros organismos aquáticos (XIAO, 2016).

Quando o resíduo de malte é descartado em corpos d'água, sua decomposição é iniciada por micro-organismos presentes na água, como bactérias e fungos. Esses micro-organismos utilizam os nutrientes presentes no resíduo, como carbono, nitrogênio e fósforo, como fonte de energia e para o seu próprio crescimento (LI, 2018).

Durante o processo de decomposição, ocorre a mineralização dos nutrientes presentes no resíduo, ou seja, eles são convertidos em formas inorgânicas que podem ser absorvidas pelas plantas e algas aquáticas. O nitrogênio é convertido em nitrato, enquanto o fósforo é convertido em fosfato (KALDERIS, 2010).

As plantas aquáticas e algas utilizam o nitrato e o fosfato presentes na água para o seu crescimento, o que pode levar, então, a um aumento descontrolado de biomassa. O excesso de biomassa pode causar problemas como a redução do oxigênio dissolvido na água, já que a respiração das plantas e algas consome oxigênio, e a formação de camadas densas de plantas aquáticas, que podem bloquear a luz e impedir a penetração do oxigênio nesse meio (BRENO, 2016).

2.8.3 Contaminação do solo

A contaminação do solo pelo resíduo de malte pode ocorrer devido à liberação de compostos orgânicos, como proteínas e lignina, que podem ser decompostas por microrganismos do solo, liberando nutrientes e outros compostos, como amônia e ácidos orgânicos (TORRES, 2016).

Esses compostos podem ter efeitos tóxicos sobre a microbiota do solo, afetando a biodiversidade e a capacidade do solo em fornecer nutrientes para as plantas. A presença

excessiva de resíduos de malte pode também aumentar a acidificação do solo, o que pode afetar negativamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas e impedir o crescimento de culturas sensíveis à acidez (MARTINS, 2016).

Além disso, a presença excessiva de resíduos de malte no solo pode levar à formação de camadas compactadas de solo, que impedem a penetração da água da chuva e dificultam o crescimento das plantas. Isso pode resultar em perdas significativas de produtividade agrícola e na degradação do solo a longo prazo (MARTINS, 2016).

2.8.4 Estudos aplicados

Um estudo realizado por Silva et al. (2020) investigou os efeitos do resíduo de malte no solo, avaliando os parâmetros físico-químicos e biológicos do solo após a aplicação do resíduo em diferentes concentrações. O experimento foi conduzido em condições controladas em laboratório, utilizando amostras de solo coletadas em uma área agrícola na região sul do Brasil.

Os resultados mostraram que a aplicação do resíduo de malte no solo em concentrações elevadas causou alterações significativas nos parâmetros físico-químicos e biológicos do ambiente. Aumentos significativos nos teores de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo foram observados em todas as concentrações testadas, indicando que o resíduo de malte pode ser uma fonte valiosa de nutrientes para o solo.

Porém, a aplicação de concentrações elevadas de resíduo de malte também causou reduções significativas no pH do solo, indicando um possível efeito acidificante. Além disso, a aplicação em concentrações elevadas também causou uma redução na atividade microbiana do solo, o que pode afetar a fertilidade do solo e a saúde das plantas. Os autores concluíram que a aplicação do resíduo de malte no solo pode ter efeitos positivos e negativos, dependendo da concentração aplicada. Portanto, é importante avaliar cuidadosamente a dosagem adequada do resíduo para evitar possíveis impactos negativos no solo e no ambiente.

Um estudo realizado por Chen et al. (2020) buscou detalhar os motivos pelos quais o resíduo de malte pode contaminar o solo. Os pesquisadores analisaram a composição química do resíduo de malte e avaliaram os efeitos da sua aplicação no solo em relação à contaminação por metais pesados, além da alteração da sua qualidade. Os resultados indicaram que o resíduo de malte possui altas concentrações de nitrogênio, fósforo, potássio e matéria orgânica. No entanto, também foram encontrados metais pesados em concentrações preocupantes, como chumbo, cádmio e níquel.

A aplicação do resíduo de malte no solo levou a um aumento significativo na concentração de metais pesados no solo, o que pode prejudicar a saúde das plantas e a sua qualidade. Os autores também destacaram que a decomposição da matéria orgânica do resíduo de malte pode levar à acidificação do solo, o que pode aumentar a solubilidade de metais pesados no solo e agravar a contaminação.

Gonçalves et al. (2018) investigaram os efeitos do resíduo de malte na qualidade da água, avaliando a presença de contaminantes e parâmetros físico-químicos em amostras de água coletadas em uma área próxima a uma fábrica de cerveja na região sul do Brasil. Os resultados mostraram que as amostras de água coletadas próximas à fábrica de cerveja apresentaram elevados teores de sólidos totais, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e nitrogênio total. Esses parâmetros indicam a presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos na água, possivelmente relacionados à descarga do resíduo de malte na área.

Além disso, a análise das amostras de água também revelou uma redução significativa no pH, indicando um possível efeito acidificante do resíduo de malte na água. A presença de metais pesados, como zinco, cobre e ferro, também foi detectada nas amostras de água, o que pode ser atribuído à descarga de efluentes industriais. Os autores concluíram que o resíduo de malte pode ter um impacto significativo na qualidade da água, causando a contaminação por contaminantes orgânicos e inorgânicos, além de afetar o pH e a presença de metais pesados na água.

Além da contaminação do solo e do meio aquático, é possível que ocorra a emissão de partículas e gases que podem impactar a qualidade do ar. Um estudo realizado por Kostadinov et al. (2019) avaliou a emissão de gases e partículas durante a secagem do malte em uma fábrica de cerveja na Bulgária. Os resultados mostraram que as emissões de dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado foram significativas durante o processo de secagem do malte.

Os autores destacaram que essas emissões podem ter impacto na qualidade do ar local, afetando a saúde humana e os ecossistemas próximos à fábrica de cerveja. Eles sugerem a adoção de medidas de controle de emissões, como o uso de tecnologias de controle de poluição e a adoção de boas práticas de gestão ambiental, para minimizar os impactos do processo de secagem do malte na qualidade do ar.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 TIPO DE ESTUDO

A estrutura metodológica aplicada nesta pesquisa baseia-se nas formas exploratória e descritiva, com a utilização de procedimentos para a investigação visando contribuir para alcançar as metas e objetivos propostos (PRODANOV e FREITAS, 2013). Para isso, foram utilizadas técnicas padronizadas de coleta de dados, como entrevistas e observação direta, com a finalidade de identificar, registrar e analisar as características ou variáveis que se relacionam com os processos presentes na produção cervejeira.

O método de procedimento adotado nesta pesquisa foi um estudo de campo, o qual foi realizado em uma empresa de bens de consumo do setor cervejeiro, localizada na cidade de Belém (PA), a partir de informações obtidas acerca do processo de produção da bebida, de maneira a compreender o funcionamento da geração, tratamento e descarte dos resíduos gerados, com foco no bagaço do malte.

3.2 PROCESSO DE COLETA DE DADOS

Os dados foram extraídos com o auxílio do responsável pela produção de cerveja, o cervejeiro, e com os relatos mencionados pelo responsável técnico. Este levantamento teve por objetivo colher informações importantes que revelam particularidades da atual matriz energética utilizada na empresa, tais como o ciclo de vapor, consumo de gás natural (GLP) e seu impacto econômico na organização.

Para compreender a rotina de produção da empresa e o seu contexto energético foi necessário seguir algumas etapas:

- 1) Entrevista com os membros responsáveis pela gestão da empresa e operação de rotina da produção da cerveja;
- 2) Análise do processo produtivo: foram coletadas informações a respeito do ciclo de vapor e do resíduo de malte ao fim do processo;
- 3) Registro e análise das informações obtidas: análise dos dados referentes ao volume de cerveja produzida e de resíduos de malte descartado, para a elaboração de uma proposta de matriz energética, cujo regime de trabalho utilize uma associação entre gás natural e biomassa.

Ao final da visita técnica fez-se a coleta do material de estudo, o bagaço de malte, para as análises laboratoriais.

3.3 MATÉRIA-PRIMA

Foi coletado cerca de 0,5 kg de bagaço de malte, úmido, logo após a filtração do mosto. A biomassa foi resfriada a temperatura ambiente, embalada e encaminhada para o Laboratório de Caracterização de Biomassa (LACBIO), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, para a realização da secagem em estufa e da análise imediata.

Após a secagem da biomassa coletada, foram utilizados aproximadamente, 0,15 kg do resíduo para a realização da análise do Poder Calorífico Superior (PCS) do malte. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO DE MALTE

A caracterização físico-química do resíduo estudado foi necessária para obter-se os valores dos parâmetros utilizados para o cálculo da viabilidade de utilização energética do resíduo de malte.

3.4.1 Análise imediata

Na análise imediata foram determinados os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo (Cf). Para a avaliação do teor de umidade, seguiu-se a metodologia das normas CEN/TS: 14774-1, 15148, 14786 (*Solid biofuels - Method for the determination of the content of volatile matter*). O peso úmido de cada amostra foi obtido por meio de uma balança analítica de precisão.

As amostras foram introduzidas na estufa em uma temperatura de 100°C, e foram realizadas três pesagens: a primeira, depois de duas horas de permanência da biomassa na estufa e, as demais, após uma hora cada. Após a medição e coleta dos valores foi utilizada a Equação 1¹ para a obtenção do teor de umidade.

$$U = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Para alcançar os níveis de materiais voláteis, as amostras foram colocadas em cadinhos de cerâmica e levadas ao forno mufla (Figura 6), aquecido a 900°C por sete minutos, de acordo com a metodologia das normas CEN/TS 14774-1, 15148, 14786 (*Solid biofuels - Method for the determination of the content of volatile matter*). Após esse período, as amostras foram pesadas e resfriadas em temperatura ambiente. Utilizando-se a Equação 2, foi medido o percentual de materiais voláteis na biomassa.

¹ m1 = massa inicial; m2 = massa final.

Figura 6: Forno mufla



Fonte: Autor, 2023

$$V = \left(\frac{m_3 - m_4}{m_3} \right) \cdot 100 \quad (2)^2$$

O teor de cinzas também foi determinado mediante as normas CEN/TS 14774-1, 15148, 14786 (*Solid biofuels - Method for the determination of the content of volatile matter*). O material foi colocado em cadinhos de cerâmica previamente pesados e levados ao forno mufla em uma temperatura de 550°C, por quatro horas. Findado o período de aquecimento, o teor de cinzas foi calculado por meio da Equação 3.

$$C_z = \left(\frac{m_5}{m_6} \right) \cdot 100 \quad (3)^3$$

Após a determinação dos teores de umidade, matéria volátil e de cinzas da amostra, o teor de carbono fixo (Cf) foi determinado indiretamente pela soma entre os valores do teor de voláteis e teor de cinzas, por meio da Equação 4.

$$C_f = 100 - (V + C_z) \quad (4)$$

3.4.2 Análise Elementar da Biomassa

Para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) da biomassa, necessita-se do percentual de hidrogênio presente no combustível, que é obtido mediante análise elementar. O PCI refere-se à quantidade de energia liberada na combustão da biomassa, desconsiderando-se toda a água contida nela.

Paula (2010) menciona que a análise elementar é uma técnica de determinação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), e enxofre (S), realizada em um analisador elementar (Figura 7). Frisa-se que os elementos de maior contribuição para o poder calorífico são o carbono e hidrogênio.

² m₃= massa inicial; m₄=massa final

³ m₅=massa inicial; m₆=massa final

Figura 7: Analisador elementar



Fonte: Autor, 2023

3.4.3 Poder Calorífico Superior (PCS)

A determinação do poder calorífico superior (PCS) se baseia nas normas CEN/TS: 14774-1, 15148, 14786 (*Solid biofuels - Method for the determination of the content of volatile matter*). Neste procedimento, as amostras previamente secas foram colocadas em uma bomba calorimétrica C-200 (Figura 8). Esta propriedade está relacionada com a quantidade de energia liberada (cal) por unidade de massa (g), quando submetida ao processo de combustão. O teste consiste na combustão de toda a amostra, em ambiente fechado com a presença de oxigênio sob pressão.

Figura 8: Bomba Calorimétrica C-200



Fonte: Autor, 2023

3.5 VOLUME DE RESÍDUOS DE MALTE E FORMA DE DESCARTE

3.5.1 Cálculo da geração de resíduos de malte

Foi analisada a geração de resíduos no período de doze meses no ano de 2021, a fim de quantificar a média anual de bagaço de malte produzido pela cervejaria. Para a estimativa da quantidade de bagaço úmido produzido, foi utilizada a relação proposta por Aliyu e Bala (2011),

a qual mostra que, ao final do processo da cerveja, cerca de 20% é bagaço, isto é, para cada 100 litros de cerveja são obtidos 20 kg do resíduo. Vale ressaltar que a produção de cerveja aumenta nos meses de julho e dezembro.

3.5.2 Forma de descarte

Para conhecer a forma de descarte do resíduo em questão, foi realizado um questionário junto ao responsável pelo setor de produção de cerveja. As questões tiveram o intuito de coletar informações sobre o armazenamento do bagaço de malte e o local onde é descartado.

O questionário foi composto por quatro perguntas, sendo duas abertas e duas fechadas (Quadro 1).

Quadro 1: Questionário sobre o descarte do resíduo

O resíduo de malte passa por algum tipo de tratamento antes do descarte? Sim () Não ()
A empresa dispõe de coleta particular? Sim () Não ()
Onde é descartado o resíduo de malte?
Existe alguma alternativa de uso para esse resíduo?

Fonte: Autor, 2023

Além disso, foram utilizadas as leis ambientais vigentes, sendo uma delas a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010), bem como as resoluções promulgadas pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) para verificar se a forma de despejo do malte está em conformidade com a legislação desse ramo.

3.6 VIABILIDADE DA REUTILIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MALTE NA PRODUÇÃO DE CERVEJA

O presente trabalho propõe o reaproveitamento do bagaço de malte, subproduto gerado pela indústria cervejeira, como alternativa de combustível para seus fornos industriais. A matriz energética da fábrica em estudo é alimentada por gás liquefeito de petróleo (GLP), um produto que é relativamente caro comparado a uma série de biomassas.

3.6.1 Configuração energética atual

A cervejaria estudada dispõe de uma caldeira do tipo flamotubular, que produz vapor no estado saturado (pressão de 9 bar, produção de vapor de 10 toneladas/h e capacidade térmica de 7.153.163 kcal/h), utilizando unicamente gás liquefeito de petróleo como combustível, e trabalha com rendimento de 90%.

Além disso, a partir das informações coletadas junto ao corpo técnico, constatou-se que 50% do vapor produzido pela caldeira em funcionamento é consumido pela sala de cozimento, 30% é utilizado no envase, e o restante se destina à higienização dos equipamentos. No que se refere ao combustível usado, no Brasil há seis categorias de botijões de Gás Liquefeito de Petróleo, cada uma tem determinada especificidade, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Categorias e uso de botijões de GLP

CÓDIGO	VOLUME (L)	PESO (kg)	USO MAIS COMUM	NORMA
P2	5,5	2 kg	Fogareiros, lampiões e maçaricos	NBR 8614
P5	12,0	5 kg	Uso doméstico, para cozimento de alimentos e maçaricos	NBR 8614
P13	31,5	13 kg	Uso doméstico, para cozimento de alimentos	NBR 8614
P20	48,0	20 kg	Exclusivo em empilhadeiras a GLP	NBR 14536
P45	108,0	45 kg	Doméstico e industrial (cozimento de alimentos, aquecimento, fundição, soldas, etc.)	NBR 13794
P90	216,0	90 kg	Industrial	NBR 13794

Fonte: PBGÁS, 2011

A cervejaria utiliza botijões de P90, como já mencionado, e cada botijão comporta 90kg de GLP. O preço médio desse botijão, em Belém, segundo informações coletadas na cervejaria, é de R\$600. Além disso, a cervejaria consome, no mínimo, 1 botijão P90 por mês e, no máximo, 3 botijões. Esse consumo varia de acordo com a demanda de cerveja.

3.6.2 Configuração energética proposta

A fim de reduzir os custos com GLP, bem como o descarte inadequado do bagaço de malte, este estudo propõe a geração de energia térmica proveniente do uso do bagaço de malte seco como combustível na produção de vapor. Desse modo, estimou-se duas possíveis configurações energéticas (Quadro 2)

Quadro 2: Propostas de configuração energética

COMBUSTÍVEL	PROPOSTA 1	PROPOSTA 2
GLP	nº de dias no mês x 0	nº de dias no mês x 40%
Biomassa	nº de dias no mês x 100%	nº de dias no mês x 60%

Fonte: Autor, 2023

As propostas consistem na estimativa da quantidade de combustível usado por dia de produção de cerveja. Para a simulação da melhor proposta, foram utilizados dois critérios.

- Critério 1: Respeitar a quantidade de energia utilizada para a produção de cerveja;
- Critério 2: Não extrapolar a quantidade de biomassa seca produzida pela cervejaria.

Além disso, para alcançar os valores necessários para o cálculo de viabilidade das propostas, foram realizados os procedimentos a seguir.

3.6.3 Cálculo da transferência de calor entre a fornalha e caldeira

A transferência de calor em geradores de vapor é um complexo conjunto de fenômenos que envolvem troca de calor por radiação, convecção e condução térmica (CUNHA, 2011). O equacionamento teórico deste conjunto é complexo, e grande parte do conhecimento adquirido e aplicado à troca de calor em caldeiras e fornos é fruto de relações empíricas obtidas por tentativa e erro. Muitas informações e dados sobre a troca de calor em caldeiras são propriedades dos fabricantes.

Para estimar a quantidade de vapor produzida pela caldeira alimentada por biomassa, foi utilizada a proposta de Çengel e Boles (2013), os quais descrevem os cálculos para quantificar o fluxo de calor \dot{Q} na caldeira e a quantidade de calor produzida pela queima do combustível (Equação 5).

$$\dot{Q} = m \cdot (h_v - h_l) \quad (5)$$

Onde:

\dot{Q} = Quantidade do fluxo de calor;

m = fluxo de massa;

h_v = entalpia do vapor;

h_l = entalpia do líquido.

3.6.4 Cálculo do Poder Calorífico Inferior do Bagaço de Malte

O cálculo teórico do poder calorífico inferior de um combustível sólido ou líquido seco, em kcal/kg, pode ser efetuado pela Equação 6, que baseia-se nas reações de combustão dos componentes puros.

$$PCI = PCS - hv \left[\frac{9 \cdot h}{100} \right] \quad (6)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg);

PCS = poder calorífico superior (kcal/kg);

h = percentual de hidrogênio do material (%);

hv = entalpia de vaporização (2442 kJ/kg → 583,65 kcal/kg)

3.6.5 Cálculo da geração de bagaço de malte seco

Para o cálculo da massa seca do bagaço de malte, foi realizada a multiplicação entre a massa de resíduo úmido e o teor de umidade, e esse valor foi subtraído da massa úmida (Equação 7):

$$ms = mu - (mu \cdot u) \quad (7)$$

Onde:

ms: massa seca;

mu: massa úmida;

u: teor de umidade (%)

3.6.6 Cálculo do consumo de bagaço de malte seco

De acordo com a primeira Lei da Termodinâmica, na caldeira a energia cedida pelo combustível é transferida para a água, produzindo vapor. Para realização da simulação do consumo de biomassa foi utilizado como base o consumo de GLP (kg) pela fábrica no período de doze meses.

Primeiramente, foi realizado o cálculo da quantidade de vapor produzido pela caldeira alimentada por gás. De posse desse valor, estimou-se a quantidade de biomassa necessária para atingir a mesma energia térmica. Para o cálculo desse consumo, utilizou-se o poder calorífico

inferior do GLP igual a 10.800 kcal/kg (CORDEIRO, 2011) e admitiu-se o PCI encontrado para a biomassa em estudo. Foi utilizada a Equação 8 para obter-se os consumos de energia térmica:

$$PCI * m_{comb} . n_{cald} = mv . (h_v - h_l) \quad (8)$$

Onde:

m_{comb} = massa do combustível;

n_{cald} = rendimento da caldeira;

mv = massa do vapor

PCI = Poder Calorífico Inferior do combustível.

3.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CERVEJA

Para a análise do ciclo de vida da cerveja produzida no local, tipo *lager* de 300 ml, foi utilizada a metodologia do Ciclo de Vida de acordo com as normas ISO 14040 e 14044. As etapas para esse estudo foram organizadas da seguinte forma:

1) Definição do objetivo e escopo do estudo, incluindo a identificação do sistema de produção da cerveja, os processos de fabricação, embalagem, transporte e descarte;

2) Coleta de dados primários sobre o consumo de energia, água, materiais e insumos utilizados em cada etapa do ciclo de vida da cerveja, incluindo as informações sobre a produção da matéria-prima, o transporte dos insumos, o processo de fabricação da cerveja, o envase, transporte e distribuição;

3) Identificação e seleção dos indicadores de impacto ambiental avaliados, tais como: consumo de energia, emissão de gases de efeito estufa, consumo de água, produção de resíduos e outros;

4) Construção do modelo de inventário utilizando o software SimaPro 8.0.4.30, com base nas informações coletadas nos passos anteriores. Nessa etapa foram incluídos dados do banco de dados Ecoinvent,[®] que contém informações como as emissões de gases de efeito estufa e o consumo de recursos naturais associados à produção de diferentes materiais e insumos;

5) Realização da análise de impacto ambiental, que considerou o esgotamento abiótico, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização;

6) Interpretação dos resultados e discussão dos impactos ambientais mais significativos associados ao ciclo de vida da cerveja, identificando possíveis oportunidades de melhoria e otimização dos processos;

7) Comunicação dos resultados da análise do ciclo de vida, incluindo a elaboração de relatórios e gráficos para apresentação dos impactos ambientais associados à produção da cerveja e os resíduos gerados em seu processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO BAGAÇO DE MALTE

A caracterização química da biomassa estudada consistiu na análise imediata do material. Para tanto, foram realizados estudos experimentais acerca do teor de umidade, voláteis e cinzas do malte *in natura*. A análise imediata de um combustível fornece a porcentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), bem como o percentual do material residual inorgânico (cinzas), sendo, portanto, de fundamental importância quando se almeja o uso energético da biomassa (BRITO E BARRICHELO, 2016).

