



TENDÊNCIAS EMERGENTES DA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO RESÍDUO DE BAGAÇO DE MALTE PRODUZIDO NA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

TENDENCIAS EMERGENTES EN LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS DE BAGAÇO DE MALTA PRODUCIDOS EN LA INDUSTRIA CERVECERA.

EMERGING TRENDS IN THE ENERGY VALORIZATION OF MALT BAGASSE WASTE PRODUCED IN THE BREWING INDUSTRY

Apresentação: Comunicação Oral

Sheyla Alice Canuto de Oliveira¹; Liliana Andréa dos Santos²; Tatiana Souza Porto³; André Felipe de Melo Sales Santos⁴

DOI :<https://doi.org/10.31692/VIICIAGRO.0048>

RESUMO

O crescente interesse por técnicas para o tratamento de resíduos oriundos da agroindústria tem alavancado pesquisas voltadas à conversão desses subprodutos em energia. A produção de cerveja gera grandes volumes de resíduos orgânicos, sendo o bagaço de malte (Brewers' Spent Grain – BSG) o principal subproduto sólido. Este trabalho teve como objetivo avaliar as tendências observadas potencial uso do BSG como substrato para produção de biogás via digestão anaeróbia. Para atingir este objetivo foi realizada uma pesquisa bibliométrica, para embasar os estudos, na base de dados *Web of Science* acessada através do Portal de Periódicos *CapesCafe*, utilizando os termos ("*biogas*" OR "*methane production*") AND ("*brewery spent grain*" OR "*brewer's spent grain*" OR "*BSG*" OR "*malt bagasse*" OR "*brewery waste*") no espaço *All Fields*. Após as etapas de identificação, triagem, seleção e inclusão, a busca resultou na escolha de 50 documentos ao final, os quais foram integralmente lidos e analisados. Foi evidenciado o crescimento das publicações científicas sobre a temática, especialmente a partir de 2015, destacando os autores mais produtivos e citados no campo da digestão anaeróbia e valorização do bagaço de malte, os principais periódicos, redes de colaboração internacional que revelaram o papel central do Brasil no aproveitamento dos resíduos orgânicos, como o bagaço de malte, além das palavras-chave mais utilizada nas publicações analisadas. Os resultados indicam a consolidação de grupos de pesquisa e a ampliação das discussões voltadas à economia circular, biorrefinaria e bioenergia. Sendo assim, os resultados atingidos com o estudo bibliométrico confirmam o aumento do interesse na valorização energética do bagaço de malte, sendo uma alternativa viável e sustentável para a geração de energia renovável e valorização desse importante subproduto da indústria cervejeira.

Palavras-Chave: bagaço de malte; digestão anaeróbia; bioenergia; valorização de resíduos; bibliometria.

¹ Bacharelado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, sheyla.canuto@ufrpe.br

² Doutora, Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, liliana.santos@ufrpe.br

³ Doutora, Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, tatiana.porto@ufrpe.br

⁴ Doutor, Departamento de Tecnologia Rural da Universidade Federal Rural de Pernambuco, andre.felipesantos@ufrpe.br

RESUMEN

El creciente interés por tecnologías destinadas al tratamiento de residuos agroindustriales ha impulsado investigaciones orientadas a la conversión de estos subproductos en fuentes de energía. La producción cervecera genera grandes volúmenes de residuos orgánicos, siendo el bagazo de malta (Brewers' Spent Grain – BSG) el principal subproducto sólido. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar las tendencias de investigación y evaluar el potencial del BSG como sustrato para la producción de biogás mediante digestión anaerobia. Para ello, se realizó un estudio bibliométrico utilizando la base de datos Web of Science, accesible a través del Portal de Periódicos CapesCafe. La estrategia de búsqueda empleó los términos ("biogas" OR "methane production") AND ("brewery spent grain" OR "brewer's spent grain" OR "BSG" OR "malt bagasse" OR "brewery waste") en el campo All Fields. Tras las etapas de identificación, cribado, selección e inclusión, se seleccionaron 50 documentos para su lectura y análisis integral. Los resultados evidenciaron un crecimiento significativo de las publicaciones científicas sobre esta temática, especialmente a partir de 2015. Asimismo, se identificaron los autores más productivos y citados en el ámbito de la digestión anaerobia y la valorización del bagazo de malta, las principales revistas científicas del área, las redes de colaboración internacional y las palabras clave más frecuentes en las publicaciones analizadas. Las redes de colaboración destacaron el papel relevante de Brasil en la valorización de residuos orgánicos, particularmente del bagazo de malta. Además, los hallazgos indican la consolidación de grupos de investigación y la expansión de las discusiones relacionadas con la economía circular, las biorrefinerías y la bioenergía. En conclusión, el análisis bibliométrico confirma el creciente interés por la valorización energética del bagazo de malta, evidenciando su potencial como alternativa sostenible para la generación de energía renovable y el aprovechamiento de este importante subproducto de la industria cervecera.

Palabras Clave: bagazo de malta; digestión anaerobia; bioenergía; valorización de residuos; bibliometría.

