

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA – CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**O USO DO *BREWER'S SPENT GRAIN* (BSG) COMO POTENCIAL MATÉRIA-
PRIMA NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS.**

Sabrina Marinho Bueno

**São Carlos - SP
2025**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA – CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

SABRINA MARINHO BUENO

**O USO DO *BREWER'S SPENT GRAIN* (BSG) COMO POTENCIAL MATÉRIA-
PRIMA NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Diego Andrade Lemos

São Carlos - SP

2025

Bueno., Sabrina Marinho

O uso do *Brewer's Spent Grain* (BSG) como potencial
matéria-prima na produção de biocombustíveis. /
Sabrina Marinho Bueno. -- 2025. 60f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Diego Andrade Lemos

Banca Examinadora: Diego Andrade Lemos, Thais
Suzane Milessi Esteves, Ruy de Sousa Junior.

Bibliografia

1. Engenharia Química. 2. BSG. 3. Biocombustível. I.
Bueno., Sabrina Marinho. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

ERRATA

BUENO, Sabrina Marinho. O uso do *Brewer's Spent Grain* (BSG) como potencial matéria-prima na produção de biocombustíveis. 2025. 60. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, *campus* São Carlos 2025.

Folha

Linha

Onde se lê

Leia

FOLHA DE APROVAÇÃO

Sabrina Marinho Bueno

O uso resíduo do *Brewer's Spent Grain* (BSG) como potencial matéria-prima na produção de biocombustíveis.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.
São Carlos - SP, 15 de julho de 2025.

Orientador(a)

Prof. Dr Diego Andrade Lemos.

DEQ – Departamento de Engenharia Química

Examinador(a)

Prof.(a) Dr.(a) Thais Suzane Milessi Esteves.

DEQ – Departamento de Engenharia Química

Examinador(a)

Prof. Dr. Ruy de Sousa Junior

DEQ – Departamento de Engenharia Química

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio que me permitiu chegar até aqui em especial a minha avó Luisa (*in memoriam*) que sempre me ofereceu acolhimento e incentivo em todos os momentos.

Aos meus amigos que compartilharam os bons e maus momentos comigo durante toda a graduação, tornando esse momento único e especial.

Ao meu companheiro André, pelo apoio incondicional nessa etapa final da graduação.

À todos os professores, estudantes e colaboradores que tive o prazer de encontrar e acompanhar durante todos esses anos na UFSCar.

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aborda a crescente necessidade de fontes de energia sustentáveis e a valorização de resíduos industriais, focando no potencial do bagaço de malte cervejeiro (BSG), principal subproduto sólido da indústria cervejeira, cuja geração massiva e subutilização representam um desafio ambiental e um potencial para a bioeconomia. Para avaliar este potencial, foi empregada uma rigorosa metodologia de revisão bibliográfica sistemática com abordagem quantitativa e qualitativa, utilizando-se o método *Methodi Ordinatio 2.0* para selecionar e ranquear os artigos científicos mais relevantes da base de dados *Web of Science*. A classificação dos trabalhos foi realizada por um índice de relevância que pondera métricas de impacto do periódico (JCR), o número total de citações e a atualidade da publicação, com pesos atribuídos para priorizar artigos de alta e consolidada influência científica, garantindo uma base de análise robusta e atualizada. A partir deste portfólio qualificado, o trabalho analisa criticamente, sob a ótica da engenharia química, as rotas produtivas para biogás, butanol, etanol e hidrogênio, focando nos gargalos tecnológicos comuns a esses bioprocessos, como a recalcitrância da biomassa, a formação de inibidores e a eficiência das etapas de separação. O objetivo final é elucidar o papel indispensável do engenheiro químico na superação desses desafios, na otimização de processos e na consolidação do conceito de biorrefinaria para impulsionar a economia circular.

Palavras-chave: Bagaço de Malte; BSG; Biocombustíveis de Segunda Geração; Biorrefinaria; Economia Circular; Engenharia Química.

ABSTRACT

This undergraduate thesis paper addresses the growing need for sustainable energy sources and the valorization of industrial waste, focusing on the potential of brewer's malt bagasse (BSG), the main solid waste from the brewing industry, whose massive generation and underutilization represent an environmental challenge and a potential for the bioeconomy. To assess this potential, a rigorous systematic literature review methodology with a quantitative and qualitative approach was employed, using the *Methodi Ordinatio* 2.0 method to select and rank the most relevant scientific articles from the Web of Science database. The papers were ranked using a relevance index that weights journal impact metrics (JCR), the total number of citations and the publication's timeliness, with weights assigned to prioritize articles of high and consolidated scientific influence, ensuring a robust and up-to-date analysis base. Based on this qualified portfolio, the work critically analyzes, from a chemical engineering perspective, the production routes for biogas, butanol, ethanol and hydrogen, focusing on the technological bottlenecks common to these bio-processes, such as the recalcitrance of biomass, the formation of inhibitors and the efficiency of the separation stages. The aim is to highlight the unquestionable role of chemists in understanding these needs, optimizing processes and consolidating biofuel concepts to promote the waste industry.

Keywords: Malt Bagasse; BSG; Second Generation Biofuels; Biorefinery; Circular Economy; Chemical Engineering.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tabelas e Quadros.....	v
Nomenclatura.....	vi
1- INTRODUÇÃO	13
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Pré-tratamento e a natureza do BSG.....	17
2.2 Processo de produção para cada biocombustível.....	20
2.2.1 Biogás	20
2.2.2 Butanol.....	23
2.2.3 Etanol.....	26
2.2.4. Hidrogênio.....	29
3- MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 Estratégia de Busca Bibliográfica.....	35
3.2 Extração de Dados e Aplicação do <i>Methodi Ordinatio</i> 2.0.....	35
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 Resultados dos Ranqueamento pelo <i>Methodi Ordinatio</i> 2.0 e Análise Bibliométrica.....	38
4.2 Seleção de Artigos para Análise de Conteúdo.....	47
4.2.1 Biogás	49
4.2.2 Butanol.....	51
4.2.3. Etanol.....	53
4.2.4 Hidrogênio.....	55
4.3 Análise de Conteúdo dos Artigos Seleccionados.....	57
5- CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
APÊNDICE A.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Composição aproximada do BSG (Base Seca).	17
Figura 2.2	Fluxograma para possíveis aplicações do BSG em uma biorrefinaria.	18
Figura 2.3	Esquema de desmantelamento essa barreira lignocelulósica.	19
Figura 2.4	Fluxograma do processo produtivo de biogás a partir do BSG.	21
Figura 2.5	Fluxograma do processo de produção de butanol a partir de BSG	24
Figura 2.6	Fluxograma do processo de produção do Etanol a partir de uma biomassa (BSG);	27
Figura 2.7	Fluxograma de produção de hidrogênio pela rota termoquímica	30
Figura 2.8	Fluxograma de produção de hidrogênio pela rota biológica direta (Fermentação escura).	31
Figura 2.9	Fluxograma de produção de hidrogênio pela rota biológica-química (através da rota do biogás).	32
Figura 3.1	Diagrama do processo de seleção de artigos.	37
Figura 4.1	Gráfico do Ano de Pesquisa versus Indicator Ordinato dos artigos ranqueados pelo Methodi Ordinato 2.0	42
Figura 4.2	Gráfico do Citações/Ano versus Indicator Ordinato dos artigos ranqueados pelo Methodi Ordinato 2.0	43
Figura 4.3	Gráfico do Fator de Impacto (JCR) versus Indicator Ordinato dos artigos ranqueados pelo Methodi Ordinato 2.0	46

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 4.1	Resultados do Ranqueamento pelo <i>Methodi Ordinatio</i> 2.0.	38
Tabela 4.2	Artigos Selecionados pelo ranqueamento e pela autora.	48
Tabela 4.3	Cálculo aproximado de rendimentos e potencial produção de biocombustíveis a partir do BSG	54

NOMENCLATURA

ABE	Acetona-Butanol-Etanol (processo de fermentação).
ACV	Análise de Ciclo de Vida.
AD	Digestão Anaeróbia.
AR	Açúcares Redutores.
BSG	<i>Brewer's Spent Grain</i> (Bagaço de Malte Cervejeiro).
CCD	<i>Central Composite Design</i> (Planejamento Composto Central).
CHP	<i>Combined Heat and Power</i> (Cogeração de Calor e Eletricidade).
CML	<i>Center for Environmental Science</i> (Método de avaliação de impacto ambiental)
CO₂	Dióxido de Carbono.
CrI	Cristalinidade da Celulose.
CRM	<i>Calcined Red Mud</i> (Lama Vermelha Calcinada).
DA	Digestão Anaeróbia.
GEE	Gases de Efeito Estufa.
H₂	Hidrogênio.
H₂S	Sulfeto de Hidrogênio.
HBSG	BSG após o processo de hidrólise.
HHV	<i>Higher Heating Value</i> (Poder Calorífico Superior).
HMF	5-Hidroximetilfurfural.
HNO₃	Ácido Nítrico.
InOrdinatio 2.0	Índice de Relevância Científica (Methodi Ordinatio 2.0).
JCR	<i>Journal Citation Reports</i> (Fator de Impacto de Periódicos).
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> (Análise de Ciclo de Vida).
m/v	Massa por Volume.
p/p	Peso por Peso (base mássica).
SHP	<i>Specific Hydrogen Production</i> (Produção Específica de Hidrogênio).
SGH	<i>Spent Grain Hydrolysate</i> (Hidrolisado de Bagaço de Malte).
SSF	Sacarificação e Fermentação Simultâneas.
US	Ultrassônico.
XOS	Xilooligossacarídeos.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente demanda por fontes de energia sustentáveis somada à necessidade urgente para redução dos impactos ambientais das indústrias, impulsionou a busca por alternativas de combustíveis que promovam esses aspectos. Diante desse contexto, surge a valorização de resíduos que são descartados de indústrias alimentícias e de bebidas, pois estes têm potencial de reutilização para produção de biocombustíveis de segunda geração, ou seja, aqueles produzidos a partir de subprodutos orgânicos e materiais vegetais não comestíveis (Sganzerla et al., 2021).

Nesse cenário, o *Brewer's Spent Grain* (BSG), também conhecido como bagaço de malte, surge como um subproduto de grande relevância devido ao seu elevado volume descartado pela indústria cervejeira. Sua geração é uma consequência direta e inevitável do processo de brassagem na produção de cerveja. Após a moagem do malte e a sua mistura com água quente (mosturação) para a extração dos açúcares fermentescíveis, o líquido resultante (mosto) é separado da fração sólida insolúvel. Esta fração sólida é o BSG.

A sua produção é consistente e previsível, com uma taxa de geração que se situa, em média, entre 19 e 20 kg de BSG úmido por cada hectolitro (100 litros) de cerveja produzida (Lynch et al., 2023). Este é tradicionalmente mais utilizado para produção de ração animal ou adubo orgânico, mas devido ao avanço de estudos dessa biomassa tem-se pesquisado a sua conversão em biocombustíveis como biogás, butanol, etanol e hidrogênio, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade industrial (Zeko-Pivač et al., 2022).

Um desses biocombustíveis, o biogás é um composto gasoso formado principalmente por metano e dióxido de carbono, obtido pela digestão anaeróbia de matéria orgânica. De forma geral, a rota de produção do biogás por meio do BSG envolve a decomposição do subproduto por comunidades microbianas em um ambiente sem oxigênio. O processo ocorre em quatro fases interdependentes — hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese — onde diferentes grupos de microrganismos atuam sequencialmente para converter os polímeros complexos do BSG em biogás. A eficiência deste processo pode ser significativamente otimizada através de pré-tratamentos, como o ultrassom ou tratamentos térmicos, que visam aumentar a disponibilidade dos açúcares e polissacarídeos presentes no BSG para os microrganismos (Sganzerla et al., 2022).

No que tange aos álcoois combustíveis que podem ser provenientes do BSG, tem-se o etanol de segunda geração cuja rota de produção envolve, em termos gerais, três etapas principais: pré-tratamento, hidrólise e fermentação. Inicialmente, o BSG passa por um pré-tratamento para despolimerizar a lignocelulose e tornar os açúcares acessíveis (Moreira et al., 2012). Em seguida, a hidrólise enzimática, utilizando coquetéis de enzimas como celulases e hemicelulases (e.g., *Cellic CTec2*), converte os polissacarídeos em açúcares simples (glicose, xilose e arabinose) (Araújo et al., 2021). Por fim, microrganismos fermentadores, como a levedura *Saccharomyces cerevisiae* ou cepas de *Pichia stipitis* e *Kluyveromyces marxianus*, convertem esses açúcares em etanol. A otimização das condições de processo, como temperatura e pH, é fundamental para maximizar o rendimento e a produtividade (White; Yohannan; Walker, 2008)

Outro álcool que se destaca como biocombustível líquido promissor, com propriedades energéticas até superiores às do etanol e menor corrosividade, é o biobutanol. Sua produção a partir do BSG geralmente ocorre por meio da fermentação ABE (Acetona-Butanol-Etanol), realizada por bactérias anaeróbias do gênero *Clostridium*, como o *Clostridium beijerinckii*. A rota geral de produção envolve um pré-tratamento do BSG (ácido, hidrotérmico ou assistido por micro-ondas) para liberar os açúcares fermentescíveis, seguido pela hidrólise enzimática da fração sólida e, posteriormente, a fermentação destes açúcares para a formação do butanol (Plaza et al., 2017). A complexidade da matriz lignocelulósica do BSG e a potencial toxicidade dos produtos da fermentação para os microrganismos são aspectos críticos que demandam otimização ao longo do processo (Kumar; Sharma, 2017).

Finalmente, tem-se o hidrogênio, um gás combustível limpo, considerado uma alternativa promissora no futuro da energia sustentável. Sua produção a partir do BSG pode ocorrer por meio da fermentação escura, um processo biológico que converte carboidratos em hidrogênio gasoso em condições anaeróbias (Gutiérrez-Sánchez et al., 2024). Geralmente, esta rota envolve um pré-tratamento do BSG (termoquímico com ácido ou com lama vermelha calcinada) para hidrolisar a biomassa e liberar os açúcares e proteínas necessários para os microrganismos. Microrganismos específicos, como *Escherichia coli* ou comunidades bacterianas de lodo, são empregados para realizar a fermentação. (Cabrera et al., 2024). Além do hidrogênio, este processo pode gerar subprodutos valiosos, como ácidos graxos voláteis e etanol, que também podem ser valorizados em um conceito de biorrefinaria (Gutiérrez-Sánchez et al., 2024).

Frente a esse panorama, a valorização do BSG por meio da produção desses biocombustíveis representa não apenas uma alternativa viável ao descarte inadequado, mas também uma oportunidade de inovação tecnológica no setor energético. Para que esse aproveitamento seja eficaz, é essencial compreender os processos envolvidos, suas variáveis e os avanços tecnológicos que vêm sendo propostos e implementados (Zeko-Pivač et al., 2022).

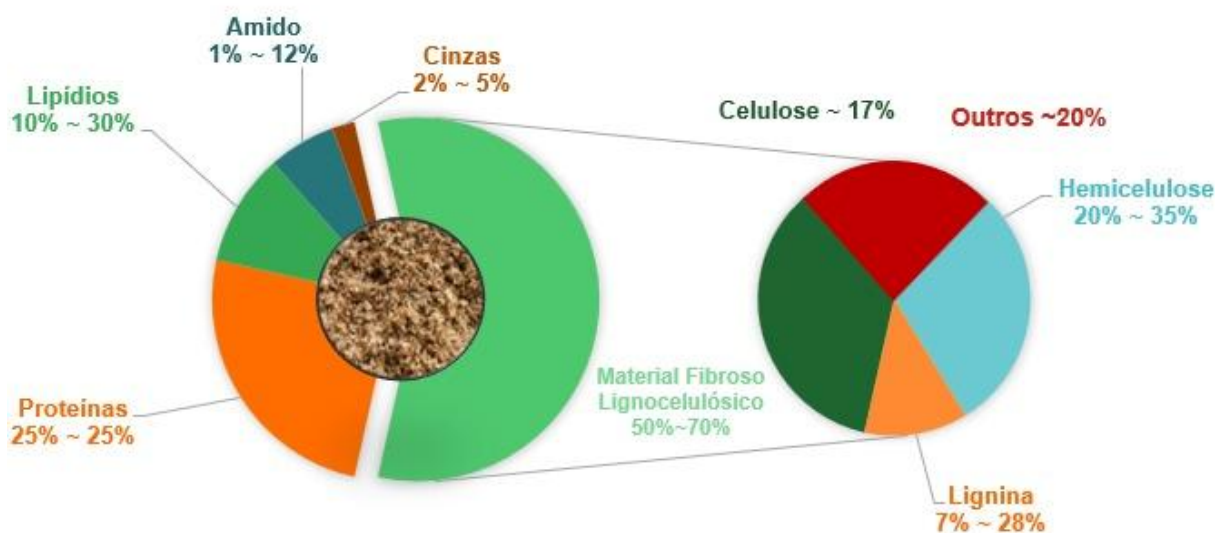
Portanto, esse trabalho tem como objetivo estudar o uso do BSG como potencial matéria-prima na produção de biocombustíveis de segunda geração. Para isso, será realizada uma revisão criteriosa dos estudos disponíveis, visando traçar um panorama atual sobre a produção e aplicação do BSG nesse contexto, além de analisar as etapas do processo produtivo, as variáveis envolvidas e as perspectivas futuras sob a ótica da engenharia química. Para a seleção e ranqueamento dos artigos por relevância científica para esta revisão, adotou-se o método *Methodi Ordinatio 2.0*. Este método sistemático permite a seleção, classificação e análise de artigos científicos, considerando métricas como o Fator de Impacto do periódico (JCR), o ano de publicação do artigo, o tempo de meia-vida das citações e o número total de citações. A aplicação da equação *InOrdinatio 2.0*, também permite a avaliação do autor sobre os critérios da seleção dos artigos, determinando os pesos para cada parâmetro relacionado. Esta abordagem visa garantir a inclusão de trabalhos de alto impacto e tendências de pesquisa sobre o uso do BSG para biocombustíveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica explora a crescente preocupação global com a gestão de resíduos e a busca por fontes de energia sustentáveis, destacando a relevância dos resíduos agroindustriais como matéria-prima. Nesse cenário, será contextualizado o *Brewer's Spent Grain* (BSG), abordando suas destinações atuais e as diversas aplicações potenciais, com ênfase na produção de biocombustíveis. Essa análise visa a ressaltar a importância da valorização do BSG para a transição energética e o desenvolvimento de uma economia circular, que são os pontos centrais que motivaram este trabalho.