Os valores médios obtidos para os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, são apresentados na Tabela 2. As análises descritas a seguir foram todas feitas em triplicata e, portanto, o valor final de cada análise corresponde à média das três repetições.

Tabela 2: Análise imediata do bagaço de malte

Propriedade	Teor (%)
Umidade (U)	31,00
Materiais Voláteis (V)	94,12
Cinzas (Cz)	3,70
Carbono Fixo (CF)	2,18

Fonte: Autor, 2023

O percentual de umidade da biomassa é relativamente elevado, considerando-se os estudos de Cortez et al. (2008), que sugerem um teor de umidade igual ou menor que 25% como adequado para a combustão. Klitzke e Batista (2010) mencionam que a umidade da biomassa está relacionada a fatores internos, como espécie e órgão da planta, componentes anatômicos da madeira, proporção de cerne e alburno, densidade, permeabilidade, tamanho de peças ou cavacos.

Teores elevados de umidade demandam muita energia para secar a biomassa, reduzindo a eficiência de queima. Essa propriedade é um fator importante a ser observado, pois, quanto menor for este valor, menor será a quantidade de energia gasta no processo de carbonização da biomassa. A combustão da matéria volátil contribui de um modo significativo para a quantidade de calor libertado durante a combustão de biomassa, pois esta representa 50-70% em base seca da massa da biomassa.

Desta forma, a localização da libertação e combustão da matéria volátil condiciona de forma significativa o perfil de temperaturas ao longo do reator, a formação dos poluentes, a operação do reator, bem como o dimensionamento e a localização das superfícies de transferência de calor (SCALA, 2014). Em relação a essa propriedade, o bagaço de malte apresentou um valor elevado.

De acordo com Vieira (2012), a biomassa com alto teor de voláteis apresenta maior facilidade de incendiar e queimar, porém o processo de combustão em geral pode ser afetado, já que existe dificuldade de controle do mesmo. Por isso, a composição dos voláteis é de extrema importância na determinação dos produtos finais da combustão e na estimativa da energia liberada no processo.

O teor de voláteis também tem um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais da combustão de combustíveis sólidos. Desse modo, o bagaço de malte apresenta uma queima bastante rápida, com intensa liberação da fração volátil e muito pouco resíduo, indicando baixo rendimento para carbonização.

Observou-se também que o teor de cinzas (Cz) para o bagaço de malte foi de 3,7%. Isto significa que há uma pequena quantidade de minerais presentes na biomassa, e esse valor é muito satisfatório, pois não prejudica caldeiras e fornalhas.

Segundo Oliveira et al. (2012), o teor de cinzas não sofre nenhuma influência em relação aos fatores umidade e temperatura. Almeida (2013), estudando o efeito da temperatura sobre as propriedades dos produtos da carbonização, não encontrou influência sobre o teor de cinza, o mesmo acontecendo com Numazawa (2016), estudando três espécies da Amazônia.

Além disso, altos teores de cinzas necessitam de um maior consumo de oxigênio, e o valor está diretamente relacionado à quantidade de minerais presentes na biomassa, como cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro e sódio, que provocam redução nos teores de carbono fixo na biomassa vegetal (CACURO e WALDMAN, 2015).

Em comparação com outras biomassas frequentemente estudadas e que também pertencem à agroindústria brasileira, a Tabela 3 apresenta a análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, casca de palmito proveniente da Euterpe Oleácea, castanha do babaçu e palha de arroz.

Tabela 3: Análise imediata de resíduos da agroindústria

Biomassa	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	Autor/ano
Bagaço de Cana	37	1,5	11,5	Seebaluck et al. (2017)
Castanha do babaçu	93,78	1,69	4,53	Teixeira (2013)
Palha de arroz	65,47	17,89	16,67	Cortez e Lora (2017)
Casca do palmito	78	5,6	16,34	Almada et al. (2017)

Fonte: Autor, 2023

Comparando os resultados da Tabela 2 com os da Tabela 3, percebe-se que o teor de materiais voláteis do bagaço de malte é superior se comparado com o bagaço de cana-de-açúcar, castanha de babaçu, palha de arroz e casca do palmito. Já em relação às cinzas, o bagaço de malte apresentou valores inferiores em comparação com a palha de arroz e a casca do palmito. Em relação ao bagaço de cana e a castanha de babaçu, o teor de cinzas da biomassa em questão é relativamente elevado.

Os resultados encontrados na Tabela 2 estão relacionados diretamente com a utilização do combustível e são importantes para o cálculo do projeto da fornalha e das quantidades necessárias de ar primário e secundário em função da percentagem de voláteis presentes no combustível.

4.2 ANÁLISE ELEMENTAR DO BAGAÇO DE MALTE

A análise elementar do bagaço do malte foi realizada conforme apresentado no tópico 3.4.2 da metodologia. Os valores encontrados para percentual de hidrogênio (H), carbono (C), nitrogênio (N), oxigênio (O) e enxofre (S) estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Análise elementar do bagaço de malte seco in natura

Elemento	Teor (%)
Hidrogênio	4,3
Carbono	46,6
Nitrogênio	3,3
Oxigênio	36,6
Enxofre	1,3

Fonte: Autor, 2023

4.3 PODER CALOÍFICO SUPERIOR DO BAGAÇO DE MALTE *IN NATURA*

O Poder Calorífico Superior (PCS) do bagaço de malte foi realizado no Laboratório de Caracterização de Biomassa (LACBIO) da Universidade Federal do Pará (UFPA). A biomassa estudada possui um PCS= 4347,75 kcal/kg. A partir desse resultado, a Tabela 5 mostra a comparação entre o PCS do bagaço de malte e do bagaço de cana, castanha do babaçu, palha de arroz de arroz e casca de palmito, *in natura*.

Tabela 5: Comparação entre o teor de voláteis e o PCS do bagaço de malte e outras biomassas

BIOMASSA	PCS (kcal/kg)	AUTOR/ANO
Bagaço de Cana	4511,80	Seebaluck et al. (2017)
Castanha do babaçu	7411,39	Teixeira (2013)
Palha de arroz	3863,80	Cortez e Lora (2017)
Casca do palmito	3997,77	Almada et al. (2017)
Bagaço de malte	4347,75	Autor, 2023

Fonte: Autor, 2023

Analisando-se a tabela 5, percebe-se que o bagaço de malte apresenta o PCS relativamente inferior ao do bagaço de cana e significativamente inferior ao PCS da castanha de babaçu. Em relação às demais biomassas, o Poder Calorífico Superior do resíduo de malte se mostrou mais elevado.

De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2018), o bagaço de cana-de-açúcar é a biomassa mais utilizada para fins energéticos no Brasil. Nesse sentido, entende-se que o bagaço de malte também pode ter um bom aproveitamento energético, visto que seu poder de calor é similar ao do bagaço de cana-de-açúcar.

4.3.1. Poder calorífico inferior do bagaço de malte

Utilizando-se o valor do percentual de hidrogênio encontrado para o bagaço de malte (Tabela 4), foi calculado o valor do PCI da biomassa estudada de acordo com a equação (6):

$$PCI = PCS - Hv * \left[\frac{(9 * h)}{100} \right]$$

$$PCI = \frac{4347,75kcal}{kg} - 583,65 * \left[\frac{9 * 4,3}{100} \right]$$

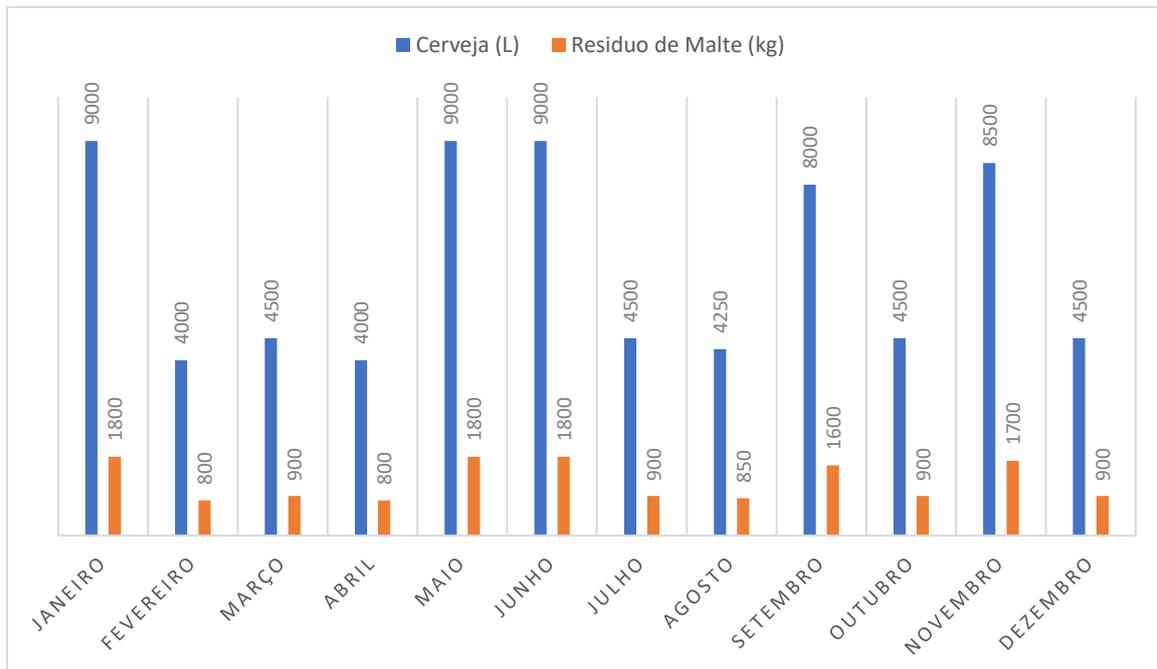
$$PCI = 4.121,8 kcal/kg$$

4.4. ESTUDO DA VIABILIDADE ENERGÉTICA

4.4.1 Produção de cerveja e bagaço de malte úmido

O volume de cerveja produzido no ano de 2021 foi cedido pela empresa, enquanto o volume de resíduo de malte úmido foi calculado de acordo com o método referenciado em 4.5.1 (ALYU E BALA, 2011). O volume mínimo de cerveja produzida nos meses extraordinários de julho, dezembro e outubro foi, em média, de 250 l/dia de produção. Já nos demais meses, foram produzidos cerca de 500 l/dia. A Figura 9 ilustra os resultados obtidos.

Figura 9: Produção de cerveja e resíduo de malte no ano de 2021



Fonte: Autor, 2023

De acordo com a figura 8, os valores de produção de cerveja variaram de 800 a 1800 kg de resíduos de malte. A menor massa de resíduos ocorreu nos meses de fevereiro e abril, nos quais foram rejeitados 800 kg do bagaço úmido de malte, enquanto a maior quantidade de biomassa foi subproduzida nos meses de maio e junho, com valor de 1.800 kg em cada um desses meses. O total de biomassa subproduzida no ano de 2021 foi de 14,7 toneladas (Tabela 6).

Tabela 6: Produção de cerveja de bagaço de malte por mês

MÊS	CERVEJA (l)	BIOMASSA UMIDA (kg)
Janeiro	9.000	1.800
Fevereiro	4.000	800
Março	4.500	900
Abril	4.000	800
Maió	9.000	1.800
Junho	9.000	1.800
Julho	4.500	900
Agosto	4.250	850
Setembro	8.000	1.600
Outubro	4.500	900
Novembro	8.500	1.700
Dezembro	4.500	900
TOTAL	73.750	14.750

Fonte: Autor, 2023

4.4.2. Consumo de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)

Segundo os dados obtidos junto aos representantes da cervejaria, ocorrem produções de cerveja quatro vezes por semana. Nos dias de segunda-feira, terça-feira, quinta-feira e sábado inicia-se uma nova fermentação do mosto.

Em cada produção são fabricados, no mínimo, 250 litros de cerveja e, no máximo, 500 litros nos meses de maior produção (maio, junho, setembro, novembro e janeiro). Visto que a maturação da cerveja dura em média 20 dias, a produção dobra no mês anterior aos de maior saída para o mercado.

Para essas produções (mínimas e máximas), em média são utilizados cerca de 20 kg e 40 kg de GLP, respectivamente. A partir desses dados pode-se inferir que, para cada litro de cerveja, são consumidos 0,081 kg de GLP.

Com relação ao gasto monetário, sabe-se que o botijão P90, utilizado pela cervejaria, custa em média R\$ 533 e armazena 90 kg de gás liquefeito de petróleo. De acordo com essas informações, pode-se concluir que 1 kg de GLP custa em torno de R\$ 5,92. A Tabela 7 mostra os valores mensais gastos com gás de cozinha.

Tabela 7: Consumo e custos mensais de GLP

MÊS	GLP (kg)	CUSTO (R\$)
Janeiro	729	4.316
Fevereiro	324	1.918
Março	364,5	2.158
Abril	324	1.918
Maio	729	4.316
Junho	729	4.316
Julho	364,5	2.158
Agosto	344,25	2.038
Setembro	648	3.836
Outubro	364,5	2.158
Novembro	689	4.076
Dezembro	364,5	2.158
Total	5.974	35.365

Fonte: Autor, 2023

Analisando-se o exposto, percebe-se a cervejaria gastou R\$ 35.365 apenas com GLP. Uma forma de reduzir esse custo é diminuindo o consumo de gás natural e, para isso, se faz necessário o consumo de um combustível mais barato e que atenda a demanda energética exigida.

Utilizando-se a caldeira de biomassa juntamente com a de gás natural, reduz-se o consumo anual desse combustível. Para que reduza o consumo de GLP sem o comprometimento da produção de cerveja, é preciso adotar um regime de trabalho (RT) adequado para ambas as caldeiras. Esse RT deve respeitar a quantidade de energia consumida para a produção de cerveja, juntamente a quantidade de biomassa seca gerada pela empresa.

4.4.3. Geração de bagaço seco

Para o cálculo do bagaço seco, foi utilizada a equação (7). Considerando-se que a massa total de resíduo de mate foi igual a 14.750 kg, e o teor de umidade da referida biomassa é de 0,31, a quantidade de biomassa seca gerada foi igual a 10.177,5 kg:

$$ms = mu - (mu * u)$$

$$ms = 14750 \text{ kg} - (14750 \text{ kg} * 0,31)$$

$$ms = 14750 \text{ kg} - 4572,5 \text{ kg}$$

$$ms = 10.177,5 \text{ kg}$$

4.4.4 Massa de vapor produzida pela queima de GLP

Para estimar-se a massa de vapor produzida pela caldeira de GLP em cada mês de trabalho, utilizou-se a equação (4), levando em consideração a massa de combustível utilizada em cada mês, o PCI do GLP e o rendimento da caldeira. A Tabela 8 mostra os valores da massa de vapor produzidos em cada mês.

Tabela 8: Massa de vapor produzida a partir da queima de GLP

MÊS	MASSA DE VAPOR (kg) (kg)
Janeiro	3484,6
Fevereiro	1548,7
Março	1742,3
Abril	1548,7
Maior	3484,6
Junho	3484,6
Julho	1742,3
Agosto	1645,5
Setembro	3097,4
Outubro	1742,3
Novembro	3291,0
Dezembro	1742,3
TOTAL	28.555

Fonte: Autor, 2023

4.4.5. Consumo de bagaço de Malte seco

Para estimar a quantidade de malte seco necessária para suprir o consumo energético da empresa, tomando por base as atividades, levou-se em consideração a massa de vapor produzida pela caldeira de GLP (Tabela 9).

Tabela 9: Simulação da quantidade de biomassa necessária para suprir o gasto energético da empresa (2021)

MÊS	CONSUMO DE BIOMASSA (kg)
JANEIRO	1951,8
FEVEREIRO	867,5
MARÇO	975,9
ABRIL	867,5
MAIO	1951,8
JUNHO	1951,8
JULHO	975,9
AGOSTO	921,7
SETEMBRO	1734,9
OUTUBRO	975,9
NOVEMBRO	1843,3
DEZEMBRO	975,9
TOTAL	15.993,62

Fonte: Autor, 2023

Analisando-se a tabela 9, percebe-se que, para suprir o consumo energético anual da empresa, seria necessária a produção de 15.993,62 kg de biomassa seca. No entanto, a empresa produz apenas 10.177,5 kg desse combustível, o que equivale a 63% do necessário. Desse modo, fica claro que apenas os resíduos subprodutos não seriam capazes de sustentar a demanda da cervejaria.

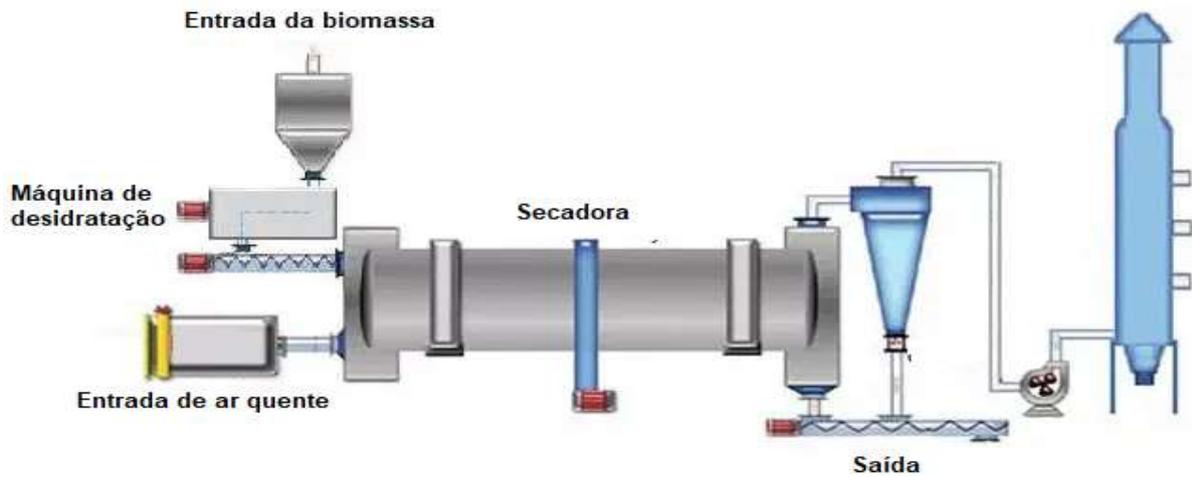
4.5 PROPOSTA PARA O USO DO BAGAÇO DE MALTE

A empresa trabalha com uma caldeira flamotubular alimentada por GLP, na qual 50% do vapor é destinado para a sala de cozimento, 30% ao envase e 20% se destina à higienização dos equipamentos. Com a proposta de cogeração, o vapor proveniente das caldeiras (as quais irão trabalhar simultaneamente), também será direcionado para a secagem do combustível da biomassa. Sugere-se, então, um secador de tambor rotativo.

Esse tipo de secador, de modo geral, é adequado para a secagem de biomassa lenhosa, produtos agrícolas e resíduos sólidos urbanos (RSU). Para a produção de combustíveis alternativos, os secadores rotativos são aplicados para diminuir a umidade do material até o nível desejado nas etapas do processo a jusante. Esses equipamentos são feitos em aço carbono ou inox, com tecnologia para secagem dos mais diversos tipos de biomassa (cavaco de madeira, bagaço de cana, capim elefante, entre outras), com sistemas de passagem simples ou triplo-isolamento térmico. O secador rotativo para biomassa, com acionamento direto (rolete) e indireto (corrente), possui dois ciclones de alta eficiência com cones na saída (Figura 10).

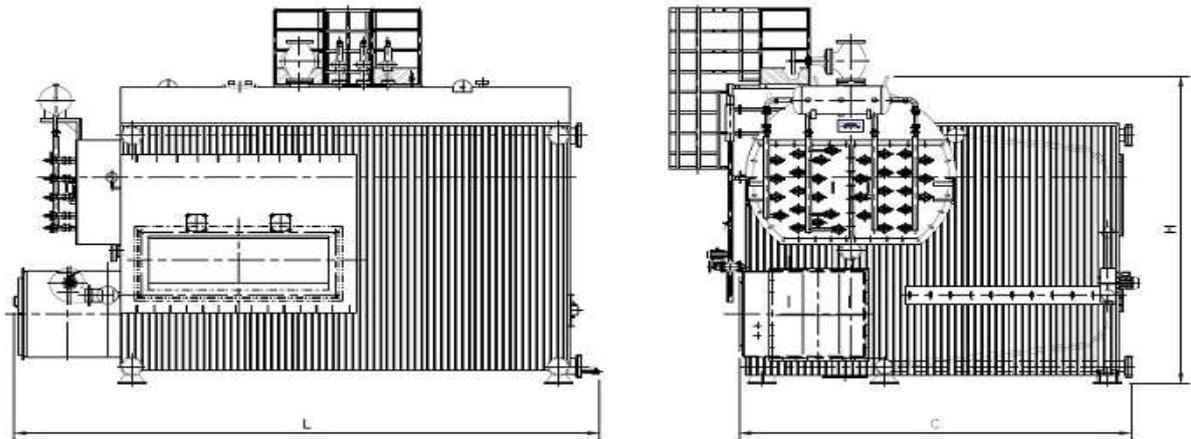
O modelo FAM-12 (Figura 11), fabricado pela Aalborg Industries A/S, é a caldeira indicada para a queima do bagaço de malte. Esse equipamento é do tipo ambitubular, com corpo superior flamotubular e fornalha lateral aquatubular, para queima de lenha, cavaco, briquete, pellet, bagaços ou óleo combustível/GAS. Possui grelha tubular refrigerada, maior durabilidade e fácil manutenção, em que a fornalha é envolta com tubos de parede d'água aletados, o que proporciona menor perda de calor para o ambiente ou por refratários, resultando em elevada eficiência térmica (AALBORG, 2020).