ABSTRACT

The growing interest in technologies for the treatment of agro-industrial waste has driven research focused on converting these by-products into energy. Beer production generates large amounts of organic waste, with Brewers' Spent Grain (BSG) being the main solid by-product. This study aimed to evaluate research trends and the potential use of BSG as a substrate for biogas production through anaerobic digestion. To achieve this objective, a bibliometric analysis was conducted using the Web of Science database, accessed through the CapesCafe Journal Portal. The search strategy employed the terms ("biogas" OR "methane production") AND ("brewery spent grain" OR "brewer's spent grain" OR "BSG" OR "malt bagasse" OR "brewery waste") in the All Fields category. Following the stages of identification, screening, selection, and inclusion, a total of 50 documents were selected for comprehensive reading and analysis. The results revealed a significant increase in scientific publications on this topic, particularly after 2015. The analysis highlighted the most productive and highly cited authors in the fields of anaerobic digestion and BSG valorization, the leading scientific journals, international collaboration networks, and the most frequently used keywords in the selected publications. The collaboration networks also revealed Brazil's prominent role in the utilization of organic residues, particularly Brewers' Spent Grain. Furthermore, the findings indicate the consolidation of research groups and the expansion of discussions related to the circular economy, biorefineries, and bioenergy. Overall, the bibliometric analysis confirms the growing interest in the energy valorization of Brewers' Spent Grain, demonstrating its potential as a viable and sustainable alternative for renewable energy generation and the valorization of this important by-product of the brewing industry.

Keywords: brewers' spent grain; anaerobic digestion; energy; waste valorization; bibliometrics.

INTRODUÇÃO

O progressivo interesse por fontes renováveis de energia, principalmente devido ao contexto das mudanças climáticas e a diminuição do uso de combustíveis fósseis, tem promovido pesquisas voltadas ao aproveitamento de resíduos agroindustriais para produção de biogás, através da digestão anaeróbia. Neste âmbito, o bagaço de malte, também conhecido

como *brewery spent grain* (BSG), surge como um subproduto importante utilizável para a produção de biogás e metano. Resultante da indústria cervejeira, o BSG se destaca tanto por sua relevância econômica quanto pelo elevado volume de resíduos gerados, pois a cerveja é uma das bebidas alcoólicas mais consumidas globalmente e uma das mais populares, ficando atrás apenas da água, do suco de laranja, do chá e do café. O bagaço de malte, gerado em grandes proporções, possui características que o tornam adequado no processo de digestão anaeróbia (Gourmet, 2024).

A indústria cervejeira está entre os setores mais tradicionais e significativo da rede de bebidas alcoólicas no mundo. Refere-se a um segmento que movimenta bilhões de dólares por ano e executa um papel importante na economia global, tanto pela geração de empregos quanto pela demanda por matérias-primas agrícolas, como cevada, lúpulo e milho. Segundo dados do relatório da Kirin Holdings (2023), o consumo mundial de cerveja atingiu aproximadamente 185 bilhões de litros em 2022, evidenciando a relevância socioeconômica desta bebida em diversos países e culturas. A partir dos dados do Anuário da Cerveja 2023, divulgado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), o Brasil ocupa uma posição de destaque nesse cenário, sendo um dos principais produtores e consumidores globais, com uma produção superior a 15 bilhões de litros por ano no cenário nacional (Brasil, 2023).

Dados da Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CervBrasil), mostram que a cerveja no Brasil é responsável por 1,6% do produto interno bruto (PIB) e figura entre os maiores produtores e consumidores de cerveja no mundo.(Brasil, 2023). Este cenário impulsiona também o aumento da geração de resíduos a, sendo o bagaço de malte o principal subproduto sólido gerado dentro das cervejeiras, é crucial realizar sua correta destinação objetivando diminuir o impacto ao meio ambiente (Hasan *et al.*, 2018).

Entre os diversos substratos possíveis, o bagaço de malte é um resíduo sólido derivado da etapa de mosturação, fase inicial da produção da cerveja, na qual os grãos de malte são submetidos à extração de açúcares fermentáveis (mosto), além de ser o principal subproduto oriundo da indústria da cerveja, representando cerca de 85% do total de resíduos sólidos das cervejeiras. Estima-se que, para cada 100 litros de cerveja produzidos, cerca de 20 kg de bagaço de malte são gerados (Mussatto, 2014), ou seja, 0,2kg/L de cerveja. Esse resíduo apresenta elevado teor de matéria orgânica e umidade. O bagaço de malte é o que resta após os açúcares serem extraídos para o mosto da cerveja. O que sobra é um material extremamente rico em proteínas (20% a 30% da matéria seca) e fibras digestíveis (celulose, hemicelulose e lignina), que são ideais para o sistema digestivo de ruminantes. Como os açúcares (carboidratos simples) foram retirados para a fermentação da cerveja, o resíduo torna-se um concentrado proteico de

baixo custo.

A digestão anaeróbia (DA) é uma alternativa para o aproveitamento energético do bagaço de malte. Esse processo biológico ocorre na ausência de oxigênio, promovendo a decomposição da matéria orgânica por microrganismos e gerando biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (referência).

O bagaço de malte tem sido destinado à alimentação animal, devido ao seu valor nutricional. Mas, nas últimas décadas, alternativas sustentáveis vêm sendo exploradas, como sua valorização energética através da digestão anaeróbia, produção de bioetanol, compostagem, fabricação de biomateriais e aplicações em biotecnologia (referencia).

