

O Potencial da Biorrefinaria Integrada na Indústria Cervejeira: Um estudo de viabilidade e Oportunidades Sustentáveis

The Potential of Integrated Biorefinery in the Brewing Industry: A Feasibility Study and Sustainable Opportunities

Gabriel Pinheiro Barros ¹, Araceli Aparecida Seolatto*²

Citação: Barros, G.P.; Seolatto, A.A; (2026). O Potencial da Biorrefinaria Integrada na Indústria Cervejeira: Um estudo de viabilidade e Oportunidades Sustentáveis. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, 11, e026005
<https://doi.org/10.18554/rbcti.v11i00.8126>

Recebido: 09 nov. 2024

Aceito: 23 dez. 2025

Publicado: 02 jul. 2026



Copyright: este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de atribuição Creative Commons, que permite uso irrestrito, distribuição, e reprodução em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



1. Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Goiás , Goiânia, Goiás, Brasil.

2. Professora do Instituto de Química, Universidade Federal de Goiás , Goiânia, Goiás, Brasil.

*Autor correspondente: araceliseolatto@ufg.br

Resumo: O trabalho realizado explora a integração de biorrefinarias na indústria cervejeira com o objetivo de promover a sustentabilidade ambiental através do aproveitamento de subprodutos, oferecendo benefícios econômicos, aumentando a eficiência e a competitividade da indústria cervejeira. A metodologia adotada envolve uma revisão bibliográfica detalhada, focando em artigos científicos dos últimos cinco anos que discutem a utilização de biorrefinarias na indústria cervejeira para converter resíduos em produtos de valor agregado. O trabalho demonstra que os processos de hidrólise ácida e enzimática são eficazes na quebra das ligações complexas da biomassa, facilitando a liberação de açúcares fermentáveis e compostos bioativos, com potencial para a produção de bioetanol e outros bioprodutos. Os principais resultados do estudo indicam que a aplicação de biorrefinarias pode significativamente diminuir a geração de resíduos, promovendo a reutilização do bagaço de malte em diversos produtos, como biocombustíveis, alimentos funcionais, e materiais biodegradáveis.

Palavras-chave: Recuperação de CO₂. Bagaço de Malte. Sustentabilidade. Economia Circular.

Abstract: The work carried out explores the integration of biorefineries in the brewing industry with the goal of promoting environmental sustainability through the use of by-products, offering economic benefits, and increasing efficiency and competitiveness in the brewing industry. The adopted methodology involves a detailed literature review, focusing on scientific articles from the last five years that discuss the use of biorefineries in the brewing industry to convert waste into value-added products. The study shows that acid and enzymatic hydrolysis processes are effective in breaking down the complex bonds in biomass, facilitating the release of fermentable sugars and bioactive compounds, with potential for the production of bioethanol and other bioproducts. The main results of the study indicate that applying biorefineries can significantly reduce waste generation, promoting the reuse of spent grain in various products, such as biofuels, functional foods, and biodegradable materials.

Keywords: CO₂ Recovery. Malt Bagasse. Sustainability. Circular Economy.

1. Introdução

A indústria cervejeira é uma das mais antigas e amplamente difundidas no mundo, com um consumo global que ultrapassou 190 milhões de quilolitros em 2022, sendo o Brasil o terceiro maior produtor mundial, refletindo a relevância desse setor na economia nacional (Kirin Holfings, 2023). Com o crescimento da produção, também há um aumento significativo na geração de resíduos, sendo o bagaço de malte o principal subproduto gerado.

Um dos principais desafios enfrentados pela indústria cervejeira é o manejo dos resíduos gerados durante o processo de produção. O bagaço de malte, resultante da extração do mosto, representa o principal resíduo sólido, composto majoritariamente por fibras e proteínas (Outeriño et al., 2024). Este resíduo, se não tratado adequadamente, pode gerar impactos ambientais significativos, como a emissão de gases de efeito estufa e a contaminação do solo e água (Pekkoh et al., 2023).

Nesse contexto, surge o conceito de biorrefinaria, que envolve a conversão de biomassa em produtos de alto valor agregado, como biocombustíveis, bioquímicos e materiais de origem biológica (Evaristo et al., 2023). A biorrefinaria se alinha ao modelo de economia circular, que busca maximizar o aproveitamento dos recursos e minimizar a geração de resíduos, criando um ciclo contínuo de reutilização e reciclagem (Agrawal et al., 2023). Integrar biorrefinarias à indústria cervejeira torna-se uma solução eficaz para a reutilização dos subprodutos, contribuindo para a redução de resíduos e a promoção de um modelo econômico mais sustentável.

O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica a partir de artigos científicos para analisar a viabilidade da integração de biorrefinarias em indústrias cervejeiras, com o intuito de atingir uma queda na geração de resíduos e alcançar uma economia circular. Desta maneira, reduzindo o impacto ambiental e gerando benefícios econômicos e sociais, promovendo a reutilização dos subprodutos da produção de cerveja e avançando para um modelo de desenvolvimento mais sustentável.

2. Métodos

Este trabalho foi conduzido através de uma revisão bibliográfica narrativa de artigos científicos, com o objetivo de analisar a integração de biorrefinarias na indústria cervejeira. Para a obtenção dos artigos, foram utilizados os portais Portal Periódicos CAPES e Science Direct. A busca foi delimitada a artigos publicados nos últimos cinco anos, de 2020 a 2024, utilizando as palavras-chave "beer" e "biorefinery". Adicionalmente, foi estabelecido que os artigos base deveriam possuir acesso livre.

O processo de busca combinado resultou em mais de 150 artigos, dos quais 25 foram selecionados e apresentados neste estudo. Outros 10 artigos foram utilizados como referência de literatura e complemento dos temas abordados.

Desta maneira, os artigos foram escolhidos com o critério de que houvesse cobertura abrangente e diversificada dos tópicos que possuem relação à integração de biorrefinarias na indústria cervejeira, fornecendo uma visão ampla e atualizada sobre o tema.