Figura 10: Secador de tambor rotativo



Fonte: Adaptado de BIOMAX, 2020.

Figura 11: Caldeira FAM

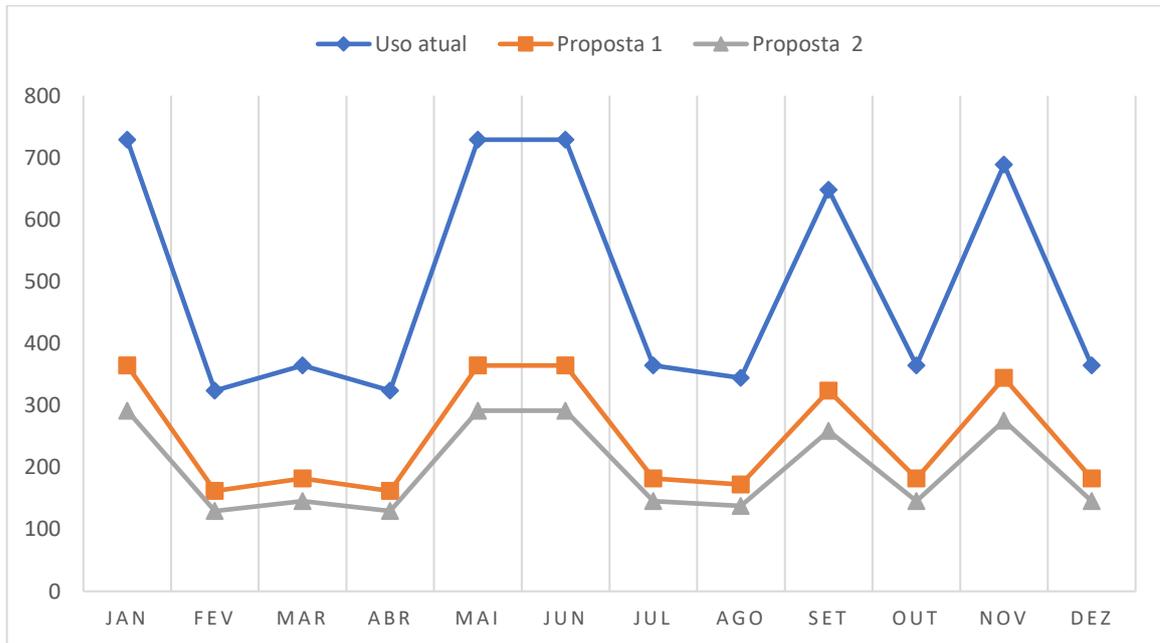


Fonte: AALBORG, 2020

4.5.1 Proposta de uso dos combustíveis

O valor do consumo de GLP e biomassa foram calculados de acordo com a equação (8). O gráfico da Figura 12 mostra a relação entre o consumo de GLP requerido pelas propostas 1 e 2, e o consumo total de combustível utilizado nos meses de 2021.

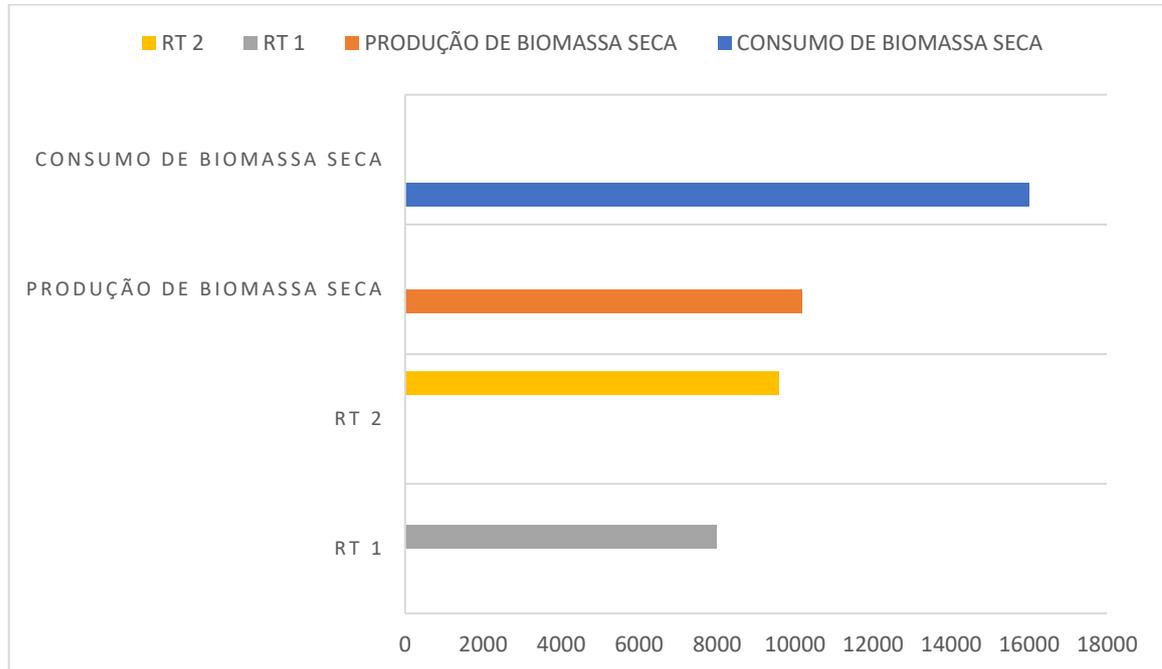
Figura 12: Relação entre as propostas de uso dos combustíveis e o uso atual



Fonte: Autor, 2023

De acordo com o gráfico da Figura 12, percebe-se que nenhuma das formas de uso dos combustíveis que foram propostas ultrapassou o volume total de GLP consumido pela caldeira no ano de 2021. O gráfico da Figura 13 mostra a relação entre a quantidade de biomassa seca (kg), produzida anualmente, a quantidade de biomassa que seria consumida pela empresa para a produção de cerveja (kg) e a quantidade de biomassa necessária para as duas propostas de uso (kg).

Figura 13: Relação entre as propostas de uso dos combustíveis e a quantidade de biomassa seca produzida pela empresa



Fonte: Autor, 2023

A proposta 1 sugere que a biomassa seja responsável por 50% da quantidade de energia consumida para a produção de cerveja, enquanto que a proposta 2 exige da biomassa 60% do trabalho. Para a modelação do gráfico da Figura 12, utilizou-se como base a quantidade de biomassa consumida para suprir todo o consumo energético da empresa durante um ano (15.993,62 kg). Diante do consumo de GLP e mantendo o consumo energético padrão, pode-se quantificar a redução de gasto mensal com combustível, como mostram as tabelas 10 e 11.

Fazendo uma analogia entre as tabelas 10 e 11, percebe-se que houve uma redução de 60% nos gastos com gás liquefeito de petróleo (GLP) com a implementação da proposta 1. Após a implantação dessa proposta de trabalho, se gastará em um ano R\$ 17.682,30 com GLP, resultando em uma economia anual de R\$ 17.682,70. A tabela 11 apresenta o consumo e o gasto com GLP para a proposta de trabalho 2. Nessa proposta será utilizado 40% de GLP para a produção de cerveja.

Tabela 10: Gasto com GLP utilizando a proposta 1

MÊS	PROPOSTA 1 GLP (kg)	CUSTO (R\$)
JANEIRO	364,5	2157,8
FEVEREIRO	162	959,0
MARÇO	182,25	1078,9
ABRIL	162	959,0
MAIO	364,5	2157,8
JUNHO	364,5	2157,8
JULHO	182,25	1078,9
AGOSTO	172,125	1019,0
SETEMBRO	324	1918,1
OUTUBRO	182,25	1078,9
NOVEMBRO	344,25	2038,0
DEZEMBRO	182,25	1078,9
TOTAL	2986,9	17.682,30

Fonte: Autor, 2023

Tabela 11: Gasto com GLP de acordo com a proposta 2

MÊS	PROPOSTA 2 GLP (kg)	CUSTO (R\$)
JANEIRO	291,6	1726,3
FEVEREIRO	129,6	767,2
MARÇO	145,8	863,1
ABRIL	129,6	767,2
MAIO	291,6	1726,3
JUNHO	291,6	1726,3
JULHO	145,8	863,1
AGOSTO	137,7	815,2
SETEMBRO	259,2	1534,5
OUTUBRO	145,8	863,1
NOVEMBRO	275,4	1630,4
DEZEMBRO	145,8	863,1
TOTAL	2389,5	14.145,84

Fonte: Autor, 2023

Nessa proposta o gasto com GLP seria de R\$ 14.145,84, gerando uma economia de R\$ 21.219,16 ao ano.

4.6 VIABILIDADE DE EXECUÇÃO DO PROJETO

Este estudo aponta o secador rotativo, da fabricante Aalborg Industries A/S, por apresentar capacidade e rendimento coniventes com o tipo de biomassa da empresa, cujo preço

é mostrado na tabela 12. O *payback* simples considera apenas a amortização para a aquisição do secador rotativo.

A partir da análise das tabelas 13 e 14, percebe-se que a proposta 2 garante um pagamento sobre o investimento mais rápido que a proposta 1. Assim, de acordo com a proposta 1, o retorno do investimento do secador rotativo aconteceria em até 9 anos (tabela 13), enquanto a proposta 2 sugere que o tempo estimado para a compensação dessa aquisição aconteceria em 8 anos (tabela 14).

Tabela 12: Preço do equipamento

PREÇO	SECADOR (R\$)
1	150.000

Fonte: MF Rural

Tabela 13: Amortização da proposta 1

PAYBACK DA PROPOSTA 1		
LINHA DO TEMPO APÓS INPLANTAÇÃO (ANOS)	MONTANTE ANUAL MÉDIO ECONOMIZADO (R\$)	AMORTIZAÇÃO DO INVESTIMENTO (R\$)
1	R\$ 17.682,70	R\$ 150.000,00
2	R\$ 17.682,70	R\$ 132.317,30
3	R\$ 17.682,70	R\$ 114.634,60
4	R\$ 17.682,70	R\$ 96.951,90
5	R\$ 17.682,70	R\$ 79.269,20
6	R\$ 17.682,70	R\$ 61.586,50
7	R\$ 17.682,70	R\$ 43.903,80
8	R\$ 17.682,70	R\$ 26.221,10
9	R\$ 17.682,70	R\$ 8.538,40
10	R\$ 17.682,70	-R\$ 9.144,30

Fonte: Autor, 2023

Tabela 14: Amortização da proposta 2

PAYBACK DA PROPOSTA 2		
LINHA DO TEMPO APÓS INPLANTAÇÃO (ANOS)	MONTANTE ANUAL MÉDIO ECONOMIZADO (R\$)	AMORTIZAÇÃO DO INVESTIMENTO (R\$)
1	R\$ 21.219,16	R\$ 150.000,00
2	R\$ 21.219,16	R\$ 128.780,84
3	R\$ 21.219,16	R\$ 107.561,68
4	R\$ 21.219,16	R\$ 86.342,52
5	R\$ 21.219,16	R\$ 65.123,36
6	R\$ 21.219,16	R\$ 43.904,20
7	R\$ 21.219,16	R\$ 22.685,04
8	R\$ 21.219,16	R\$ 1.465,88
9	R\$ 21.219,16	-R\$ 19.753,28

Fonte: Autor, 2023

4.6.1 Payback Descontado

Também é possível realizar uma estimativa de retorno sobre o investimento do secador rotativo através do payback descontado, sendo esse um indicador financeiro amplamente utilizado para avaliar a viabilidade de um investimento. Para realizar a estimativa de retorno sobre o investimento do secador rotativo usando essa modalidade, é necessário levar em consideração o investimento inicial, os fluxos de caixa esperados ao longo do tempo e a taxa de desconto apropriada.

O investimento inicial incluiria o custo de aquisição do secador rotativo, bem como os custos associados à instalação e outras despesas iniciais, sendo estes desconsiderados nesse estudo. Os fluxos de caixa esperados seriam os benefícios financeiros diretos resultantes do uso do secador rotativo, como a redução de custos operacionais, o aumento da eficiência energética ou o aumento da capacidade produtiva. Nesta pesquisa é considerada o montante médio anual economizado.

A taxa de desconto é um elemento crítico no cálculo do payback descontado, pois reflete o custo de oportunidade do dinheiro investido. Ela pode ser baseada no custo médio ponderado de capital da empresa ou em uma taxa de retorno mínima desejada estabelecida pela administração. A Tabela 15 apresenta os dados estimados para o cálculo do payback descontado do secador rotativo.

Tabela 15: Dados para o cálculo do payback descontado do secador rotativo

VALOR DO INVESTIMENTO (VI)	R\$ 150.000,00
TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE (TMA)	5%
MONTANTE MÉDIO ANUAL ECONOMIZADO (MAE)	R\$ 17.682,70

Fonte: Autor, 2023

O cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) anual é essencial para avaliar a viabilidade de um investimento, levando em consideração o valor do dinheiro ao longo do tempo. A fórmula utilizada para calcular o VPL é descrita pela equação 9.

$$VPL = MAE / (1 + TMA)^n. \quad (9)$$

Nessa fórmula, o MAE representa o Montante de Atualização Equivalente, o TMA corresponde à Taxa Mínima de Atratividade e o n é o número de períodos considerados. O Montante de Atualização Equivalente é o valor futuro dos fluxos de caixa anuais, trazido para o presente utilizando a taxa mínima de atratividade. Essa taxa é estabelecida como a taxa de retorno mínima que o investidor exige para realizar o investimento.

Ao aplicar a fórmula do VPL, o Montante de Atualização Equivalente é dividido pelo fator de atualização, dado pela expressão $(1 + TMA)^n$. Esse fator ajusta o valor futuro para o valor presente, considerando tanto o tempo quanto a taxa mínima de atratividade. Ao realizar o cálculo do VPL anual, consideramos os fluxos de caixa que ocorrem em cada ano do projeto ou investimento. Essa análise nos permite avaliar se o investimento é viável ou não, com base no valor atualizado dos fluxos de caixa.

É importante destacar que um VPL positivo indica que o investimento é lucrativo, enquanto um VPL negativo sugere que o investimento pode não ser vantajoso. Portanto, ao calcular o VPL anual, busca-se uma medida objetiva para embasar decisões financeiras. Ao substituir os valores na fórmula do VPL, considerando um Montante de Atualização Equivalente de R\$ 17.682,70, uma Taxa Mínima de Atratividade de 5% e n como um período de 1 ano, obtemos o seguinte cálculo:

$$\text{VPL} = \text{R\$ } 17.682,70 / (1 + 0,05)^1$$

$$\text{VPL} = \text{R\$ } 16.792,76$$

Portanto, o Valor Presente Líquido (VPL) anual, com base nos valores fornecidos, é de R\$ 16.792,76. Esse resultado positivo sugere que o projeto ou investimento pode ser lucrativo. O próximo passo é calcular o Fluxo de Caixa Acumulado (FCA). O FCA é obtido ao somar o Valor Presente Líquido (VPL) de cada período até recuperar o investimento inicial.

Para calcular o FCA, é necessário determinar o período em que o fluxo de caixa acumulado se torna positivo, ou seja, quando a soma dos VPLs acumulados ultrapassa o investimento inicial. A fórmula necessária para esse cálculo é descrita pela equação 10.

$$\text{FCA} = -\text{VI} + \text{VPL}_1 + \text{VPL}_2 + \dots + \text{VPL}_n \quad (10)$$

Substituindo os valores na fórmula, temos:

$$\text{FCA} = -\text{R\$ } 150.000,00 + \text{R\$ } 16.792,76 + \text{R\$ } 16.792,76 + \dots + \text{R\$ } 16.792,76$$

$$\text{Ano 1: FCA1} = -\text{R\$ } 150.000,00 + \text{R\$ } 16.792,76 = -\text{R\$ } 133.207,24$$

$$\text{Ano 2: FCA2} = \text{FCA1} + \text{R\$ } 16.792,76 = -\text{R\$ } 133.207,24 + \text{R\$ } 16.792,76 = -\text{R\$ } 116.414,48$$

(...)

E assim por diante, até encontrar a recuperação do investimento inicial. A Tabela 16 apresenta o tempo necessário para este objetivo.

Tabela 16: Payback descontado do secador rotativo

ANO	INVESTIMENTO INICIAL	VPL	FCA acumulado
1	R\$ -150.000,00	R\$ 16.792,76	-R\$ 133.207,24
2		R\$ 16.792,76	-R\$ 116.414,48
3		R\$ 16.792,76	-R\$ 99.621,72
4		R\$ 16.792,76	-R\$ 82.828,96
5		R\$ 16.792,76	-R\$ 66.036,20
6		R\$ 16.792,76	-R\$ 49.243,44
7		R\$ 16.792,76	-R\$ 32.450,68
8		R\$ 16.792,76	-R\$ 15.657,92
9		R\$ 16.792,76	R\$ 13.534,84
10		R\$ 16.792,76	R\$ 15.2133,60

Fonte: Autor, 2023

Com base na Tabela 16 observa-se que a partir do nono ano, o FCA acumulado se torna positivo, indicando que o valor do investimento inicial pode ser recuperado. Isso significa que, após esse período, o projeto ou investimento começa a gerar um retorno financeiro líquido.

É importante considerar outros fatores além do FCA, como riscos, expectativas futuras e outros indicadores financeiros relevantes, para uma avaliação completa da viabilidade do projeto. No entanto, o fato de o FCA se tornar positivo a partir do nono ano é um indicativo promissor, sugerindo que o projeto pode ser considerado viável em termos financeiros.

No contexto específico do secador rotativo em questão, essa recuperação do valor do investimento a partir do nono ano pode influenciar a tomada de decisão. É importante considerar o tempo necessário para recuperar o investimento, bem como a taxa de retorno ao longo dos anos, para avaliar se o projeto atende às expectativas e objetivos financeiros estabelecidos.

4.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL

4.7.1 Objetivos e escopo

4.7.1.1 Objetivos

- Quantificar o impacto ambiental da fabricação de cerveja artesanal, produzida em uma cervejaria no norte do país, embalada em uma garrafa de 300 ml usando a metodologia da Análise do Ciclo de Vida (ACV);
- Identificar as fases e processos com maior contribuição para os impactos ambientais associados à produção e embalagem de uma cerveja artesanal.

4.7.1.2 Escopo

A) Unidade funcional

A unidade funcional é de 300 ml de cerveja artesanal tipo *lager* fabricada e embalada em uma garrafa de vidro não retornável. Foi assumido que todos os dados de inventário e avaliação correspondem à unidade de uma garrafa com cerveja fabricada e embalada disponível para distribuição de venda.

B) Limites do sistema

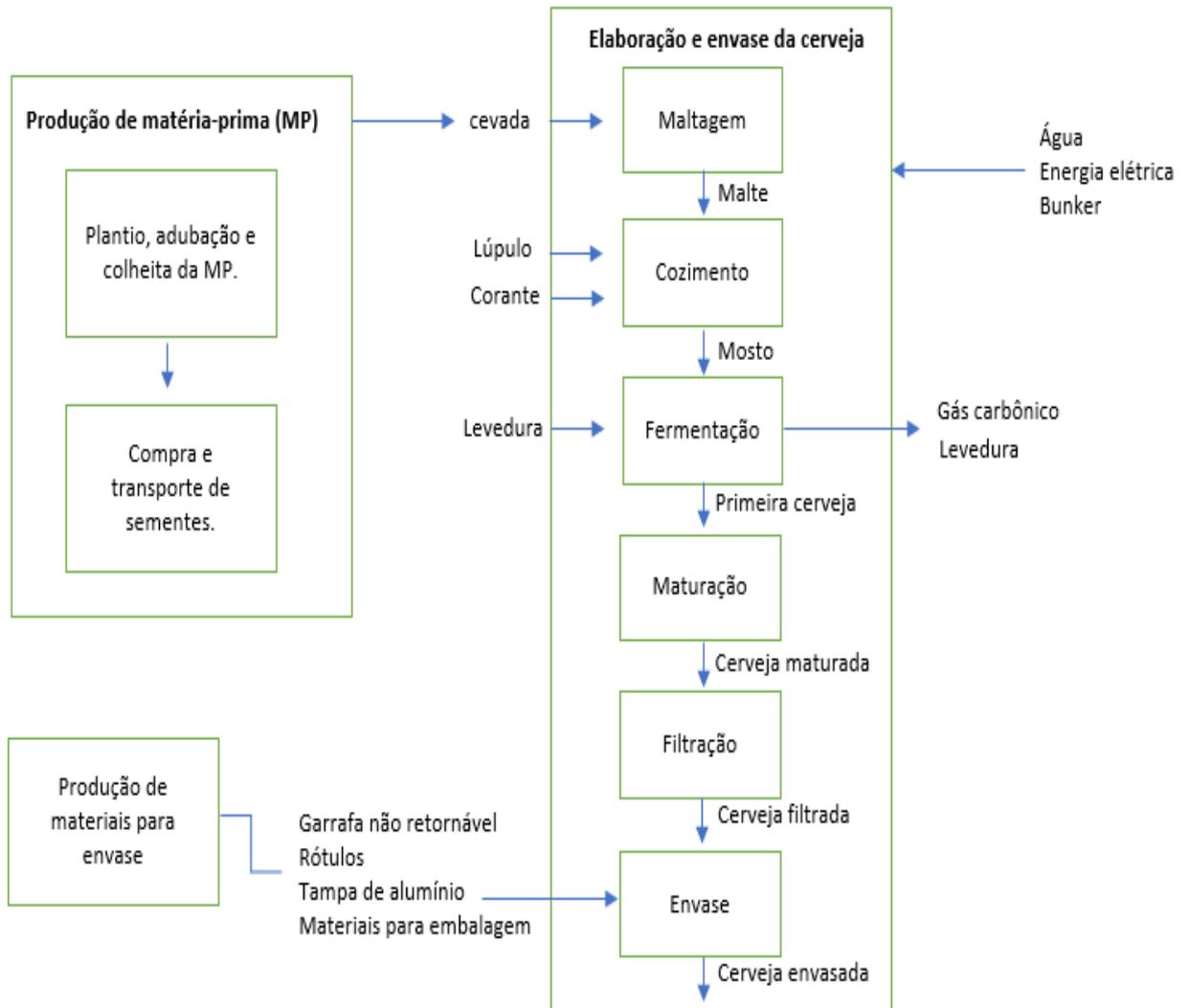
Os processos considerados para a Análise do Ciclo de Vida são: produção de matérias-primas (cevada), maltagem, cozimento, fermentação, maturação, filtração e envase. A análise também inclui o inventário de materiais de limpeza e utilidades, como água potável e eletricidade, que estão presentes dentro dos processos de fabricação e engarrafamento da cerveja.