Além de contribuir para a matriz energética limpa, o aproveitamento do bagaço de malte reduz impactos ambientais associados à sua disposição inadequada, como emissões de gases de efeito estufa e poluição do solo e da água. Nesse sentido, a valorização energética deste resíduo se insere no conceito de economia circular, promovendo sustentabilidade no setor cervejeiro e agroindustrial como um todo.

Este trabalho teve como objetivo avaliar as tendências observadas relacionadas ao potencial uso do BSG como substrato para produção de biogás via digestão anaeróbia, a partir de uma análise da literatura nas últimas décadas, através de uma análise bibliométrica.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A INDÚSTRIA DA CERVEJA

O primeiro regulamento sobre o processo de fabricação da cerveja foi feito no ano de 1516 na Baviera o qual determinava os ingredientes da cerveja, apenas malte, cevada, água e lúpulo seriam usados em sua produção, pois ainda era desconhecida a levedura como ingrediente para a fermentação. Esse regulamento, conhecido também como Lei da Pureza da Cerveja (Reinheitsgebot), foi promulgada pelos duques Guilherme IV e Ludovico X da Baviera (Pinheiro, 2019).

No ano de 1808, D. João VI inseriu a cerveja no Brasil que resultou na indústria cervejeira implantada com vinte e sete cervejarias implantadas em menos de cem anos. O fato de o país ter um clima apropriado, qualidade da bebida ser boa, incentivou o aumento da indústria e o consumo constante de cerveja ao longo de ano (Martins; Fuzioka; Silva, 2014).

A cerveja está presente na maioria dos bares e restaurantes, casas dos consumidores, tornando a sua presença universal, independente dos fatores climáticos da região. A cerveja já foi considerada uma bebida rica pelo fato de constituída com os mesmos ingredientes do pão, como vitaminas e minerais. Por isso, no passado também era conhecida como pão líquido (Beltramelli, 2014).

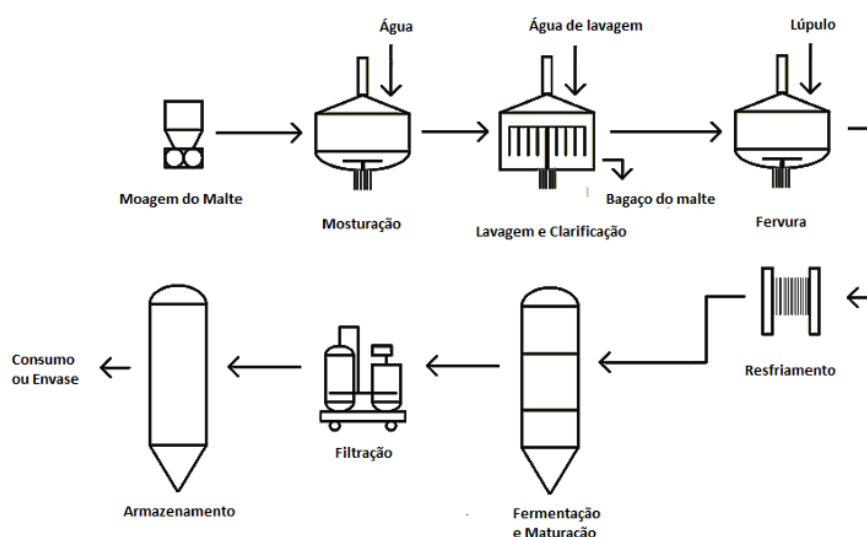
De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Cervejeira, as indústrias cervejeiras têm um grande impacto na economia por ser um dos melhores setores. Sua cadeia produtiva vem desde a atividades da agricultura, importação dos insumos até a sua distribuição final que envolve uma grande quantidade de frotas de veículos brasileiros para distribuir a bebida nos mercados, tornando-a alcançável para a população brasileira (Veroneze *et al.*, 2019).

ETAPAS DA PRODUÇÃO DA CERVEJA

O processo de fabricação da cerveja se divide simplificadaamente em 9 etapas sequenciais: moagem do malte (1), mosturação (2), lavagem e clarificação (3), fervura (4), resfriamento (5), fermentação e maturação (6), filtração (7), armazenamento (8) e envase ou consumo (9).

Na Figura 1, apresenta-se de forma esquemática o processo de produção da cerveja.

Figura 1. Fluxograma esquemático das etapas do processo de produção da cerveja



Fonte: Tozetto (2017)

Na etapa de moagem (1), o malte colocado em um moinho com o intuito de ocorrer a exposição do amido do endosperma ao separar as cascas da semente de malte e aumentar a área da superfície com o propósito de na etapa seguinte as enzimas atuem em uma maior área (Matos *et al.*, 2011).

Na mosturação ou brasagem (2), o malte é umedecido na água quente com o objetivo de hidratar e ativar as enzimas que vão transformar o amido dos grãos em açúcares. Durante o processo, controlar as temperaturas e o tempo é importante para auxiliar as reações bioquímicas. Por meio do ajuste da temperatura, as enzimas presentes na cevada maltada, realizam o processo de hidrólise do amido, mudando o amido em maltose dentre outros açúcares e remove substâncias pouco relevantes para a produção da cerveja. Depois da hidratação, o amido

consegue se solubilizar pelo calor ou pela combinação entre calor e ação enzimática. Por causa das reações físicas e bioquímicas que acontecem nessa fase, ela é dita como uma das mais complexas dentre o processo de fabricação da cerveja (Matos *et al.*, 2011).