3. Resultados e Discussão

3.1. Produção da cerveja e seus resíduos

O processo industrial de produção de cerveja é uma prática que pode ser aplicada tanto em pequena escala, artesanal, quanto em grande escala, industrial. Esse processo envolve a transformação de matérias-primas, em que se destacam as principais: água, malte, lúpulo e levedura em uma bebida alcoólica através de uma série de operações controladas (Agrawal et al. 2023). Apesar de sua aplicação

em diferentes escalas, é inevitável a ocorrência de perdas e desperdícios ao longo das etapas de produção, o que representa um desafio para a eficiência e sustentabilidade da indústria cervejeira

3.1.1. Processo produtivo

O processo produtivo da cerveja é uma sequência complexa de etapas que começa com a moagem do malte e termina com o envase do produto final. Primeiramente, o malte é moído para facilitar a extração dos açúcares durante a mosturação, onde a mistura de malte moído e água é aquecida para converter o amido em açúcares fermentáveis. Em seguida, o mosto obtido é fervido e adicionado de lúpulo, que confere o amargor característico da cerveja. Após a fervura, o mosto é resfriado rapidamente e transferido para fermentadores, onde a levedura é adicionada para iniciar a fermentação alcoólica. Durante a fermentação, a levedura metaboliza os açúcares do mosto, produzindo álcool e dióxido de carbono (Goyal et al., 2022; Aroh, 2019).

Após a fermentação, a cerveja passa por um período de maturação, para que os sabores se equilibram e os compostos indesejáveis são reduzidos. A clarificação é a etapa seguinte, em que partículas suspensas são removidas para garantir a limpidez da cerveja. Finalmente, a cerveja é carbonatada e envasada em garrafas, latas ou barris para distribuição (Goyal et al., 2022; Aroh, 2019).

Durante cada uma dessas etapas, são gerados resíduos específicos que podem ser reaproveitados ou necessitam de descarte adequado. Na moagem, por exemplo, o bagaço do malte é um subproduto significativo, frequentemente utilizado como ração animal ou em compostagem (Agrawal et al., 2023). A fervura e fermentação produzem trub (resíduos de lúpulo e proteínas) e leveduras exauridas, respectivamente, que também podem ser reaproveitados em processos industriais ou agrícolas (Chattarraj et al., 2024).

3.1.2. Bagaço de malte

A composição química do bagaço de malte, conhecido também como brewer's spent grain (BSG), é complexa e variada, refletindo a origem e o processo de fabricação da cerveja. Estudos recentes destacam que o bagaço de malte é rico em fibras (cerca de 70%), proteínas (até 30%), e possui uma quantidade significativa de lignina, celulose, hemicelulose, e minerais como cálcio, magnésio, fósforo e potássio (Naibaho et al., 2022; Agrawal et al., 2023). A análise composicional (Tabela 1) revela a presença de compostos bioativos como polifenóis e ácidos fenólicos, que possuem propriedades antioxidantes e antimicrobianas (Bruner, Marcus e Fox, 2021). A alta umidade do bagaço, que pode chegar a 80%, é um desafio para seu armazenamento e transporte, mas também oferece oportunidades para sua utilização em processos de fermentação e produção de biogás (Głowacki et al., 2022). Com uma composição nutritiva robusta, o bagaço de malte tem sido explorado para diversas aplicações, incluindo alimentação animal, biocombustíveis, e ingredientes alimentares funcionais, destacando-se como um subproduto valioso na bioeconomia circular (Chetrariu e Dabija, 2020; Zeko-Pivač et al., 2022).

Tabela 1: Composição química fracionada do bagaço de malte.

Componentes	%
Celulose	15-20
Hemicelulose	20-40
Lignina	10-20
Amido	1-10
Lipídios	3-10
Proteínas	15-30
Fenólicos	1-2
Minerais	<0.5
Vitaminas	<0.5

Fonte: Agrawal et al. (2023) – Adaptado.

3.1.3. Trub

No contexto da indústria cervejeira, o termo "trub" refere-se ao material sedimentado resultante da coagulação de proteínas e outros componentes durante o processo de fervura do mosto. Este material consiste principalmente em proteínas, polissacarídeos, lúpulo e resíduos de levedura, sendo tradicionalmente removido antes da fermentação primária (Chattarraj et al., 2024). No entanto, o trub possui um potencial significativo de reaproveitamento em várias etapas do processo produtivo de cerveja. Em termos de nutrição, o trub contém uma quantidade considerável de proteínas, aminoácidos e vitaminas, tornando-o um substrato valioso para a produção de levedura, suplementos alimentares e ingredientes funcionais (Santos e Martins, 2024). Além disso, sua composição rica em lúpulo confere propriedades antioxidantes e antimicrobianas, destacando seu potencial em aplicações na indústria farmacêutica e cosmética (Chattarraj et al., 2024).

3.2. Usos primários do bagaço de malte

Como aponta Colpo et al. (2022), o bagaço de malte pode ser utilizado em aplicações significativas na nutrição humana e animal. Para alimentação humana, o bagaço de malte pode ser utilizado na produção de pães, biscoitos e barras energéticas, enriquecendo esses alimentos com fibras dietéticas, proteínas e compostos bioativos. Além disso, é uma fonte potencial de vitaminas do complexo B e minerais como cálcio e ferro, contribuindo para a nutrição e saúde geral dos consumidores. No âmbito da nutrição animal, o bagaço de malte é frequentemente utilizado na formulação de rações para bovinos, suínos e aves, devido ao seu teor de fibras, proteínas e energia metabolizável.

Ainda tratando-se do bagaço de malte em sua forma crua, outra possibilidade para reaproveitamento está em seu uso como biomassa para geração de energia, através da produção de vapor em caldeiras industriais. Tendo em vista um cenário no qual é utilizado madeira, uma matéria-prima considerada cara, como biomassa em uma caldeira industrial, o bagaço de malte surge como possibilidade de substituição nesse sistema de cogeração.

A partir dos resultados mostrados por Castro et al. (2023), o bagaço de malte seco possui altos valores caloríficos (Tabela 2) e uma mistura madeira e bagaço na proporção 1:4 apresentou melhores parâmetros energéticos para os testes realizados, além de promover a redução de 82% do consumo de madeira. Desta maneira, o bagaço de malte demonstra sua viabilidade como biomassa de cogeração industrial.

Tabela 2: Comparativo dos valores caloríficos obtidos experimentalmente.

Biomassa	Maior Calorífico Bruto	Menor Valor Calorífico
Madeira	17,09	14,74
Bagaço Molhado	7,73	5,38
Bagaço Seco	20,47	18,12

Fonte: Castro et al. (2023) – Adaptado.