A problemática ambiental relacionada à crescente geração de resíduos industriais tem impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis para o descarte e a valorização desses materiais. Nesse contexto, a biomassa lignocelulósica, abundante e renovável, emerge como uma matéria-prima promissora para a produção de diversos produtos de valor agregado, incluindo biocombustíveis. Um dos subprodutos de grande interesse é o BSG, ou bagaço de malte, que é o principal subproduto sólido da indústria cervejeira. Dados de 2018 apontam que a produção mundial de cerveja atinge 194 bilhões de litros, gerando aproximadamente 87 milhões de toneladas de BSG anualmente em todo o mundo. No Brasil, a produção nacional de 14 bilhões de litros de cerveja resulta na geração de cerca de 2,8 milhões de toneladas de BSG por ano. Esse volume expressivo, aliado à sua composição rica em lignocelulose, contendo, em base seca, altos valores de celulose, hemicelulose e de lignina, como mostrado na pelo gráfico da figura 2.1 abaixo, o torna um recurso valioso e subutilizado (Sganzerla et al., 2021).

Figura 2.1. Composição aproximada do BSG (Base Seca).

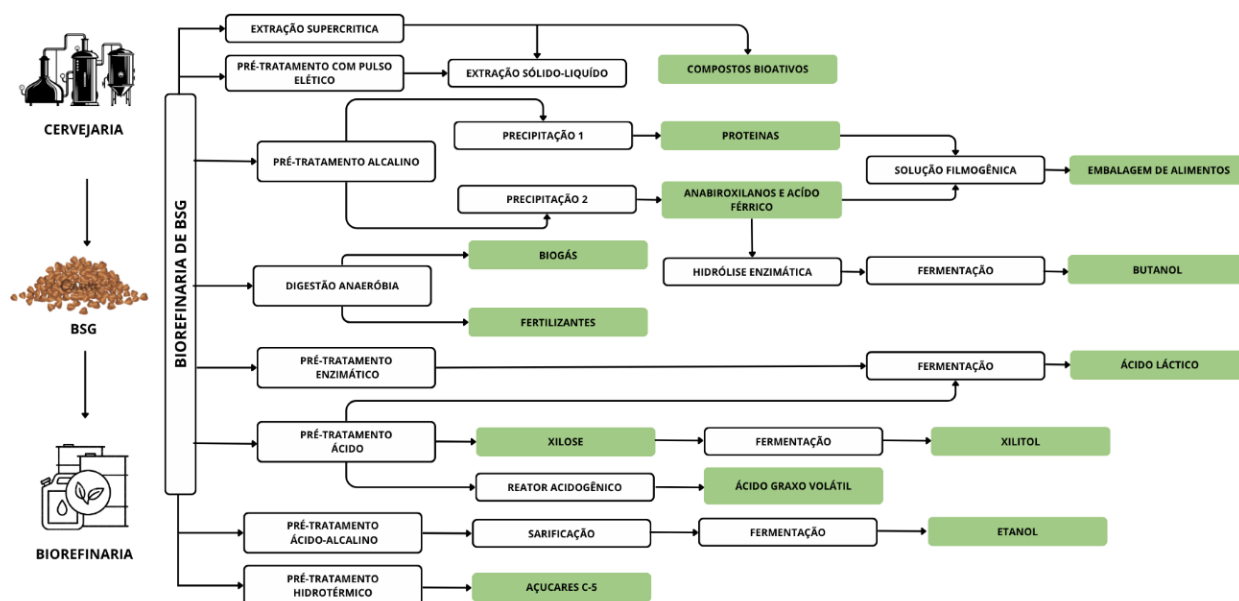


Fonte: Autoria Própria.

Tradicionalmente, o BSG é destinado principalmente à produção de ração animal ou adubo orgânico, devido ao seu alto teor de umidade (cerca de 85% após a brassagem). Contudo, essas destinações muitas vezes não são as mais sustentáveis ou econômicas, levando ao descarte em aterros sanitários ou incineração, práticas que geram impactos ambientais negativos (Sganzerla et al., 2021). Diante desse cenário, a valorização do BSG em uma biorrefinaria surge como uma estratégia poderosa para promover a transição para a economia circular na indústria cervejeira. O conceito de biorrefinaria, conforme definido pela Agência Internacional de Energia, envolve o processamento sustentável da biomassa em um espectro de produtos comercializáveis e bioenergia.

As possíveis aplicações do BSG em uma biorrefinaria são diversas e incluem a produção de compostos bioativos, arabinosilanos, proteínas, xilitol, ácido láctico, butanol, biogás e etanol, como pode ser observado na Figura 2.2. Dentre essas aplicações, a geração de biocombustíveis de segunda geração — aqueles produzidos a partir de resíduos orgânicos e materiais vegetais não comestíveis — tem ganhado destaque.

Figura 2.2. Fluxograma para possíveis aplicações do BSG em uma biorrefinaria



Fonte: Autoria Própria.

As seções subsequentes detalharão cada uma das rotas de produção dos biocombustíveis biogás, butanol, etanol e hidrogênio a partir do BSG, explorando os processos, microrganismos e etapas envolvidas na sua transformação em bioenergia.

2.1 Pré-tratamento e a natureza do BSG

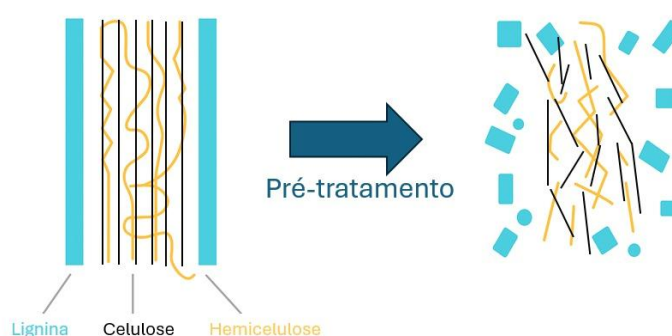
Para uma melhor contextualização será abordado nessa seção sobre os pré-tratamentos necessários como etapa anterior a produção de cada biocombustível. Primeiramente é necessário esclarecer sobre a natureza lignocelulósica do BSG, isso se refere a materiais compostos por lignina, celulose e hemicelulose, que são os principais componentes das paredes celulares das plantas, como já visto na sessão anterior, grande parte da porcentagem da constituição do nosso subproduto em questão é composto por esses materiais.

A celulose, um polissacarídeo linear e o polímero orgânico mais abundante na natureza, confere rigidez estrutural e resistência mecânica, atuando como o esqueleto fundamental da parede celular. As hemiceluloses, por sua vez, são polissacarídeos ramificados de menor complexidade que a celulose, servindo como uma matriz flexível que conecta as microfibrilas

de celulose, proporcionando maleabilidade à parede celular. Finalmente, a lignina é um polímero tridimensional amorfo que age como um agente cimentante, preenchendo os espaços entre a celulose e as hemiceluloses. Sua presença confere impermeabilidade, resistência à compressão e proteção contra agentes externos, sendo crucial para a integridade e durabilidade dos tecidos lenhosos. Em conjunto, esses componentes asseguram a sustentação, proteção e transporte de fluidos essenciais para a vida vegetal.

Diante dessa complexidade estrutural, os pré-tratamentos tornam-se indispensáveis na produção de biocombustíveis a partir do BSG. O principal objetivo desses tratamentos é dismantlar essa barreira lignocelulósica, tornando a celulose e a hemicelulose acessíveis, como ilustrado na figura 2.3 mais abaixo. Isso é feito pela remoção ou desestruturação da lignina, pela redução da cristalinidade da celulose e pelo aumento da área de superfície do material. Sem essas etapas de pré-tratamento, a hidrólise enzimática seria ineficaz e o custo do processo seria muito alto, inviabilizando a produção de biocombustíveis de segunda geração.

Figura 2.3. Esquema de dismantelamento essa barreira lignocelulósica



Fonte: Autoria Própria.

Ao dismantlar a complexa estrutura do BSG, as etapas de pré-tratamento permitem que a hidrólise atue de forma eficiente. Assim, a celulose, rica em unidades de glicose (açúcar C6), é quebrada em glicose, enquanto as hemiceluloses, majoritariamente compostas, são hidrolisadas para liberar xilose (açúcar C5), entre outros. Esses açúcares C6 e C5 são os substratos essenciais que serão então fermentados para a produção de biocombustíveis, validando a indispensabilidade dos pré-tratamentos para a viabilidade do processo..

Com a compreensão estabelecida sobre a composição lignocelulósica do BSG e a necessidade fundamental dos pré-tratamentos para desconstruir essa matriz complexa e liberar

açúcares fermentáveis, a discussão agora se aprofundará nos processos de produção de biocombustíveis específicos derivados deste subproduto. É crucial ressaltar que, em cada fluxograma de processo a ser apresentado, a etapa de pré-tratamento estará invariavelmente presente, servindo como a porta de entrada indispensável para a viabilidade técnica e econômica da conversão da biomassa. A importância dessa fase inicial, já detalhada, será um pilar contextual para a compreensão de cada rota produtiva a seguir.

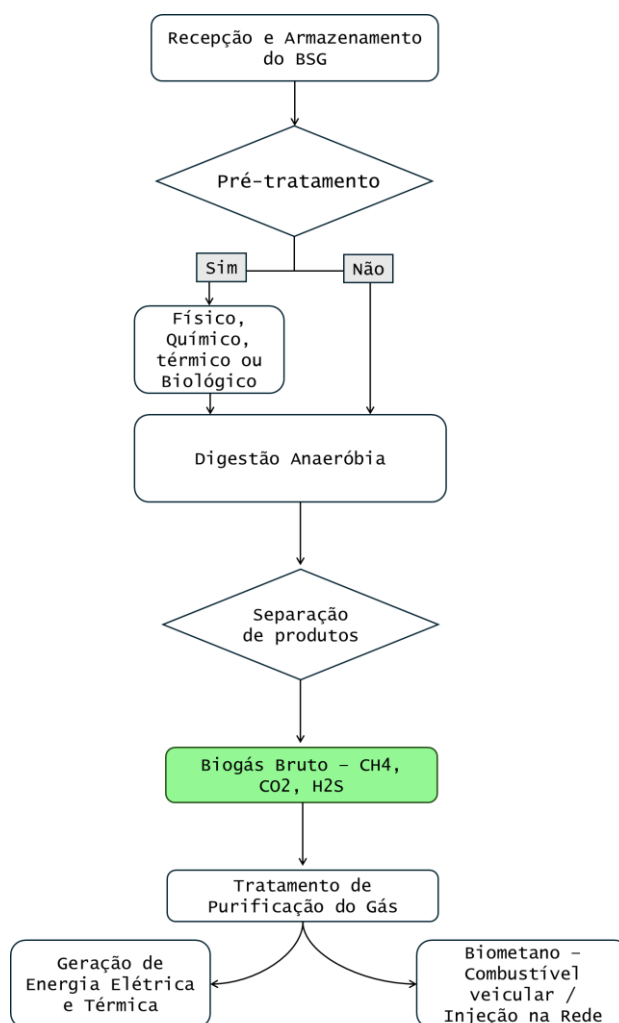
2.2 Processo de produção para cada biocombustível

2.2.1 Biogás

A digestão anaeróbia (DA) emerge no tratamento de resíduos da cervejaria como uma tecnologia estratégica e promissora para a gestão sustentável do BSG. A DA é um processo biológico robusto que não só permite o tratamento eficaz do resíduo, reduzindo o seu volume e o seu potencial poluente, mas também o converte em dois produtos de elevado valor agregado: o biogás e o digestato (Świechowski et al., 2023).

A transformação do BSG em biogás envolve uma série de etapas sequenciais, que podem ser representadas no seguinte fluxograma da Figura 2.4 logo abaixo.

Figura 2.4. Fluxograma do processo produtivo de biogás a partir do BSG.



Fonte: Autoria própria

O processo produtivo inicia-se com a coleta e o armazenamento adequado do resíduo úmido das cervejarias para prevenir sua decomposição. Em seguida, o BSG passa por um pré-tratamento recomendado para desestruturar suas fibras lignocelulósicas, facilitando a etapa seguinte de digestão anaeróbia, onde uma comunidade microbiana decompõe a matéria orgânica na ausência de oxigênio dentro de um biodigestor. O biogás resultante, uma mistura de metano e dióxido de carbono, é então coletado e pode ser purificado, principalmente para remover o H_2S corrosivo, viabilizando seu uso na geração de energia térmica e elétrica ou, após ser refinado a biometano, como combustível veicular e para injeção na rede de gás (Mussatto, 2014).

Apesar do processo de produção parecer simples, a composição do BSG revela um paradoxo interessante quando se considera a sua valorização. As mesmas características que o

tornam um subproduto valioso para certas aplicações, como a ração animal, representam os principais desafios técnicos para a sua conversão em biogás (Lynch et al., 2016). O principal obstáculo é a sua natureza lignocelulósica, como já explicado anteriormente e como resultado, a etapa de hidrólise, ou seja, a quebra dos polímeros em açúcares simples, torna-se extremamente lenta, funcionando como o passo limitante da velocidade de todo o processo de digestão anaeróbia. Sem um pré-tratamento eficaz para desestruturar esta matriz, os rendimentos de biogás e a eficiência do processo são significativamente reduzidos (Świechowski et al., 2023).

Ao mesmo tempo tem-se um potencial energético. O elevado teor de matéria orgânica, nomeadamente os polissacarídeos (celulose e hemicelulose) e as proteínas, confere ao BSG um alto valor calorífico (o poder calorífico superior, ou HHV, é de aproximadamente 21 MJ/kg) e, conseqüentemente, um potencial energético substancial para a produção de biogás através da digestão anaeróbia (Świechowski et al., 2023).

No estudo de Buller et al. (2022), investigou-se a digestão anaeróbia (DA) do BSG com e sem pré-tratamento ultrassônico (US), visando aprimorar a produção de biogás e a recuperação de energia. O processo envolveu a sonicação de uma mistura de BSG e água com uma sonda ultrassônica por um período total de uma hora, dividida em ciclos de sonicação e resfriamento. Essa etapa foi seguida pela digestão anaeróbia em reatores mantidos em condições mesofílicas. Parâmetros como pH, alcalinidade, nitrogênio amoniacal e a concentração de sólidos e demanda química de oxigênio foram monitorados no digestato, juntamente com o volume e a composição do biogás produzido. O estudo também avaliou o potencial de geração de energia elétrica e térmica a partir do biogás e a mitigação de emissões de GEE (gases de efeito estufa). Sobre rendimento, o autor cita que o rendimento de metano do processo com pré-tratamento ultrassônico (US + AD) foi notavelmente superior, alcançando um valor quatro vezes maior em comparação com a digestão anaeróbia sem esse pré-tratamento (AD). Em termos de valores temos $107,28 \text{ L CH}_4\text{kg}^{-1}\text{TVS}$ e $26,72 \text{ L CH}_4\text{kg}^{-1}\text{TVS}$, respectivamente.