Na etapa de lavagem e clarificação (3), acontece a separação, por meio da filtração, da fase sólida da fase líquida, isolando o bagaço de malte do mosto cervejeiro, parte importante no processo de fabricação (Tozetto, 2017).

Já na fase de fervura (4), ocorre a esterilização, desnaturação das proteínas e enzimas, a concentração do mosto, pela reação de Maillard. A Reação de Maillard é, sem dúvida, a "alma" da cor e do sabor de muitas cervejas. Ela não é um processo fermentativo, mas sim uma reação química complexa que ocorre entre aminoácidos (das proteínas do malte) e açúcares redutores sob a ação do calor. Também nessa etapa ocorre a incorporação do lúpulo, acontece em duas etapas: no início da fervura, para verificar o amargor e no final, para verificar o aroma da cerveja em produção (Tozetto, 2017). O objetivo dessa etapa é decantar o excedente de proteína desnaturada durante a fervura. Ao final da fase o mosto é transportado para outro tanque (Morado, 2009).

Na fase do resfriamento (5), que pode ocorrer de forma rápida ou lenta, é utilizado um aparelho chamado chiller, que realiza movimentos objetivando reduzir a temperatura adquirida na fervura. No resfriamento rápido forma-se o *cold break*, que é uma mistura de proteínas que sofrem choque térmico e são precipitadas e não se dissolvem mais. Já no resfriamento lento, não atinge as proteínas por não haver o choque térmico formando o *chill haze*, problema de equilíbrio visual e de preservação do sabor. O resfriamento deve ocorrer sempre de forma rápida (Matos *et al.*, 2011).

A etapa de fermentação (6), inicia quando a levedura é inoculada com o mosto resfriado e aerado. Os microrganismos irão se reproduzir, se alimentar dos açúcares fermentativos, produzirem álcool, dióxido de carbono, dentre outros ésteres, ácidos e álcoois superiores que transferem as características organolépticas para a cerveja (Matos *et al.*, 2011). Na fase de maturação, que acontece depois da retirada do fermento, diminuição da temperatura no tanque e quando a cerveja produzida (cerveja verde) é colocada no tanque de maturação ou engarrafada (produção artesanal), onde vai ser conservada a temperaturas próximas a 0°C. Nela se realizam mudanças em relação ao visual da cerveja, acrescentando valores e aromas específicos (Morado, 2009).

Já na etapa de filtração (7) a cerveja é filtrada para remover material particulado em suspensão, aumentando a estabilidade microbiológica e físico-químico (Matos *et al.*, 2011).

Na fase de armazenamento (8), após o término da fermentação, a temperatura do tanque

é reduzida drasticamente. Enquanto a fermentação ocorre entre 10°C e 25°C (dependendo do estilo), o armazenamento ocorre em temperaturas próximas a 0°C ou até negativas (até -2°C) e pode variar de alguns dias (cervejas artesanais simples) a vários meses (estilos complexos como *Doppelbocks* ou *Barley Wines*). O armazenamento ocorre em tanques de aço inoxidável pressurizados, chamados de tanques de maturação ou tanques de pressão (BBTs - *Bright Beer Tanks*). Nas baixas temperaturas do armazenamento, a solubilidade de diversas partículas diminui. Por gravidade, o que sobrou de levedura em suspensão, proteínas e polifenóis (taninos) decanta para o fundo do tanque. Isso resulta em uma cerveja muito mais límpida e brilhante. A cerveja "verde" (recém-fermentada) contém compostos indesejados, como o diacetil (que tem gosto de manteiga rançosa) e o acetaldeído (gosto de maçã verde). Durante o início do armazenamento, a levedura ainda presente "reabsorve" e metaboliza esses subprodutos, limpando o perfil sensorial da bebida.

O frio forçado ajuda a precipitar o chamado "chill haze" (turvação a frio). Ao fazer isso precipitar no tanque de armazenamento, garante-se que a cerveja não fique turva quando o consumidor gelá-la em casa. Se o tanque for fechado antes do fim total da fermentação, o CO₂ produzido pela levedura é dissolvido no líquido sob pressão, criando a carbonatação natural.

(Matos *et al.*, 2011).

Já na última etapa, envase (9), o cuidado para evitar a exposição da cerveja ao oxigênio e evitar oxidação se faz necessário (Matos *et al.*, 2011). Esse procedimento pode ser realizado por máquinas, mais seguro, ou manualmente.

BAGAÇO DE MALTE: ORIGEM, COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS

O bagaço de malte tem sua origem na indústria cervejeira, onde é um dos principais subprodutos gerados, forma-se durante a etapa de mosturação, processo em que os grãos maltados (que foram germinados e secos ou torrados, geralmente de malte) são moídos e submetidos à ação da água quente para a extração dos açúcares fermentáveis, em seguida o resíduo sólido restante (BSG) — composto principalmente por cascas, frações de amido não convertidas e fibras vegetais — constitui o chamado bagaço de malte (Jatunarachchi, Senaratne, De Alwis, 2006).

O bagaço de malte, é um resíduo lignocelulósico, de baixo custo, renovável, abundante e um bom recurso natural para bioenergia e muitos outros produtos, gerado em grande volume pela indústria cervejeira. Apesar de ser considerado um resíduo, o bagaço de malte é constituído de compostos orgânicos, como carboidratos estruturais, proteínas e fibras, o que o torna um material propício para diversas aplicações, incluindo a produção de biogás (Bachmann, Calvete, Féris, 2022).