3.3. Valorização do bagaço de malte

O processo de carbonização hidrotérmica (CHT) consiste em tratar a biomassa em condições subcríticas de água, geralmente entre 180°C e 260°C, sob pressão autogênica, sem a necessidade de secagem prévia do material (Arauzo, Olszewski e Kruse, 2018). Durante o CHT, a biomassa é convertida em um material carbonizado, conhecido como hidrocarvão, que possui propriedades físico-químicas melhoradas, como maior densidade energética e menor teor de cinzas (Jackowski et al., 2019). O objetivo principal do CHT é valorizar resíduos orgânicos, como o bagaço de malte da indústria

cervejeira, transformando-os em produtos com valor agregado, aptos para diversas aplicações, incluindo melhoradores de solo, biocombustíveis e materiais adsorventes (Arauzo, Olszewski e Kruse, 2018).

Os dados experimentais obtidos por Jackowski et al. (2020) mostram que a aplicação do CHT ao bagaço de malte resulta em melhorias significativas nas propriedades do material. O hidrocarvão produzido possui um valor calorífico superior aumentado e uma redução no teor de cinzas, tornando-o um combustível mais eficiente. Adicionalmente, o CHT facilita a remoção de inorgânicos como potássio, fósforo e sódio, que são eliminados em diferentes graus dependendo da temperatura do processo. Esses avanços não apenas melhoram a eficiência energética do bagaço, mas também ampliam suas possíveis utilizações em biorrefinarias e outras aplicações industriais. Além disso, a pesquisa sugere que o líquido subproduto do CHT pode ser integrado em processos de digestão anaeróbica, recuperando parte da energia contida nos resíduos do processo.

A hidrólise utilizando água subcrítica visa a quebra das ligações complexas presentes na estrutura lignocelulósica do bagaço de malte, facilitando a liberação e extração de proteínas e compostos fenólicos (Cocero et al., 2018). Segundo Alonso-Riaño (2021), a água subcrítica, mantida em estado líquido sob alta pressão e em temperaturas elevadas (entre 100 °C e 374 °C), apresenta propriedades únicas como maior produto iônico e menor constante dielétrica comparada com a água em condições normais. Essas características permitem a solubilização e fracionamento seletivo dos componentes bioativos presentes no bagaço, otimizando a recuperação de proteínas e fenólicos com potencial antioxidante (Alonso-Riaño et al., 2020).

Outra vertente analisada por Lisci et al. (2024) é a hidrólise ácida como processo de valorização do bagaço de malte, tendo como objetivo principal a conversão da celulose e hemicelulose presentes no resíduo em açúcares fermentáveis, como a glicose. O processo envolve o tratamento do bagaço com ácidos diluídos, como o ácido sulfúrico (H_2SO_4) e o ácido nítrico (HNO_3), em condições controladas de temperatura e pressão (Swiatek et al., 2020). O ácido quebra as ligações glicosídicas nas moléculas de celulose e hemicelulose, liberando monossacarídeos que podem ser posteriormente utilizados na fermentação para a produção de bioetanol (Lisci et al., 2024).

Os resultados obtidos por Lisci et al. (2024) revelam que o uso da hidrólise ácida no bagaço de malte mostrou uma recuperação significativa de glicose, atingindo valores de até 18,3 g de glicose por 100 g de bagaço utilizando ácido sulfúrico em concentração de 0,37 M e uma razão líquido-sólido de 10.

Em paralelo a esses resultados, Bedř et al. (2022) nos fornece mais uma análise experimental a partir da hidrólise do bagaço de malte, demonstrando a eficiência do processo otimizado. Na primeira etapa de hidrólise ácida, o rendimento de arabinose alcançou 76%, com uma concentração significativa de oligossacarídeos de arabino-xilose no supernatante. A segunda etapa de hidrólise ácida solubilizou 90% do xilan restante, resultando em um hidrolisado rico em xilose. Na etapa final de hidrólise enzimática, foi obtido um supernatante com alta concentração de glicose (46 g/L), que foi eficientemente fermentado para produzir bioetanol com um rendimento de 72%. Esses resultados indicam que o processo desenvolvido não apenas maximiza a extração de açúcares fermentáveis do bagaço, mas também proporciona um método eficaz para a valorização desse subproduto da indústria cervejeira.

Aprofundando no tema, Schmidt et al. (2023) experimentou sobre o uso de catalisadores na conversão do bagaço de malte mostrando resultados promissores em termos de eficiência e seletividade. Como um exemplo, a hidrólise ácida diluída com ácido sulfúrico resultou em uma recuperação de açúcares hemicelulósicos superior a 80%, com uma concentração média de pentoses (xilose e arabinose) alcançando 30 g/L. O uso de peróxido de hidrogênio alcalino também demonstrou eficácia significativa, recuperando até 80% dos monossacarídeos de hemicelulose sem a formação de compostos inibidores, tornando o hidrolisado adequado para conversões enzimáticas e microbiológicas subsequentes. Esses métodos catalíticos destacam-se como novas possibilidades de reduzir a geração de subprodutos indesejados e melhorar os rendimentos dos produtos desejados.

Em outra via de pesquisa, Liguori et al. (2021) e Parchami et al. (2023) propõem a utilização de culturas fúngicas para valorização do bagaço de malte. Nos resultados obtidos, a estabilidade das

enzimas produzidas foi avaliada, demonstrando que a celulase e a xilanase mantêm sua atividade em uma ampla faixa de pH e temperaturas, o que é crucial para aplicações industriais. Esses resultados indicam que o uso de bagaço como substrato não apenas é viável, mas também pode ser altamente eficiente para a produção de enzimas industriais.

3.4. Fermentação de subprodutos do bagaço

Utilizando métodos como fisiologia quantitativa microbiana, engenharia metabólica, remodelação sintética e engenharia de processos, Branduardi (2021) revela uma pesquisa que exemplifica como os processos microbianos podem inovar as fermentações tradicionais e expandir o potencial das biorrefinarias. Os resultados destacam o papel crucial dos microrganismos na biotecnologia industrial, promovendo a economia circular.