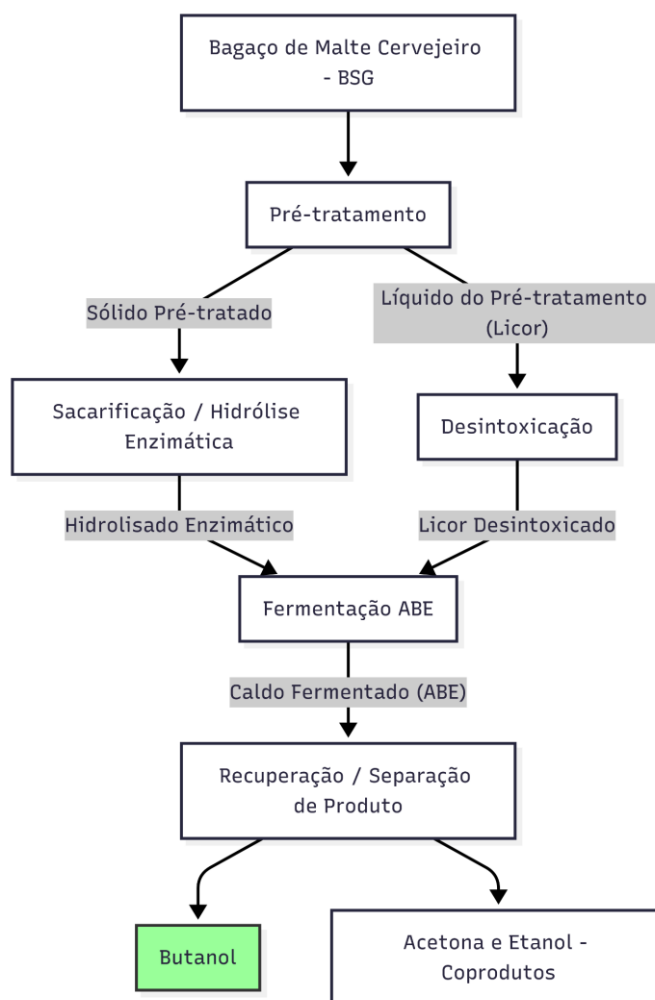
Em comparação, tem-se também o estudo de Emmanuel et al. (2022). Para a geração de biogás, o processo principal é a digestão anaeróbia. Contudo, a baixa degradabilidade do BSG, impulsionada pelo seu alto teor de lignina e celulose, limita a produção em larga escala. Para superar essa limitação, o artigo aponta estratégias como o pré-tratamento térmico, que

pode aumentar a geração de biogás entre 30% e 40% em comparação com o BSG não tratado. A co-digestão anaeróbia, combinando BSG com outros substratos como esterco bovino, lodo de esgoto ou outros resíduos de cervejaria (como precipitados formados durante o resfriamento do mosto, compostos principalmente por proteínas coaguladas, polifenóis e resíduos de lúpulo ou então a biomassa de levedura que sobra após a fermentação) também é destacada. A co-digestão pode aumentar a geração de biogás de 40 a 80% e foi observado que a inclusão dos outros resíduos de cervejaria impulsionou a geração de biogás, resultando em uma produtividade diária de biogás por volume do sistema de digestão mais que duplicada. Um estudo específico, citado no trabalho, relatou um rendimento médio de gás de 0,290 metros cúbicos por quilograma de sólidos voláteis adicionados em condições de co-digestão, ou seja, $290 \text{ L CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ TVS}$.

2.2.2 Butanol

A conversão do Bagaço de Malte Cervejeiro (BSG) em butanol é um processo multifásico que envolve a desconstrução da estrutura complexa da biomassa, a liberação de seus açúcares constituintes e sua subsequente conversão biológica em solventes. Cada etapa apresenta seus próprios desafios tecnológicos e oportunidades de otimização, sendo o fluxo de processo geralmente dividido em quatro operações unitárias principais: pré-tratamento, sacarificação, fermentação ABE e recuperação do produto conforme apresentado na Figura 2.5 logo abaixo.

Figura 2.5. Fluxograma do processo de produção de butanol a partir de BSG



Fonte: Autoria própria

O pré-tratamento é indiscutivelmente a etapa mais crucial e, frequentemente, a que mais causa despesas do processo de conversão de biomassa lignocelulósica, podendo representar até 40% dos custos totais de processamento (Kumar; Sharma, 2017).

Contextualizando sobre o processo de produção de butanol, a etapa mais importante é a fermentação Acetona-Butanol-Etanol (ABE), uma via metabólica característica de bactérias anaeróbias do gênero *Clostridium*, como *C. acetobutylicum* e *C. beijerinckii* (Plaza et al., 2017). Essas bactérias são notáveis por sua capacidade de fermentar uma ampla gama de açúcares, incluindo hexoses (C6) e pentoses (C5), o que as torna ideais para hidrolisados de biomassa lignocelulósica como o BSG. Os resultados desse processo podem variar consideravelmente, o que reflete a forte influência do método de pré-tratamento e da estratégia de fermentação (Sganzerla et al., 2022).

Nesse contexto, o artigo de Plaza et al. (2017) investiga a produção de biobutanol a partir do bagaço de malte (BSG). O estudo aborda o BSG como um resíduo lignocelulósico industrial, disponível em grande volume e com baixo custo. O butanol é apresentado como um combustível líquido com valor energético maior que o etanol e propriedades superiores, como menor corrosividade e miscibilidade com água. O trabalho teve como objetivo determinar a viabilidade de se usar BSG como matéria-prima para obter butanol através de um processo de fermentação ABE (Acetona-Butanol-Etanol) empregando *Clostridium beijerinckii* DSM 6422 (uma linhagem específica da bactéria *Clostridium beijerinckii*, utilizada na fermentação para a produção de biobutanol a partir de açúcares).

O processo produtivo compreendeu um pré-tratamento ácido diluído do BSG usando ácido sulfúrico. Nesse estudo, 1000 g de BSG seco foram inicialmente submetidos a esta etapa. Foram testadas concentrações de sólidos de 5% e 15% em base mássica da matéria seca de BSG (massa do material sólido seco em relação à massa total da solução ou mistura). Após o pré-tratamento, a fase sólida foi separada, e foi explorada a lavagem do BSG pré-tratado e a desintoxicação da fração líquida do pré-tratamento por *overliming* (ou sobrecolagem, é um método de desintoxicação). A hidrólise enzimática da fase sólida pré-tratada foi realizada com um coquetel de enzimas comerciais. O trabalho informa que a redução dos grãos do BSG não é necessária e as tecnologias de moagem que consomem muita energia podem ser evitadas (Plaza et al., 2017). Os hidrolisados enzimáticos e a fração líquida do pré-tratamento foram então utilizados como substratos para a fermentação ABE por *C. beijerinckii* DSM 6422.

Os resultados indicaram que o pré-tratamento com 15% em base mássica de BSG resultou em maior disponibilidade de açúcares tanto nos hidrolisados enzimáticos quanto no líquido de pré-tratamento. A produção total combinada foi de 75 g de butanol por kg de BSG seco e 95 g de ABE por kg de BSG seco. Em conclusão, a lavagem do BSG pré-tratado antes da fermentação dos hidrolisados enzimáticos resultou em concentrações mais altas de butanol e ABE. Também foi observado que a presença de compostos fenólicos em concentrações mais elevadas no BSG não lavado podem inibir a produção de ABE em cerca de 30%. Os autores afirmam que a fermentação de hidrolisados enzimáticos e do líquido liberado no pré-tratamento ácido diluído permite que a produtividade do processo geral seja melhorada.

Complementarmente, o artigo de López-Linares et al. (2019) também investigou um pré-tratamento, nesse caso, hidrotérmico assistido por micro-ondas para o BSG, visando a produção de biobutanol. A tecnologia é considerada um pré-tratamento mais sustentável pois

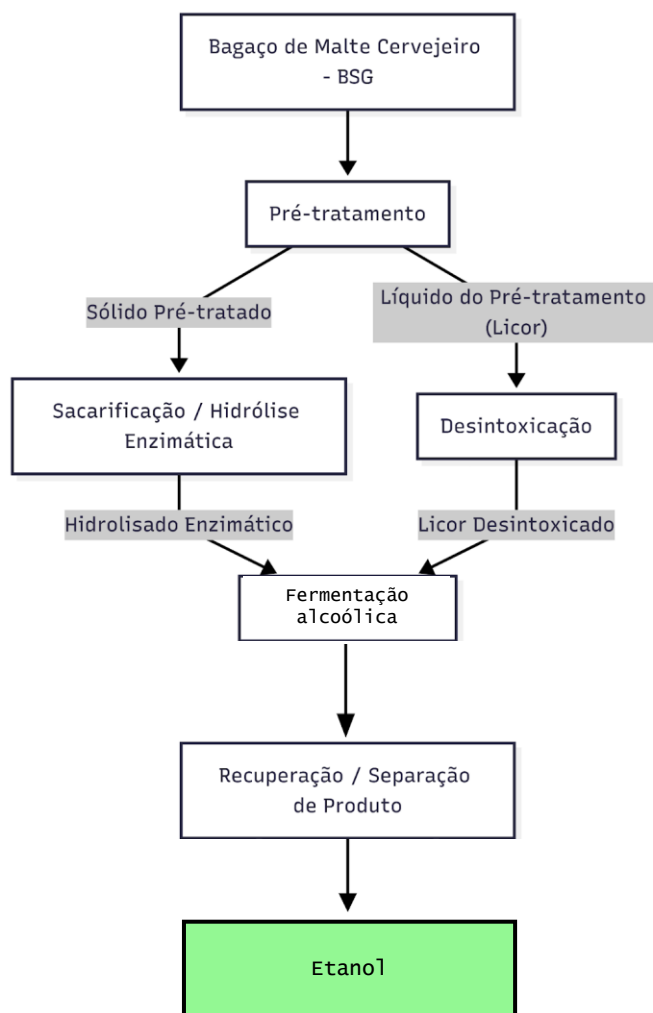
não são usados ácidos ou álcalis como catalisadores. O objetivo central foi maximizar a recuperação de açúcares hemi celulósicos na fração líquida e a recuperação de glicose na hidrólise enzimática, além de minimizar os inibidores na fração líquida para garantir a fermentabilidade ABE (acetona-butanol-etanol).

As etapas do processo, envolveram o pré-tratamento do BSG com micro-ondas sob condições controladas de temperatura e tempo para solubilizar hemicelulose e preparar a celulose para hidrólise. A fase líquida resultante do pré-tratamento e o hidrolisado enzimático da fase sólida foram submetidos à fermentação ABE utilizando *Clostridium beijerinckii*. A fração líquida do pré-tratamento passou por desintoxicação com carvão ativado, que é um método com alta eficácia, baixo custo e alta capacidade de remover inibidores, para melhorar sua fermentabilidade. Os resultados indicaram que, sob condições controladas, a recuperação de açúcares potenciais contidos no BSG foi de 82%. A fermentação do hidrolisado enzimático gerou uma concentração de butanol de 8,3 g/L. A produção global de ABE, calculada por balanços de massa, foi de 62 kg por tonelada de BSG, dos quais 46 kg por tonelada foram de butanol. A fermentação da fração líquida do pré-tratamento atingiu uma baixa concentração de butanol (aproximadamente 1 g/L) e é afirmado que, para a valorização da fração líquida pela produção de butanol, maiores cargas de sólidos no pré-tratamento deveriam ser realizadas (López-Linares et al., 2019).

2.2.3 Etanol

De modo similar ao butanol, o processo de produção do etanol envolve o pré-tratamento da biomassa, hidrólise, fermentação e purificação. As principais diferenças residem no modo de fermentação específico para cada álcool e seu pré tratamento. O fluxograma do processo pode ser observado pela figura 2.6 logo abaixo.

Figura 2.6. Fluxograma do processo de produção do Etanol a partir de uma biomassa (BSG).



Fonte: Autoria própria

Observando a Figura 2.3 acima pode-se perceber que tudo começa com o pré-tratamento, onde a biomassa é preparada para liberar seus açúcares. Em seguida, a hidrólise quebra os polissacarídeos da biomassa em açúcares simples, o substrato para a próxima fase. A fermentação é o ponto chave, pois para o etanol, leveduras como a *Saccharomyces cerevisiae* transformam os açúcares em combustível, num processo robusto e conhecido. Já para o butanol, bactérias do tipo *Clostridium* fazem o trabalho, gerando butanol, acetona e um pouco de etanol em um processo mais sensível. Por fim, a purificação separa o álcool dos demais componentes; enquanto para o etanol a destilação é o método principal, para o butanol, mais complexo de isolar, são usadas técnicas adicionais como a extração líquido-líquido ou adsorção, garantindo o produto final pronto para uso (Sganzerla et al., 2022).

No trabalho de González-García et al. (2018), avalia-se a produção de etanol por meio da Análise de Ciclo de Vida (LCA - *Life Cycle Assessment*) em uma biorrefinaria em escala industrial que produz bioetanol de segunda geração e xilooligossacarídeos (XOS) a partir de bagaço de malte e palha de cevada.

O processo produtivo da biorrefinaria é dividido em cinco áreas principais. Inicialmente, na etapa de acondicionamento e armazenamento da matéria-prima (Área 1), a palha de cevada é moída e seca ao ar, enquanto o bagaço de malte é recebido e armazenado resfriado até o uso. O pré-tratamento por auto-hidrólise (Área 2) submete ambas as matérias-primas a um processo não-isotérmico com água, atingindo uma razão líquido-sólido de 8 gramas de líquido por grama de material seco e uma temperatura de operação de 210°C, otimizada para a obtenção de XOS. Esta etapa crucial permite a separação seletiva da biomassa em uma fração líquida rica em hemiceluloses e uma fração sólida rica em celulose e lignina, separadas por filtração. A purificação de xilooligossacarídeos (XOS) (Área 3) envolve ultrafiltração para remover compostos indesejados, como monossacarídeos, seguida de uma unidade de evaporação de triplo efeito e secagem por *spray drying*, resultando em XOS em pó com no máximo 5% de umidade e composição média de 50% (m/m) de XOS. Na fermentação (Área 4), a fração sólida é utilizada para a produção de bioetanol via sacarificação e fermentação simultâneas (SSF - *Simultaneous Saccharification and Fermentation*) em modo batelada alimentada, utilizando *Saccharomyces cerevisiae* e enzimas (Cellic CTec2). Este processo é otimizado para promover elevadas concentrações de etanol. Finalmente, a purificação do etanol (Área 5) compreende centrifugação para remover sólidos, separação gás-líquido para dióxido de carbono (CO₂), destilação para enriquecer o etanol a aproximadamente 90% em peso, e desidratação por peneiras moleculares para obter bioetanol de grau combustível (pureza superior a 99.5%) (González-García et al., 2018).

Porém, quando feita a análise ambiental, usando o método CML 2001, identificou-se o pré-tratamento por auto-hidrólise (Área 2) como um grande impactante, contribuindo com até 55% do impacto total em categorias como potencial de acidificação e aquecimento global, devido ao alto consumo de vapor. A produção de enzimas para a fermentação (Área 4) também é um ponto crítico, sendo responsável por mais de 95% das contribuições para potenciais de ecotoxicidade aquática marinha e terrestre. As emissões de CO₂ da fermentação representaram 39% do potencial de aquecimento global, com o bioetanol registrando 0,280 kg de CO₂ equivalente por MJ. Em contrapartida, os XOS obtiveram o melhor resultado em emissões de

gases de efeito estufa (4,21 kg de CO₂ equivalente por kg de XOS) entre rotas de oligossacarídeos, evidenciando a vantagem da coprodução (González-García et al., 2018).

Já no trabalho de White; Yohannan; Walker (2008) o objetivo foi desenvolver um processo para converter as frações de hemicelulose e celulose do BSG a glicose, xilose e arabinose, e investigar a fermentação destes açúcares para a produção de etanol. O processo produtivo desenvolvido envolveu etapas de pré-tratamento e hidrólise enzimática, seguidas pela fermentação. O pré-tratamento do BSG seco e moído foi otimizado, sendo que o tratamento com ácido nítrico (HNO₃) foi escolhido como o método mais adequado para solubilizar os grãos antes da digestão enzimática. Após essa etapa e a neutralização parcial, uma mistura de enzimas, incluindo celulases e hemicelulases, foi aplicada para a hidrólise do material. O trabalho comparou diferentes concentrações de sólidos na suspensão de BSG (10, 15 e 20% m/v), observando que entre 40 e 48 gramas de açúcares redutores por 100 gramas de BSG seco foram extraídos.

Os resultados indicaram que o hidrolisado preparado a partir de uma concentração elevada de BSG pré-tratado e digerido enzimaticamente continha glicose, xilose e arabinose em concentrações consideráveis. A fermentação deste hidrolisado por *Pichia stipitis* e *Kluyveromyces marxianus* resultou na produção de etanol, com 8,3 e 5,9 g/L de solução e rendimentos de conversão a etanol de 0,32 e 0,23 gramas de etanol por grama de substrato consumido, para cada levedura, respectivamente. Contudo, a eficiência de utilização do substrato foi menor em comparação com meios sintéticos, o que sugere que compostos inibidores de leveduras derivados do BSG estavam presentes no hidrolisado. Em termos de rendimento por massa de BSG, o etanol produzido foi de 4,2 e 3,0 gramas de etanol por 100 gramas de BSG, para *P. stipitis* e *K. marxianus*, respectivamente (White; Yohannan; Walker, 2008).

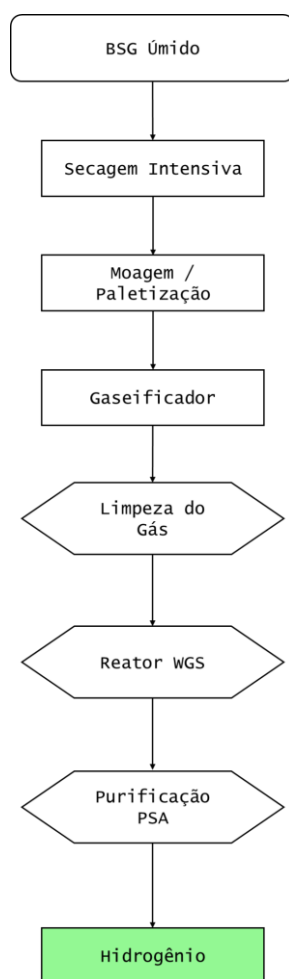
2.2.4 Hidrogênio

Para a produção de hidrogênio, atualmente existem, fundamentalmente, três rotas principais para a sua conversão utilizando BSG, cada uma com etapas e tecnologias específicas, sendo elas uma rota termoquímica (gaseificação), biológica direta (fermentação escura) e biológica-química (através do biogás) (Zhang; Zang, 2016).