Do ponto de vista físico, trata-se de um material úmido, com teor de umidade variando entre 70% e 80% logo após o processo de fabricação da cerveja. A alta umidade favorece a rápida degradação microbiológica.

Seu pH tende a ser levemente ácido, variando entre 4,5 e 5,5, o que pode impactar o equilíbrio microbiano em processos fermentativos (Mussatto, 2006).

Essas características tornam o bagaço de malte um resíduo com grande potencial de reaproveitamento em práticas sustentáveis, como a geração de energia renovável.

PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DO BAGAÇO DE MALTE

A digestão anaeróbia é um processo biotecnológico amplamente utilizado para o tratamento de resíduos orgânicos, como o bagaço de malte, visando à estabilização da matéria orgânica e à produção de biogás. Este processo ocorre na ausência de oxigênio livre e é realizado pela associação microbiana em quatro etapas metabólicas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Carlini *et al.*, 2021).

Na primeira etapa, denominada hidrólise, os compostos poliméricos, formados pela mistura de dois ou mais materiais, presentes no bagaço de malte, como celulose, hemicelulose, amido e proteínas, são quebrados por enzimas extracelulares em moléculas menores e solúveis, como açúcares simples, aminoácidos e ácidos graxos (Mussatto *et al.*, 2006).

Durante a acidogênese, segunda fase do processo, os produtos solúveis da hidrólise são convertidos em ácidos orgânicos voláteis, álcool, hidrogênio e CO₂ por bactérias acidogênicas. Essas substâncias são transformadas em ácido acético, H₂ e CO₂ por meio da acetogênese (Kunz; Steinmetz; Do Amaral, 2022).

A última fase, metanogênese, é conduzida por *arqueas* metanogênicas, que convertem os produtos da acetogênese, especialmente o ácido acético e o hidrogênio, em metano. A eficiência dessa etapa é fundamental para a quantidade e qualidade do biogás produzido (Emmanuel; Nganyira; Shao, 2022).

Diferentes grupos de microrganismos atuam sinergicamente, de maneira colaborativa, na digestão anaeróbia, sendo as arqueias metanogênicas essenciais para a etapa final da conversão (Nganyira *et al.*, 2023). A eficiência do processo é afetada por fatores como temperatura, pH, tempo de retenção hidráulica e a relação carbono/nitrogênio do substrato (Carlini *et al.*, 2019). O controle adequado dessas variáveis é essencial para otimizar a produção de biogás e garantir a estabilidade do sistema. A digestão anaeróbia representa uma estratégia promissora para a gestão de resíduos orgânicos e a produção sustentável de energia, promovendo benefícios ambientais, econômicos e sociais (Donoso-bravo *et al.*, 2011).

Devido ao seu alto teor de matéria orgânica biodegradável e sua constante disponibilidade na indústria cervejeira, o bagaço de malte se torna um substrato atrativo para digestores anaeróbios. Mas, o seu teor de fibras e pH levemente ácidos requerem constantes monitoramentos para garantir a estabilidade microbiológica e elevar a produção de metano.

BIOGÁS

O biogás é um combustível renovável produzido pela decomposição anaeróbia de matéria orgânica, sendo composto, em sua maioria, por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de pequenas quantidades de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), amônia (NH_3) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) (Khalid *et al.*, 2011). Sua composição pode variar dependendo do tipo de substrato utilizado, das condições operacionais do processo e da presença de impurezas (Weiland, 2010).

A produção de biogás tem grande importância na matriz energética sustentável, visto que permite a conversão de resíduos orgânicos em uma fonte de energia limpa, colaborando assim para a redução da dependência de combustíveis fósseis e diminuindo as emissões de gases de efeito estufa (Holm-Nielsen *et al.*, 2009).

O uso do biogás pode ser incorporado também a sistemas de economia circular, viabilizando a valorização energética de resíduos agroindustriais e urbanos. Sua aplicação vai desde a geração de eletricidade e calor até o uso como biocombustível veicular, após processos de purificação e enriquecimento do metano (Sganzerla *et al.*, 2021).

Na indústria cervejeira em particular, a esenergia do biogás (biometano convertido em eletricidade) pode ser usada justamente para alimentar os sistemas de refrigeração dos tanques de armazenamento, fechando o ciclo energético da fábrica ou encaminhado após limpeza para caldeiras reduzindo custos operacionais.

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A bibliometria, campo da biblioteconomia e da ciência da computação, consiste em uma técnica na qual é permitido analisar quantitativamente a produção científica de uma determinada área, como autoria, período de publicação, atuação de países, dentre outros (Merigó, *et al.* 2018). A bibliometria tem sido utilizada em vários ramos do conhecimento devido a qualidade na análise e processamento de grandes quantidades de dados de forma organizada e exata, fornecendo uma investigação mais precisa e verdadeira (Guedes, Borschiver, 2005). Também, indicadores bibliométricos permitem reconhecer modelos de repetições e relações, enquanto permitem a ponderação das influências vindas das aplicações feitas em inovação tecnológica e pesquisas (Pimenta, *et al.* 2017).