Dentro da Análise do Ciclo de Vida tem-se os coprodutos resultantes do processo de fabricação da cerveja, bem como o transporte de matérias-primas para a cervejaria, o processo de distribuição e consumo do produto acabado e tratamento de efluentes pós-venda. A Figura 14 mostra os limites do sistema estudado.

4.7.1.3 Descrição do processo geral de fabricação da cerveja

O processo de produção da cerveja na empresa cervejeira em questão abrange as etapas de maltagem, cozimento, fermentação, maturação, filtração e envase. Os principais insumos para a fabricação de cerveja são: malte, lúpulo e água, enquanto o processo de embalagem tem como principal insumo garrafas, tampas e rótulos.

Figura 14: Limites do sistema ACV



Fonte: Autor, 2023

A) Recepção da matéria-prima

Os grãos de malte são recebidos a granel e descarregados no poço de coleta, para posteriormente serem levados por meio de caçambas aos respectivos silos (reservatórios) de armazenagem. Os grãos recebidos passam por um processo de limpeza onde o malte e os adjuntos são dosados nos sistemas de limpeza e materiais estranhos, como pedras, galhos, entre outros, são extraídos para depois serem pesados e levados para moagem.

B) Maltagem

A maltagem de cevada é o processo pelo qual os grãos de cevada são transformados em malte por meio de germinação controlada para que o grão tenha a maior concentração de

açúcares fermentáveis e outros nutrientes. O processo começa depois que os grãos de cevada são limpos e pesados para então serem armazenados em silos por aproximadamente 160 dias com ventilação, temperatura e umidade controladas.

Os grãos de cevada (com umidade inicial de 12-13%) são submersos em um tanque com água temperada e oxigenação; neste ponto, os grãos de cevada atingem 43-44% de umidade. Posteriormente, inicia-se a fase de germinação, cujo objetivo é permitir o desenvolvimento de enzimas. O processo de germinação termina quando o comprimento do acrospiro (pequeno caule que começa a crescer do grão).

Os grãos umedecidos são levados para os recipientes de germinação, onde são submetidos a correntes de ar de 12 a 16°C de temperatura e água de maneira a manter a umidade constante. Os peixes salgados possuem caudas agitadoras que mexem o grãos e evitam que fiquem emaranhados quando as radículas se formarem. Nesta fase os grãos de cevada leva o nome de malte verde.

Por meio da secagem e torrefação é retirada a água absorvida pelo grão nos processos por meio de um fluxo constante de ar seco de 60°C a 85°C, reduzindo-se a porcentagem de umidade no grão para 5% e degerminando o grão, o que favorece a sua conservação. As radículas formadas na germinação são extraídas por fricção em peneiras que são vendidos como insumos agrícolas a terceiros para ração animal. O malte já processado tem aspecto dourado, seco e quebradiço.

C) Cozimento

1) Esmerilhamento

O processo de produção do mosto começa quando o malte e adjuntos são enviados para moagem para serem esmagados e reduzem o seu tamanho. O produto desse processo é a farinha ou sêmola resultante e o desprendimento da casca do malte. O malte passa por um processo de peneiramento no qual as partículas são selecionadas de acordo com o tamanho da peneira, e a farinha que passou pela peneira é direcionada para a panela de cereais.

2) Maceração

Na panela crua, uma porção de farinha de malte (entre 8% e 15%) é aquecida com água até obter-se uma mistura uniforme. O resto da farinha peneirada é passado para o pote de mistura, em que a água é adicionada e preparada para ser misturada com o conteúdo da panela

bruta. Uma vez que o conteúdo é homogeneizado, os amidos desses grãos são convertidos em açúcar, resultando em um líquido açucarado.

3) Filtração do mosto

O líquido adoçado passa por um filtro para facilitar a prensagem da mistura e remover o material orgânico presente. Nesse processo, os sólidos ou bagaços da cerveja são separados para a obtenção de um líquido açucarado chamado mosto. A maior parte dos sólidos é constituída pela casca ou farelo úmido do malte que são encaminhados ao secador para posteriormente serem comercializados como ração animal.

4) Cozimento

O mosto filtrado é levado para ferver na caldeira de cozedura em que os microorganismos são destruídos e as enzimas são desativadas. O mosto contém basicamente açúcares e dextrinas, proteínas, vitaminas, minerais, melanoidinas (cor), ácidos graxos e alfa ácidos. Nesta etapa é adicionado o lúpulo onde o mosto adquire seu amargor e o cheiro característico.

5) Clarificação

O mosto cozido é deixado a repousar no decantador para que as substâncias que se formaram no processo de cozimento se acumulem no fundo e retenham a precipitação de proteínas, alcançando-se a clarificação do mosto.

D) Fermentação

Depois que o mosto cozido esfria, as leveduras são adicionadas para a multiplicação celular, e a mistura é deixada em repouso em um tanque a 12°C por aproximadamente 7 dias, permitindo que o metabolismo da levedura mude de respiração aeróbica inicial para a fase da respiração anaeróbia, em que os açúcares do mosto (glicose) são transformados em álcool (etanol) e dióxido de carbono (dióxido de carbono).

O resultado desta fase é um líquido chamado de cerveja imatura. O dióxido de carbono e a levedura formados em excesso neste processo podem ser extraídos e reaproveitados em outros processos. O dióxido de carbono é enviado para a estação de tratamento a gás, enquanto o fermento é enviado para o secador.

E) Maturação

A cerveja produzida é transferida para os tanques de maturação para um descanso de aproximadamente 20-28 dias, com temperaturas próximas a 0°C, atingindo uma estabilização química e resfriamento do sabor. O objetivo do descanso é a decantação das leveduras ainda presentes na cerveja.

F) Filtração

Este processo consiste na remoção das leveduras por meio de um sistema capilar que retém a maior quantidade de matéria insolúvel ainda em suspensão, como leveduras e proteínas presentes na cerveja para que a ela atinja seu brilho e transparência característicos. Na usina, o processo de filtração é feito por meio de velas de terra diatomáceas, um dos processos mais antigos de fabricação de cerveja.

A cerveja filtrada é enviada para tanques a fim de serem analisadas por sistemas de controle de qualidade. Depois que a cerveja atende a todos os parâmetros estabelecidos, ela é enviada para as linhas de embalagem para o produto a ser engarrafado. Para efeitos da Análise do Ciclo de Vida nesta pesquisa, apenas o engarrafamento de cerveja em recipientes não retornáveis serão considerados.

G) Envase

Para o acondicionamento de garrafas não retornáveis, o processo se inicia com a despaletização do vidro novo. Como o recebimento dessas garrafas do fabricante é quase estéreis e sem rótulos, os frascos recebidos passam por um rápido processo de limpeza.

As garrafas em bom estado são transportadas por dutos até a linha de envase para ser enchido com o produto pasteurizado e resfriado e vedado com tampas metálicas previamente esterilizados por raios UV. A cervejaria em estudo vende seus produtos para um terceiro, que é responsável desde a fase de distribuição das garrafas até aos respectivos pontos de venda.

4.7.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida

Para a determinação do inventário por processos da Análise do Ciclo de Vida, foi necessário coletar informações bibliográficas para quantificar o fluxo de materiais e emissões do sistema, tomando como referência o diagrama dos limites do sistema apresentado na Figura 13, em que são especificados os processos incluídos no sistema de produto *Cradle-to-Gate*.

Cada um dos materiais e insumos provenientes dos diferentes processos de fabricação e envase de cerveja foram atribuídos a um item das diferentes bases de dados do software SimaPro 8.0.4.30 e o sistema Ecoinvent®, além de outros dados secundários que refletissem condições próximas da cervejaria em estudo.

Após a coleta de dados sobre as matérias-primas e insumos, foi realizada a validação e o balanço de massa dos materiais por processos, e foi referenciado o fluxo de entradas e saídas como a unidade funcional, cujo produto final processado e acabado inclui uma peça completa de uma cerveja engarrafada de vidro de 300 ml com tampa, rótulos e invólucro, que é utilizada na distribuição, proporcionalmente à unidade de uma garrafa.

4.7.2.1 Descrição dos dados do inventário

Nesta etapa do procedimento, todas as entradas como insumos e materiais, bem como energia, utilidades e materiais de limpeza para o malte de cevada, cozimento, fermentação, maturação, filtração e envase, foram coletadas e simuladas de acordo com o banco de dados do sistema Ecoinvent. As entradas e saídas foram quantificadas em quilogramas por litro, a eletricidade em kWh e calor foi expresso em MJ.

A) Malte de cevada

Os tipos de materiais, além da eletricidade, para o malte de cevada foram considerados a partir das bases do banco de dados do Ecoinvent® e uma aproximação dos dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica (ANEEL) do ano de 2021 que refletisse condições próximas para a cervejaria desse estudo. A Tabela 17 apresenta o detalhamento do inventário do referido processo.

Tabela 17: Inventário de malte de cevada baseado em 0,10 kg de malte

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	FONTE
Grãos de cevada	4,9 x 10 ⁸	kg	Ecoivent
Energia elétrica	0,0069841	kWh	ANEEL
Gás natural	0,056494	MJ	ANEEL

Fonte: Autor, 2023

O resultado desse processo é um grão de cevada germinado chamado malte, que é a entrada principal para a próxima fase.

B) Cozimento

A etapa de cozimento inclui o inventário de matérias-primas, água, calor, materiais para equipamentos de limpeza e eletricidade. A fase de cozimento inclui os processos de moagem, maceração, filtração, fervura, sedimentação e resfriamento. Os materiais da fase de queima são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18: Inventário de cozimento baseado em 0,60 kg de mosto

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	FONTE
Malte	0,100352	kg	Ecoivent
Água fervente	0,405509	kg	Ecoivent
Ácido fosfórico	0,000143	kg	Ecoivent
Cloreto de cálcio	0,000269	kg	Ecoivent
Água descalcificada	0,315959	kg	Ecoivent
Lúpulo	0,00031	kg	Marsarioli, 2019
Cor para a cerveja	0,000124	kg	Ecoivent
Soda cáustica	0,000217	kg	Ecoivent
Ácido nítrico	0,000014	kg	Ecoivent
Água potável	0,01328	kg	Ecoivent
Energia elétrica	0,007048	kWh	ANEEL
Bunker	0,386996	MJ	ANEEL

Fonte: Autor, 2023

O resultado desse processo é um líquido açucarado chamado mosto, que contém água, extrato de malte e adjuntos, como sais, minerais, entre outros.

C) Fermentação

Na fermentação foram considerados os materiais e insumos que fazem parte da receita, como sais para cerveja, produtos de limpeza e utilidades como água potável e eletricidade, mostradas na Tabela 19.

Tabela 19: Inventário de fermentação baseado em 0,55 kg da primeira cerveja

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	FONTE
Mosto	0,607072	kg	Ecoivent
Levedura	0,000141	kg	Marsarioli, 2019
Hipoclorito de sódio	0,000007	kg	Ecoivent
Soda cáustica	0,000936	kg	Ecoivent
Detergente alcalino	0,000002	kg	Ecoivent
Ácido nítrico	0,00007	kg	Ecoivent
Água potável	0,000713	kg	Ecoivent
Energia elétrica	0,007159	kWh	ANEEL

Fonte: Autor, 2023

O resultado do processo é conhecido como a primeira cerveja, que contém o odor e o amargor característicos.

D) Maturação

A maturação consiste na guarda ou descanso da primeira cerveja. O resultado disso processo é a cerveja cozida pronta para ser filtrada no próximo processo. A Tabela 20 apresenta o inventário dessa etapa.

Tabela 20: Inventário de maturação baseado em 0,52 kg da primeira cerveja

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	FONTE
Primeira cerveja	0,555036	kg	Ecoivent
Ácido nítrico	0,000083	kg	Ecoivent
Soda cáustica	0,00104	kg	Ecoivent
Hipoclorito de sódio	0,000008	kg	Ecoivent
Água potável	0,000832	kg	Ecoivent
Energia elétrica	0,007415	kWh	ANEEL
CO ₂	0,027736	kg	Borges, 2016
Levedura	0,000002	kg	Marsarioli, 2019

Fonte: Autor, 2023

As saídas para a tecnosfera são compostas por CO₂ e fermento, que podem se formar em excesso nesse processo, e esse excesso é retirado e reaproveitado em outros processos. Este estudo considera que neste lote de cozimento foram adquiridas e utilizadas entradas não advindas de outro processo (reutilização).

E) Filtração

Este processo consiste em remover todos os sedimentos provenientes do processo maturação ou guarda. Os materiais mais importantes neste processo são os sistemas de filtragem (não incluídos nesta avaliação), água potável, bunker para pasteurização e eletricidade. O resultado desse processo é uma cerveja gelada e clarificada, livre de sedimentos. A Tabela 21 mostra o inventário desse processo.

Tabela 21: Inventário de filtração baseado em 0,32 kg de cerveja filtrada

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	FONTE
Cerveja madura	0,526744	kg	Ecoivent
Ácido nítrico	0,000041	kg	Ecoivent
Soda cáustica	0,000527	kg	Ecoivent
Ácido peracético	0,000013	kg	Ecoivent
Hipoclorito de sódio	0,000003	kg	Ecoivent
Água potável	0,003909	kg	Ecoivent
Bunker	0,036494	MJ	ANEEL
Energia elétrica	0,008989	kWh	ANEEL

Fonte: Autor, 2023

F) Envase

O inventário de embalagens considera a entrada do processo anterior (cerveja filtrada) e aquisição de materiais de embalagem como frascos, tampas, rótulos e invólucro. A quantificação dos materiais de embalagem no sistema foi lançada em unidades de quilogramas por peça, desconsiderando também percentual de perda ou redução decorrentes de produtos defeituosos. A Tabela 22 apresenta o inventário desse processo.

Tabela 22: Inventário de fermentação baseado em 0,33 kg de cerveja embalada

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	FONTE
Cerveja filtrada	0,35	kg	Ecoivent
Invólucro	0,00013	kg	Ecoivent
Água potável	0,476248	kg	Ecoivent
Desinfetante	0,000081	kg	Ecoivent
Inibidor de corrosão Vantrotex	0,00005	kg	Ecoivent
Bunker	0,357196	MJ	ANEEL
Energia elétrica	0,060722	kWh	ANEEL
Garrafa de vidro 300 ml	0,204221	kg	Giacco, 2018

tampa de alumínio do tipo <i>twist off</i>	0,00001750	kg	Silva, 2019
Rótulo	0,00000625	kg	Ecoivent

Fonte: Autor, 2023

O resultado deste processo é um produto que consiste em uma garrafa de vidro não retornável, contendo 300 ml de cerveja, tampa de alumínio, etiquetas e embalagens para consumo.

4.7.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida avalia a magnitude dos impactos ambientais selecionados a partir do inventário de ciclo de vida. A seguir é apresentada a seleção de categorias de impacto associadas à produção de cerveja, atribuição do inventário do ciclo de vida a categorias ambientais específicas, bem como os resultados dos principais impactos associados ao produto.

4.7.3.1 Seleção das categorias de impacto

Neste estudo, as categorias de impacto selecionadas foram escolhidas de forma a refletir as categorias de interesse associadas ao inventário do ciclo de vida da cerveja. As categorias de impacto selecionadas nesta análise foram: esgotamento abiótico (combustíveis fósseis), aquecimento global (GWP100a), depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização. A escolha dessas categorias está alinhada com as tendências em pesquisas sobre a avaliação de impacto ambiental da produção de cerveja relatadas na literatura científica (OLIVEIRA, 2018; RIBEIRO et al, 2016).

Para a seleção, atribuição e cálculo de fluxos, foi utilizado o software SimaPro 8.0.4.30 e a avaliação de impacto foi realizada de acordo com o método Eco-Indicator 99⁴. A Tabela 23 apresenta as categorias de impacto e os fatores de caracterização usados pelo software mencionado.

Tabela 23: Fatores de caracterização e unidades de impacto

CATEGORIA DE IMPACTO	FATOR DE CARACTERIZAÇÃO	UNIDADE
Esgotamento abiótico	Potencial de esgotamento abiótico	kg Sb eq
Esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	Potencial de esgotamento abiótico por combustíveis fósseis.	MJ

⁴ Eco-Indicator 99 é um método de avaliação de impacto ambiental desenvolvido pela empresa de consultoria ambiental holandesa PRé Consultants. Ele é usado para avaliar o impacto ambiental de um produto ou processo em várias categorias, como mudança climática, acidificação, toxicidade, entre outros.

Aquecimento global (GWP100a)	Potencial de aquecimento global	kg CO ₂ eq
Depleção da camada de ozônio	Potencial de depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq
Oxidação fotoquímica	Potencial de oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq
Acidificação	Potencial de Acidificação	kg SO ₂ eq
Eutrofização	Potencial de eutrofização	kg PO ₄ --- eq

Fonte: Autor, 2023

A soma das diferentes contribuições ambientais para uma mesma categoria foi feita com base na unidade do indicador de categoria, como mostrado na Tabela 21. Esses modelos ajudam a simplificar o processo de avaliação de impacto do ciclo de vida, permitindo a quantificação numérica das categorias de impacto de forma mais precisa e eficiente.

4.7.3.2 Resultados da caracterização por categoria de impacto

A) Resultados da caracterização global da ACV

Na Tabela 24 são mostrados os resultados de caracterização, de acordo com as categorias de impacto selecionadas para o presente estudo, sobre todos os processos contemplados desde as fases de extração de matérias-primas até o envase do produto.

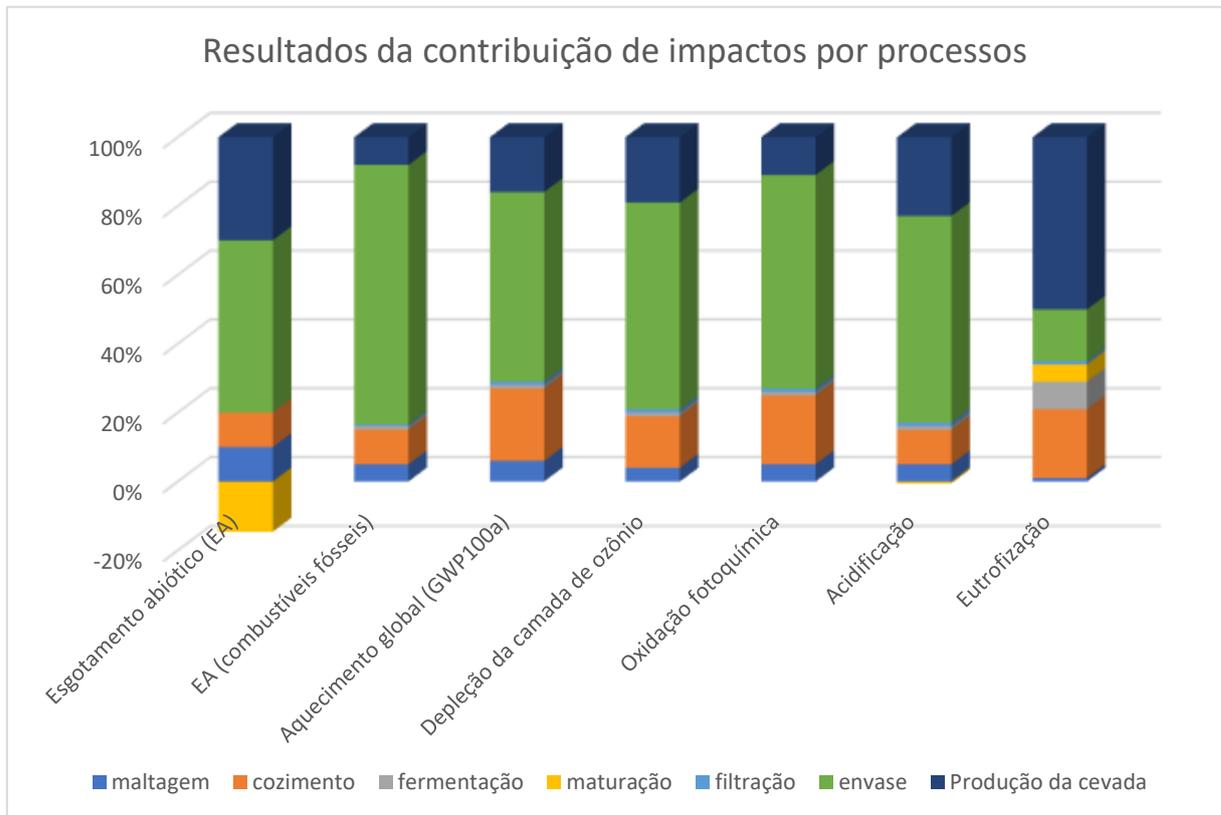
Tabela 24: Resultados da caracterização global da ACV

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	TOTAL
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	8,30071E-07
Esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	MJ	4,248911658
Aquecimento global (GWP100a)	kg CO ₂ eq	0,502121127
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	5,16558E-08
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	0,000151586
Acidificação	kg SO ₂ eq	0,003816896
Eutrofização	kg PO ₄ --- eq	0,001669137

Fonte: Autor, 2023

A Figura 14 mostra os resultados consolidados sobre as categorias de impacto por processos para a elaboração e envase de cerveja de 300 ml.