A rota termoquímica via gaseificação, embora tecnicamente robusta por aproveitar toda a fração orgânica do BSG — incluindo a lignina — e se basear em tecnologia madura, enfrenta

um obstáculo econômico quase intransponível, o altíssimo custo energético para secar o resíduo de 80% para menos de 15% de umidade. Essa necessidade de secagem intensiva, somada à complexidade na limpeza dos gases devido ao alto teor de proteína do BSG, torna esta rota economicamente inviável na maioria dos cenários, apesar de sua eficiência na conversão da matéria-prima seca (Pinheiro et al., 2019). Abaixo, na figura 2.7 está ilustrado o fluxograma geral da produção de hidrogênio pela rota termoquímica.

Figura 2.7. Fluxograma de produção de hidrogênio pela rota termoquímica

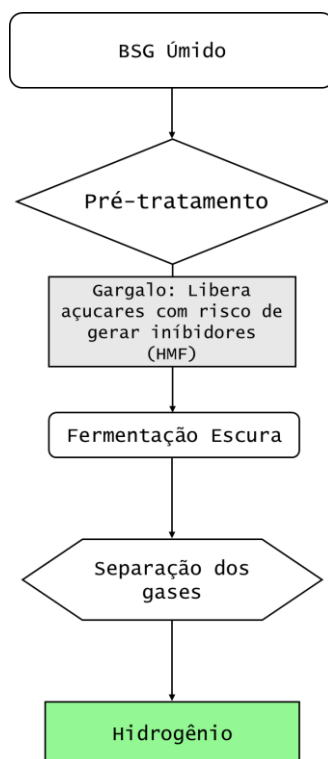


Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, a rota biológica direta via fermentação escura representa a abordagem mais promissora, pois utiliza o BSG em seu estado úmido natural e opera em baixas temperaturas, eliminando os custos de secagem, seu processo está melhor exemplificado pela figura 2.8 mais abaixo. Seu desafio, no entanto, é tecnológico e reside na etapa crítica do pré-tratamento. A estrutura resistente da lignocelulose do BSG exige um método eficiente e de

baixo custo, seja químico ou enzimático, para liberar os açúcares fermentescíveis, um gargalo científico que atualmente impede a sua aplicação comercial e a mantém em fase de pesquisa e desenvolvimento (Zhang; Zang, 2016).

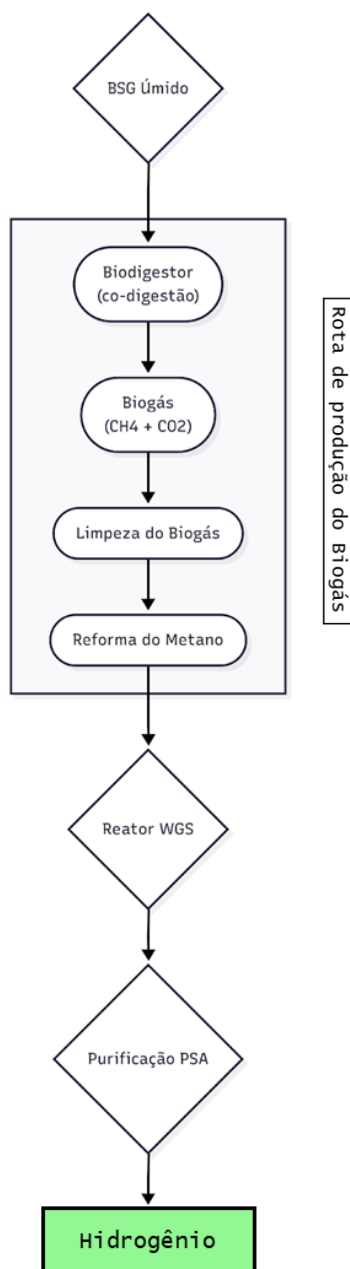
Figura 2.8. Fluxograma de produção de hidrogênio pela rota biológica direta (Fermentação escura).



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, a rota biológica-química via biogás surge como a alternativa mais pragmática e plausível no curto prazo. Sua grande vantagem é combinar duas tecnologias consolidadas, a digestão anaeróbica e a reforma do metano, utilizando o BSG úmido diretamente. Os desafios desta abordagem são sua natureza indireta, a digestibilidade limitada das fibras do BSG que pode reduzir o rendimento de metano (a menos que um pré-tratamento seja aplicado) e a potencial inibição do processo pela amônia gerada a partir do alto teor de proteína do resíduo, mas sua base tecnológica sólida a torna uma opção viável (Emmanuel et al., 2022). O fluxograma 2.9 abaixo ilustra esse processo.

Figura 2.9. Fluxograma de produção de hidrogênio pela rota biológica-química (através da rota do biogás).



Fonte: Autoria própria.

O trabalho de Zhang; Zang (2016) investigou a otimização da produção de bio-hidrogênio a partir do bagaço de malte (BSG) por meio de pré-tratamento com lama vermelha calcinada (CRM) que é o principal resíduo industrial gerado durante a produção de alumina (óxido de alumínio) a partir do minério de bauxita. Os principais objetivos incluíram a avaliação do BSG como matéria-prima adequada, o impacto do CRM na solubilização do BSG e seus

efeitos na produção e cinética da fermentação de hidrogênio. O BSG foi selecionado por ser um subproduto abundante da indústria cervejeira e possuir uma relação carbono-nitrogênio (C/N) de 20/06, considerada adequada para o crescimento bacteriano anaeróbio. O processo experimental envolveu o pré-tratamento do BSG com diversas concentrações de CRM (0,0 a 20,0 g/L) a 55°C por 48 horas, seguido de fermentação com lodo de esgoto termicamente tratado. Este pré-tratamento com CRM demonstrou ser eficaz na hidrólise do BSG, despolimerizando a hemicelulose e removendo a lignina, além de reduzir a cristalinidade da celulose (CrI). Durante a fermentação, não foi detectada a presença de metano (CH₄), indicando uma supressão bem-sucedida da atividade metanogênica.

Os resultados revelaram que o pré-tratamento com CRM a 10 g/L de concentração foi o mais eficaz, proporcionando a maior produção específica de hidrogênio (SHP) de 198,62 mililitros de hidrogênio por grama de sólidos voláteis do BSG, o que representou um aumento de 67,74% em relação ao grupo controle sem pré-tratamento. Contudo, concentrações de CRM superiores a 10 g/L resultaram em uma diminuição na produção de hidrogênio, atribuída à formação de produtos da reação de Maillard e ao desvio do pH de fermentação de sua condição ótima. Em suma, o estudo valida o pré-tratamento com CRM como uma estratégia promissora para a valorização do BSG na produção de bio-hidrogênio, um combustível limpo. As perspectivas futuras devem focar na mitigação de inibidores em altas concentrações de CRM e na otimização para escala industrial, além de explorar a integração com outros processos de biorrefinaria para maximizar a sustentabilidade do uso do BSG (Zhang; Zang, 2016).

Já o trabalho de Cabrera et al. (2024) aborda também a valorização do bagaço de malte (BSG), para a produção de hidrogênio biológico (H₂) utilizando a bactéria *Escherichia coli*. O estudo ressalta a urgência de valorizar resíduos agroindustriais em compostos de alto valor, incluindo biocombustíveis, para mitigar danos ambientais e à saúde humana causados pelo descarte inadequado. O trabalho teve como objetivo otimizar o processo de hidrólise termoquímica do BSG para maximizar a extração de açúcares redutores (AR) e proteínas, tornando-os disponíveis para a fermentação bacteriana.

O processo produtivo envolveu o pré-tratamento do BSG e a fermentação escura. Na fase de pré-tratamento, o ácido sulfúrico foi selecionado como o agente hidrolisante mais eficiente e econômico para a extração de açúcares. Através de planejamento experimental fatorial e também utilização do método *Central Composite Design* (CCD), as condições ótimas de hidrólise foram determinadas, resultando em concentrações teóricas de 54,8 g/L de AR e

20,0 g/L de proteínas. A fermentação subsequente com *E. coli* buscou a produção de hidrogênio, e uma das condições (117°C, 20 min, e 0,1 M de H₂SO₄), dentre as mais de 19 outras testadas gerou a maior produção de hidrogênio, com 48,0 mmol/L (Cabrera et al., 2024).

Os resultados demonstraram que a temperatura e a concentração de ácido sulfúrico são fatores cruciais, influenciando a extração de açúcares e a formação de 5-hidroximetilfurfural (HMF), um composto inibidor da fermentação. A condição destacada, apesar de não ter as maiores concentrações de AR, foi evidenciada pela alta produção de hidrogênio, possivelmente devido à menor concentração de HMF detectada. Além do hidrogênio, o processo gerou ácidos graxos voláteis (como succinato e acetato) e etanol como subprodutos, o que torna possível o uso do HBSG (BSG após o processo hidrólise) para um processo de fermentação subsequente, como a foto fermentação (Cabrera et al., 2024).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho configura-se como uma revisão da literatura com abordagem quantitativa e qualitativa, visando selecionar, classificar e analisar artigos científicos pertinentes ao uso do *Brewer's Spent Grain* (BSG) na produção de biocombustíveis. Para a seleção e ranqueamento dos artigos por relevância científica, adotou-se o método *Methodi Ordinatio* 2.0, proposto por Pagani et al. (2023). Após a escolha dos artigos, estes foram discutidos sob a ótica da engenharia química. As etapas metodológicas são detalhadas a seguir.

3.1. Estratégia de Busca Bibliográfica

O levantamento bibliográfico foi realizado na base de dados *Web of Science* em maio de 2025. Utilizaram-se as seguintes palavras-chave e combinações booleanas: ("*Brewer's Spent Grain*" OU "Bagaço de Malte") E ("Etanol" OU "Ethanol" OU "Butanol" OU "Hidrogênio" OU "Hydrogen" OU "Biogás"). Inicialmente, sem filtros para o período de busca, idioma ou qualquer outra variável. O resultado dessa busca inicial gerou um portfólio bruto de 200 artigos. Após esse resultado direto, foi realizada uma análise dos temas abordados desses artigos, avaliando se esses se alinhavam com o objetivo do trabalho. O critério usado foi a utilização do BSG como matéria-prima do processo e o biocombustível como produto final. Qualquer artigo que estava fora desse cenário foi desconsiderado. Assim, no final dessa avaliação 45 artigos foram escolhidos.

3.2. Extração de Dados e Aplicação do *Methodi Ordinatio* 2.0

Os artigos identificados foram tabulados, registrando-se para cada um: título, primeiro autor, ano de publicação, número total de citações (obtido em *Web of Science*) e a métrica de impacto do periódico (JCR do último ano atualizado). Para a classificação dos artigos, aplicou-se a equação *InOrdinatio* 2.0 (Pagani et al., 2023):

$$InOrdinario\ 2.0 = \left\{ [\Delta * (IF)] - \left[\lambda * \left(\frac{ResearchYear - PubYear}{CitedHalfLife} \right) \right] + \Omega * \left[\frac{Ci}{(ResearchYear + 1) + PubYear} \right] \right\}$$

Onde:

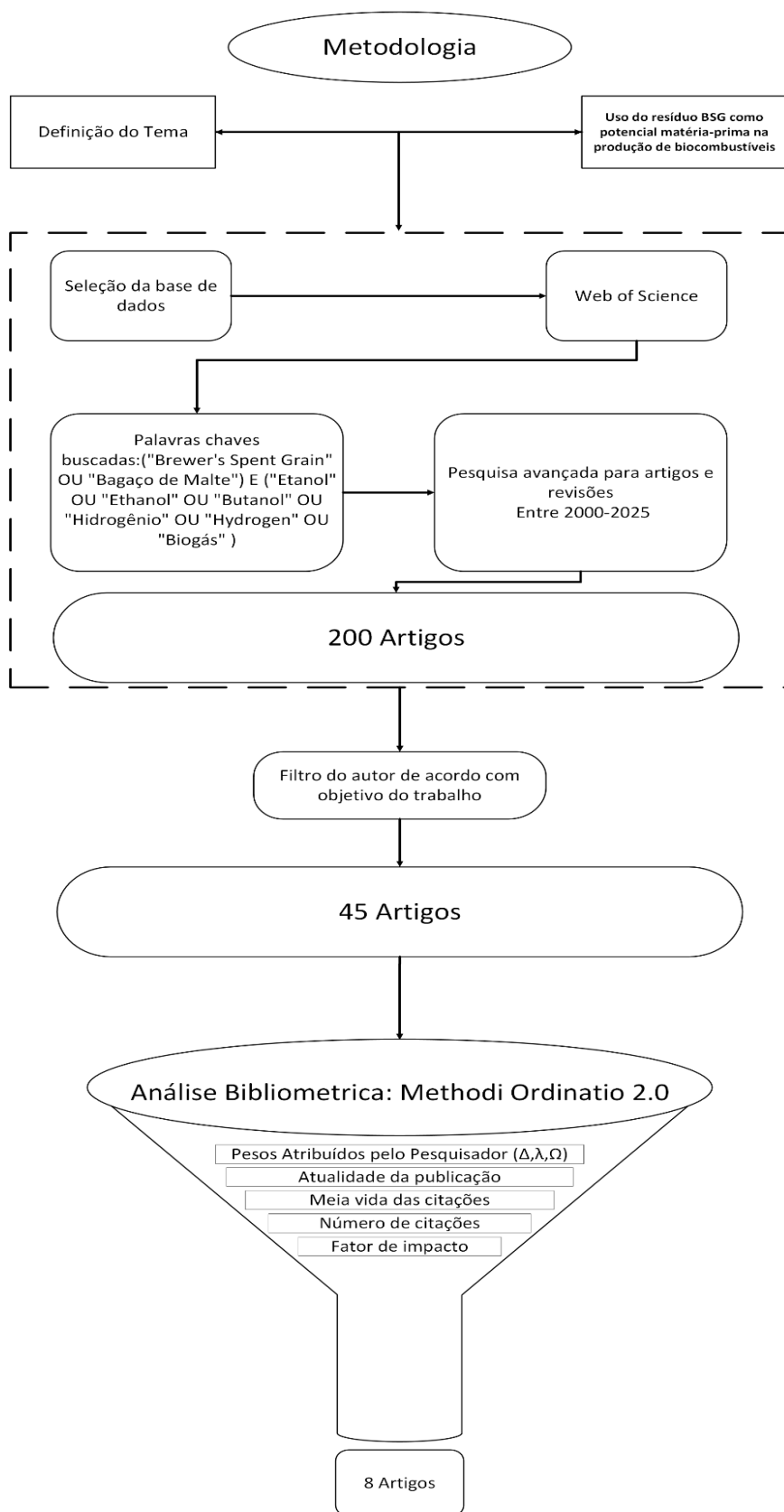
- IF: Métrica do periódico selecionado, no caso deste, JCR (*Journal Citation Reports*);
- *Research Year*: Ano da presente pesquisa, 2025;
- *Pub Year*: Ano de publicação do artigo;

- *Cited Half Life*: Tempo de meia-vida das citações. Para este estudo, adotou-se um valor específico para cada revista, obtido também através do JCR;
- Ci: Número total de citações do artigo;
- Δ , λ , Ω : Pesos atribuídos pelo pesquisador à relevância das métricas do periódico, atualidade do artigo e número de citações, respectivamente, variando de 0 a 10. Para este trabalho, os seguintes pesos foram definidos:
 - Δ (métricas do periódico) = 10
 - λ (atualidade do artigo) = 5
 - Ω (número de citações por ano) = 10

A escolha desses pesos foi delineada para priorizar a seleção de um portfólio bibliográfico de alta relevância e impacto científico consolidado. A atribuição de peso máximo ($\Delta = 10$) às métricas do periódico visa garantir que os artigos selecionados venham de fontes com reconhecido prestígio na comunidade científica, ou seja, revistas com melhores avaliações. Similarmente, o peso máximo ($\Omega = 10$) conferido ao número de citações por ano, pode-se direcionar a seleção para trabalhos que já demonstraram significativa influência e repercussão no campo de estudo do aproveitamento do BSG para biocombustíveis nos últimos anos, indicando sua importância e contribuição para o avanço do conhecimento. Por sua vez, o peso intermediário ($\lambda = 5$) para a atualidade do artigo foi estabelecido para buscar um equilíbrio entre a identificação de contribuições científicas já validadas e influentes e a consideração de desenvolvimentos mais recentes na área. Essa ponderação permite a inclusão de artigos mais antigos que continuam relevantes.

Feito isso, foi possível calcular o InOrdinatio 2.0 para cada artigo, o que permitiu a criação de um ranking de relevância. Esta etapa objetivou identificar os trabalhos de maior impacto e as tendências de pesquisa sobre o uso do BSG para cada biocombustível estudado, servindo como um filtro qualificado antes da análise de conteúdo aprofundada. Abaixo na Figura 3.1 pode-se observar o fluxograma do processo de seleção dos artigos desde a pesquisa direta no *Web of Science* até o resultado final de 8 artigos.

Figura 3.1. Diagrama do processo de seleção de artigos.



Fonte: Autoria própria.