Outeiriño et al. (2024) propõe um modelo de biorrefinaria para converter o bagaço de malte em produtos de alto valor agregado. Métodos de pré-tratamento com líquidos iônicos e hidrólise enzimática foram otimizados, utilizando um coquetel enzimático obtido por fermentação em estado sólido com *Aspergillus brasiliensis* e *Trichoderma reesei*. Posteriormente, a fermentação desses hidrolisados com *Lactobacillus pentosus* e *Lactobacillus plantarum* produziu ácidos orgânicos, bacteriocinas e biossurfactantes microbianos. A eficiência da bioconversão foi alta, e a ausência de compostos inibitórios no processo de hidrólise enzimática contribuiu significativamente para os altos rendimentos de produção. A viabilidade econômica do processo é reforçada pela utilização de resíduos agroindustriais, reduzindo os custos de produção e tratamento de resíduos.

O estudo de Sganzerla et al. (2023), investigou a co-digestão anaeróbia de subprodutos da cervejaria para a recuperação de biometano e bioenergia, com foco na avaliação do desempenho operacional, análise cinética, metataxonômica microbiana e previsão de função metabólica. A recuperação de bioenergia poderia gerar eletricidade (0,348 kWh/kg TVS) e calor (1556 MJ/kg TVS), evitando emissões de gases de efeito estufa (0,114 kg CO₂-eq/kg TVS).

3.5. Etanol de segunda geração

O etanol celulósico (EC) é obtido a partir da fermentação de açúcares liberados pela quebra da celulose e hemicelulose, sendo a destilação utilizada para purificar o etanol produzido, removendo impurezas e alcançando a concentração necessária para uso comercial (Schmidt et al., 2023). O mosto resultante da fermentação, possui 3-12% em peso de etanol, sendo necessário então uma separação para atingir a pureza necessária para fins comerciais, essa mistura etanol/água presente no mosto é de característica azeotrópica homogênea, causando assim um alto custo energético da etapa de separação. Desta maneira diferentes técnicas de separação foram propostas, a fim de superar esses desafios, dentre elas: destilação azeotrópica, adsorção, permeação de vapor por membrana, destilação extrativa e destilação com variação de pressão. (Nhien; Van Duc Long; Lee, 2021).

No estudo realizado por Nhien, Van Duc Long e Lee (2021), foi investigada uma abordagem inovadora para a coprodução de EC, calor e eletricidade a partir de um caldo de fermentação lignocelulósico real. O estudo propôs e analisou um design sustentável e eficiente em termos de custos para a coprodução de EC, utilizando um processo híbrido de destilação e adsorção (HDA) integrado com diversas técnicas de integração térmica (IT). Os resultados obtidos no estudo demonstraram que a integração térmica proposta no processo IT-HDA oferece melhorias substanciais em comparação ao processo convencional de coprodução de EC. A técnica combinada BC-MED permitiu economias significativas de 36,9% nos custos anuais totais (CAT) e uma redução de 33,6% na pegada de carbono. Além disso, o processo de recuperação de tornou-se autossuficiente em energia, gerando 12% mais eletricidade em comparação ao método convencional. A análise econômica e ambiental mostrou que a implementação das técnicas de IT não só melhora a sustentabilidade do processo, mas também a sua viabilidade econômica, tornando-o uma alternativa promissora para a produção de biocombustíveis a partir de biomassa lignocelulósica (Nhien Van Duc; Long; Lee, 2021).

A produção de etanol de segunda geração (2G) a partir de bagaço de malte é significativamente influenciada pelos efeitos dos catalisadores utilizados no processo de conversão da biomassa. Segundo Lisci et al. (2024), catalisadores homogêneos, como ácidos diluídos, facilitam a hidrólise da hemicelulose, quebrando as ligações entre os monômeros de xilose e arabinose, o que aumenta a disponibilidade de açúcares fermentáveis para a produção de etanol. Por exemplo, a utilização de ácido sulfúrico diluído em condições otimizadas pode alcançar um rendimento de 90% de xilose e 76% de arabinose, como demonstrado por Bedó et al. (2023). Assim como, catalisadores heterogêneos, como óxidos metálicos, oferecem a vantagem de serem recuperáveis e reutilizáveis, reduzindo a formação de subprodutos indesejados e melhorando a seletividade das reações. A pesquisa de Bedó et al. (2023) também mostrou que a utilização de peróxido de hidrogênio alcalino pode resultar em uma recuperação eficiente de açúcares sem a formação de inibidores, permitindo um ambiente favorável para a fermentação subsequente por microrganismos, aumentando a produtividade de etanol.

3.6. Captura de carbono

Com o objetivo de atingir uma economia de baixo carbono, a biomassa renovável surge como uma rota viável e sustentável. Na biotecnologia industrial, utiliza-se direta ou indiretamente o dióxido de carbono, pois as matérias-primas originam-se da biomassa vegetal ou são sintetizadas por organismos autotróficos fixadores de CO₂ (Malubhoy et al. 2022). Como a biomassa é um recurso renovável originário de plantas e organismos autotróficos, o carbono perdido na forma de CO₂, durante os processos industriais, é sequestrado biologicamente pelas plantas e algas durante seu ciclo de crescimento. Desta maneira, ao adotar a transição de recursos baseados em fósseis para biomassa renovável, a descarbonização do processo industrial levaria a uma produção mais limpa de produtos químicos e com pegada neutra ou negativa de carbono (Agrawal et al., 2023).

Entrando no tópico da economia circular dentro da indústria cervejeira o artigo de Pekkoh et al. (2023) investiga a utilização da cianobactéria *Leptolyngbya* sp. KC45 como fotocatalisador vivo para a captura e conversão de CO₂ residual em produtos de biorrefinaria. A *Leptolyngbya* sp. KC45, cultivada sob diferentes concentrações de CO₂, demonstrou alta eficiência na fixação de carbono e produção de biomassa rica em pigmentos fluorescentes e lipídios. A biomassa resultante, que inclui ficoeritrina, foi processada para extrair pigmentos antioxidantes e anticancerígenos, e os lipídios remanescentes foram transesterificados para produzir biodiesel. Estes resultados demonstram o potencial da *Leptolyngbya* sp. KC45 em processos de biorrefinaria para a captura de CO₂ e produção de bioprodutos valiosos, contribuindo para objetivos de desenvolvimento sustentável e oferecendo uma solução prática para a mitigação de gases de efeito estufa (Pekkoh et al., 2023).