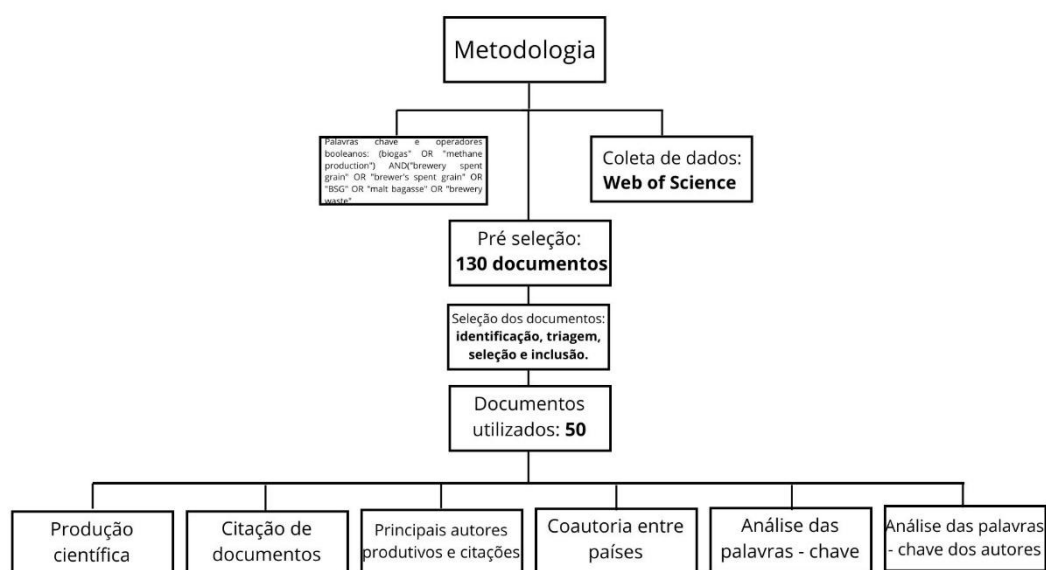
METODOLOGIA

LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E BIBLIOMÉTRICO

A escolha dos artigos necessários para a realização desse trabalho, se deu nas seguintes fases: identificação, triagem, seleção e inclusão.

Na primeira fase, a identificação, foi realizada a escolha da base de dados Web of Science pelo portal de periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), biblioteca virtual que reúne e disponibiliza a produção científica internacional, por meio da CAFE (Comunidade Acadêmica Federativa), que é um serviço de gestão de identidades e integração das bases de dados de instituições, utilizando o campo “All Fields” e empregando os termos ("*biogas*" OR "*methane production*") AND ("*brewery spent grain*" OR "*brewer's spent grain*" OR "*BSG*" OR "*malt bagasse*" OR "*brewery waste*"), objetivando obter um maior número de resultados que fossem pertinentes ao trabalho. Nesse passo foram encontrados 130 documentos. Na fase da triagem, filtros de idioma (inglês) e tipo de documento originais e de revisão foram aplicados. A análise bibliométrica foi realizada no dia 03 de abril de 2025. A Figura 2, mostra a etapa de coleta de dados e análise bibliométrica.

Figura 2. Esquema que demonstra as etapas de busca dos dados na plataforma Web of Science, onde foram elencados os documentos relacionados ao tema para bibliometria.



Fonte: Os autores (2026).

Na etapa de seleção, foram elencados títulos e resumos que eram relevantes ao tema do trabalho. Já na fase de inclusão, os artigos selecionados foram lidos e elegidos conforme a sua correspondência ao estudo. Ao final do processo, foram relacionados 50 documentos para a realização do estudo bibliométrico.

SOFTWARES UTILIZADOS

Depois das etapas de seleção dos artigos pertinentes ao tema oriundos da base de dados *Web of Science*, foram utilizados programas computacionais que fizeram correlações e análise dos dados obtidos. Os dados foram exportados nos formatos *Extensible Markup Language (XML)* e *Plain Text File (TXT)* visando a compatibilidade com os programas usados. As aplicações utilizadas foram: *Microsoft Excel®*, usado visando a organização e fichamento dos artigos e *VOSviewer®*, aplicado na interpretação mais facilitada dos dados mediante esquemas explicativos concedendo a análise de modelos informacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