4.RESULTADOS

4.1 Resultados do Ranqueamento pelo *Methodi Ordinatio 2.0* e Análise Bibliométrica Inicial

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do método *Methodi Ordinatio 2.0*, detalhado na seção anterior (3. MATERIAIS E MÉTODOS). Para expor o ranqueamento dos artigos científicos, resultante do cálculo do índice *InOrdinatio 2.0* para cada um, optou-se por apresentar as informações de maneira sumarizada: as colunas mais pertinentes da tabela de classificação serão exibidas no corpo do texto, evitando-se poluição visual, enquanto a tabela completa está disponível no Apêndice A. Em seguida, com o objetivo de oferecer uma visualização mais clara do panorama da pesquisa e das tendências encontradas, serão introduzidos gráficos que fundamentam a análise bibliométrica inicial do portfólio de artigos. Esta abordagem combinada visa a caracterizar o cenário atual e identificar aspectos relevantes sobre o aproveitamento do *Brewer's Spent Grain* (BSG) na produção de biocombustíveis.

Este ranqueamento, em seu formato sumarizado, é demonstrado na Tabela 4.1 abaixo. Um adendo importante sobre a tabela é que encontra-se uma categoria chamada “geral” na qual foram colocados artigos que são relevantes ao tema mas não atendem diretamente a apenas uma categoria, ou seja, artigos que falam sobre vários biocombustíveis no mesmo estudo ou então artigos de análise sobre o tema do BSG enquanto matéria prima para a produção desses biocombustíveis.

Tabela 4.1. Resultados do Ranqueamento pelo *Methodi Ordinatio 2.0*

Biocombustível	Ano da Pesquisa	Revista	IF	IO
	2022	Journal of Cleaner Production	9,8	124,05
	2021	Journal of Environmental Chemical Engineering	7,4	96,59
	2022	Heliyon	3,4	93,44

Biogás	2015	World Journal of Microbiology and Biotechnology	4	57,46
	2023	Biomass Conversion and Biorefinery	3,5	44,33
	2022	Environmental Technology	2,2	39,37
	2023	Waste and Biomass Valorization	2,6	33,37
	2025	BioFuels	2,1	21,00
	2023	Detritus	1,2	15,96
Butanol	2017	Bioresource Technology	9,7	223,55
	2019	Chemical Engineering Journal	13,4	195,08
	2019	Biotechnology for Biofuels	6,1	141,80
	2019	Industrial Crops and Products	5,6	114,04
	2020	Industrial Crops and Products	5,6	109,13
	2020	Biomass and Bioenergy	5,8	104,99
	2018	Industrial Crops and Products	5,6	174,96
	2019	Bioresource Technology	9,7	134,77
	2020	Waste Management	7,1	126,90

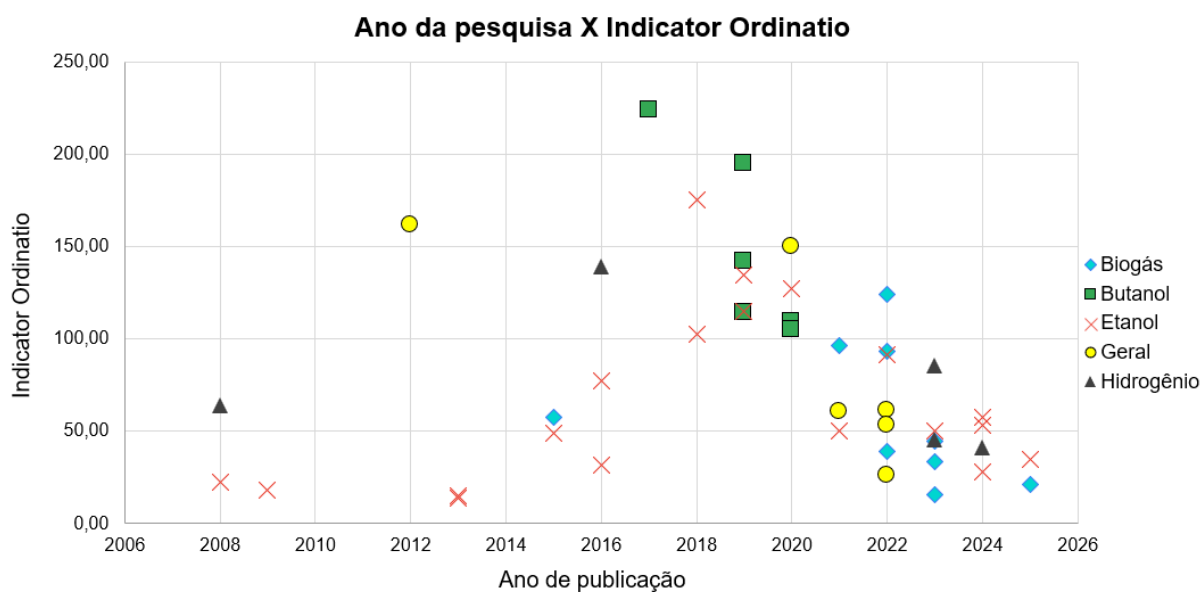
Etanol	2019	New Biotechnology	4,5	114,60
	2018	Energy and Fuels	5,2	102,51
	2022	Polymers	4,7	91,44
	2016	BioEnergy Research	3,1	77,29
	2024	Biomass Conversion and Biorefinery	3,5	57,62
	2024	Energies	3,0	53,28
	2021	Processes	2,8	50,31
	2023	Chemical Engineering Science	4,1	50,02
	2015	Energies	3,0	49,12
	2025	Biomass Conversion and Biorefinery	3,5	35,00
	2016	AIMS Agriculture and Food	1,9	31,84
	2024	Energies	3,0	28,28
	2008	Fems Yeast Research	2,4	22,27
	2009	Biotechnology for Biofuels and Bioproducts	3,3	18,29
	Hidrogênio	2016	Bioresource Technology	9,7
2023		International Journal of Hydrogen Energy	8,1	85,49
2008		Cellulose	4,9	64,25

	2023	BioEnergy Research	3,1	45,29
	2024	Bioengineering and Biotechnology	4,3	41,28
Geral	2012	Biomass and Bioenergy	5,8	161,60
	2020	Renewable Energy	9,0	150,09
	2022	Bioprocess Engineering	0,69	61,46
	2021	Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr	3,2	60,55
	2022	Heliyon	3,4	53,44
	2022	CLEAN-Soil Air Water	1,5	25,90

Fonte: Autoria própria.

A partir do ranqueamento e dos dados dos artigos apresentados na Tabela 4.1, foram elaborados os gráficos subsequentes. Estes visam a proporcionar uma representação visual mais clara de certas tendências e características do conjunto de publicações analisadas, facilitando a análise que será discutida a seguir.

Figura 4.1. Gráfico do Ano de Pesquisa versus Indicador Ordinatário dos artigos ranqueados pelo *Methodi Ordinatio* 2.0



Fonte: Autoria própria.

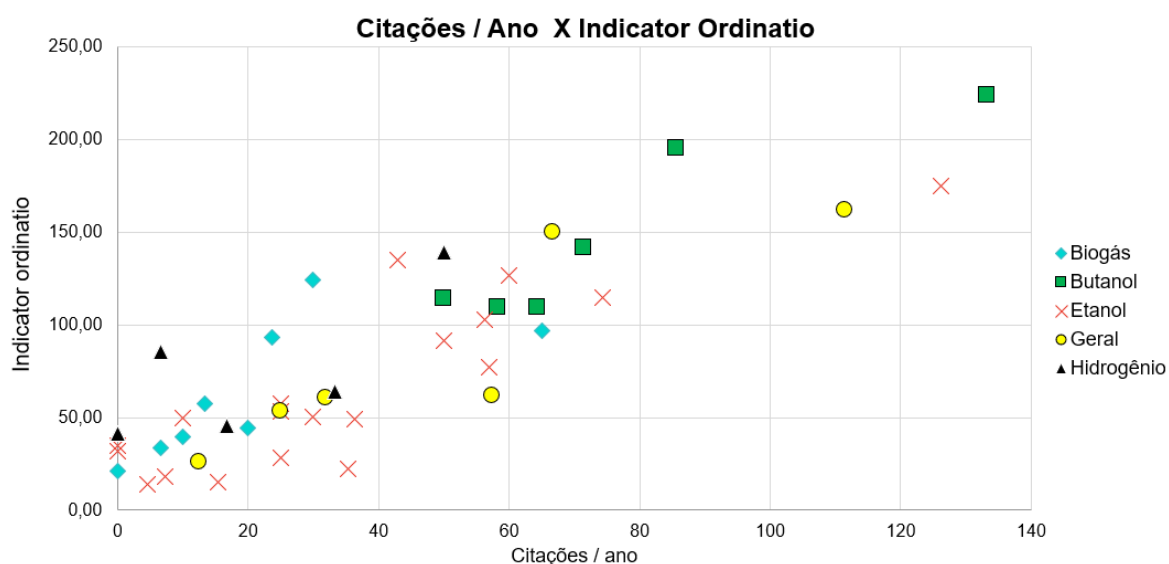
A Figura 4.1 é um gráfico em formato de diagrama de dispersão que mapeia os artigos científicos identificados sobre a utilização do *Brewer's Spent Grain* (BSG) para a produção de diferentes biocombustíveis. Cada ponto representa um artigo, posicionado pelo seu ano de publicação (eixo X, variando de aproximadamente 2008 a 2025) e seu Indicador Ordinatário (eixo Y, variando de 0 a aproximadamente 250), calculado pelo método *Methodi Ordinatio* 2.0. Esta visualização é crucial para identificar os trabalhos de maior relevância científica (Indicador Ordinatário mais alto) e sua distribuição temporal, oferecendo um panorama da evolução da pesquisa e auxiliando na seleção dos artigos mais impactantes para a análise aprofundada.

A distribuição dos pontos ao longo do tempo não mostra um crescimento linear simples da relevância. Em vez disso, o gráfico revela "ondas" de pesquisa, com um período particularmente notável de publicações de altíssimo impacto entre aproximadamente 2016 e 2020. Artigos publicados nesta janela de tempo alcançaram os maiores *scores* no Indicador Ordinatário. Observa-se também a existência de um artigo mais antigo (2012), de abordagem geral, com um *score* muito elevado, indicando uma influência duradoura. As publicações mais recentes, após o ano 2021, apresentam, no geral, pontuações mais moderadas, o que pode ser explicado pelo menor tempo para acúmulo de citações ou por uma mudança no foco da pesquisa.

A produção de butanol se destaca como a área com o artigo de maior impacto de todo o conjunto de estudos, publicado em 2017 e com a mais alta pontuação no Indicador Ordinatío. A pesquisa sobre etanol também mostra um trabalho de altíssima relevância em 2018, além de uma atividade de pesquisa intensa e consistente ao longo desse período. Um achado notável é um artigo de escopo "Geral" de 2012, cujo *score* elevado indica uma grande e duradoura influência. As pesquisas sobre hidrogênio e biogás, por sua vez, mostram picos de impacto em momentos distintos. O hidrogênio teve seu trabalho de maior relevância publicado em 2016, enquanto a pesquisa de maior destaque sobre biogás é mais recente, de 2022. De forma geral, o gráfico aponta para um período particularmente fértil para a publicação de pesquisas de alto impacto entre 2016 e 2020.

Esta concentração de trabalhos de alto impacto pode ser compreendida através do conceito de "Vantagem Cumulativa" (*Cumulative Advantage*), um princípio popularizado na cienciometria pelo pioneiro Derek de Solla Price (1922-1983). Segundo este princípio, também conhecido como "Efeito Mateus" ou "sucesso gera mais sucesso": um artigo que já é muito citado ganha mais visibilidade e, por consequência, tem maior probabilidade de ser citado novamente, criando um ciclo de retroalimentação positiva. (Grácio; Oliveira, 2018). Assim, a proeminência dos artigos de 2017 (Butanol) e 2018 (Etanol) pode ser atribuída não apenas ao seu mérito intrínseco, mas também a esse processo cumulativo que solidificou seu impacto.

Figura 4.2. Gráfico do Citações/Ano versus Indicator Ordinatío dos artigos ranqueados pelo *Methodi Ordinatío 2.0*



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.2 apresenta um gráfico em formato também de diagrama de dispersão que relaciona duas métricas cruciais para a análise da relevância dos artigos: as "Citações por Ano" (eixo X), que medem o impacto corrente, e o "Indicador Ordinatio" (eixo Y), que calcula a relevância geral. A orientação deste gráfico, com o "impacto corrente" no eixo X, nos ajuda a visualizar quais artigos estão gerando maior repercussão atualmente e como isso se traduz em sua classificação geral.

Antes de analisar os dados, é crucial entender a diferença entre o impacto total e o impacto corrente ou velocidade de citação, termo atribuído através do índice de imediatismo, criado por Eugene Garfield (1925 - 2017). O impacto total, refletido no número absoluto de citações de um artigo, indica sua importância histórica e acumulada. Já o impacto corrente, medido pelas "Citações por Ano", revela a "velocidade" com que um artigo está sendo citado no momento, ou seja, quão relevante ele é na discussão científica atual. Um artigo pode ser um "clássico" com muitas citações totais acumuladas ao longo de anos, ou um artigo "do momento" com um número de citações por ano muito alto. Este gráfico nos permite visualizar e diferenciar esses perfis de impacto, uma vez que apresenta definições importantes.

A análise do gráfico revela uma tendência geral positiva na qual artigos com maior Indicador Ordinatio (relevância geral) tendem a ter mais Citações por Ano (impacto corrente). Podemos interpretar as posições dos artigos da seguinte forma:

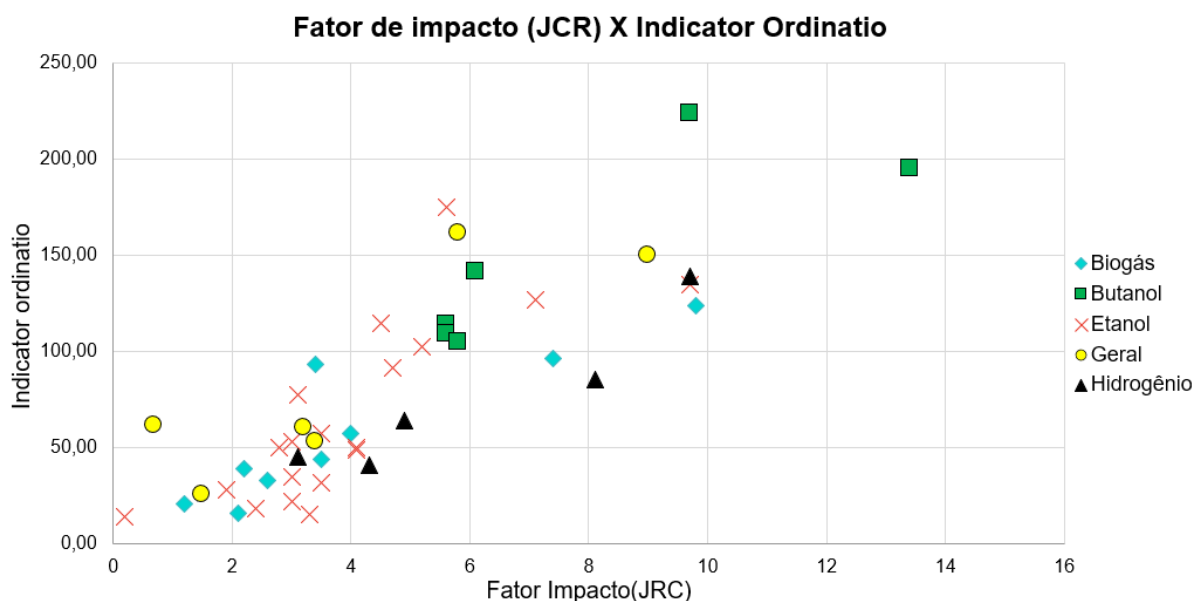
- Artigos no canto superior direito, ou seja, valores em X entre 70 e 140 e valores em y entre 125 e 250, são os trabalhos de maior destaque, o "melhor dos dois mundos". pois possuem tanto uma alta relevância geral (Indicador Ordinatio) quanto um forte impacto corrente (Citações por Ano).
- Artigos com alto Indicador Ordinatio, mas "Citações por Ano" moderadas: Geralmente são trabalhos mais antigos e fundamentais (chamados de "clássicos"). Sua alta pontuação no Indicador Ordinatio é devida ao grande número de citações totais acumuladas e/ou ao prestígio do periódico de publicação, mesmo que seu pico de citações correntes já tenha passado.
- Artigos com altas "Citações por Ano", mas Indicador Ordinatio ainda não tão elevado: Podem ser artigos muito recentes e "quentes", cuja relevância está crescendo rapidamente e cujo Indicador Ordinatio tende a aumentar com o tempo.

A análise detalhada do impacto corrente dos artigos revela que as pesquisas sobre butanol e etanol possuem os trabalhos de maior repercussão na comunidade científica atual. Ambas as categorias apresentam artigos de destaque no canto superior direito do gráfico, combinando um altíssimo número de citações por ano com um excelente Indicador Ordinato, caracterizando-os como os estudos mais influentes do portfólio. De forma notável, um artigo de escopo "Geral" também exibe um forte impacto corrente e alta relevância.

As pesquisas sobre hidrogênio, por outro lado, mostram um perfil de "clássicos fundamentais", com artigos de alto indicador ordinatio, mas com uma velocidade de citação atual mais moderada, indicando uma relevância mais histórica e consolidada. A área de biogás, por sua vez, apresenta um impacto corrente mais modesto em comparação com os outros biocombustíveis.