3.7. Águas residuais do produção de cerveja

Outro ponto de estudo levantado por Zacharof (2021) são os grandes volumes de águas residuais gerados pela produção de cerveja, que devido ao seu alto teor orgânico, podem ser convertidas em produtos químicos de alto valor, como o ácido lático. O tratamento das águas residuais inclui processos físico-químicos e biológicos.

Na aplicação em biorrefinaria, primeiramente, ocorre a sedimentação e a filtração para remoção de sólidos grosseiros e poluentes. Em seguida, o uso de membranas de microfiltração (MF), ultrafiltração (UF) e nanofiltração (NF) são implementados para purificar ainda mais o efluente. Esses processos permitem a remoção de sólidos suspensos totais (SST) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). O sistema é projetado para produzir um efluente limpo que pode ser reutilizado como água cinza ou para outros fins industriais, além de servir como meio nutritivo para o crescimento de bactérias do ácido lático (BAL) visando a produção de ácido lático. (Zacharof, 2021). Os resultados experimentais demonstram que o sistema de tratamento desenvolvido é eficaz na redução de SST e DBO nas águas residuais de cervejarias. Após o tratamento, os níveis de SST foram reduzidos a 0 mg/L e os níveis de DBO a 11,6 mg/L, permitindo a reutilização do efluente como água cinza ou para outros fins industriais.

Além disso, o estudo mostra que o efluente tratado pode ser utilizado como meio nutritivo para a produção de ácido lático por BAL.

3.8. Viabilidade econômica

A viabilidade econômica é um conceito fundamental na introdução de novos processos na indústria, pois envolve a avaliação detalhada dos custos e benefícios associados a um projeto para determinar sua sustentabilidade financeira ao longo do tempo. Esse processo inclui a análise de investimentos iniciais, custos operacionais, receitas projetadas e indicadores financeiros, como o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR) (Voogt et al., 2023). A importância da viabilidade econômica reside na sua capacidade de fornecer uma base racional para decisões de investimento, ajudando a identificar projetos que ofereçam retornos atrativos e minimizem riscos financeiros. Além disso, a viabilidade econômica é crucial para garantir que os recursos sejam alocados de maneira eficiente, maximizando o valor para os acionistas e contribuindo para a competitividade da empresa no mercado.

Segundo Sinnott e Towler (apud Voogt et al., 2021), a análise tecnoeconômica é uma ferramenta essencial que auxilia engenheiros e gestores a planejarem e implementarem projetos de forma mais eficaz, garantindo que eles sejam economicamente viáveis e sustentáveis a longo prazo.

Além das simulações positivas mostradas por Nhien, Van Duc Long e Lee (2021) anteriormente, Voogt et al. (2023) explora a criação de uma biorrefinaria virtual para avaliar a viabilidade de integrar a produção de proteínas alimentares e bioetanol a partir de subprodutos de biomassa, especificamente a grão de cervejaria gasto. O estudo desenvolveu um processo conceitual para uma biorrefinaria em escala industrial, processando anualmente 20 mil toneladas de bagaço de malte, com 8 mil horas de produção por ano, estimando os custos operacionais e de capital, e calculando os indicadores econômicos como TIR e VPL. Os resultados mostraram que a biorrefinaria de bagaço tem um alto potencial econômico com uma TIR de 24%. Concluindo-se que a integração da produção de proteínas e bioetanol pode aumentar significativamente o valor econômico da biomassa residual.

3.9. Economia circular e desafios enfrentados

A economia circular é um modelo econômico que busca maximizar a utilização de recursos, minimizando a geração de resíduos e promovendo a sustentabilidade ambiental (Purvis et al., 2023).

Diferentemente do modelo linear tradicional, que segue um ciclo de produção, uso e descarte, a economia circular foca na reutilização, reciclagem e valorização de subprodutos industriais, contribuindo para a redução de impactos ambientais e o uso eficiente de recursos naturais. No contexto da indústria cervejeira, essa abordagem se torna particularmente relevante devido à grande quantidade de resíduos gerados durante o processo de fabricação de cerveja.

Estudos recentes destacam o potencial biotecnológico dos resíduos de cervejarias, como o grão e a levedura gastos, para diversas aplicações, desde a alimentação animal até a produção de biogás e biocompostos (Chattarraj et al., 2024). A implementação de tecnologias avançadas para a valorização desses subprodutos não só alivia a carga ambiental, mas também oferece oportunidades econômicas significativas, promovendo uma transição para práticas mais sustentáveis dentro da indústria (Agrawal et al., 2023).

3.10. Modelo de planta industrial

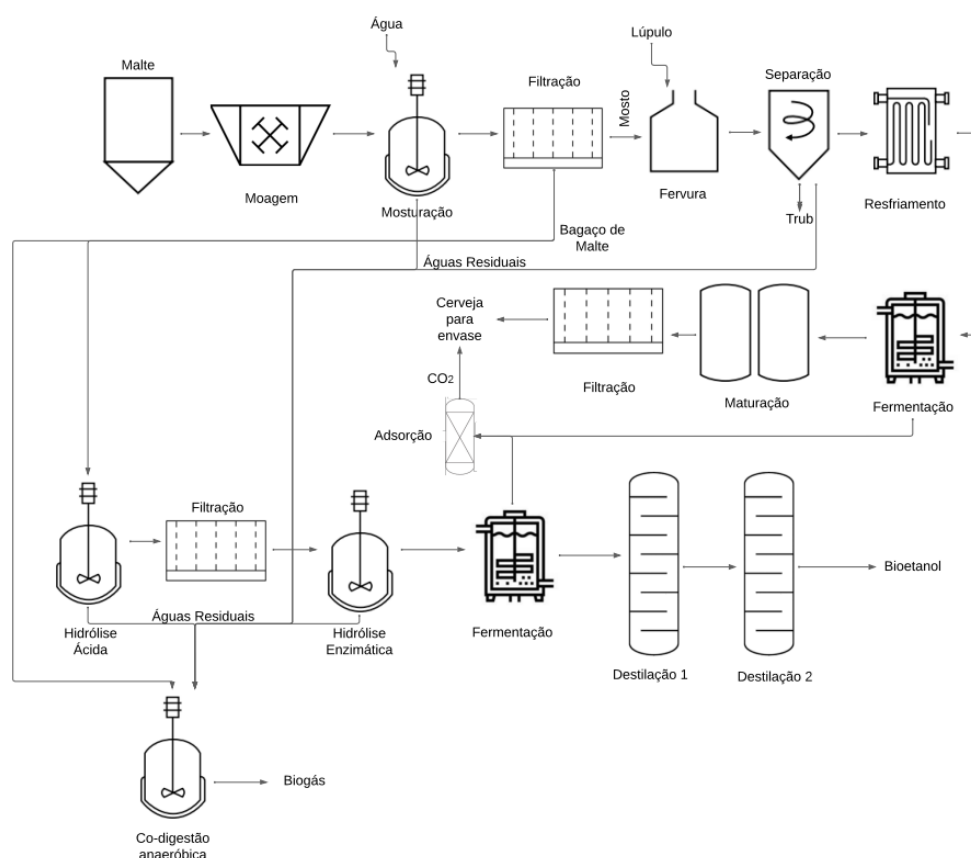
A redestinação dos resíduos gerados durante a produção cervejeira, especialmente o bagaço de malte, desempenha um papel crucial na promoção da sustentabilidade e implementação de uma economia circular. Como observado durante a revisão e exemplificado na Tabela 3, existem diversas vias a valorização e reaproveitamento destes resíduos, levando diversos ganhos para uma unidade