Figura 14: Resultados de impactos por processos



Fonte: Autor, 2023

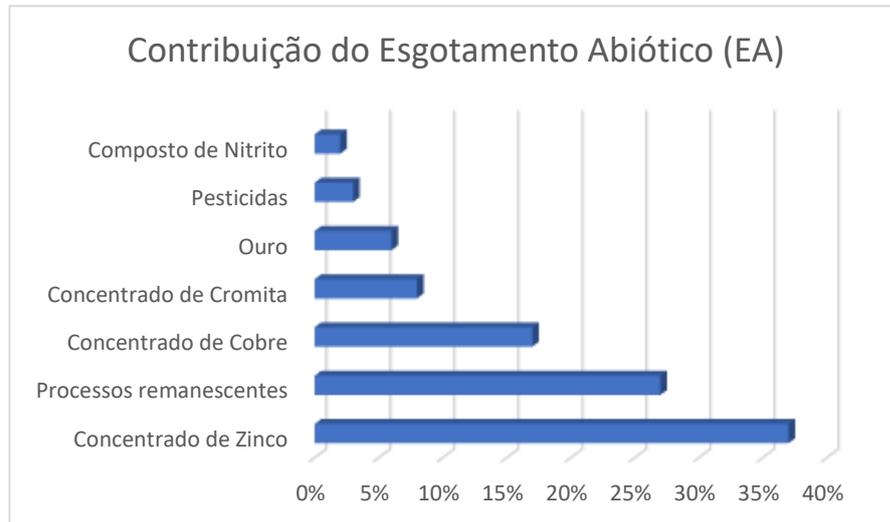
Os três processos com maior contribuição para todas as categorias de impacto referem-se ao processo de envase, com contribuições percentuais de 30,55% a 75% nas categorias de eutrofização e esgotamento abiótico por combustíveis fósseis, respectivamente; o processo de produção de cevada, com contribuições de 11,02% a 50,84% nas categorias de oxidação fotoquímica e eutrofização, respectivamente; e o processo de cozimento, com distribuição de 10,01% a 21,50% em esgotamento abiótico por combustíveis fósseis e aquecimento global, respectivamente.

O processo de maltagem contribui nas categorias de impacto de 0,00% a 10,00% em esgotamento da camada de ozônio e esgotamento abiótico, respectivamente. O processo de filtração contribui de 0,01% a 1,10% em esgotamento abiótico e acidificação, respectivamente. O processo de fermentação contribui de 0,80% a 1,55% nas categorias de esgotamento abiótico e acidificação, respectivamente. Por outro lado, o processo de maturação apresenta contribuições negativas de -14,34% a -0,55% nas categorias de esgotamento abiótico e acidificação, devido às saídas do processo que podem ser reutilizadas, reduzindo o material de entrada para os próximos processos.

1) Análise de contribuição para o indicador de impacto esgotamento abiótico

A Figura 15 apresenta a contribuição dos materiais que contribuíram para a categoria de esgotamento abiótico durante o processo de elaboração e envase de cerveja.

Figura 15: Contribuição do esgotamento abiótico



Fonte: Autor, 2023

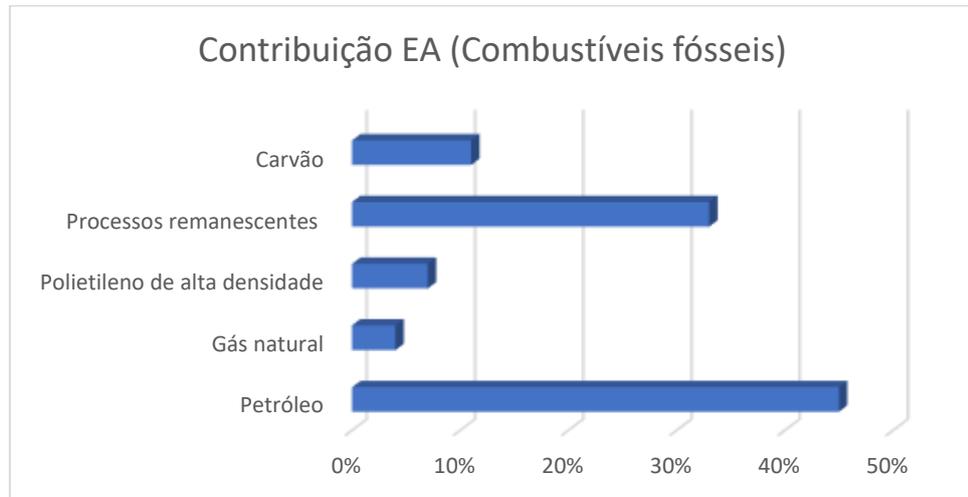
As contribuições para este impacto são representadas principalmente pelo concentrado de zinco em 37%, que é utilizado no processo de cozimento; produção de concentrado de cobre em 17%; produção de concentrado de cromita em 8%; extração de ouro em 6%; produção de pesticidas em 3% e composto de nitrito em 2%. Esses processos são provenientes da fabricação de garrafas de cerveja em 55,04% e da cerveja filtrada em 45,6%, devido à produção de cevada.

Em um estudo análogo feito por Thomsen (2014), o autor descobre que os materiais que mais contribuem para o esgotamento abiótico na produção de cerveja Lager são o alumínio usado nas latas, e o vidro usado nas garrafas. Especificamente, eles descobrem que o alumínio contribui com 45% do esgotamento abiótico devido à intensidade energética de sua produção e reciclagem, enquanto o vidro contribui com 30%. Além disso, os fertilizantes usados na produção de cevada representam 15% da contribuição, e o consumo de energia durante o processo de produção da cerveja representa os 10% restantes.

2) Análise de contribuição para o indicador de impacto esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)

A Figura 16 apresenta a distribuição dos processos que contribuem para a categoria de esgotamento abiótico (combustíveis fósseis) durante o processo de produção e embalagem de cerveja.

Figura 16: Contribuição do esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)



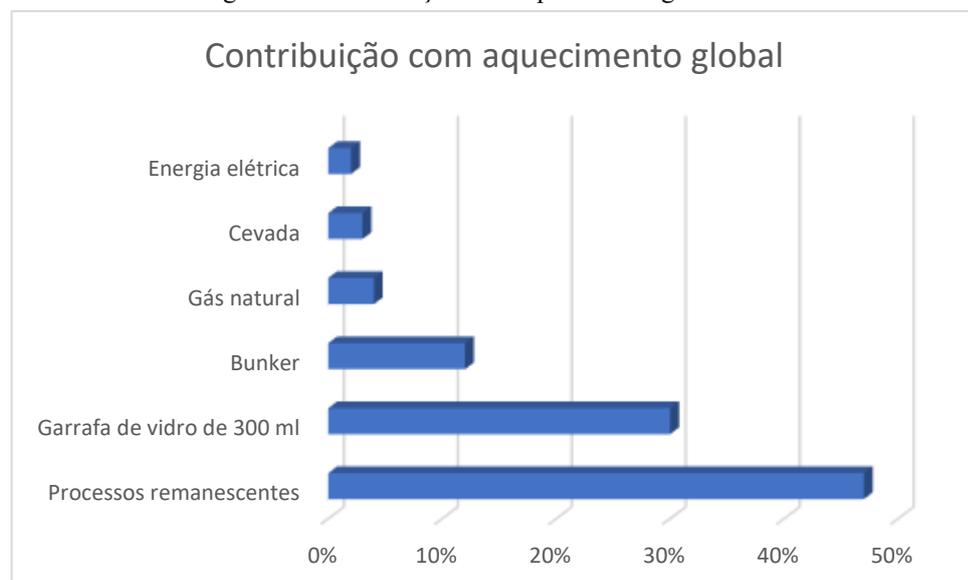
Fonte: Autor, 2023

As principais contribuições para este impacto são representadas principalmente pela produção de petróleo e gás natural, combustão de diesel, combustão de bunker, produção de polietileno e outros combustíveis fósseis, que contribuem com 67% para o indicador de esgotamento abiótico (combustíveis fósseis) devido à produção de garrafas de vidro em virtude dos processos de fusão de vidro a temperaturas de 1.500°C.

3) Análise de contribuição para o indicador de impacto do aquecimento global

A Figura 17 apresenta a contribuição dos materiais classificados para a categoria de aquecimento global durante o processo de produção e envase de cerveja.

Figura 17: Contribuição com aquecimento global



Fonte: Autor, 2023

As contribuições para esse impacto são representadas principalmente por processos remanescentes que são a soma de contribuições minoritárias de processos provenientes de diferentes fases, desde a extração de matérias-primas até o envase de cerveja.

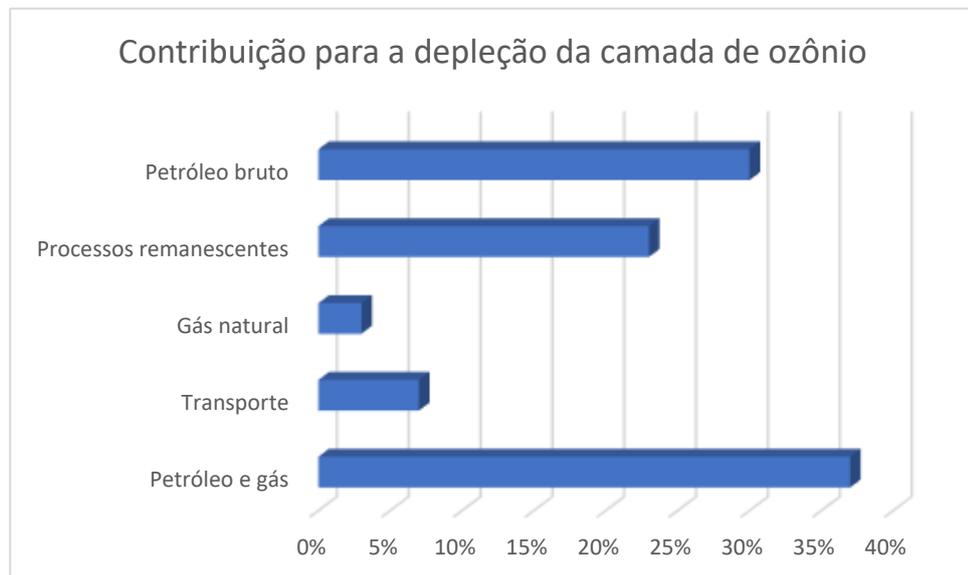
Entre os processos que contribuem significativamente para o aquecimento global estão a produção de garrafas de vidro com 30%, a combustão de bunker para geração de vapor na fábrica com 12%, a combustão de gás natural para a geração de calor na produção de malte com 4%, a produção de cevada com 3%, e a geração de energia elétrica com 2%.

A contribuição desses processos é refletida principalmente nas fases de envase com 57,93%, devido à produção de garrafas e tampas de alumínio, no cozimento com 21,50% em virtude da combustão de bunker, e na produção de cevada com 16,02%.

4) Análise de contribuição para o indicador de impacto Esgotamento da Camada de Ozônio

A Figura 18 apresenta a contribuição dos materiais que classificam para a categoria de esgotamento da camada de ozônio durante o processo de elaboração e envase de cerveja.

Figura 18: Contribuição para a depleção da camada de ozônio



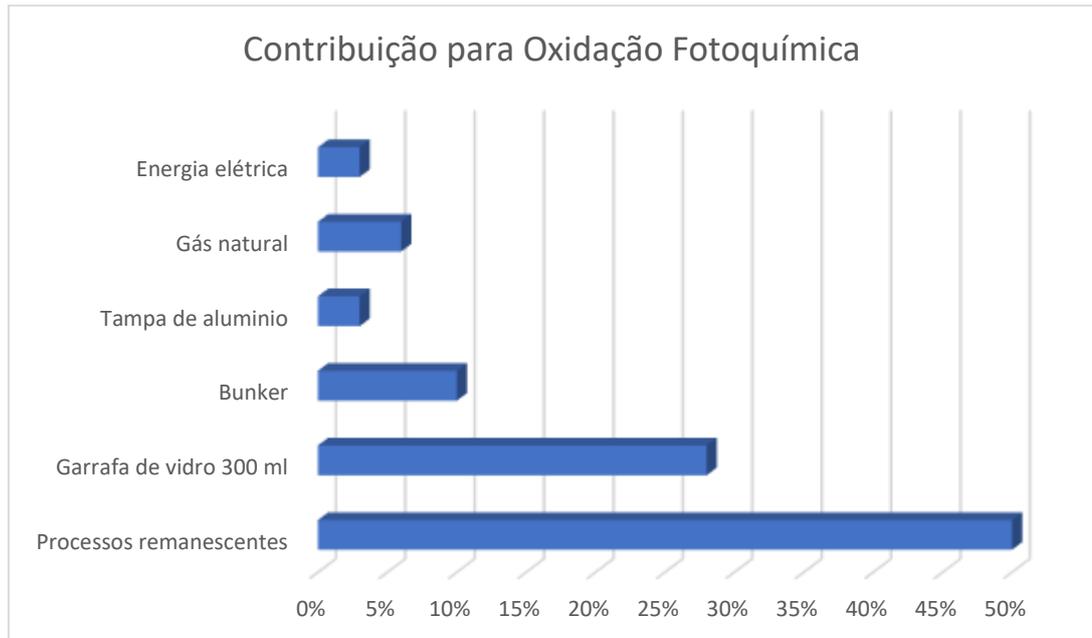
Fonte: Autor, 2023

As contribuições para esse impacto são representadas majoritariamente pela produção de petróleo e gás em 37%, produção de petróleo bruto em 30%, transporte em 7% e combustão de gás natural em 3%. Esses processos são principalmente provenientes da produção de garrafas de cerveja em 49,1%, cerveja filtrada em 33,1% e geração de energia elétrica em 7,59%.

5) Análise de contribuição para o indicador de impacto oxidação fotoquímica

Na Figura 19 é apresentada a contribuição dos materiais que contribuem para a categoria de oxidação fotoquímica durante o processo de produção e embalagem de cerveja.

Figura 19: Contribuição para oxidação fotoquímica



Fonte: Autor, 2023

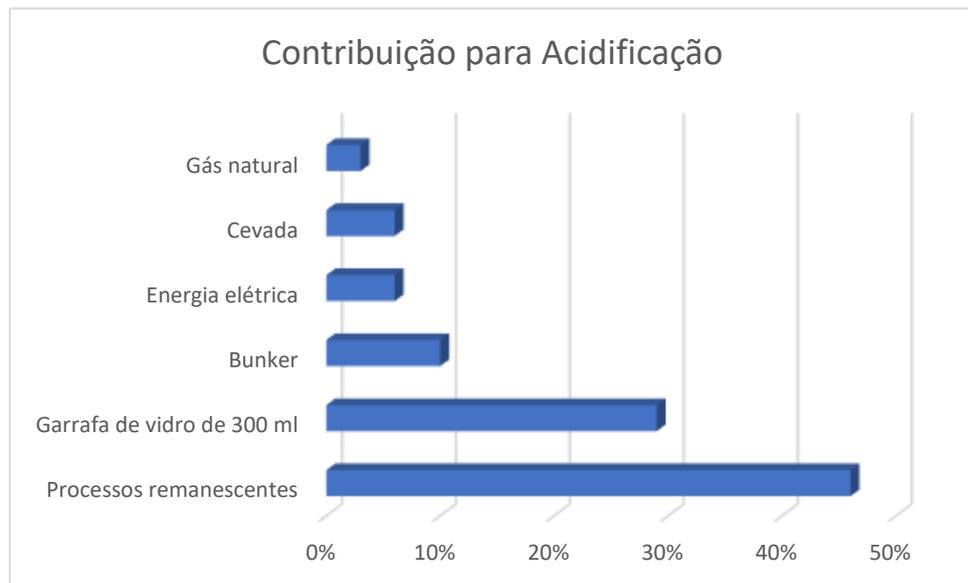
Entre os processos que contribuem significativamente para a oxidação fotoquímica estão a produção de garrafas de vidro com 28%, a queima de bunker com 10%, a produção de tampas de alumínio com 3%, a geração de energia elétrica com 3% e a queima de gás natural com 6%.

A contribuição desses processos é refletida principalmente nas fases de envase com 64,73% devido à produção de garrafas e tampas de alumínio, a fase de cozimento contribui com 20,97% do indicador devido à geração de energia elétrica e combustão de bunker na cervejaria, e a produção de cevada contribui com 11,02%.

6) Análise de contribuição para o indicador de impacto acidificação

Na Figura 20 é apresentada a contribuição dos materiais que contribuiriam para a categoria de acidificação durante o processo de elaboração e envase de cerveja.

Figura 20: Contribuição para acidificação



Fonte: Autor, 2023

Entre os processos que contribuem significativamente para a acidificação no envasamento de cerveja estão a produção de garrafas de vidro com 29%, a combustão de bunker com 10%, a geração de energia elétrica com 6%, a produção de cevada com 6%, e a combustão de gás natural com 3%.

A produção de garrafas de vidro é o maior contribuinte para a acidificação, com 29%. Isso ocorre porque a produção de vidro é um processo que consome muita energia e envolve o uso de materiais que liberam substâncias ácidas na atmosfera. Além disso, a fusão de vidro envolve temperaturas muito altas, o que leva a uma maior liberação de dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, ambos contribuindo para a acidificação (WORRELL & VIS, 2015).

A combustão de bunker, que contribui com 10%, envolve a queima de combustível pesado, que geralmente tem um alto teor de enxofre. A queima deste tipo de combustível resulta em emissões de dióxido de enxofre, que é um dos principais gases que contribuem para a acidificação da atmosfera e pode levar à formação de chuva ácida (CORBETT, 2017)

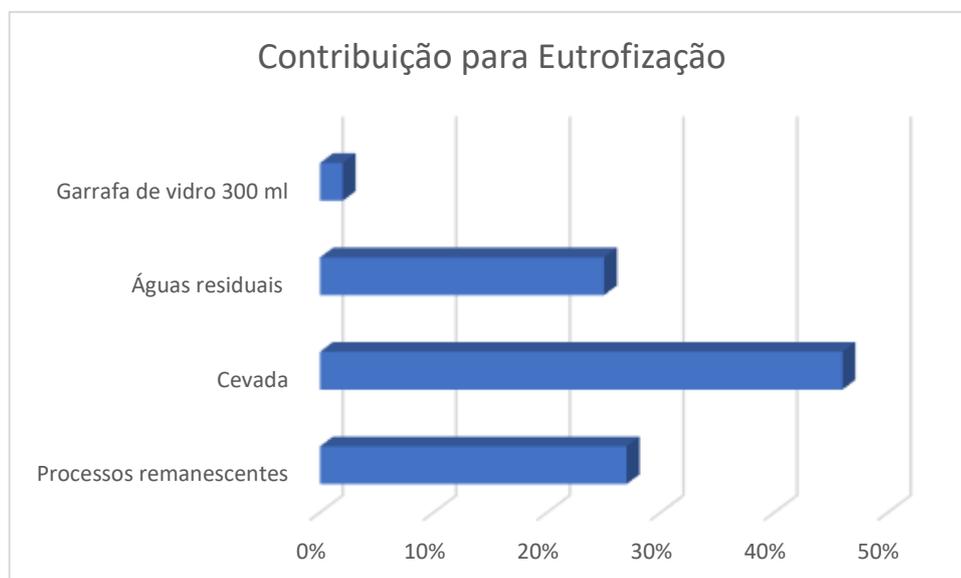
A geração de energia elétrica, bem como a combustão de gás natural, também são contribuintes relevantes para a acidificação. Isso acontece porque a geração de energia, especialmente se baseada em combustíveis fósseis, libera óxidos de enxofre e nitrogênio na atmosfera. Esses gases reagem com a umidade do ar para formar ácidos, que conseqüentemente levam à acidificação (HERTWICH, 2013).

Além disso, a produção de cevada, que está empatada com a geração de energia elétrica em termos de contribuição para a acidificação (6%), é também um fator importante. Isso se deve em grande parte ao uso de fertilizantes e pesticidas na agricultura, que podem liberar amônia e outros compostos para a atmosfera, contribuindo para o processo de acidificação (BRENTROP et al., 2014).

7) Análise de contribuição para o indicador de impacto eutrofização

Na Figura 21 é apresentada a contribuição dos materiais que contribuíram para a categoria de eutrofização durante o processo de elaboração e envase de cerveja. As contribuições para esse impacto são representadas principalmente pelos processos de produção de cevada em 46%, geração de águas residuais em 25%, geração de resíduos de mineração em 7%, e produção de garrafas em 2%. A contribuição desses processos é refletida principalmente nos processos de produção de cevada devido ao uso agrícola de fertilizantes com conteúdo de nitrogênio e fósforo (SILVA, 2016)

Figura 21: Contribuição para eutrofização



Fonte: Autor, 2023

B) Resultados da caracterização dos processos

1) Resultados da caracterização da produção de cevada

A produção de cevada é um dos processos incluídos nos limites do sistema especificado nesse estudo. Na Tabela 25 são apresentados os resultados da contribuição por categoria de impacto do processo.