Essa distribuição temporal do impacto científico, com um pico de relevância para artigos publicados há alguns anos e a influência duradoura de trabalhos mais antigos, reflete dinâmicas bem documentadas na literatura científica. A ciência descreve um "arco canônico" de influência, no qual um artigo atinge um pico de citações e depois entra em um período de declínio, um fenômeno quantificado por métricas como a "meia-vida" da literatura. Contudo, a história da ciência está repleta de exceções notáveis a este padrão, conhecidas como "Belas Adormecidas" (*Sleeping Beauties*) (Van Raan, 2004): publicações que passam por um longo período de baixa citação e são "despertadas" subitamente, anos ou décadas depois, ao terem seu valor reconhecido. Este reconhecimento tardio pode ocorrer porque a ideia era conceitualmente prematura ou porque foi redescoberta por uma disciplina diferente, um padrão observado em análises de larga escala (Ke et al., 2015). Assim, o alto impacto observado em um artigo de 2012 pode ser um exemplo de um trabalho "clássico".

Figura 4.3. Gráfico do Fator de Impacto (JCR) versus Indicator Ordinatios dos artigos ranqueados pelo *Methodi Ordinatio 2.0*



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.3 apresenta um gráfico em dispersão com Indicador Ordinatios (eixo Y) em função do fator de impacto (JCR) do periódico de publicação (eixo X). Assim como anteriormente, o objetivo deste gráfico é entender a relação entre o prestígio do periódico e a relevância geral do artigo.

Eugene Garfield (1925-2017) criou o Fator de Impacto do Periódico (JIF) na década de 1960. Seu propósito original não era avaliar a qualidade de pesquisadores individuais, mas sim servir como uma ferramenta para ajudar bibliotecários a decidir quais periódicos assinar, com base na frequência com que eram citados (DORA, 2012). É importante esclarecer que o JIF (Journal Impact Factor) é um indicador numérico que mede o impacto de um periódico, calculado como o número médio de citações que seus artigos recebem em um período específico, já o JCR (Journal Citation Reports) é a ferramenta, da Clarivate, que calcula e publica esses indicadores, além de outras métricas e informações sobre periódico, utilizado para retirar os dados presentes neste trabalho.

Embora o fator de impacto seja amplamente utilizado como um indicador de prestígio, a literatura cienciométrica aponta para diversas críticas e limitações em seu uso como um proxy de qualidade. A principal falha reside no fato de que o JIF é uma média aritmética aplicada a distribuições de citação extremamente enviesadas, onde um pequeno número de artigos muito

citados infla o valor final, não representando o impacto de um artigo típico daquela revista. Além disso, a métrica possui vieses disciplinares, favorecendo sistematicamente áreas com culturas de citação mais rápidas e densas, e também vieses de tipo de artigo, já que artigos de revisão tendem a ser mais citados que pesquisas originais (DORA, 2012).

A análise detalhada da relação entre o fator de impacto do periódico e a relevância geral dos artigos (de acordo com *Methodi Ordinatio* determinado neste trabalho), revela novas percepções complementares confrontando um possível viés do fator de impacto. A pesquisa sobre butanol emerge como protagonista, com seus artigos de maior pontuação no Indicador *Ordinatio* sendo publicados em periódicos de altíssimo fator de impacto, demonstrando uma forte combinação de conteúdo relevante e prestígio do veículo de publicação. Em contraste, os artigos de maior destaque sobre etanol e o principal artigo de escopo "Geral" confirmam a análise anterior: sua altíssima relevância parece ser impulsionada mais pelo mérito do conteúdo e por um grande número de citações diretas, uma vez que foram publicados em periódicos de impacto mais moderado em comparação com os de butanol.

As pesquisas sobre hidrogênio e biogás também mostram seus trabalhos mais relevantes publicados em periódicos de alto Fator de Impacto, solidificando a conclusão de que a pesquisa sobre a valorização do BSG como matéria prima para produção de biocombustíveis em suas diversas rotas é um tema presente em publicações científicas de alta qualidade. Esta análise, portanto, permite uma compreensão mais precisa da origem do impacto de cada artigo, diferenciando entre a influência do prestígio do periódico e a relevância intrínseca do conteúdo científico, e destacando o butanol como uma área de pesquisa publicada em veículos de elite.

Esta análise, portanto, permite uma compreensão mais precisa da origem do impacto dos artigos, diferenciando entre a influência do prestígio do periódico e a relevância do conteúdo científico, além de destacar o butanol como uma área de pesquisa publicada em veículos de elite.

4.2. Seleção e análise dos artigos.

Com base no ranking gerado pelo *InOrdinatio* 2.0, foram selecionados dois artigos para cada biocombustível, biogás, butanol, etanol e hidrogênio: um com maior pontuação e outro a escolha da autora para uma análise mais detalhada, essa análise se baseou em artigos que melhor se encaixavam no tema e trariam uma discussão interessante quando comparados ao outro artigo ranqueado ou então que trouxe uma inovação sobre o tema.

Os artigos do portfólio final foram submetidos a uma leitura integral e análise crítica de seu conteúdo, buscando resumir o contexto geral do trabalho dando foco a etapas do processo produtivo, pré-tratamentos, tipos de aplicação/fermentação, variáveis de resultado como composição final, rendimento e emissões evitadas pelo processo além de suas perspectivas futuras como temas a serem explorados e estudados futuramente. Os *insights* desta análise serão sintetizados para construir o panorama atual da pesquisa, discutir as principais tecnologias e desafios, e apontar perspectivas futuras no aproveitamento do BSG para biocombustíveis, conforme os objetivos deste trabalho e atuação do profissional da engenharia química.

Abaixo, encontra-se a tabela com os títulos dos artigos selecionados para o estudo, todas as informações adicionais como ano de publicação, nome do autor e outros estarão disponíveis de forma integral na planilha presente no Apêndice A.

Tabela 4.2. Artigos selecionados pelo ranqueamento e pela autora.

Biocombustível	Artigos com maiores IO	Artigos selecionados pela autora
BIOGÁS	Ultrasonic pretreatment of <i>brewers' spent grains</i> for anaerobic digestion: Biogas production for a sustainable industrial development	Evaluating the potential applications of <i>brewers' spent grain</i> in biogas generation, food and biotechnology industry: A review
BUTANOL	Biobutanol production from <i>brewer's spent grain</i> hydrolysates by <i>Clostridium beijerinckii</i>	Microwave assisted hydrothermal as greener pretreatment of <i>brewer's spent grains</i> for biobutanol production

ETANOL	Estimating the environmental impacts of a brewery waste-based biorefinery: Bio-ethanol and xylooligosaccharides joint production case study	Bioconversion of <i>brewer's spent grains</i> to bioethanol
HIDROGÊNIO	Enhancement of biohydrogen production from <i>brewers' spent grain</i> by calcined-red mud pretreatment	Revalorisation of <i>brewer's spent grain</i> for biotechnological production of hydrogen with <i>Escherichia coli</i>

Fonte: Autoria própria

4.2.1 Biogás

Em suma, os artigos sobre a produção de biogás demonstraram que, enquanto a ciência de base valida o potencial do BSG, a sua implementação industrial eficaz depende criticamente da atuação do engenheiro químico para otimizar o balanço energético, projetar reatores estáveis, garantir a viabilidade econômica através de análises de processo e, de forma mais ampla, integrar a produção de biogás em um conceito de biorrefinaria que maximize o valor e minimize o desperdício.

Pode-se observar isso nos dois artigos que estão em discussão. Em resumo, a razão para o maior rendimento no estudo analisado por Emmanuel et al. (2022) se deve à sua abordagem. Diferente de um trabalho experimental padrão que testa uma única condição, este artigo é uma revisão da literatura que avalia as diversas limitações da digestão do BSG, como sua baixa degradabilidade, e aponta as estratégias mais eficientes para superá-las.

A conclusão do estudo de Tewelde et al (2012), um dos artigos experimentais citados na revisão de Emmanuel et al. (2022), é que a co-digestão cria um ambiente bioquímico muito mais otimizado e estável para a produção de metano do que a digestão do BSG isoladamente. Ao misturar o BSG com substratos complementares como o esterco bovino, o processo supera os gargalos nutricionais e de inibição do BSG, permitindo que os microrganismos convertam a matéria orgânica em biogás de forma muito mais eficiente, resultando em um rendimento quase três vezes maior.

A atuação do engenheiro químico abrange todo o ciclo do processo, iniciando com uma análise de viabilidade técnico-econômica para selecionar a rota mais vantajosa, seja a monodigestão com pré-tratamento ou a co-digestão com substratos ideais. Sua contribuição vai desde a concepção e simulação de processos, utilizando ferramentas como o Aspen Plus para realizar balanços de massa e energia, até a condução da Análise Tecno-Econômica (TEA) e da Análise de Ciclo de Vida (ACV) para garantir que a transformação do BSG em biocombustível seja não apenas tecnicamente possível, mas também economicamente rentável e ambientalmente sustentável. (Xenos et al., 2022). Com a estratégia definida, ele projeta e dimensiona todo o sistema físico, como tanques, bombas e o reator anaeróbio com agitação adequada para esse meio. Por fim, é responsável por implementar e otimizar os sistemas de controle de processo para manter as condições operacionais ótimas, como a proporção de alimentação dos substratos e o pH do reator, garantindo a estabilidade e a máxima eficiência na produção de biogás.

Sob outra perspectiva, o artigo sobre ultrassom (US) de Buller et al. (2022) demonstra que, embora o pré-tratamento aumente o rendimento em metano em 4 vezes, ele consome uma quantidade significativa de energia elétrica (0,29 MWh/t), da qual a própria geração de biogás consegue suprir apenas 80%. A oportunidade aqui é otimizar os parâmetros do ultrassom (potência, frequência, tempo de sonicação) para encontrar um ponto ótimo que maximize o rendimento de metano com o mínimo consumo energético, aplicando os princípios de integração energética.

A realização da Integração Energética (Análise Pinch) é um caminho interessante, já que o processo de produção de cerveja consome energia térmica, o pré-tratamento também pode consumir calor e a queima do biogás em um motor de cogeração (CHP) gera um excedente de calor (Xenos et al., 2022)

Uma sugestão seria projetar uma rede de trocadores de calor que utilize o calor residual de um motor CHP (equipamento projetado para queimar biogás). A partir dessa queima, é possível coproduzir energia elétrica e energia térmica de forma simultânea para suprir as demandas térmicas do próprio processo de digestão e pré-tratamento. Também se pode integrar a biorrefinaria ao processo produtivo cervejeiro para atender às necessidades de calor de outras etapas, como na pasteurização, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis da fábrica. Esta integração energética melhora drasticamente a eficiência e a sustentabilidade de toda a planta, aumentando a sua autossuficiência e diminuindo os custos operacionais. A implementação

desta otimização, muitas vezes realizada através de metodologias como a Análise Pinch, é uma das principais atribuições do engenheiro químico no projeto de biorrefinarias (IEA Bioenergy Task 37, 2022).

Outra sugestão, de acordo com o artigo de revisão de Emmanuel et al. (2022), tem-se lista uma gama de pré-tratamentos: físicos, químicos, térmicos e biológicos. Em vez de depender de um único método intenso (como ultrassom de alta energia ou químico agressivo), pode-se também projetar e modelar processos híbridos ou sequenciais. Por exemplo, um pré-tratamento mecânico brando (moagem) para aumentar a área superficial, seguido por um pré-tratamento biológico de baixo custo (usando fungos) para degradar a lignina antes da digestão anaeróbia. Esta abordagem pode reduzir drasticamente os custos com energia e produtos químicos, além de evitar a formação de compostos inibidores gerados por métodos químicos ou térmicos severos (Emmanuel et al. 2022).

4.2.2 Butanol

Os trabalhos avaliados sugerem que, em escala laboratorial, o BSG pode ser eficientemente convertido em butanol através de uma série de etapas de processo que incluem pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação ABE, com bons rendimentos.

No entanto, a transição da viabilidade técnica para a competitividade comercial é dificultada por algumas barreiras principais e interligadas, como a logística da matéria-prima e o custo do pré-tratamento, o alto teor de umidade e a rápida perecibilidade do BSG impõem desafios logísticos e de custo significativos (Ikram et al., 2020). A etapa de pré-tratamento, necessária para superar a recalcitrância da biomassa, é intensiva em capital e energia, representando uma parcela substancial do custo total do processo (Kumar; Sharma, 2017). Além disso, a toxicidade do butanol para as cepas de *Clostridium* limita sua concentração no caldo de fermentação a níveis baixos (tipicamente < 2% p/v), o que restringe a produtividade volumétrica e torna a recuperação mais desafiadora. (Patel et al., 2021). Por fim, a separação de butanol de uma solução aquosa diluída é uma limitação energética, especialmente usando a destilação convencional, cujo consumo de energia pode inviabilizar economicamente o processo (Liu et al., 2017).

Em acordo com o discutido por Plaza et al. (2017) e López-Linares et al. (2019) em seus respectivos trabalhos, para o futuro, o primeiro autor indica que os esforços deveriam ser focados na otimização da remoção de inibidores para que o processo geral possa ser escalonado.

Para López-Linares et al (2019), para melhorar o desempenho do processo, é necessário operar com maiores cargas de sólidos para se obter soluções concentradas de açúcares fermentáveis e, assim, reduzir o tamanho do equipamento. Outra alternativa de valorização mencionada é a recuperação de arabinosídeos com aplicações industriais. O artigo conclui que o pré-tratamento hidrotérmico assistido por micro-ondas é eficaz para fracionar o BSG sem usar catalisadores ácidos ou alcalinos. O desenvolvimento de alternativas para a desintoxicação de hidrolisados e estratégias acopladas de fermentação-separação são vistos como chaves para aumentar a produção geral de butanol, além de tornar o processo mais verde.

Um exemplo prático dessa busca por processos mais sustentáveis é encontrado no trabalho de Giacobbe et al. (2019), que investigou um pré-tratamento enzimático com a enzima lacase. Essa abordagem representa uma rota "verde" que realiza a deslignificação e a desintoxicação do BSG de forma simultânea. Ao atuar em condições brandas, este método evita a formação de novos inibidores e reduz a geração de efluentes, alinhando-se diretamente à necessidade de desenvolver processos mais eficientes e ecológicos.

Com base em uma análise de ambos os autores mencionados e também com o estudo da engenharia química sobre os processos apresentados, pode-se concluir que a otimização da produção de butanol a partir do bagaço de malte cervejeiro (BSG) deve focar em uma abordagem que equilibre os benefícios da alta carga de sólidos com a necessidade de desintoxicação e lavagem. Pois essa última remove inibidores solúveis, o que melhora significativamente tanto a hidrólise enzimática quanto a fermentação subsequente, resultando em uma maior concentração de butanol, de 4,2 g/L para 6,1 g/L após a lavagem. (Plaza et al., 2017).

Operar o pré-tratamento com uma carga de sólidos de 15% (p/p ou m/m) é vantajoso, pois gera um produto com alta concentração de açúcares (47 g/L). Isso reduz o volume de água a ser processado, o que, por sua vez, diminui os custos de capital dos reatores e a energia necessária para a separação final do butanol. No entanto, essa alta concentração de sólidos eleva também a quantidade de compostos inibidores, como os fenólicos, a níveis que podem paralisar completamente a fermentação (Plaza et al., 2017).

A solução para esse impasse, pode ser a incorporação de etapas de desintoxicação. Portanto, a atuação do engenheiro químico consiste em integrar essas observações: projetar ou melhorar um processo que opere com alta carga de sólidos para obter caldos concentrados e,

ao mesmo tempo, incorporar as etapas de lavagem do sólido e desintoxicação do líquido (seja por *overliming* ou carvão ativado) como partes indispensáveis do fluxograma.

4.2.3. Etanol

Avaliando-se todo o processo, pode-se perceber que o pré-tratamento representa uma etapa importante do processo produtivo do etanol, pois ele determina os processos subsequentes a serem adotados. Processos mais severos, como o uso de ácido concentrado, podem maximizar a liberação de açúcares e reduzir a necessidade de enzimas caras na etapa seguinte. No entanto, eles exigem reatores construídos com materiais resistentes à corrosão e frequentemente necessitam de uma etapa adicional de desintoxicação para remover os inibidores gerados, o que adiciona complexidade e custo operacional (Moreira et al., 2012). Por outro lado, pré-tratamentos mais brandos e "verdes", como a auto-hidrólise e eliminam a necessidade de desintoxicação, mas podem resultar em uma recuperação de açúcar inferior (Kumar; Sharma, 2017).

Após o pré-tratamento ter exposto as fibras de celulose e hemicelulose, a etapa de hidrólise, ou sacarificação, é realizada para quebrar esses polímeros em seus monômeros constituintes (açúcares fermentescíveis). Na etapa de fermentação, os açúcares liberados na hidrólise são convertidos em etanol por microrganismos. Assim, a integração das etapas de hidrólise e fermentação é uma estratégia chave de um engenheiro químico para reduzir custos e melhorar a eficiência do processo (Öhgren et al., 2007).

Dentre as lacunas de aplicação desse profissional, cita-se também a preocupação ambiental geral do processo. As perspectivas futuras do estudo de Gonzáles-García et al. (2018) enfatizam a necessidade de otimização para aprimorar a sustentabilidade do processo. Pode-se então sugerir a substituição do gás natural por fontes renováveis, como cavacos de madeira, para a geração de vapor, esta foi avaliada em um cenário alternativo e demonstrou melhorias significativas, com reduções de 61% no potencial de aquecimento global, 72% no potencial de acidificação, 66% no potencial de ecotoxicidade de água doce e 65% no potencial de oxidação fotoquímica.