industrial. Partindo disso, a Figura 1 exemplifica uma sugestão de planta industrial, na qual, o bagaço de malte passaria a valorização deste a fim de produzir etanol de segunda geração.

Tabela 3 - Resultados obtidos entre alguns dos artigos revisionados.

Artigo	Objeto de estudo	Resultados obtidos
Colpo et al. (2022)	Combustão do bagaço	Melhora de até 82% no consumo de matéria-prima.
Jackowski et al. (2020)	CHT do bagaço	Melhoras na uniformização e potencial como combustível.
Alonso-Riaño et al. (2021)	Hidrólise em água subcrítica	Rendimentos de até 78% de proteínas solubilizadas.
Lisci et al. (2024)	Hidrólise ácida	Recuperação de até 18,3g de glicose por 100g de bagaço.
Bedó et al. (2022)	Hidrólise ácida e enzimática	Rendimento de 76% e 90% na solubilização de arabinose e xilano na hidrólise ácida e na enzimática, um supernatante com concentração de 46 g/L.
Schmidt et al. (2023)	Influência catalisadores na hidrólise	Recuperação de até 80% de açúcares hemicelulósicos, utilizando tanto ácido sulfúrico como peróxido de hidrogênio.
Liguori et al. (2021)	Cultura fúngica do bagaço	Produção de celulase de até 118,04 U/g de substrato e 1315 U/g de substrato de xilanase.
Parchami et al. (2023)	Cultura fúngica do bagaço	O rendimento de etanol em substrato aumentou em 50%, enquanto o conteúdo proteico diminuiu em 23%.
Outeiriño et al. (2024)	Fermentação do bagaço	Bioconversões de até 70,46% de ácido láctico e 6,76g de biosurfactante.
Sganzerla et al. (2023)	CoDA	A implementação da CoDA poderia render a unidade industrial até 7,38% da eletricidade e 6,86% do calor necessário do processo
Nhien, Van Duc Long e Lee (2021)	Coprodução de CE	Economias de 36,9% no CAT e redução de 36,9% na pegada de carbono.
Pekkoh et al. (2023)	Conversão de CO ₂ residual	Recuperação de até 112 kg de biodiesel por tonelada de biomassa.
Zacharof (2021)	Tratamento de águas residuais	SST reduzidos a 0 mg/L e níveis de DBO a 11,6 mg/L.
Voogt et al. (2021)	Viabilidade econômica	Projeções com uma TIR de até 24%.

Figura 1 - Sugestão de planta para uma indústria cervejeira com biorrefinaria integrada.



Fonte: De autoria própria

O processo inicia-se no silo de malte, matéria-prima inicial do processo, que segue para um triturador acoplado de funil, para a moagem. Em seguida, esse malte moído é levado até um tanque de mistura, onde é adicionado de água para ocorrer a mistura da etapa de mosturação. Esse mosto então passa por um filtro prensa, separando dele o bagaço de malte, que será reutilizado posteriormente na seção da biorrefinaria.

O mosto filtrado segue para a etapa de fervura na caldeira, onde é adicionado de lúpulo e tem-se a definição do sabor da cerveja. Em seguida passa por um separador por ciclone, a fim de separar as impurezas sólidas da etapa anterior, estas sendo o trub. Depois da a separação do trub, o mosto é então resfriado, utilizando-se de um trocador de calor com corrente fria de água, antes de seguir para a fermentação, etapa na qual leveduras serão adicionadas ao mosto em um bioreator de mistura para transformar os açúcares do mosto em álcool. Após a fermentação, a cerveja segue para tanques de maturação a fim de desenvolver seus sabores e, finalmente, filtrada para remover impurezas antes de ser enviada para o envase.

Paralelamente, parte do bagaço de malte separado na filtração inicial, buscando aumentar a concentração de açúcares hemicelulósicos como evidenciado por Bedó et al. (2022), é tratado através de dois processos de hidrólise: ácida e enzimática. Primeiramente, em um reator de mistura com temperatura e pressão controlada e utilizando o ácido sulfúrico, exemplificado por Schmidt et al. (2023), como ácido base para a quebra deles em açúcares (Lisci et al., 2024). Esse resultante de açúcares passa por um filtro prensa, que retira subprodutos indesejados ao processo. Com isso parte-se para a hidrólise enzimática, também ocorrendo em um reator de mistura com temperatura e pressão controlados, obtendo um produto com alta concentração de açúcares (Bedó et al., 2022). Tal produto é então

adicionado de microbactérias, como descrito por Nhien, Van Duc Long e Lee (2021), que realizarão a etapa de fermentação, em um biorreator de mistura, obtendo etanol como produto final. No último processo dessa seção, é necessária a separação do etanol da mistura obtida, desta forma, é utilizado de duas colunas de destilação, a fim de obter a concentração e pureza de desejada para fins comerciais (Sganzerla et al., 2023).