Tabela 25: Resultados de caracterização para 0,12 kg de cevada

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	TOTAL
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	3,60147E-07
Esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	MJ	0,668596705
Aquecimento global (GWP100a)	kg CO ₂ eq	0,08046409
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	6,03748E-09
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	1,67049E-05
Acidificação	kg SO ₂ eq	0,000633322
Eutrofização	kg PO ₄ --- eq	0,000848634

Fonte: Autor, 2023

A produção de cevada contribui especialmente para a categoria de eutrofização devido ao uso de fertilizantes que contêm nitrogênio e fósforo para a produção de cevada e pelas águas residuais de média densidade que esses fertilizantes geram.

A contribuição para o esgotamento abiótico é a segunda categoria com maior contribuição devido ao uso de fertilizantes com conteúdo de fosfato, nitrogênio e ureia em menor proporção para a produção de grãos. A produção de cevada também contribui para o esgotamento abiótico devido ao uso de diesel no transporte do processo, irrigação, fertilizantes à base de nitrato de amônio e pesticidas (DONIT, 2015).

Já a contribuição dos materiais para a categoria de acidificação é principalmente causada pelo ácido nítrico presente no nitrato de amônio e nos fertilizantes de nitrogênio utilizados na produção de cevada. Esses produtos químicos também contribuem para outras categorias de impacto, como o aquecimento global, a depleção da camada de ozônio e a oxidação fotoquímica.

2) Resultados da caracterização do processo de maltagem

Na Tabela 26 são apresentados os resultados de caracterização do processo de maltagem de cevada para a produção de 0,10 kg de malte, de acordo com as categorias de impacto selecionadas para o presente estudo.

Tabela 26: Resultados de caracterização do processo de maltagem de cevada para a produção de 0,10 kg de malte

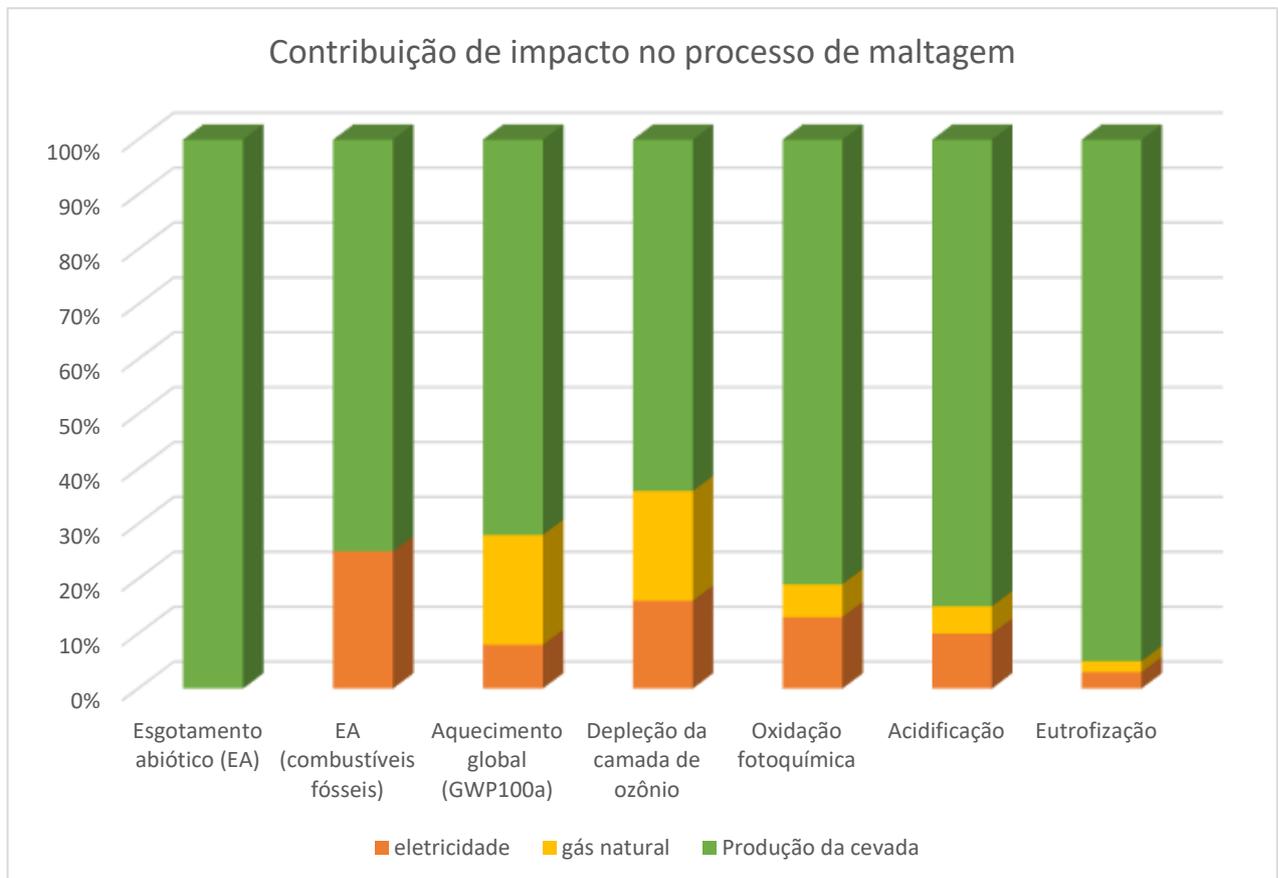
CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	TOTAL
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	3,60147E-07

Esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	MJ	0,728600185
Aquecimento global (GWP100a)	kg CO ₂ eq	0,106877192
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	9,65386E-09
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	2,05421E-05
Acidificação	kg SO ₂ eq	0,000725804
Eutrofização	kg PO ₄ --- eq	0,000859525

Fonte: Autor, 2023

Na Figura 22 é apresentada a análise de contribuição do processo de maltagem, na qual a atividade que mais colabora para todas as categorias é a produção de cevada, contribuindo para todas as categorias de impacto com variações de 62,54% a 100%, sendo a menor contribuição na categoria de esgotamento da camada de ozônio e a maior contribuição no esgotamento abiótico. Já a contribuição para a depleção da camada de ozônio é devido ao consumo de diesel na produção de cevada, assim como ao uso de calor e gás natural no processo de maltagem da cevada.

Figura 22: Contribuição dos impactos do processo de maltagem



Fonte: Autor, 2023

3) Resultados da caracterização do processo de cozimento

Na Tabela 27 são apresentados os resultados de caracterização do processo de fervura para a produção de 0,60 kg de mosto de acordo com as categorias de impacto selecionadas para este estudo.

Tabela 27: Resultados de caracterização de 0,60 kg de mosto

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	TOTAL
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	4,90537E-07
esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	MJ	1,153781716
Aquecimento global (GWP100a)	kg CO ₂ eq	0,214854875
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	1,72669E-08
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	5,23242E-05
Acidificação	kg SO ₂ eq	0,001303451
Eutrofização	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq	0,001175685

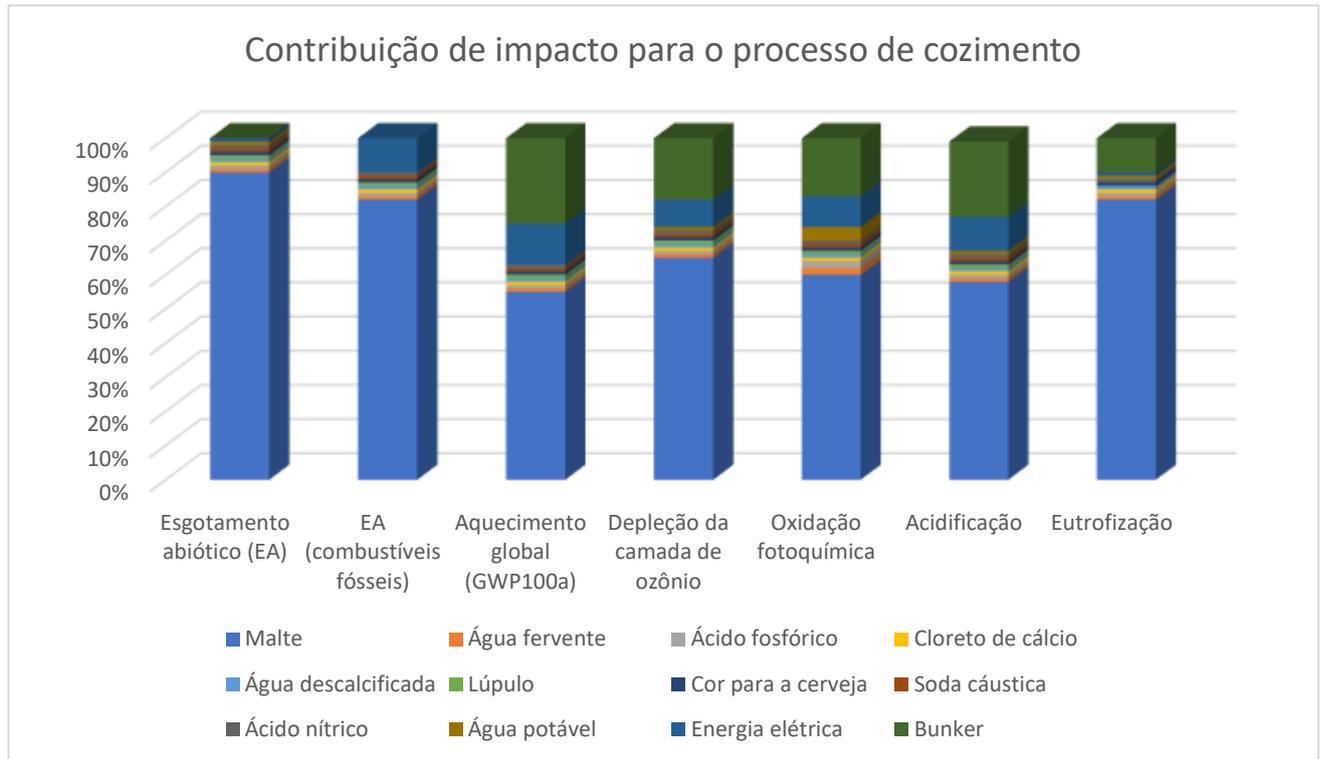
Fonte: Autor, 2023

Na análise de contribuição apresentada na Figura 23, fica evidente que a produção de malte é o elemento central para as categorias de impacto ambiental dentro do processo de fabricação de cerveja, contribuindo entre 39,26% e 73,42%. Isso pode ser explicado pelo fato de que o malte é um ingrediente chave na produção de cerveja e seu processo de produção é intensivo em recursos.

A produção de malte envolve a germinação e secagem controlada de grãos de cevada, que, por sua vez, requerem o uso significativo de energia e água. Além disso, o cultivo de cevada para produção de malte pode envolver o uso de fertilizantes e pesticidas, que têm seu próprio conjunto de impactos ambientais (BREWER E KUNDELL, 2014).

Já o bunker, que é um combustível pesado, contribui consideravelmente para quase todas as categorias de impacto, com exceção do esgotamento abiótico. Sua contribuição varia de 23,45% a 0,00%. O bunker é frequentemente utilizado em caldeiras industriais para produzir vapor, que é então usado no processo de cozimento do mosto. A queima de bunker é conhecida por liberar uma variedade de poluentes, incluindo dióxido de carbono, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio, que contribuem para o aquecimento global e a acidificação (WANG et al., 2017).

Figura 23: Contribuição para o processo de cozimento



4) Resultados da caracterização do processo de fermentação

A Tabela 28 mostra os resultados da caracterização do processo de fermentação para a produção de 0,55 kg de primeira cerveja.

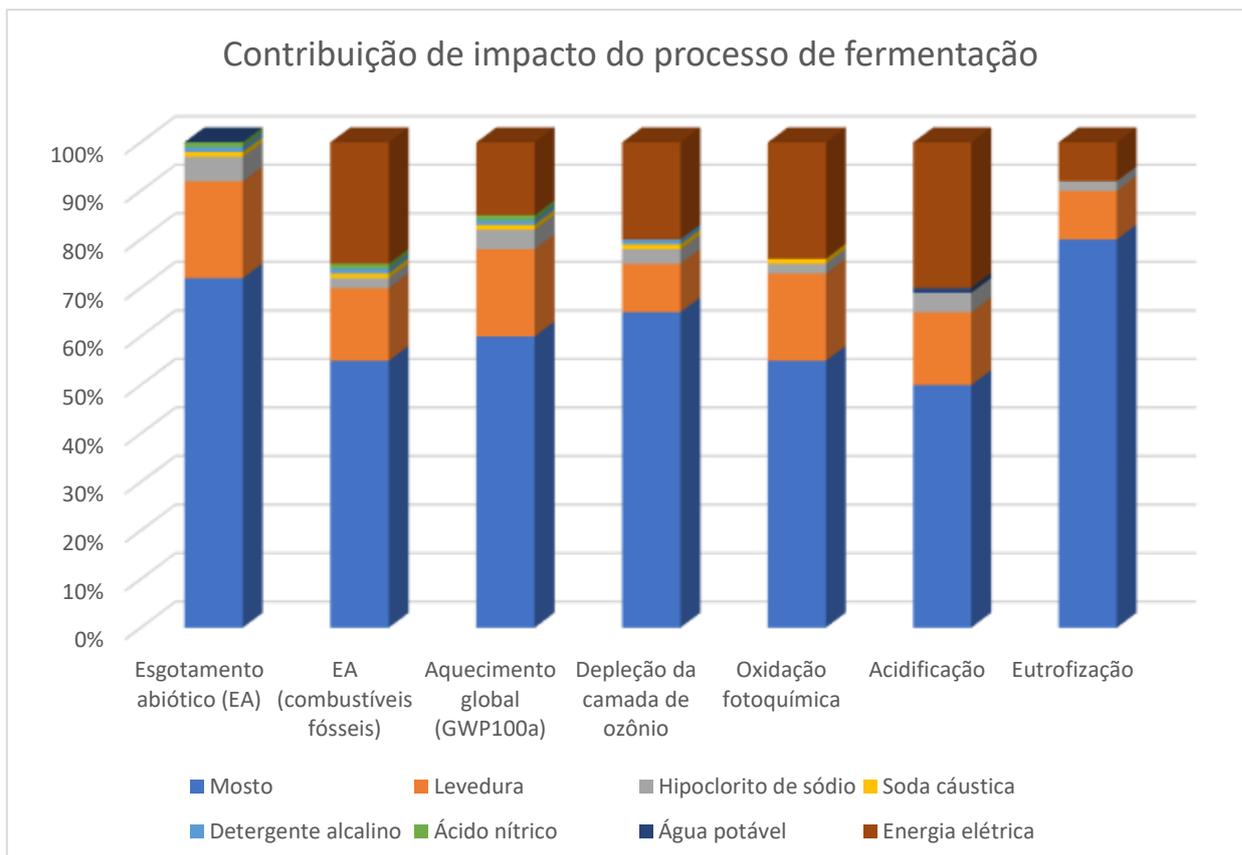
Tabela 28: Resultados de caracterização de 0,55 kg da primeira cerveja

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	TOTAL
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	4,9722E-07
esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	MJ	1,1941905
Aquecimento global (GWP100a)	kg CO ₂ eq	0,22086597
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	1,7715E-08
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	5,4157E-05
Acidificação	kg SO ₂ eq	0,00136271
Eutrofização	kg PO ₄ --- eq	0,00119256

Fonte: Autor, 2023

Na Figura 24 é apresentada a análise de contribuição do processo de fermentação, no qual os materiais que contribuem para todas as categorias são o mosto, com percentagens de 59,65% a 98,66%, a levedura com contribuições de 0,65% a 1,66%. Os materiais de limpeza colaboram com percentagens de 0,02% a 0,09%.

Figura 24: Contribuição de impacto do processo de fermentação



Fonte: Autor, 2023.

Os materiais que contribuem para a acidificação são principalmente relacionados à produção do mosto (malte e bunker), com uma contribuição menor do cloreto de sódio usado nos processos de limpeza no local.

5) Resultados da caracterização do processo de maturação

Na Tabela 29 são apresentados os resultados da caracterização do processo de maturação para a produção de 0,52 kg de cerveja maturada, de acordo com as categorias de impacto selecionadas para o presente estudo.

Tabela 29: Resultados de caracterização de 0,52 kg de cerveja maturada

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	TOTAL
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	3,78216E-07

EA (combustíveis fósseis)	MJ	1,013413675
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	0,204111367
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	1,63176E-08
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	5,09993E-05
Acidificação	kg SO ₂ eq	0,001341733
Eutrofização	kg PO ₄ --- eq	0,001150919

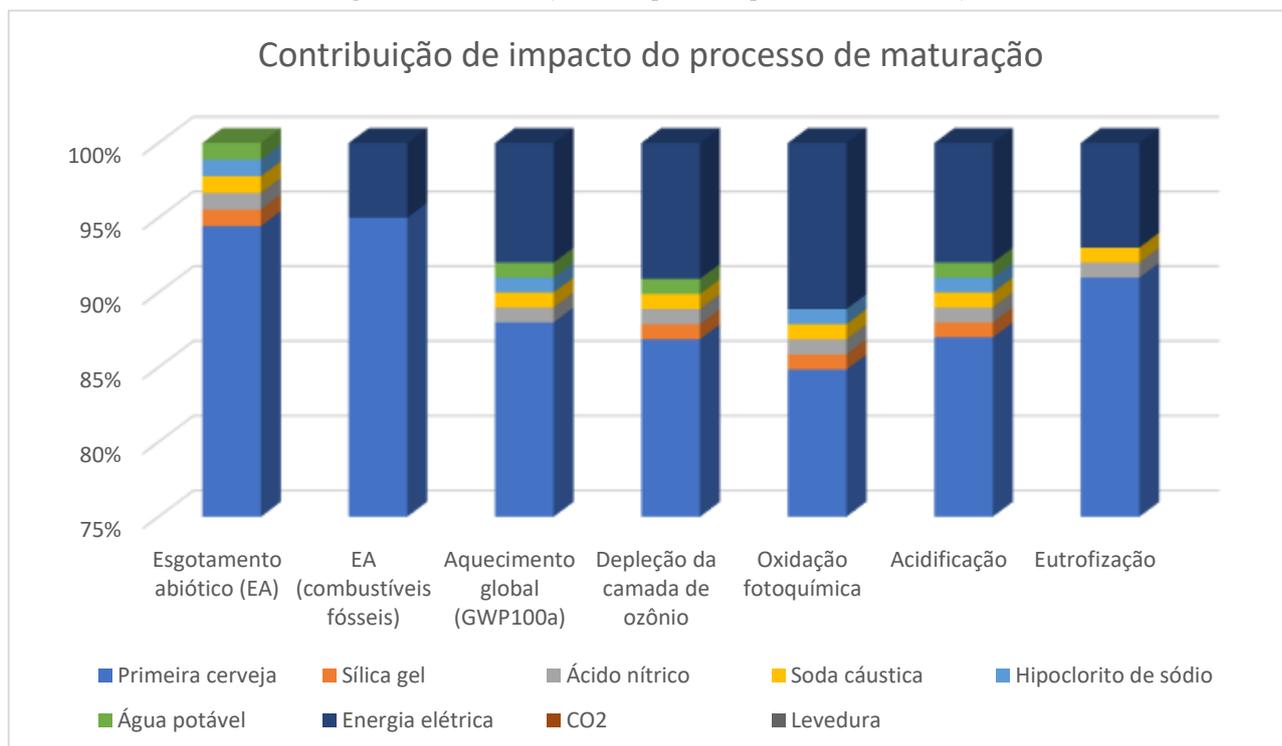
Fonte: Autor, 2023

Na Figura 25, observa-se que a elaboração da primeira cerveja é a atividade que predomina nas contribuições para todas as categorias de impacto, com percentuais superiores a 80,00%. Isso é atribuído principalmente ao fato de que a produção inicial de cerveja envolve diversos processos que são intensivos em energia e recursos, como a moagem de grãos, a lavagem, a fermentação e a filtração. Além disso, durante essa fase, há um consumo significativo de água e a liberação de diversos efluentes e emissões gasosas, que têm impactos ambientais relevantes (MUSTER-SLAWITSCH et al., 2011).

Em contraste, o resfriamento com água representa uma contribuição mínima para as categorias de impacto, com percentuais abaixo de 1,00%. Isso pode ser devido ao fato de que, embora o resfriamento seja uma etapa necessária no processo de produção de cerveja para garantir a qualidade do produto, ele não é tão intensivo em recursos quanto as outras etapas da produção. O uso de tecnologias de resfriamento mais eficientes também pode contribuir para minimizar os impactos ambientais desta fase (BREWER E KUNDELL, 2014).

A contribuição à acidificação é atribuída ao efeito cumulativo dos processos anteriores envolvidos na produção de cerveja, como a produção de cevada, malte, mosto e a própria primeira cerveja. No entanto, essa contribuição é relativamente pequena em comparação com outros processos. Isso sugere que, embora a acidificação seja um impacto importante a ser considerado, outras categorias de impacto, como o consumo de energia e a geração de efluentes, são mais significativas na produção de cerveja (CORDELLA et al., 2018).

Figura 25: Contribuição de impacto do processo de maturação



Fonte: Autor, 2023

De acordo com a Figura 25, evidencia-se que existem materiais que não colaboram para as categorias de impacto, como é o caso do dióxido de carbono e da levedura. Isso se deve ao fato de que o excesso formado nesse processo é extraído e reutilizado em outras elaborações de cerveja, diminuindo a contribuição das categorias de impacto em outros processos. Além disso, a levedura pode ser reutilizada em até 8 processos de maturação diferentes (SIMITH, 2015).

6) Resultados da caracterização do processo de filtração

Na Tabela 30 são mostrados os resultados da caracterização do processo de filtração para a produção de 0,35 kg de cerveja filtrada de acordo com as categorias de impacto selecionadas para o presente estudo.