De acordo com os resultados do trabalho, pesquisas futuras em larga escala devem focar não apenas na otimização da dose de enzimas celulasas, mais especificamente as *Cellic CTec2* mas também no próprio processo de produção de enzimas, com o objetivo de aumentar

sua atividade específica e reduzir os requisitos de energia, bem como no potencial de reciclagem de enzimas (González-García et al., 2018).

Com base no estudo fornecido, a área 2 (pré-tratamento por auto hidrólise) é o principal ponto crítico ambiental do processo. O problema central é a necessidade de produzir grandes quantidades de vapor para aquecer o reator de auto hidrólise à temperatura de operação de 210 °C. No cenário base, esse vapor é gerado com o uso de gás natural, um combustível fóssil. Isso torna a produção de vapor responsável por mais de 50% dos impactos de aquecimento global e acidificação de toda a biorrefinaria.

Portanto, um ponto de oportunidade para trabalho e estudo do engenheiro químico é a otimização do processo de pré-tratamento, onde este pode atuar para reduzir a própria demanda de energia da Área 2, em vez de apenas mudar o combustível (González-García et al., 2018). A temperatura de 210 °C é o principal fator do alto consumo de vapor. Pesquisar e validar condições de processo que permitam uma hidrólise eficaz a temperaturas mais baixas reduziria diretamente a necessidade de vapor e, conseqüentemente, as emissões associadas. Isso pode envolver um tempo de residência maior no reator ou outras otimizações de processo. Outra melhoria seria implementar um sistema de recuperação de calor mais eficiente. O calor de correntes quentes de outras áreas da planta (como a purificação na Área 5) poderia ser utilizado para pré-aquecer a água que alimenta o reator de auto hidrólise, diminuindo a quantidade de vapor necessária para atingir a temperatura final (Triana, 2016). Outra ideia interessante também seria o uso de biomassas para a produção desse vapor ao invés da utilização de combustível fóssil.

Por fim, explorar outras tecnologias de pré-tratamento que sejam menos intensivas em energia para alcançar o mesmo objetivo de fracionar a biomassa. Isso poderia incluir processos catalíticos que reduzem a energia de ativação da reação ou a combinação de métodos, por exemplo, um pré-tratamento químico suave seguido por um tratamento térmico menos severo.

A combinação desses métodos no pré-tratamento é descrita no artigo de White; Yohannan; Walker (2008), o processo utiliza um pré-tratamento químico e térmico. Porém, pode-se observar que a eficiência de utilização do substrato foi menor em comparação com meios sintéticos, o que sugere que compostos inibidores de leveduras derivados do BSG estavam presentes no hidrolisado como dito pelos autores.

Nesse cenário, o engenheiro químico pode trabalhar na otimização das condições de pré-tratamento ácido, como a concentração do ácido nítrico, temperatura e tempo de reação, visando maximizar a solubilização das frações de hemicelulose e celulose do BSG, ao mesmo tempo em que minimiza a formação de compostos inibidores para a fermentação ou desenvolver e implementar processos de desintoxicação do SGH (Hidrolisado de Bagaço de Malte). para remover compostos inibidores que afetam a eficiência da fermentação das leveduras. Isso pode envolver a pesquisa e aplicação de tecnologias como tratamento com carvão ativado ou resinas de troca iônica. Além disso, também é possível trabalhar para otimizar as condições da reação como pH, temperatura, tempo, concentração de enzimas e carga de sólidos para assim garantir a máxima liberação de açúcar fermentáveis do BSG (White; Yohannan; Walker, 2008).

Por fim, esse profissional também pode atuar no projeto e otimização de biorreatores, considerando a agitação, aeração e as transferências de massa e calor para maximizar a produtividade da hidrólise enzimática e da fermentação. Adicionalmente, é crucial para integrar as diferentes etapas do processo, desde o pré-tratamento até a recuperação do etanol, a fim de melhorar a eficiência geral, por exemplo, através da recuperação de calor ou do reaproveitamento de resíduos.

4.2.4 Hidrogênio

De acordo com os autores Zhand e Zang (2016), as pesquisas futuras devem focar na minimização dos efeitos negativos observados em concentrações elevadas de Calcined Red Mud (Lama Vermelha Calcinada), como a formação de produtos inibidores, e na otimização do processo para aplicação em escala industrial, considerando a viabilidade econômica e ambiental. A integração com outras rotas de biorrefinaria, como a produção sequencial de outros biocombustíveis a partir da biomassa residual, também representa uma via promissora para maximizar a sustentabilidade do processo.

Já em relação ao discutido por Cabrera et al. (2024), para o futuro, o artigo sugere a engenharia metabólica da *E. coli* para otimizar a assimilação de carboidratos e a síntese de hidrogênio, dado que aproximadamente 50% dos carboidratos permanecem na fração líquida após a fermentação. É também enfatizada a necessidade de uma análise do ciclo de vida para avaliar os custos reais de energia e solventes, e a integração de sistemas de pré-tratamento do BSG com a produção de hidrogênio e outros bioprodutos fermentativos, como a foto

fermentação, para promover uma economia circular. Essas perspectivas visam aprimorar a viabilidade e sustentabilidade da valorização do BSG em aplicações industriais de grande escala.

Portanto, com base nos estudos fornecidos, o hidrogênio não é considerado a melhor rota para a produção industrial a partir do Bagaço de Malte (BSG) devido a uma combinação crítica de barreiras tecnológicas, ineficiências biológicas e desvantagens econômicas quando comparado a outras alternativas. Os próprios artigos de pesquisa, embora bem-sucedidos em escala laboratorial, revelam os obstáculos que impedem a sua viabilidade industrial.

Nesse sentido, a atuação do engenheiro químico é fundamental para transpor a produção de hidrogênio a partir do BSG da escala laboratorial para a viabilidade industrial, atuando como elo entre a descoberta científica e a aplicação prática. Podendo atuar simultaneamente entre os gargalos das rotas ácida e alcalina, otimizando o projeto de reatores e as condições operacionais (temperatura, pH, tempo de residência) para maximizar a liberação de açúcares enquanto minimiza a formação de subprodutos inibidores, como o HMF na rota ácida-térmica e os produtos da reação de Maillard na rota alcalina (Cabrera et al., 2024).

Além disso, cabe a este profissional enfrentar a baixa eficiência de conversão, onde cerca de 50% dos açúcares permanecem não consumidos, através do projeto de biorreatores avançados, otimizados para esse tipo de processo e que melhorem a assimilação dos substratos (Gutiérrez-Sánchez, 2024).

Em uma visão macro, o engenheiro químico deve desenhar um fluxograma de processo integrado, onde os subprodutos de uma etapa, como os ácidos graxos voláteis, podem se tornem matéria-prima para outra, como a foto fermentação, e a biomassa residual seja usada para cogeração de energia, visando uma economia circular (Chen et al., 2024). Finalmente, é sua responsabilidade conduzir a Análise de Ciclo de Vida (ACV) e a avaliação tecnoeconômica para quantificar os custos reais de energia e reagentes, determinando assim qual rota, ou combinação de rotas, é verdadeiramente sustentável e economicamente viável para a aplicação na indústria (Souza et al., 2023).

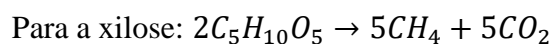
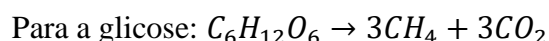
4.3 Análise comparativa sobre a produção dos biocombustíveis a partir do BSG

Em suma, a valorização do BSG para a produção de biocombustíveis de segunda geração representa uma oportunidade promissora para a inovação tecnológica e a sustentabilidade industrial.

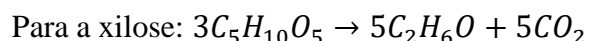
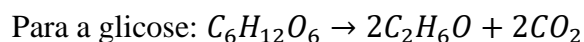
Considerando que a produção mundial anual de BSG é de 87 milhões de toneladas das quais 2,8 milhões de toneladas são advindas da produção brasileira, é possível, sabendo as reações química de formação dos biocombustíveis e também os valores de rendimentos dos processos de produção citados neste trabalho, calcular aproximadamente qual poderia ser o rendimento teórico, produção em massa brasileira e mundial (utilizando os valores de rendimento real) com a utilização desse subproduto como matéria-prima.

Para determinar os rendimentos teóricos, empregou-se as reações químicas pertinentes à formação de biocombustíveis. A base para esses cálculos foi utilizada a composição máxima em base seca do *Brewer's Spent Grain* (BSG), detalhada na Figura 1.1 deste trabalho (12% de celulose e 24,5% de hemicelulose). Assumiu-se também uma base de cálculo de 1 kg da matéria-prima (BSG) e uma conversão de 100% dos açúcares fermentáveis, garantindo a obtenção do rendimento máximo possível sob condições ideais.

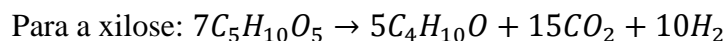
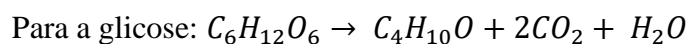
Biogás:



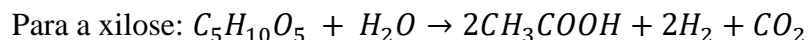
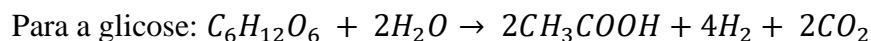
Etanol:



Butanol:



Hidrogênio (para esse caso o artigo utilizado indicou uma composição de celulose e hemicelulose 21,2% e 28,25% respectivamente):



Abaixo na Tabela 4.3 é possível observar os resultados obtidos.

Tabela 4.3. Cálculo aproximado de rendimentos e potencial produção de biocombustíveis a partir do BSG.

Biocombustível	Rendimento Teórico	Rendimento Real	Potencial de Produção Mundial (anual)	Potencial de Produção Brasileira (anual)
Biogás (CH₄)	136,27 L/Kg	107,28 L/Kg	25 trilhões de L	812 bilhões de L
Butanol	135,80 g/Kg	75 g/Kg	6,5 Milhões de ton	210 mil ton
Etanol	186,15 g/kg	42 g/Kg	21,4 Milhões de ton	690 mil ton
Hidrogênio	0,23189 L/Kg	0,18712 L/Kg	16,28 trilhões de L	523,96 bilhões de L

Fonte: Autoria própria

Avaliando agora a produção em larga escala, por exemplo, a produção de butanol poderia variar de 4 a 6,5 milhões de toneladas globalmente e de 128,8 mil a 210 mil toneladas no Brasil. O etanol, por sua vez, poderia gerar entre 3,6 e 21,4 milhões de toneladas mundialmente e entre 117,6 mil e 690,7 mil toneladas no Brasil. O biogás apresenta um potencial de geração de 9,3 a 25,2 trilhões de litros em escala mundial e de 300,38 a 812 bilhões de litros no Brasil. Já o hidrogênio, poderia atingir 16,28 trilhões de litros globalmente e 523,96 bilhões de litros no Brasil.

Estes números evidenciam o vasto potencial do BSG em contribuir significativamente para a matriz energética renovável. Os desafios atuais concentram-se na otimização de pré-tratamentos para maximizar a liberação de açúcares, minimizar a formação de compostos inibidores e integrar os processos de forma mais eficiente e ecologicamente correta. As

perspectivas futuras apontam para a exploração de pré-tratamentos mais "verdes", a otimização de linhagens microbianas por engenharia metabólica e a implementação de biorrefinarias em larga escala que permitam a produção conjunta de múltiplos bioprodutos. A integração desses processos, conforme ilustrado pelo conceito de biorrefinaria, é a chave para transformar um resíduo abundante em um recurso valioso, contribuindo não apenas para a descarbonização das indústrias, mas também para o fortalecimento da economia circular e a geração de valor a partir de resíduos.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Com base em todo o estudo apresentado, conclui-se então que a transição para uma economia de baixo carbono impulsiona a valorização de subprodutos agroindustriais, e o bagaço de malte cervejeiro (BSG) emerge como uma matéria-prima abundante e promissora para a produção de biocombustíveis de segunda geração. A análise dos processos de conversão em biogás, butanol, etanol e hidrogênio revela que, para além da validação científica em escala laboratorial, a viabilidade técnica, econômica e ambiental em escala industrial é indissociável da atuação do engenheiro químico. Este profissional atua como o elo fundamental que traduz o potencial de bioconversão do BSG em combustíveis para fluxogramas de processo otimizados, projetando reatores, integrando etapas, gerenciando balanços de massa e energia e garantindo que a sustentabilidade se alinhe à rentabilidade, consolidando o conceito de biorrefinaria.

A produção de biogás a partir do BSG demonstra ser uma rota robusta, cujo sucesso industrial depende da otimização do balanço de matéria e energia. A co-digestão com substratos complementares, como o esterco bovino, surge como uma estratégia superior à mono digestão, superando limitações nutricionais e quase triplicando o rendimento. Contudo, pré-tratamentos como o ultrassom, embora quadruplicam o potencial de metano, apresentam um elevado custo energético. Neste cenário, a intervenção do engenheiro químico é crucial para projetar sistemas de co-digestão estáveis e, principalmente, para aplicar os princípios de integração energética, como a Análise Pinch, utilizando o calor excedente de motores de cogeração para suprir à demanda térmica do processo, maximizando a eficiência e a autonomia energética da planta.

No que tange à produção de butanol, os desafios se concentram na superação de barreiras interligadas que afetam a competitividade comercial. A baixa concentração final do produto, devido à sua toxicidade para as cepas fermentativas, e a subsequente separação energética por destilação representam gargalos críticos. A estratégia de operar com altas cargas de sólidos para concentrar os açúcares no hidrolisado, embora vantajosa para reduzir o volume de reatores e custos de separação, agrava a formação de compostos inibidores. A atuação da engenharia química consubstancia-se, portanto, no desenvolvimento de um processo integrado que harmonize a alta carga de sólidos com etapas indispensáveis de lavagem e desintoxicação, viabilizando a fermentação e tornando a rota economicamente mais atrativa.

Para a rota do etanol, a otimização do pré-tratamento e a sustentabilidade do processo global são os pontos principais. A escolha entre pré-tratamentos severos, que maximizam a

liberação de açúcares ao custo de corrosão e geração de inibidores, e métodos mais brandos, ambientalmente corretos, mas com menor rendimento, define toda a cadeia subsequente. O principal ponto crítico identificado é a alta demanda energética do pré-tratamento. Assim, o trabalho do engenheiro químico se direciona para a redução do consumo de energia nesta etapa, seja por meio da otimização das condições operacionais (temperatura e tempo), da implementação de sistemas eficientes de recuperação de calor, ou da exploração de tecnologias de pré-tratamento híbridas e menos intensivas, melhorando drasticamente o perfil ambiental e econômico da produção de etanol.

Por fim, a produção de hidrogênio, apesar do seu potencial teórico, revela-se a rota mais desafiadora e menos madura para aplicação industrial a partir do BSG. As principais barreiras são a baixa eficiência de conversão biológica, com cerca de metade dos açúcares permanecendo não consumida, e a severa inibição do processo por subprodutos gerados durante os pré-tratamentos ácido e alcalino. Nesse contexto, o papel do engenheiro químico é mais fundamental, focando no projeto de biorreatores avançados que melhorem a assimilação de substratos, no desenho de fluxogramas integrados que valorizem os subprodutos em outras rotas (como a foto fermentação) dentro de um conceito de economia circular, e na condução de Análises de Ciclo de Vida e de viabilidade tecno-econômica para determinar se esta rota pode, futuramente, tornar-se competitiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. B. de S. et al. Hidrólise enzimática de biomassa: o estado da arte. **Química Nova**, v. 44, n. 8, p. 993-1006, 2021.

BULLER, L. S.; et al. Ultrasonic pretreatment of brewers' spent grains for anaerobic digestion: Biogas production for a sustainable industrial development. **Journal of Cleaner Production**, v. 357, p. 131802, 2022.

CABRERA, G.; et al. Revalorisation of brewer's spent grain for biotechnological production of hydrogen with *Escherichia coli*. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 12, p. 1473704, 2024.

CHEN, C. et al. Hydrogen gas and biochar production from kitchen food waste through dark fermentation and pyrolysis. **Frontiers in Chemical Engineering**, v. 6, 2024.

DECLARAÇÃO DE SÃO FRANCISCO SOBRE AVALIAÇÃO DA PESQUISA (DORA). San Francisco, 2012. Disponível em: <https://sfdora.org/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

EMMANUEL, J. K.; et al. Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogas generation, food and biotechnology industry: A review. **Heliyon**, v. 8, n. 10, p. e11140, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **EPE lança Nota Técnica sobre Hidrogênio e Biomassa: Oportunidades para o Brasil**. 2023. Disponível em:– Acesso em: 20 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Fontes renováveis atingem 49,1% na matriz energética brasileira**. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/fontes-renovaveis-atingem-49-1-na-matriz-energetica-brasileira>. Acesso em: 20 jun. 2025.

GIACOBBE, S.; et al. Butanol production from laccase-pretreated brewer's spent grain. **Biotechnology for Biofuels**, v. 12, n. 39, 2019.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; et al. Estimating the environmental impacts of a brewery waste-based biorefinery: Bio-ethanol and xylooligosaccharides joint production case study. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 331-341, 2018.