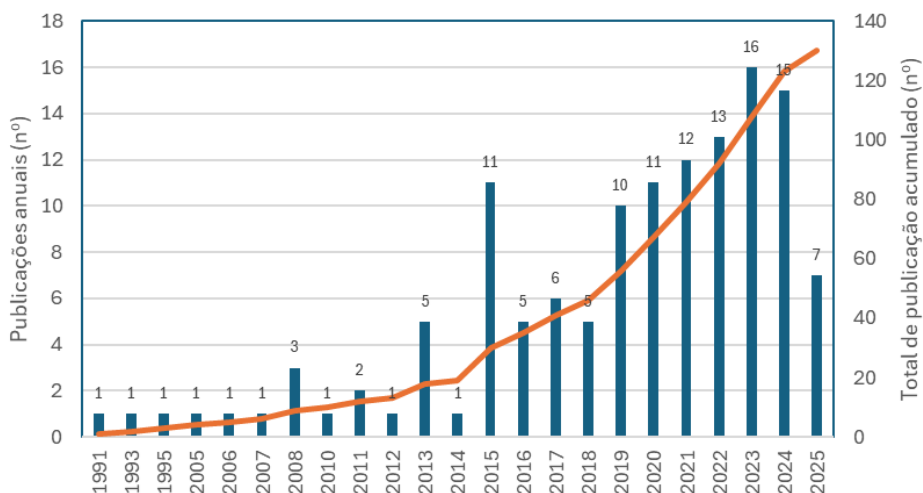
PRODUÇÃO CIENTÍFICA

O estudo sobre os dados referentes a publicações relativas à utilização do bagaço de malte para a produção de biogás é recente. De acordo com as informações obtidas acerca dos 130 documentos na pesquisa, verificou-se que a temática vem sendo abordada desde o ano de 1991, mas então com poucos estudos e publicações sobre a temática. Nos anos de 1991, 1993, 1995 e 2005, observou-se um intervalo entre os anos e apenas uma publicação em cada um deles.

A partir do ano de 2006 as divulgações dos documentos passam a ser anuais, porém ainda com poucas publicações.

Cenário diferente dos tempos mais atuais, destacando a última década, onde pode-se observar, na Figura 3, um aumento crescente no número de publicações. Percebe-se que a partir do ano de 2015 houve um aumento significativo no número de publicações a respeito do tema, tendo o seu ápice o ano de 2023, com 16 divulgações.

Figura 3. Publicações de documentos (1991-2025).



Fonte: Os Autores (2026)

A digestão anaeróbia tem sido bastante estudada como alternativa viável para o tratamento de resíduos orgânicos com alto potencial energético, como é o caso de resíduos agroindustriais como o bagaço de malte. O trabalho de Xiros (2012) destacou-se como um dos referenciados mais frequentemente, demonstrando a sua relevância na compreensão dos mecanismos de degradação de substratos lignocelulósicos. Esse estudo estabelece bases fundamentais para outras pesquisas, como as de Panjicko (2017) e Kavalopoulos (2021), que expandem a discussão sobre a eficiência de conversão biológica em diferentes estados (líquido-sólido-pastoso). A interconexão entre esses autores, conforme evidenciado no mapeamento de citações (Figura 4), demonstra o estabelecimento de um núcleo temático centrado na otimização da digestão anaeróbia e na valorização de resíduos. Outros trabalhos, como os de Dudek (2019) e Puligundla (2021), compõem um segundo *cluster* (agrupamento) de destaque, voltado ao aprimoramento de técnicas fermentativas e ao uso de tecnologias no pré-tratamento dos BSG.

Figura 4. Análise das citações de documentos.



Fonte: Os autores (2025)

Tabela 1. Ranking dos quatro documentos mais citados (2012-2021)

Ranking	Título	Autor/Ano	Nº de Citações	Revista	DOI
1º	Biotechnological Potential of Brewers Spent Grain and its Recent Applications	Xiros (2012)	96	<i>Waste and Biomass Valorization</i>	https://doi.org/10.1007/s12649-012-9108-8
2º	The Effect of Biochar Addition on the Biogas Production Kinetics from the Anaerobic Digestion of Brewers' Spent Grain	Dudek (2019)	68	<i>Energy</i>	https://doi.org/10.3390/en12081518
3º	Techno-economic assessment of bioenergy and fertilizer production by anaerobic digestion of brewer's spent grains in a biorefinery concept	Sganzerla (2021a)	62	<i>Journal of Cleaner Production</i>	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126600
4º	Biogas production from brewery spent grain as a mono-substrate in a two-stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors	Panjicko (2017)	60	<i>Journal of Cleaner Production</i>	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.197

Fonte: Os autores (2025)

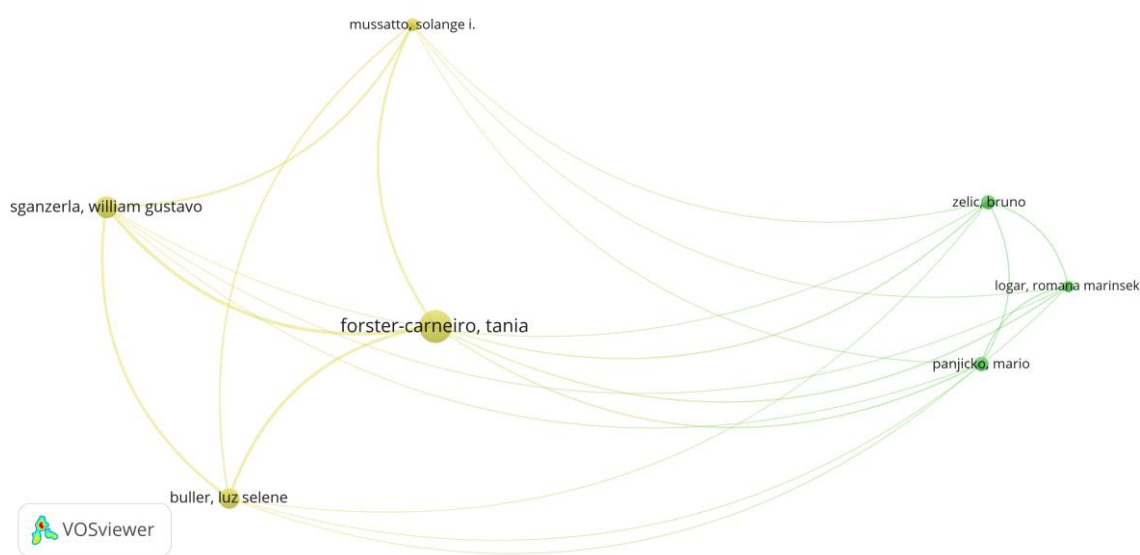
PRINCIPAIS AUTORES PRODUTIVOS E CITAÇÕES