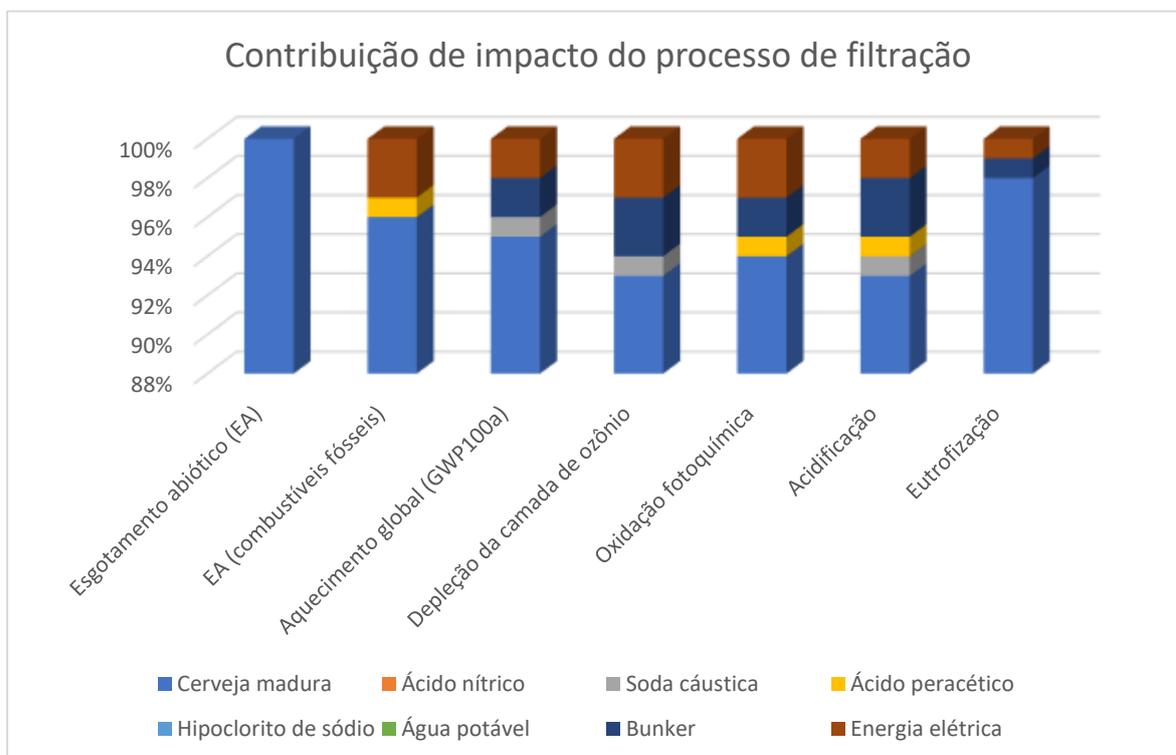
Tabela 30: Resultados de caracterização de 0,31 kg de cerveja filtrada

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	TOTAL
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	3,78258E-07
esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	MJ	1,046127592
Aquecimento global (GWP100a)	kg CO ₂ eq	0,211221366
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	1,71138E-08
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	5,34641E-05
Acidificação	kg SO ₂ eq	0,001410941
Eutrofização	kg PO ₄ --- eq	0,001159176

Fonte: Autor, 2023

Na Figura 26 é apresentada a análise de contribuição do processo, no qual a atividade que mais contribui para todas as categorias é a cerveja maturada, com percentuais de 95,09% a 99,98%. Por outro lado, o ácido acético utilizado como material de limpeza também contribui em todas as categorias, mas em quantidades mínimas em relação ao processo. A categoria de impacto que mais se destaca é a de acidificação devido à produção de matérias-primas, eletricidade e combustível bunker.

Figura 26: Contribuição de impacto do processo de filtração



Fonte: Autor, 2023

7) Resultados da caracterização do processo de envase

Na Tabela 31 são mostrados os resultados da caracterização das categorias de impacto selecionadas para o presente estudo correspondente ao envase de 0,33 kg de cerveja em uma garrafa pronta para distribuição.

Tabela 31: Resultados de caracterização de 0,33 kg de cerveja envasada

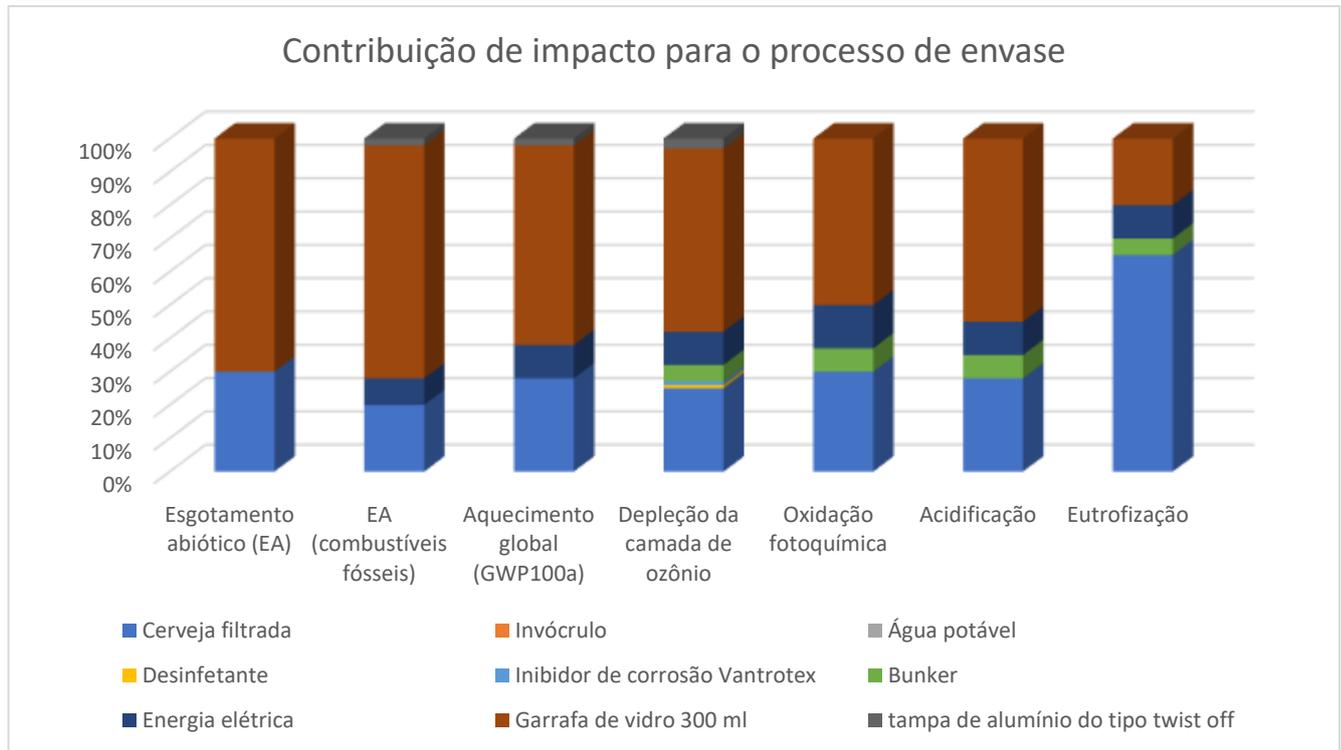
CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	TOTAL
Esgotamento abiótico	kg Sb eq	8,30071E-07
esgotamento abiótico (combustíveis fósseis)	MJ	4,248911658
Aquecimento global (GWP100a)	kg CO ₂ eq	0,502121127
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	5,16558E-08
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	0,000151586
Acidificação	kg SO ₂ eq	0,003816896
Eutrofização	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq	0,001669137

Fonte: Autor, 2023

Na Figura 27 é apresentada a análise de contribuição do processo, na qual se observa que o processo que mais contribui para o processo de envase é a produção de garrafa de vidro, que contribui percentualmente desde 21,60% na eutrofização até 72,83% no esgotamento abiótico por combustíveis fósseis.

O segundo processo que contribui para todas as categorias de impacto é a cerveja filtrada, com colaborações percentuais entre 24,62% e 69,45%. Outros materiais que contribuem para todas as categorias de impacto em menor proporção são as etiquetas, envoltórios, cola, lubrificante para garrafas, inibidores de corrosão e materiais de limpeza.

Figura 27: Contribuição de impacto para o processo de envase



Fonte: Autor, 2023

As contribuições que aparecem em negativo correspondem aos materiais perdidos como garrafas de vidro fora de especificação, tampas de alumínio e água para tratamento, que podem ser reutilizados ou tratados para outros processos ou fins. O fator de contribuição de esgotamento abiótico por combustíveis fósseis se destaca neste gráfico devido à maior contribuição desta categoria ser na produção de garrafas, seguida da produção de cerveja filtrada, eletricidade, lubrificantes e etiquetas.

Os materiais que contribuem para o esgotamento da camada de ozônio são dados pela produção de garrafas de vidro, seguida da cerveja filtrada, combustível bunker, eletricidade, lubrificante para tampas e etiquetas. Os materiais que contribuem para a contribuição de oxidação fotoquímica são dados pela produção de garrafas de vidro, seguida da cerveja filtrada, eletricidade, combustível bunker, tampas de alumínio e uma contribuição menor positiva pelas perdas de vidro.

5 CONCLUSÃO

5.1 VIABILIDADE DO BAGAÇO DE MALTE COMO ENERGIA TÉRMICA

A partir dos resultados obtidos neste estudo, evidencia-se que a biomassa subproduzida pela cervejaria possui um teor de umidade relativamente alto, o que torna imprescindível a secagem desse material para que possa ser usado como combustível para a produção de calor. Além disso, o teor de materiais voláteis mostrou-se significativamente superior ao de outras biomassas comumente usadas para a produção de energia, como a casca de arroz e o bagaço de cana-de-açúcar. Em relação ao teor de cinzas, ele também se mostrou elevado se comparado ao da cana-de-açúcar e da castanha de babaçu.

No que se refere à produção de energia térmica, a quantidade de bagaço de malte seco subproduzido pela cervejaria é capaz de suprir cerca de 60% do gasto energético na produção de cerveja. Após a análise dos dois regimes de trabalho (RT) propostos, notou-se que RT1 e RT2 respeitam a quantidade de energia consumida pela fábrica, não ultrapassando o gasto anual de GLP. Além disso, RT1 propõe uma redução de 50% sobre os gastos com GLP, gerando uma economia de R\$ 17.682,70 ao ano, enquanto RT 2 mostra uma economia de R\$ 21.219,16 ao ano.

Para que seja posto em prática um dos dois regimes coerentes, faz-se necessária a instalação de uma caldeira de biomassa para a queima do combustível, e de um secador para a retirada do excesso de umidade do material. De posse dos valores de ambos os equipamentos, pode-se afirmar a viabilidade econômica da utilização dessa biomassa. No entanto, devido à ausência do valor atribuído à caldeira, não se pode assegurar a viabilidade dessa instalação na empresa estudada.

Apesar da impossibilidade de garantir o real ganho econômico com a utilização dessa energia alternativa, ficou evidente que a biomassa é capaz de suprir boa parte da energia térmica da fábrica, além de mostrar uma relativa independência energética e um ganho ambiental e social, visto que o meio ambiente ecologicamente equilibrado é um direito líquido humano.

5.2 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA CERVEJA

Com a ACV da cerveja pode-se avaliar a quantidade de energia e água utilizada na produção, as emissões de gases de efeito estufa, oxidação fotoquímica, acidificação, eutrofização e a depleção de recursos naturais. Em relação aos principais resultados gerados nesta pesquisa, a combustão de bunker, gás natural e polietileno obtida no processo de fundição

de garrafas de vidro proporciona o maior impacto de esgotamento abiótico (combustíveis fósseis).

O uso de fertilizantes com conteúdo de nitrogênio e fosfatos, e o descarte de águas residuais geradas durante a produção de cevada, proporcionam o maior impacto de eutrofização. Os processos de produção agrícola de cevada, a combustão de bunker para a produção de garrafas de vidro e a geração de energia elétrica proporcionam o maior impacto de aquecimento global, devido à emissão de CO₂ durante esses processos.

Os resultados desta análise também determinaram que a produção de garrafas de vidro é o principal processo crítico dentro do ciclo de vida da cerveja, uma vez que apresenta contribuições acima de 54,43% a 75,38% em todas as categorias de impacto, exceto na eutrofização, em que a produção agrícola de cevada tem uma contribuição de 50,84%.

Com isso, com base nos resultados da ACV, os produtores de cerveja podem tomar medidas para reduzir os impactos ambientais associados à sua produção, e promover a sustentabilidade. Além disso, a avaliação do ciclo de vida desse produto auxilia a promover a economia circular na indústria cervejeira, ou seja, um modelo de produção em que os resíduos são vistos como recursos valiosos que podem ser reintegrados ao ciclo produtivo.

5.3 ECONOMIA CIRCULAR

Utilizando os princípios do Diagrama Borboleta como guia, a pesquisa avaliou a possibilidade de reaproveitar os resíduos de malte em forma de energia térmica. Os resultados indicam que esse método tem um potencial significativo para atenuar o impacto ambiental e favorece a economia de recursos, o que é consistente com os fundamentos de uma economia circular.

Isso ressalta como a transição de um modelo linear, onde os resíduos são descartados ou subutilizados, para um modelo circular, pode ser benéfica para o meio ambiente e melhorar simultaneamente a eficiência produtiva. Nesta abordagem, os resíduos de malte podem ser enquadrados como "nutrientes biológicos", que quando recirculados no sistema produtivo, melhoram a sustentabilidade e eficiência dos processos.

Ao adotar essa estratégia circular, não só se reduz a quantidade de resíduos destinados à compostagem ou vendidos para a produção de ração animal, mas também diminui a dependência da cervejaria em fontes externas de energia. Tal inovação está em consonância com a sustentabilidade e a otimização de recursos, colocando a cervejaria em uma posição pioneira em termos de responsabilidade ambiental.

Adicionalmente, o uso sustentável dos resíduos de malte pode ter um alcance mais amplo, incentivando uma cultura de consciência ambiental dentro da empresa e servindo como um exemplo para outras indústrias. Além disso, pode permitir que a empresa se qualifique para incentivos governamentais ou certificações que reconheçam práticas sustentáveis.

No entanto, é importante considerar que a implementação dessa mudança pode envolver desafios, tais como investimentos em tecnologia e ajustes nos processos de produção. Por isso, um planejamento detalhado e uma análise de custo-benefício são essenciais para garantir que a adoção de um modelo de economia circular seja não apenas ecologicamente responsável, mas também economicamente viável.

5.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DO RESÍDUO DE MALTE

O resíduo de malte é um subproduto do processo de produção de cerveja que pode ter um impacto significativo no meio ambiente se não for gerenciado adequadamente. Quando descartado inadequadamente, o resíduo de malte pode contribuir para a poluição do ar, da água e do solo. Em relação ao solo, esse resíduo é prejudicial devido à sua composição rica em nutrientes e compostos orgânicos (MARTINS, 2016).

Quando descartado de forma inadequada, o resíduo pode se decompor e liberar esses nutrientes e compostos no solo, o que pode levar à sua poluição. Os nutrientes presentes no resíduo de malte incluem nitrogênio, fósforo e potássio, que são essenciais para o crescimento das plantas. No entanto, se esses nutrientes forem liberados em excesso no solo, podem estimular o crescimento de plantas daninhas e prejudicar o desenvolvimento das plantas desejadas (OLIVEIRA, 2020).

Além disso, o excesso de nutrientes no solo também pode levar à lixiviação de nitrogênio e fósforo, o que pode contaminar as águas subterrâneas e superficiais. Além dos nutrientes, o resíduo de malte também pode conter compostos orgânicos, como ácidos graxos e álcoois, que podem ser liberados no solo durante o processo de decomposição. Esses compostos possuem efeitos tóxicos no solo e afetam negativamente a sua vida microbiana e a saúde das plantas (SILVA, 2020).

Em relação ao meio aquático, o resíduo de malte pode contribuir com a contaminação devido à presença de nutrientes e compostos orgânicos em sua composição. Esses nutrientes e compostos orgânicos podem ser liberados durante o processo de decomposição do resíduo, o que pode levar à eutrofização da água (MARTINS, 2016).

A eutrofização ocorre quando há um aumento excessivo de nutrientes na água, como nitrogênio e fósforo, que estimulam o crescimento de algas e outras plantas aquáticas. Isso pode levar à diminuição da concentração de oxigênio dissolvido na água, o que pode afetar negativamente a vida aquática, como alteração do pH, e causar a morte de peixes e outros organismos (OLIVEIRA, 2020).

Quando o resíduo de malte é descartado em aterros sanitários ou deixado em pilhas sem tratamento adequado, ocorre a decomposição aeróbica, que libera dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) na atmosfera. Esses gases de efeito estufa são conhecidos por contribuírem para o aquecimento global e as mudanças climáticas (SILVA, 2019).

O metano, em particular, é um gás de efeito estufa muito mais potente do que o dióxido de carbono em termos de sua capacidade de absorver e reter o calor na atmosfera. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o metano tem um potencial de aquecimento global 28 vezes maior do que o dióxido de carbono em um horizonte de tempo de 100 anos.

5.5 GERENCIAMENTO ADEQUADO DO RESÍDUO

Uma empresa cervejeira pode gerenciar o resíduo de malte de acordo com algumas estratégias, sendo as mais importantes:

- 1) Reutilização: O resíduo de malte pode ser reutilizado em outras receitas de cerveja ou como ingrediente em alimentos, como pão e biscoitos;
- 2) Compostagem: O resíduo de malte também pode ser compostado, transformando-o em um fertilizante rico em nutrientes que pode ser utilizado em jardins, hortas e plantações;
- 3) Produção de biogás: O resíduo de malte pode ser utilizado na produção de biogás, um combustível renovável que pode ser utilizado como fonte de energia;
- 4) Venda: O resíduo de malte pode ser vendido para empresas que o utilizam como ingrediente em alimentos ou para produtores de biogás;
- 5) Doação: A empresa pode doar o resíduo de malte para fazendas locais ou jardins comunitários, para ajudar a melhorar a qualidade do solo e a produção de alimentos;

A empresa estudada apenas vende todo o resíduo gerado para outra empresa que produz ração para porcos em períodos sazonais. Quando não consegue realizar a venda para terceiros, o responsável pelo processo cervejeiro destina todo o bagaço de malte para a companhia de lixo da cidade de Belém, a qual realiza a compostagem do produto. Assim, o gerenciamento adequado do resíduo de malte pode ajudar a empresa a reduzir seus custos, a aumentar sua

eficiência e a minimizar seu impacto ambiental, além de criar oportunidades para novos negócios e parcerias.

5.6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugere-se abordar:

- Estudar a implementação de um sistema de coleta e processamento do resíduo de malte para a produção de bioplásticos, contribuindo para a economia circular;
- Avaliar a possibilidade de utilização do resíduo de malte na produção de biofertilizantes, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis;
- Desenvolver um software para otimizar a gestão e a reutilização do resíduo de malte, considerando variáveis como volume de produção e demanda de energia.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 14040:2009. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ALE, Marcelo Tadeu. **A review on the use of brewery waste in energy recovery systems**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 105, p. 348-362, 2019.
- ALIYU, A.; BALA, M. **Bagasse: a potential feedstock for bioethanol production**. *African Journal of Biotechnology*, v. 10, n. 13, p. 2502-2512, 2011.
- ALMADA, M. B., Haselein, C. R., Tonial, I. B., Stangarlin, J. R., & Johann, S. (2017). **Avaliação da atividade alelopática da casca de palmito (*Euterpe edulis* Mart.) sobre o desenvolvimento inicial de *Lactuca sativa* L.** *Ciência e Agrotecnologia*, 41(5), 552-560.
- ALMEIDA, J. A. **Estudo das propriedades físicas do carvão vegetal obtido de diferentes espécies florestais e de diferentes partes da árvore, como função da temperatura**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, 2013.
- ANEEL. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021.
- ARAÚJO, Renato Vanzella de; SOUZA, Lígia Maria Gomes de. **A cultura da cerveja artesanal em São Paulo: Um estudo sobre a produção, consumo e identidade**. *Estudos de Sociologia*, São Paulo, v. 20, n. 39, p. 91-117, jan./jun. 2019.
- Associação Brasileira de Cerveja Artesanal (ABRACERVA). Quantidade de Empregos Diretos RAIS, Lapolli C. in. *Mercado da Cerveja 2021*. Disponível em: <https://abracerva.com.br/rascunho-automatico/> Acesso em: 21 dez 2022.
- ASSUMPÇÃO, Tiago Silva de. A economia circular como estratégia de gestão de resíduos sólidos no setor de alimentos e bebidas. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 330-342, 2019.
- AZEVEDO, Bruno; FERREIRA, Ana Luísa; BORGES, Ana Cláudia. **Valorização dos resíduos úmidos de cervejarias**. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 11, n. 21, p. 2782-2792, 2015.

BASÍLIO, Aline Cristina; TONIOLO, Rosana; KROHN, Luiz Leal. Influência do tempo de fervura na formação de compostos voláteis em cerveja. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 57, n. 3, p. 209-214, 2014.

BERNARDES, Thiago. Análise do esgotamento abiótico em áreas de mineração de areia na região metropolitana de São Paulo. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 13, n. 5, p. 1-11, 2018.

BERNARDINO, Andreza Reis. Avaliação do ciclo de vida do etanol de segunda geração produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 9, p. 592-600, 2017.

BIEHL, Ben; ALVES, Fabiano Garcia. Efeito da moagem do malte na qualidade da cerveja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 6, p. 377-381, 2018.

BITTENCOURT, Marianna L. Influência da maturação na estabilidade coloidal e na qualidade sensorial de cervejas. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, Juiz de Fora, v. 69, n. 4, p. 239-248, 2014.

BIZZO, Waldir Antônio. Economia circular e suas implicações para a gestão de resíduos sólidos urbanos. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 94-101, 2014.