A outra parte do bagaço de malte, em junção com águas residuais do processo, iria para um reator de mistura aquecido, em um processo de co-geração anaeróbica para a produção de biogás (Sganzerla et al., 2023). Por fim, os gases resultantes dos processos de fermentação da cerveja e do etanol seriam recolhidos e levados até uma coluna de adsorção, na qual o CO₂ seria separado e utilizado na carbonatação da cerveja (Pekkoh et al., 2023).

A configuração proposta traria etanol como um produto de alto valor agregado e o biogás como um de alto valor energético, além da reutilização do CO₂ no processo. Desta forma, esse modelo de biorrefinaria traria excelentes ganhos econômicos e economia energética para a unidade industrial, como demonstrado por Voogt et al. (2021), além de diminuir os efluentes residuais e a pegada de carbono atribuída a planta, concluindo um modelo de economia circular sustentável e bioeficiente.

4. Conclusões

A integração de biorrefinarias à indústria cervejeira, conforme explorado neste estudo, apresenta um caminho promissor para a valorização de subprodutos, particularmente o bagaço de malte. A análise dos principais achados deste estudo destaca diversas metodologias eficazes para a valorização do bagaço de malte, com impactos positivos tanto econômicos quanto ambientais.

Os processos de hidrólise demonstram ser eficazes na quebra das ligações complexas da celulose e hemicelulose, facilitando a liberação de açúcares fermentáveis e compostos bioativos. Esses processos não só maximizam a recuperação de biomoléculas valiosas, mas também promovem a produção de bioetanol e biocombustíveis, também se destacou como uma tecnologia promissora para a gestão sustentável de resíduos.

Além das tecnologias de valorização direta, o estudo ressaltou a importância da viabilidade econômica e da análise técnico econômica para a implementação prática dessas soluções.

A criação de biorrefinarias virtuais e a avaliação de indicadores financeiros, como a taxa interna de retorno (TIR) e o valor presente líquido (VPL), demonstraram o alto potencial econômico dessas iniciativas. A integração de biorrefinarias à indústria cervejeira pode, portanto, não só minimizar os impactos ambientais associados à geração de resíduos, mas também criar novas oportunidades de negócios e fortalecer a competitividade do setor.

Este estudo contribui significativamente para o entendimento da viabilidade e das vantagens da biorrefinaria na indústria cervejeira, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimento. Contudo, a transição para um modelo de economia circular completo na indústria cervejeira exige mais do que apenas avanços tecnológicos. É crucial promover a colaboração entre a pesquisa científica e a indústria, evidenciado pela necessidade de converter pesquisas em tecnologias viáveis. Futuras pesquisas devem focar na otimização dos processos de hidrólise e co-digestão, na avaliação de novos catalisadores e na integração de soluções biotecnológicas avançadas para maximizar a eficiência e a sustentabilidade das biorrefinarias.

Contribuição dos autores: O autor Gabriel Pinheiro realizou as pesquisas bibliográficas relacionada ao assunto com orientação e correção da autora Araceli Aparecida Seolatto, que atuou como professora orientadora do trabalho.

Conflito de interesse: Não há.

Declaração ética: Não se aplica

Financiamento: Não há.

Agradecimentos: A Universidade Federal de Goiás, pelo apoio ao estudo.

Referências

- Agrawal, D., Awani, K., Nabavi, S. A., Balan, V., Jin, M., Aminabhavi, T. M., Dubey, K. K., & Kumar, V. (2023). Carbon emissions and decarbonisation: The role and relevance of fermentation industry in chemical sector. *Chemical Engineering Journal*, 475, Article 146308.
- Agrawal, D., Gopaliya, D., Willoughby, N., Khare, S. K., & Kumar, V. (2023). Recycling potential of brewer's spent grains for circular biorefineries. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 40, Article 100748.
- Alonso-Riaño, P., Sanz, M. T., Benito-Román, O., Beltrán, S., & Trigueros, E. (2021). Subcritical water as hydrolytic medium to recover and fractionate the protein fraction and phenolic compounds from craft brewer's spent grain. *Food Chemistry*, 351.
- Alonso-Riaño, P., Sanz Diez, M. T., Blanco, B., Beltrán, S., Trigueros, E., & Benito-Román, O. (2020). Water ultrasound-assisted extraction of polyphenol compounds from brewer's spent grain: Kinetic study, extract characterization, and concentration. *Antioxidants*, 9, 265.
- Aroh, K. (2019). Review: Beer production. *SSRN Electronic Journal*.
- Arauzo, P., Olszewski, M., & Kruse, A. (2018). Hydrothermal carbonization brewer's spent grains with the focus on improving the degradation of the feedstock. *Energies*, 11, 3226.
- Bedó, S., Rozbach, M., Nagy, L., Fehér, A., & Fehér, C. (2021). Optimised fractionation of brewer's spent grain for a biorefinery producing sugars, oligosaccharides, and bioethanol. *Processes*, 9, 366.
- Branduardi, P. (2021). Closing the loop: The power of microbial biotransformations from traditional bioprocesses to biorefineries, and beyond. *Microbial Biotechnology*, 14(1), 68–73.
- Bruner, J., Marcus, A., & Fox, G. (2021). Dry-hop creep potential of various *Saccharomyces* yeast species and strains. *Fermentation*, 7, 66.
- Castro, L. E. N., Sganzerla, W. G., Matheus, L. R., Mançano, R. R., Ferreira, V. C., Barroso, T. L. C. T., Rosa, R. G., & Colpini, L. M. S. (2023). Application of brewers' spent grains as an alternative biomass for renewable energy generation in a boiler combustion process. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 4, Article 100039.
- Chatarraj, S., Mitra, D., Ganguly, A., Thatoi, H., & Das Mohapatra, P. K. (2024). A critical review on the biotechnological potential of brewers' waste: Challenges and future alternatives. *Current Research in Microbial Sciences*, 6, Article 100228.