GRÁCIO, M. C. C.; OLIVEIRA, E. F. T. de. Princípios de Price e de Merton na Ciência da Informação: estudo sobre Vantagem Cumulativa e Efeito Mateus. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 23, n. 4, p. 147-164, 2018.

GUTIÉRREZ-SÁNCHEZ, D. G. et al. **Brewery spent grain valorization through fermentation: Targeting biohydrogen, carboxylic acids and methane production**. Tese (Doutorado) - Universidad de Valladolid, Valladolid, 2024.

IEA BIOENERGY TASK 37. **Gösser Brewery: Case Study**. Dublin, 2022.

IKRAM, S. et al. Brewer's Spent Grains-Valuable Beer Industry By-Product. **Foods**, v. 9, n. 12, p. 1922, 2020.

KE, Q. et al. Defining and identifying Sleeping Beauties in science. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 24, p. 7426-7431, 2015.

KUMAR, A.; SHARMA, S. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 4, n. 7, 2017.

KUMAR, M.; ANISHA, A.; KAUSHIK, D.; KAUR, J.; SHUBHAM, S.; RUSU, A. V.; ROCHA, J. M.; TRIF, M. **Combinations of Spent Grains as Sources of Valuable Compounds with Highly Valuable Functional and Microbial Properties**. *Sustainability*, v. 15, n. 20, p. 15184, out. 2023.

LIU, D. et al. Techno-economic analysis of butanol production from lignocellulosic biomass by concentrated acid pretreatment and hydrolysis plus continuous fermentation. **Bioresource Technology**, v. 249, p. 907-915, 2017.

LYNCH, K. M.; et al. Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 74, n. 2, p. 75-87, 2016.

LYNCH, K. M.; et al. Sustainable valorisation of brewers' spent grain. In: *The Brewer's Tale*. Elsevier, 2023. p. 301-325.

LÓPEZ-LINARES, J. C.; et al. Microwave assisted hydrothermal as greener pretreatment of brewer's spent grain for biobutanol production. **Chemical Engineering Journal**, v. 367, p. 1-10, 2019.

MAZUR, F. W. et al. Lignin from Brewers' Spent Grain: Structural and Thermal Evaluations. **Polymers**, v. 15, n. 10, p. 2382, 2023.

MITRI, S.; SALAMEH, S. J.; KHELFA, A.; LEONARD, E.; MAROUN, R. G.; LOUKA, N.; KOUBAA, M. **Valorization of Brewers' Spent Grains: Pretreatments and Fermentation, a Review**. *Fermentation*, v. 8, n. 2, p. 50, jan. 2022

MOREIRA, M. F. A. et al. **Estudo de pré-tratamentos de bagaço de cana para produção de etanol celulósico por hidrólise enzimática**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, 2012.

MUSCAT, A.; DEBONO, J.; GAUCI, V. Pretreatment and Hydrolysis of Brewer's Spent Grains. **Malta Journal of Health Sciences**, v. 8, n. 1, 2021.

MUSSATTO, S. I. (Ed.). **Brewer's spent grain: a holistic approach for a zero-waste technology**. Cambridge: Academic Press, 2014.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I. C. **Brewers' Spent Grain: Generation, Characteristics and Potential Applications**. *Journal of Cereal Science*, v. 43, n. 1, p. 1-14, jan. 2006.

ÖHGREN, K. et al. Comparison of SHF and SSF processes for ethanol production from Picea abies. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 143, p. 204-217, 2007.

PAGANI, Regina Negri et al. Methodi Ordinatio 2.0: revisited under statistical estimation, and presenting Finder and Rankin. **Quality & Quantity**, v. 57, p. 4563-4602, 2023

PATEL, A. et al. In-Situ Product Recovery Methodologies Practiced in Pharmaceutical Industries: A Review. **International Journal of Advances in Research and Cloud Services**, v. 9, n. 1, 2021.

PINHEIRO, T.; et al. Intensifying ethanol production from brewer's spent grain waste: Use of whole slurry at high solid loadings. **New Biotechnology**, v. 53, p. 64-73, 2019.

PLAZA, P. E.; et al. Biobutanol production from brewer's spent grain hydrolysates by *Clostridium beijerinckii*. **Bioresource Technology**, v. 244, p. 159-167, 2017.

SGANZERLA, W. G. et al. Valorization of Brewers' Spent Grains: Pretreatments and Fermentation, a Review. **Fermentation**, v. 8, n. 2, p. 50, 2022.

SGANZERLA, W. G.; et al. A bibliometric analysis on potential uses of brewer's spent grains in a biorefinery for the circular economy transition of the beer industry. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 6, p. 1775-1793, 2021.

SOUZA, L. A. et al. Life Cycle Assessment of Microbial 2,3-Butanediol Production from Brewer's Spent Grain Modeled on Pinch Technology. **Fermentation**, v. 9, n. 6, p. 560, 2023.

SWIECHOWSKI, K.; et al. Anaerobic digestion of brewer's spent grain with biochar-biogas production kinetics and process efficiency. **Detritus**, v. 23, p. 17-27, 2023.

TRIANA, C. E. **Towards Improved Ethanol Production from Lignocellulosic Biomass**. Tese (Doutorado em Engenharia Bioquímica) - University College London, Londres, 2016.

VAN RAAN, A. F. J. Sleeping beauties in science. **Scientometrics**, v. 59, n. 3, p. 467-472, 2004.

WHITE, J. S.; YOHANNAN, B. K.; WALKER, G. M. Bioconversion of brewer's spent grains to bioethanol. **FEMS Yeast Research**, v. 8, n. 7, p. 1175-1184, 2008.

XENOS, D. et al. Techno-Economic Analysis for the Production of 2,3-Butanediol from Brewers' Spent Grain Using Pinch Technology. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 61, n. 6, p. 2575-2586, 2022.

ZEKO-PIVAČ, A.; et al. The Potential of Brewer's Spent Grain in the Circular Bioeconomy: State of the Art and Future Perspectives. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 10, p. 870744, 2022.

ZHANG, J.; ZANG, L. Enhancement of biohydrogen production from brewers' spent grain by calcined-red mud pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 209, p. 18-24, 2016.

IO	Revista	Título	DOI	Ano da pesquisa	IF	Cited Half-Life	Citações	Nome do Primeiro Autor	Combustível
223.55	Bioresources Technology	Biobutanol production from brewer's spent grain hydrolysates by <i>Clostridium beijerinckii</i>	10.1016/j.biortech.2017.07.139	2017	9.7	5.9	120	Pedro E. Plaza	Butanol
195.08	Chemical Engineering Journal	Microwave assisted hydrothermal as greener pretreatment of brewer's spent grains for biobutanol production	10.1016/j.cej.2019.03.032	2019	13.4	2.9	50	Juan C. López-Linares	Butanol
174.96	Industrial Crops and Products	Estimating the environmental impacts of a brewery waste-based bioethanol and xylooligosaccharides joint production case study	10.1016/j.indcrop.2018.07.003	2018	5.6	4.8	101	Sara González-García	Etanol
161.60	Biomass and Bioenergy	Alcohol production from sterilized and non-sterilized molasses by <i>Saccharomyces cerevisiae</i> immobilized on brewer's spent grains in two types of continuous bioreactor systems	10.1016/j.biombioe.2012.05.015	2012	5.80	8.30	156	Nikolaos Kopsahellis	Geral
150.09	Renewable Energy	Brewer's spent grain as a source of renewable fuel through optimized dilute acid pretreatment	10.1016/j.renene.2019.12.030	2020	9.00	3.80	40	José A. Rojas-Chamorro	Geral
141.30	Biotechnology for Biofuels	Butanol production from laccase-pretreated brewer's spent grain	10.1186/s13068-019-3383-1	2019	6.1	6.1	60	Simona Giacobbe	Butanol
139.37	Bioresources Technology	Enhancement of biohydrogen production from brewers' spent grain by calcinated mud pretreatment	10.1016/j.biortech.2016.02.110	2016	9.7	5.9	50	Jishi Zhang	Hidrogênio
134.77	Bioresources Technology	Improving enzymatic hydrolysis of brewer spent grain with atmospheric air pressure plasma treatment	10.1016/j.biortech.2019.03.071	2019	9.7	5.9	30	Rajeev Ravindran	Etanol
126.90	Waste Management	An evaluation of sonication pretreatment for enhancing saccharification of brewers' spent grain	10.1016/j.wasman.2020.02.012	2020	7.10	6.10	36	Shady S. Hassan	Etanol
124.05	Journal of Cleaner Production	Ultrasonic pretreatment of brewers' spent grains for anaerobic digestion: Biogas production for a sustainable industrial development	10.1016/j.jclepro.2022.131802	2022	9.8	3.8	12	Luz Selene Butler	Biogás
114.60	New Biotechnology	Intensifying ethanol production from brewer's spent grain waste: Use of whole slurry at high solid loadings	10.1016/j.nbt.2019.06.005	2019	4.50	6.40	52	Tânia Pinheiro	Etanol
114.04	Industrial Crops and Products	Comparison of mild alkaline and oxidative pretreatment methods for biobutanol production from brewer's spent grains	10.1016/j.indcrop.2018.12.087	2019	5.6	4.8	45	Marina Fernández-Delegado	Butanol
109.13	Industrial Crops and Products	A bioethanol based on brewer's spent grains: Arabinofuran recovery by microwave assisted pretreatment integrated with butanol production	10.1016/j.indcrop.2020.113044	2020	5.6	4.8	35	Juan C. López-Linares	Butanol
104.99	Biomass and Bioenergy	Integral valorization of cellulosic and hemicellulosic sugars for biobutanol production: ABE fermentation of the whole slurry from microwave pretreated brewer's spent grain	10.1016/j.biombioe.2020.105524	2020	5.8	8.3	30	Juan C. López-Linares	Butanol
102.51	Energy and Fuels	Ethanol Production from Brewers Spent Grain Pretreated by Dilute Phosphoric Acid	10.1021/acs.energyfuels.8b00343	2018	5.2	6.1	45	José A. Rojas-Chamorro	Etanol
96.59	Journal of Environmental Chemical Engineering	Production of biogas and fermentable sugars from spent brewery grains: Evaluation of one- and two-stage thermal pretreatment in an integrated biorefinery	10.1016/j.jece.2021.105860	2021	7.4	2.7	15	Adonal Brunel de Camargos	Biogás
93.44	Heliyon	Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogas generation, food and biotechnology industry: A review	10.1016/j.heliyon.2022.e11140	2022	3.4	2.7	26	Jovine K. Emmanuel	Biogás
91.44	Polymers	Subcritical Water as Pretreatment Technique for Bioethanol Production from Brewer's Spent Grain within a Biorefinery Concept	10.3390/polym14235218	2022	4.70	2.70	20	Pablo Alonso-Riano	Etanol
86.49	International Journal of Hydrogen Energy	Hydrogen production from Brewer's spent grain hydrolyzate by dark fermentation	10.1016/j.ijhydene.2023.06.076	2023	8.1	4.6	2	Juliana Ferreira Soares	Hidrogênio
77.29	BioEnergy Research	Bioethanol Production from Brewers Spent Grains Using a Fungal Consolidated Bioprocessing (CBP) Approach	10.1007/s12155-016-9782-7	2016	3.1	4.2	57	Stuart Wilkinson	Etanol
64.25	Cellulose	Hydrogen peroxide bleaching of cellulose pulps obtained from brewer's spent grain	10.1007/s10570-006-9198-4	2008	4.9	4.7	60	Solange I. Mussatto	Hidrogênio
61.46	Bioprocess Engineering	The Potential of Brewer's Spent Grain in the Circular Bioeconomy: State of the Art and Future Perspectives	10.3389/fbioe.2022.870744	2022	0.69	5.10	23	Ana Zeiko-Pivač	Geral
60.55	Bioteils Bioproducts & BioRefining-BioPr	A bibliometric analysis on potential uses of brewer's spent grains in a bioethanol production process: A circular economy transition of the beer industry	10.1002/bbb.2290	2021	3.20	5.80	16	William Gustavo Spangzeria	Geral
57.62	Biomass Conversion and BioRefinery	Monitoring of rheological parameters in the anaerobic fermentation process to obtain bioethanol from craft brewer's spent grain using brewer's spent yeast and <i>Saccharomyces cerevisiae</i> S-04	10.1007/s13399-024-06271-0	2024	3.5	2.1	5	Joaquín Estrada-García	Etanol
57.46	World Journal of Microbiology and Biotechnology	The biotransformation of brewer's spent grain into biogas by anaerobic microbial communities	10.1007/s12174-015-1951-x	2015	4	8.1	26	Dina V. Malakhova	Biogás
53.44	Heliyon	Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogas generation, food and biotechnology industry: A review	10.1016/j.heliyon.2022.e11140	2022	3.4	2.7	10	Jovine K. Emmanuel	Geral
53.28	Energies	Development of a Two-Stage Bioprocess for the Production of Bioethanol from the Acid Hydrolyzate of Brewer's Spent Grain	10.3390/en17163975	2024	3	2.9	5	Renata Vitevič	Etanol
50.31	Processes	Optimised Fractionation of Brewers' Spent Grain for a Bioethanol Producing Sugars, Oligosaccharides, and Bioethanol	10.3390/pr920366	2021	2.8	2.6	15	Soma Bedő	Etanol
50.02	Chemical Engineering Science	Valorizing brewer's spent grain: A sequential pathway of supercritical extraction, hydrolysis, and fermentation	10.1016/j.ces.2023.119620	2023	4.10	10.20	3	Silvia Lisci	Etanol
48.12	Energies	Second Generation Ethanol Production from Brewers Spent Grain and Brewer's Spent Grains for Bio-hydrogen Production	10.3390/en16042575	2015	3	2.9	40	Rossana Ligori	Etanol
45.29	BioEnergy Research	Determination of Anaerobic Co-fermentation of Brewery Wastewater and Brewer's Spent Grains for Bio-hydrogen Production	10.1007/s12155-022-10486-2	2023	3.1	4.2	5	William Gustavo Spangzeria	Hidrogênio
44.33	Biomass Conversion and BioRefinery	Enhanced anaerobic digestion of brewers' spent grain effect of inoculum, poultry manure application and iron (II) chloride supplementation on biogas production and its kinetics	10.1007/s13399-023-04813-6	2023	3.5	2.5	4	Tunde David Etdunjobi	Biogás
41.28	Bioengineering and Biotechnology	Revalorisation of brewer's spent grain for biotechnological production of hydrogen with <i>Escherichia coli</i>	10.3389/fbioe.2024.1473704	2024	4.30	2.90	0	Gema Cabrera	Hidrogênio
39.37	Environmental Technology	Subcritical water pretreatment enhanced methane-rich biogas production from the anaerobic digestion of brewer's spent grains	10.1080/09593330.2022.2157756	2022	2.2	5.7	8	William Gustavo Spangzeria	Biogás
35.00	Biomass Conversion and BioRefinery	Optimization of bioethanol production from a brewers' spent grain and sugarcane molasses mixture utilizing <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	10.1007/s13399-025-06629-y	2025	3.5	2.1	0	Henok Mesfin Tadesse	Etanol

33,37	Waste and Biomass Valorization	Reutilization of Brewer's Spent Grain as Spent Mushroom Substrate for the Generation of Biogas in a Semi-Continuous Digester	10.1007/s12649-023-02349-4	2023	2.6	3.8	3	Genuza, M.	Biogas
31,84	AMS Agriculture and Food	A brewery approach for the production of xylool, ethanol and polyhydroxybutyrate from brewer's spent grain	10.3934/agrfocd.2016.1.52	2016	1.9	3.7	25	Javier A. Davila	Etanol
28,28	Energies	Development of a Two-Stage Bioprocess for the Production of Bioethanol from the Acid Hydrolyzate of Brewer's Spent Grain	10.3390/en17163975	2024	3	2.9	0	Renata Vilević	Etanol
25,90	CLEAN-Soil Air Water	Estimation of Bioethanol, Biohydrogen, and Chemicals Production from Biomass Wastes in Brazil	10.1002/clel.202200155	2022	1.50	9.40	5	Juliana Ferreira Soares	Genal
22,27	Ferms Yeast Research	Bioconversion of brewer's spent grains to bioethanol	10.1111/j.1567-1364.2008.00390.x	2008	2.4	9.5	13	Jane S. White	Etanol
21,00	BioFuels	Quantity of biogas produced through co-digestion of Brewer's spent grain and cattle dung	10.1080/17597269.2025.2487734	2025	2.1	4.9	0	Phillimon Dickson Ngenyira	Biogas
18,29	Biotechnology for Biofuels and Bioproducts	Enhanced ethanol production from brewer's spent grain by a <i>Fusarium oxysporum</i> consolidated system	10.1186/1754-6834-2-4	2009	3.3	1.6	60	Charlaos Xiros	Etanol
15,96	Detritus	Anaerobic digestion of brewer's spent grain with biochar – biogas production kinetics and process efficiency	10-CZC37.31025/2611-4135/2023.17277	2023	1.2	3.7	2	Kacper Świechowski	Biogas
15,17	Chemical Engineering	Bioethanol from brewer's spent grains: acid pretreatment optimization	10.3303/CET1335170	2013	0.2	27.1	20	Nidia S. Caetano	Etanol
13,94	Journal of Renewable and Sustainable Energy	Application of consolidate enzymatic system of <i>Fusarium</i> and <i>Saccharomyces</i> to enhance the production of ethanol from spent grain	10.1063/1.4821518	2013	1.9	6.2	6	Madhu Agarwal	Etanol