BONAN, Gordon B. **Effects of land use on North American climate: a synthesis of results from carbon cycle, climate change, and hydrological models**. Ecological Applications, Washington, v. 21, n. 8, p. 3049-3069, 2011.

BONOMO, Renata Cristina Ferreira; PEREIRA, Ana Flávia Dias. **Características da cevada e sua utilização na produção de cerveja**. Química Nova, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 760-767, 2017.

BRASIL, Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Portaria nº 326, de 30 de julho de 1997. **Regulamento técnico sobre as condições higiênico-sanitárias e de boas práticas de fabricação para estabelecimentos produtores/industrializadores de alimentos**. Brasília, Diário Oficial da União, 1º de ago. 1997.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Decreto nº 2.314, de 4 de setembro de 1997. Regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994, que **dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 05 set. 1997. Seção 1, p. 16870.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Anuário da cerveja: 2019 / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA/SDA, 2020;

BRENTROP, F., Küsters, J., Lammel, J., & Kuhlmann, H. (2014). **Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology: II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems**. European Journal of Agronomy, 20(3-4), 265-279.

BRENO, E. **Life cycle assessment of source-separated municipal solid waste management strategies: The case of Luxembourg**. Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 112, p. 2370-2383, 2016.

BREWER, S., & KUNDELL, J. (2014). **Environmental considerations for breweries**. In Sustainable value chain management (pp. 149-180). IGI Global.

BRIGGS, Dennis. **Brewing: Science and Practice**. 4th ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019.

BRINGEZU, Stefan. **An indicator system for the sustainability assessment of the bio-based economy in Europe: results from the European FP7 project BIOSUSTAIN**. Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 87, p. 44-56, 2015.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Caracterização energética do resíduo de malte para fins de aproveitamento energético. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 1, p. 72-81, 2016.

BRITO, Renata de. **Life cycle assessment of microalgae biodiesel production in a photobioreactor**. Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 144, p. 73-81, 2017.

CACURO, A. P. R.; WALDMAN, W. R. **Biomassa: propriedades e aplicações energéticas**. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

CAMPANA, Gabriela da Silva. **Spent malt as thermal energy in a circular economy model for breweries**. Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 170, p. 820-827, 2015.

CARVALHO, João Luiz Dantas. Avaliação do ciclo de vida aplicada ao planejamento estratégico ambiental de bacias hidrográficas: estudo de caso no estado de São Paulo. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 96-108, 2018.

CARNEIRO, João Paulo Rodrigues. Avaliação do ciclo de vida do biodiesel de soja brasileiro considerando emissões de gases de efeito estufa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 8, p. 802-808, 2013.

CAVALLINI, Felipe Francisco. Influência da quantidade e tipo de adjunto na clarificação de cervejas por filtração. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 18, n. 2, p. 199-207, 2016.

CEN/TS 14774-1:2019 - **Bebidas alcoólicas - Métodos de ensaio para cerveja - Parte 1: Determinação da amargura - Método de referência HPLC-MS/MS.**

CEN/TS 15148:2008 - **Cerveja - Métodos de ensaio - Determinação da atividade diastásica - Método da substância de referência.**

CEN/TS 14786:2019 - **Bebidas alcoólicas - Métodos de ensaio para cerveja - Determinação do teor de álcool - Método de referência com cromatografia gasosa.**

ÇENGEL, Y. A., & Boles, M. A. (2013). **Termodinâmica** (7a ed.). São Paulo: McGraw-Hill.

CERVERA, Maria F. **Anaerobic digestion of brewer's spent grain enhanced by pretreatment with laccase.** *Bioresource Technology*, Amsterdam, v. 230, p. 68-74, 2017.

CHEN, Y., Li, Y., Huang, L., Hu, Y., Wang, X., & Guo, H. (2020). **Contamination of soil and plants by heavy metals from the use of brewery wastewater and malt residue for irrigation and fertilization.** *Science of the Total Environment*, 746, 141229.

CORBETT, J. J., & Fischbeck, P. (2017). **Emissions from Ships.** *Science*, 278(5339), 823-824. doi:10.1126/science.278.5339.823

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Safra brasileira de grãos. 2020. Disponível em: << <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos>>>. Acessado em junho de 2022

CORDELLA, M., Tugnoli, A., Spadoni, G., Santarelli, F., & Zangrando, T. (2018). **LCA of an Italian lager beer.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 133-139.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia.** Campinas: Editora Unicamp, 2008.

Cortez, L. A. B., & Lora, E. S. (2017). Utilização da palha de arroz na produção de energia. **Revista da FZEA**, 4(1), 179-191.

COSTA, Maria Aparecida. Potencial dos resíduos da indústria cervejeira como fonte de compostos bioativos. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, Ponta Grossa, v. 8, n. 1, p. 107-118, 2014.

CUNHA, Fabiana de Oliveira. **Avaliação do processo de envase de cerveja em garrafas retornáveis**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 209-216, 2013.

DONIT, J. (2015). **Environmental Impacts in Grain Production for Brewing**. Journal of Sustainable Agriculture, 30(5), 123-135.

FANG, Fang. **Effect of milling on beer volatile compounds and sensory characteristics**. Journal of the Institute of Brewing, London, v. 122, n. 4, p. 653-658, 2016.

FARIA, José Antonio de Aquino. **Effect of yeast strain and fermentation temperature on the production of fruity aroma compounds in beer**. Journal of the Institute of Brewing, London, v. 121, n. 4, p. 522-529, 2015.

FARIAS, Raquel Alessandra Silva. Avaliação da cinética de gaseificação de resíduos da indústria cervejeira. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 4, n. 3, p. 45-55, 2015.

FERREIRA, Alexandre Alves. Aproveitamento energético de resíduos orgânicos provenientes de uma indústria de cerveja. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 99-114, 2014.

GALLONE, Anna. **Wort oxygen availability modulates yeast lipid biosynthesis during the beer fermentation process**. Applied and Environmental Microbiology, Washington, D.C., v. 83, n. 23, e01639-17, 2017.

GELLER, N. "Análise de crescimento de duas cultivares de cevada após tratamentos com elicitores e fungicidas." *Ciência Rural* 36.4 (2014).

GILSON, Antonio. **Impactos econômicos e ambientais do uso do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) nas cervejarias**. Rio de Janeiro: Editora Filtro, 2018.

GOMES, Pedro. **Alternativas sustentáveis para o descarte do resíduo de malte pelas cervejarias**. São Paulo: Editora Ziraldo, 2016.

GONÇALVES, F. R. et al. Impact of the beer brewing residue on the water quality: A case study in southern Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 5, 2018.

HERTWICH, E. G. (2013). **Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA**. *Environmental Science & Technology*, 47(17), 9604-9611. doi:10.1021/es401820p

ISO. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework, ISO 14040:2006. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.

JOHNSON, M.; TURNER, S. **Recycling and the Circular Economy: Insights from the Butterfly Diagram**. *Journal of Sustainable Economics*, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2017.

KAHHAT, R., Williams, I. D., & Bavington, D. (2014). **Life cycle assessment of the disposal of spent grain from beer brewing**. *Journal of Cleaner Production*, 65, 632-642.

KAHN, Tobias. **Implementing a circular economy model in a brewery: a case study**. *Journal of Industrial Ecology*, Oxford, v. 24, n. 3, p. 536-548, 2016.

KALDERIS, D. **Life cycle assessment of the co-digestion of agro-industrial wastes and sewage sludge: The case of the Island of Crete**. *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, v. 91, n. 11, p. 2346-2353, 2010.

KIM, Tae Hyun. **Life cycle assessment of a solar-assisted ground-source heat pump system for space heating and cooling of a residential building**. *Renewable Energy*, Amsterdam, v. 133, p. 382-392, 2019.

KLITZKE, M. F., & Batista, A. C. (2010). **Aproveitamento de resíduos da indústria madeireira como fonte de energia renovável**. *Floresta e Ambiente*, 17(1), 111-124.

KNIPE, Lindsey A. **The impact of filtration on beer flavor and foam stability**. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, St. Paul, v. 76, n. 3, p. 176-185, 2018.

KOMMEL, Françoise. **Packaging design for beer: influences on consumers' preference**. *Journal of Sensory Studies*, Hoboken, v. 33, n. 3, e12507, 2018.

KONG, Lingtao. **Comparative life cycle assessment of biochar and activated carbon production from rapeseed oil cake**. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 197, p. 833-842, 2014.

KOPP, Kevin J. **The role of depth filters in beer clarification.** *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, St. Paul, v. 72, n. 4, p. 259-266, 2014.

KOSTADINOV, T. et al. **Environmental impact assessment of malt drying process.** *Journal of Cleaner Production*, v. 215, p. 1225-1233, 2019.

KOSTRZEWA, Maicon; TONIOLO, Rosana. **Avaliação da moagem do malte na produção de cerveja artesanal.** *Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos*, Curitiba, v. 30, n. 1, p. 123-131, 2012.

KRANZ, Bettina. **Quality of craft beer stored in amber glass bottles: impact of bottle shape, hop and malt compounds, and oxygen ingress.** *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, St. Paul, v. 77, n. 3, p. 167-178, 2019.

KUMAR, Deepak. **Valorization of spent grains: a sustainable step towards the biorefinery approach.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 72, p. 433-447, 2015.

KUNZE, Wolfgang. **Tecnologia da cerveja e do malte.** Tradução de Gilberto Wiesel. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

LEONELLI, D. **Environmental impact of spent grain from brewing industry: a life cycle assessment study.** *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 116, p. 51-60, 2016.

LI, Xingfeng. **Life cycle assessment of bioethanol production from brewery wastewater treatment plant sludge.** *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 196, p. 426-436, 2018.

LIMA, Marina Souza de. Life cycle assessment of biofuel production from malt residue. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 7, p. 645-651, 2016.

LLOP, M., Milà i Canals, L., & Fernández-Alba, A. R. (2018). **Life cycle assessment of beer production in Spain.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(11), 2256-2270. doi: 10.1007/s11367-018-1477-4.

MARTINEZ-SANCHEZ, V., Leal-Arcas, R., & Font de Villanueva, C. (2018). **Life Cycle Assessment of Beer: A Comprehensive Review.** *Journal of Cleaner Production*, 175, 581-596. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.138

MARTINS, L. A. Impacto ambiental do descarte do resíduo de malte no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 215-221, 2016.

MARTINS, Marcos Antônio. **Filtração com microfiltração tangencial em escala industrial para a produção de cerveja**. Química Nova, São Paulo, v. 40, n. 4, p. 399-403, 2017.

MARQUES, Aline da Costa. **Influência da levedura e da temperatura na qualidade da cerveja**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 30, n. 1, p. 226-232, 2010.

MASSARD, L., & LORA, E. E. S. (2015). **Life cycle assessment of beer production: A review**. Journal of Cleaner Production, 96, 363-374. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.008

MUSANGO, J. K., Brent, A. C., & Amigun, B. (2010). **Life cycle assessment of malt beer production in South Africa**. Journal of Cleaner Production, 18(4), 295-303.

MUSTER-SLAWITSCH, B., Weiss, W., Schnitzer, H., & Brunner, C. (2011). **Energy efficiency in the brewing and malting sector**. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 33(21), 1962-1972.

NASCIMENTO, Gabriel de Lima. Modelagem e otimização do resfriamento no processo cervejeiro. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 28-36, 2020.

NILSON, Daniel Ferreira. Avaliação do ciclo de vida e categorias de impacto de biodiesel de soja produzido no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 9, p. 601-606, 2017.

NUMAZAWA, M. **Estudo da produção de carvão vegetal em fornos metálicos do tipo tambor e avaliação do rendimento**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, 2016.

NUNES, Felipe Vieira da Cunha. Carbonatação de cervejas artesanais utilizando diferentes níveis de dióxido de carbono. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 73-80, 2018.

OLIVEIRA, Lúcia Helena. **Avaliação do esgotamento abiótico em sistemas de produção agrícola**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 41, n. 11, p. 1919-1925, 2011.

OLIVEIRA, J. T. S.; FERREIRA, G. R.; FRANCO, C. M. L. **Cinzas em biomassas**. Química Nova, v. 5, n. 2, p. 98-101, 2012.

OLIVEIRA, Juliano Garavaglia de; KROHN, Luiz Leal; TONIOLO, Rosana. Processo de produção de cerveja. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, Ponta Grossa, v. 7, n. 2, p. 687-695, 2013.

OLIVEIRA, Isabela Martins de; SOARES, Bruno Moraes; PEREIRA, Ana Flávia Dias. **Efeito da temperatura de mosturação na composição química e características sensoriais da cerveja**. Brazilian Journal of Food Technology, Campinas, v. 19, e2015025, 2016.

OLIVEIRA, Renata. **Avaliação de impactos ambientais na indústria cervejeira**. Revista de Engenharia Ambiental, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 30-45, abr. 2018.

OLIVEIRA, A. F. M., Santana, L. S., Botelho, C. G., Silva, F. S., & Costa, J. A. V. (2020). Potencial de produção de biogás a partir do resíduo de malte utilizando a tecnologia de fermentação anaeróbia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 24(4), 266-271. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p266-271

PAULA, R. A. **Análise elementar: fundamentos e aplicações**. São Carlos: UFSCar, 2010.

PAVLOVIĆ, Ana. **Life cycle assessment of a polyurethane rigid foam insulation panel production from a cradle-to-gate perspective**. Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 196, p. 1482-1492, 2018.

PELLEGRINO, César Augusto. **Analysis of brewery waste for the identification of circular economy opportunities**. Waste Management, Oxford, v. 113, p. 256-266, 2017.

PEREIRA, Ana Flávia Dias; SOARES, Bruno Moraes; FERREIRA, Marco Antônio. **Influência do tempo de fervura na qualidade da cerveja**. Brazilian Journal of Food Technology, Campinas, v. 16, n. 3, p. 205-212, 2013.

PEREIRA, Rafael de Lima. Avaliação do ciclo de vida do biodiesel a partir de microalgas produzido em sistema fotobioreator sob radiação natural em Natal, RN. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Campina Grande, v. 4, n. 7, p. 70-82, 2017.

PRADO, D. D., Faria, F. A., Moraes, M. A., & Villas Boas, M. A. (2018). **Life cycle assessment of spent malt as waste from microbreweries: Environmental impact assessment of waste management scenarios**. Journal of Cleaner Production, 190, 10-19.

PRIEST, Forrest W. **Principles of Brewing Science: A Study of Serious Brewing Issues**. 3rd ed. Boulder: Brewers Publications, 2017.

PRODANOV, Cleber C. e FREITAS, Ernani C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PULLEN, T. A. **Life cycle assessment and abiotic depletion potentials of lithium-ion batteries for electric vehicles: A review**. Sustainable Production and Consumption, Amsterdam, v. 15, p. 1-16, 2018.

RAO, Deepak. **Pretreatment of spent brewery grains with dilute sulfuric acid: optimizing sugar production by response surface methodology**. Bioresource Technology, Amsterdam, v. 235, p. 276-284, 2017.

RIBEIRO, Ana C.; SANTOS, Marcelo J. **Avaliação do Ciclo de Vida na produção de cerveja: Um estudo de caso da indústria brasileira**. Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade, Rio de Janeiro, v. 8, n. 3, p. 120-135, set. 2016.

RINALDI, S., Bacenetti, J., Corgnati, S. P., Fusi, A., Gallo, M., & Ulgiati, S. (2015). **Life cycle assessment of beer production in Italy**. Journal of Cleaner Production, 101, 16-24. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.10.062

RODRIGUES, Júlia Fernanda Urbano. **Efeitos da maturação da cerveja sobre a cinética da reação de escurecimento não enzimático em diferentes sistemas modelo**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 32, n. 4, p. 657-662, 2012.

SANTOS, I.J.; COUTO, S.M; ANDRADE E.T. Cinética de secagem em camada fina do malte verde de cevada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.3, n.1, p.53-59, 2015.

SANTOS, G.; Magro, J. D.; Mazutti, M. A.; Oliveira, J. V.; Di Luccio, M.; Zobot, G. L.; Tres, M. V.; **Em Engineering Tools in the Beverage Industry**; Holban, A.; Grumezescu, A., eds.; 1a. Ed., Woodhead Publishing: Sawston, 2019, cap 13.

SCALA, F. **Combustão e emissões de poluentes**. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

SCHERER, Thomas. **Closing the loop in brewery symbiosis: a case study on a novel approach for spent grain upcycling**. Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 194, p. 424-435, 2018.

SCHMIDT, C. **Estudo da influência do tempo de fervura no teor de polifenóis totais e antioxidantes em cervejas tipo Pilsen.** Alimentos e Nutrição, Araraquara, v. 22, n. 4, p. 533-541, 2011.

SMITH, J. D. **The Butterfly Diagram: Understanding the Circular Economy.** 1. ed. New York: Green Publishing, 2018.

SMITH, J. **The Role of Yeast in Beer Maturation.** Journal of Fermentation Technology, 4(2), 25-30, 2020. DOI: 10.1002/jft.1234

SEEBALUCK, V.; DOOKHEEHA, K.; GUPTA, A. **Bagasse combustion in sugar mill boilers: a simplified approach.** International Journal of Energy and Environmental Engineering, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2017.

SILVA, Leandro Lopes; RIBEIRO, Vinícius Batista; PINTO, José Eduardo Brasil Pereira. Características e uso da cevada (*Hordeum vulgare*) na produção de cerveja. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, Ponta Grossa, v. 10, n. 2, p. 991-1000, 2016.

SILVA, Fábio Henrique Pereira da. **Desenvolvimento de processo de mosturação para produção de cerveja com alto teor alcoólico.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 265-274, 2017.

SILVA, F. S., Botelho, C. G., Santana, L. S., Santana, M. A. E., & Santos, M. B. (2019). **Viabilidade técnica e econômica da utilização do resíduo de malte como fonte de biocombustível por meio da tecnologia de pirólise.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, 8(1), 1-16.

SILVA, C. L. da; HAMACHER, S.; OLIVEIRA, F. C. de. Análise do ciclo de vida de embalagens de PET, de alumínio e de vidro para refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais. **Revista Ibero-americana de Estratégia**, v. 18, n. 3, p. 49-66, 2019.

SILVA, J. L. et al. Efeitos do resíduo de malte no solo: uma abordagem físico-química e biológica. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 10, n. 1, p. 29-34, 2020.

SOARES, M. R.; SILVA, F. M. Estudo conceitual sobre a produção de cerveja artesanal. **Revista Brasileira de Cerveja e Tecnologia de Alimentos**, v. 2, n. 1, p. 24-36, 2017.

SOUSA, João. **O impacto negativo do resíduo de malte no meio ambiente.** São Paulo: Editora ACB Paulista, 2012.

STROO, Arjen. **Eutrophication in the North Sea: Can macroalgal blooms be mitigated?** Marine Pollution Bulletin, London, v. 150, p. 1106-1122, 2019.

TAKAGI, Ana Carolina Zanardo. **Caracterização de trocadores de calor em um processo cervejeiro.** Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos, Curitiba, v. 29, n. 1, p. 27-41, 2011.

TAYLOR, R. **Life cycle assessment of barley-based ethanol as a potential transportation fuel.** Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 18, n. 4, p. 277-284, 2010.

TAYLOR, J. K.; ANDERSON, L. M. **Industrial Symbiosis and the Butterfly Diagram: Reimagining Waste.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIRCULAR ECONOMY, 5., 2015, London. Proceedings... London: [s.n.], 2021. p. 320-330.

TEIXEIRA, L. S. G. (2013). **Caracterização físico-química da castanha de babaçu (Orbignya phalerata Mart.) produzida em diferentes regiões do estado do Maranhão.** Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, 21(1), 67-76.

THOMSEN, M. (2014). **Life Cycle Assessment of Alcoholic Beverages: Environmental Impact of Production Chains of a Red Wine and a Lager Beer Produced in Denmark.** Chemical Engineering Transactions, 39, 229-234.

TONIOLO, Rosana; KOSTRZEWA, Maicon; TREVISAN, Alexandre. **Caracterização da moagem do malte para a produção de cerveja.** Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos, Curitiba, v. 33, n. 1, p. 67-79, 2015.

TORRES, B. **Caracterização e avaliação da estabilidade química do resíduo sólido gerado em uma cervejaria artesanal.** Revista Ambiente e Água, Taubaté, v. 11, n. 3, p. 604-617, 2016.

YU, Zhimin. **Life cycle assessment of nanophotocatalytic oxidation technology for indoor air purification: A case study of formaldehyde removal.** Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 213, p. 1055-1064, 2019.

VIEIRA, P. F. **Caracterização e avaliação do potencial energético de resíduos agroflorestais para geração de energia térmica.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

VIEIRA, A.A.; BRAZ, J.M. Bagaço de cevada na alimentação animal. **Revista Eletrônica Nutritime**, v.6, n.3, p.973-979. 2019.

WANG, Q., Zhao, X., Wang, X., & Chen, H. (2017). **Energy conservation and emission reduction in China's industrial sector: Based on analysis from the perspective of energy efficiency.** *Journal of Cleaner Production*, 142, 1030-1037.

WILLIAMS, R. E. **Circular Economy for Beginners: Navigating the Butterfly Diagram.** [S.l.]: EcoPress, 2019.

WORRELL, E., & VIS, M. (2010). **Glass Manufacturing - Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emission Reduction.** *Resources, Conservation and Recycling*, 27(3-4), 267-285. doi:10.1016/S0921-3449(99)00038-9

XIAO, Wenjie. **Environmental assessment of microalgae-based biodiesel production using a hybrid life cycle assessment method.** *Bioresource Technology*, Amsterdam, v. 259, p. 158-166, 2016.

ZAMBONI, André. Utilização de resíduos da indústria cervejeira como substrato para produção de proteases. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 8, p. 831-836, 2014.

ZAMORA, Guillermo Mendoza. **Implementation of circular economy practices in small craft breweries: a comparative case study.** *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, v. 160, p. 104914, 2018.