- Chetrariu, A., & Dabija, A. (2020). Brewer's spent grains: Possibilities of valorization, a review. *Applied Sciences*, 10, 5619.
- Cimini, A., & Moresi, M. (2021). Circular economy in the brewing chain. *Italian Journal of Food Science*, 33, 47–69.
- Cocero, M. J., Cabeza, A., Abad, N., Adamovic, T., Vaquerizo, L., Martínez, C. M., & Pazo-Cepeda, M. V. (2018). Understanding biomass fractionation in subcritical & supercritical water. *Journal of Supercritical Fluids*, 133, 550–565.
- Colpo, I., Rabenschlag, D. R., de Lima, M. S., Martins, M. E. S., & Sellitto, M. A. (2022). Economic and financial feasibility of a biorefinery for conversion of brewers' spent grain into a special flour. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8, 79.
- Evaristo, R. B. W., Costa, A. A., Nascimento, P. G. B. D., & Ghesti, G. F. (2023). Biorefinery development based on brewers' spent grain (BSG) conversion: A forecasting technology study in the Brazilian scenario. *Biomass*, 3, 217–237.
- Głowacki, S., Salamon, A., Sojak, M., Tulej, W., Bryś, A., Hutsol, T., Salamon, M., Kukharets, S., & Janaszek-Mańkowska, M. (2022). The use of brewer's spent grain after beer production for energy purposes. *Materials*, 15(10), 3703.
- Goyal, A., Shukla, G., Mishra, S., Mallik, S., Singh, A., & Dubey, M. (2023). Beer production by fermentation process: A review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 13(4).
- Humbird, D., Davis, R., Tao, L., Kinchin, C., & Hsu, D. (2011). *Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol*. National Renewable Energy Laboratory.
- Jackowski, M., Niedzwiecki, L., Lech, M., Wnukowski, M., Arora, A., Tkaczuk-Serafin, M., Baranowski, M., Krochmalny, K., Veetil, V. K., Seruga, P., et al. (2020). HTC of wet residues of the brewing process: Comprehensive characterization of produced beer, spent grain and valorized residues. *Energies*, 13, 2058.
- Jackowski, M., Semba, D., Trusek, A., Wnukowski, M., Niedzwiecki, L., Baranowski, M., Krochmalny, K., & Pawlak-Kruczek, H. (2019). Hydrothermal carbonization of brewery's spent grains for the production of solid biofuels. *Beverages*, 5, 12.
- Kirin Holdings. (2023). *Global beer consumption by country in 2022*. Recuperado em 28 de junho de 2024, de https://www.kirinholdings.com/en/newsroom/release/2023/1222_04.html
- Liguori, R., Pennacchio, A., Vandenberghe, L. P. S., De Chiaro, A., Birolo, L., Soccol, C. R., & Faraco, V. (2021). Screening of fungal strains for cellulolytic and xylanolytic activities production and evaluation of brewers' spent grain as substrate for enzyme production by selected fungi. *Energies*, 14, 4443.
- Lisci, S., Tronci, S., Grosso, M., Hajrizaj, R., Siboni, L., Karring, H., Gerganov, A., Maschietti, M., & Errico, M. (2024). Valorizing brewer's spent grain: A sequential pathway of supercritical extraction, hydrolysis, and fermentation. *Chemical Engineering Science*, 285.
- Marcus, A., & Fox, G. (2021). Fungal biovalorization of a brewing industry byproduct, brewer's spent grain: A review. *Foods*, 10(9), 2159.

Nhien, L. C., Van Duc Long, N., & Lee, M. (2021). Novel heat-integrated hybrid distillation and adsorption process for coproduction of cellulosic ethanol, heat, and electricity from actual lignocellulosic fermentation broth. *Energies*, *14*, 3377.

Outeiriño, D., Costa-Trigo, I., Ochogavias, A., Pinheiro de Souza Oliveira, R., Pérez Guerra, N., Salgado, J. M., & Domínguez, J. M. (2024). Biorefinery of brewery spent grain to obtain bioproducts with high value-added in the market. *New Biotechnology*, *79*, 111–119.

Pekkoh, J., Duangjan, K., Phinyo, K., Kaewkod, T., Ruangrit, K., Thurakit, T., Pumas, C., Pathom-Aree, W., Cheirsilp, B., Gu, W., Wang, G., Chaichana, C., & Srinuanpan, S. (2023). Turning waste CO₂ into value-added biorefinery co-products using cyanobacterium *Leptolyngbya* sp. KC45 as a highly efficient living photocatalyst. *Chemical Engineering Journal*, *460*, Article 141765.

Santos, L. G., & Martins, V. G. (2024). Functional, thermal, bioactive and antihypertensive properties of hot trub derived from brewing waste as an alternative source of protein. *Food Hydrocolloids*, *146*, Article 109292.

Schmidt, A. R., Dresch, A. P., Alves Junior, S. L., Bender, J. P., & Treichel, H. (2023). Applications of brewer's spent grain hemicelluloses in biorefineries: Extraction and value-added product obtention. *Catalysts*, *13*, 755.

Sganzerla, W. G., Costa, J. M., Tena-Villares, M., Buller, L. S., Mussatto, S. I., & Forster-Carneiro, T. (2023). Dry anaerobic digestion of brewer's spent grains toward a more sustainable brewery: Operational performance, kinetic analysis, and bioenergy potential. *Fermentation*, *9*, 2.

Sganzerla, W. G., Tena, M., Sillero, L., et al. (2023). Application of anaerobic co-digestion of brewery by-products for biomethane and bioenergy production in a biorefinery concept. *BioEnergy Research*, *16*, 2560–2573.

Swaitek, K., Gaag, S., Klier, A., Kruse, A., Sauer, J., & Steinbach, D. (2020). Acid hydrolysis of lignocellulosic biomass: Sugars and furfurals formation. *Catalysts*, *10*, 437.

Voogt, J., Humblet-Hua, N. P., Geerdink, P., Beelen, B., Mulder, W., & Safi, C. (2023). Valorization of multiple components from residual biomass for food and biofuel applications: A virtual biorefinery evaluation. *Food and Bioproducts Processing*, *139*, 1–10.

Wiesberg, I. L., Brigagão, G. V., Medeiros, J. L., & Queiroz Fernandes Araújo, O. (2017). Carbon dioxide utilization in a microalga-based biorefinery: Efficiency of carbon removal and economic performance under carbon taxation. *Journal of Environmental Management*, *203*, 988–998.

Zeko-Pivač, A., Tišma, M., Žnidaršič-Plazl, P., et al. (2022). The potential of brewer's spent grain in the circular bioeconomy: State of the art and future perspectives. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *10*, Article 870744.