A análise das redes de coautoria evidencia a existência de dois núcleos principais de colaboração científica no campo da digestão anaeróbia e valorização do bagaço de malte. O primeiro, formado pelos autores Forster-Carneiro, Tania, Sganzerla, William Gustavo, Mussatto, Solange I. e Buller, Luz Selene, expõe uma grande gama de conexões e coesão interna, sugerindo um grupo de pesquisa consolidado, provavelmente ligado a instituições brasileiras. A frequência e intensidade das colaborações entre esses autores refletem uma linha de pesquisa madura, voltada à conversão de resíduos agroindustriais em energia e produtos de valor agregado.

Observou-se um segundo grupo, composto por Zelic, Bruno, Logar, Romana Marinsela e Panjicko, Mario, cuja atuação parece concentrada no contexto europeu.

A conexão entre esses dois clusters por meio de autores como Mussatto e Forster-Carneiro indica uma articulação internacional relevante, que favorece o intercâmbio de metodologias, tecnologias e resultados experimentais. Assim, o mapeamento de coautoria corrobora a existência de uma rede científica em expansão, com potencial para incentivar abordagens integradas no desenvolvimento de soluções sustentáveis para o aproveitamento energético do bagaço de malte. Na Figura 5 podem ser observada a rede formada a partir dos sete principais autores em pesquisas sobre biogás e bagaço de Malte.

Figura 5. Rede dos sete autores principais em pesquisas sobre biogás e bagaço de malte (BSG).



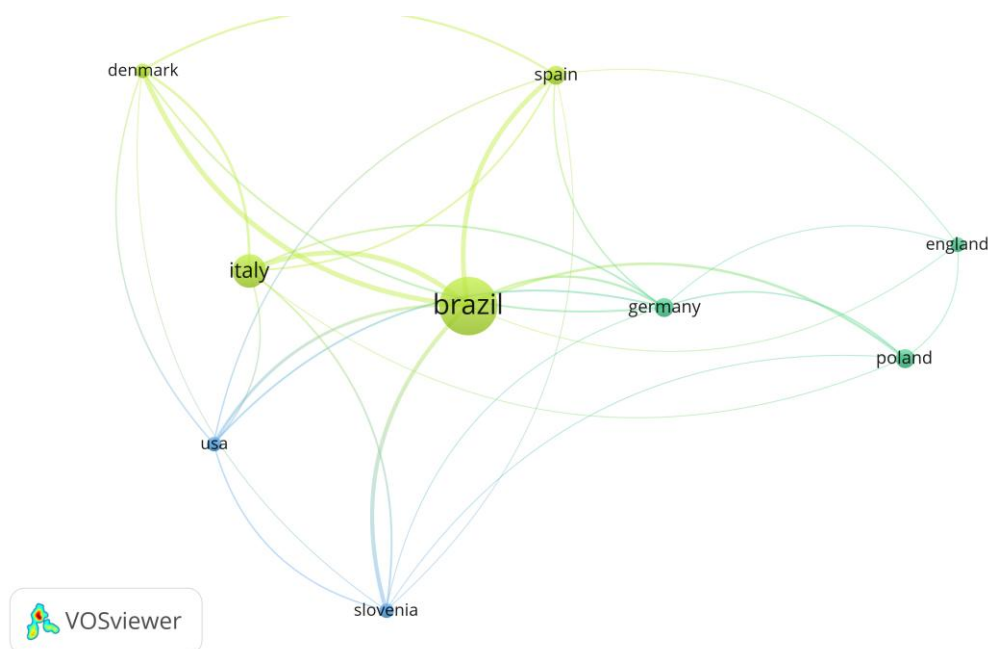
Fonte: Os autores (2025)

COAUTORIA ENTRE PAÍSES

A visualização da rede de colaboração científica (Figura 6) entre países revela o papel central do Brasil na vinculação de pesquisas sobre digestão anaeróbia e aproveitamento de resíduos orgânicos, especialmente o bagaço de malte. Com o maior número de conexões e uma sólida intensidade nos vínculos, o Brasil se destaca como um polo de colaboração internacional, especialmente com Itália, Espanha e Dinamarca, mostrando uma incorporação em redes de pesquisa europeias. Essas colaborações fortalecem a relevância do país no cenário global, tanto na produção científica quanto no intercâmbio de tecnologias sustentáveis. Além disso, o Brasil mantém vínculos significativos com países como Estados Unidos, Alemanha e Polônia, demonstrando a dimensão e variedade geográfica das suas parcerias.

A participação de países como Eslovênia e Inglaterra, indica a expansão gradual dessa rede colaborativa. Essa articulação internacional amplia a propagação de conhecimentos e fortalece o desenvolvimento de soluções inovadoras voltadas à bioenergia e à gestão de resíduos, temas de crescente importância na agenda ambiental e energética global.

Figura 6. Rede de coautoria entre países



Fonte: Os autores (2025)

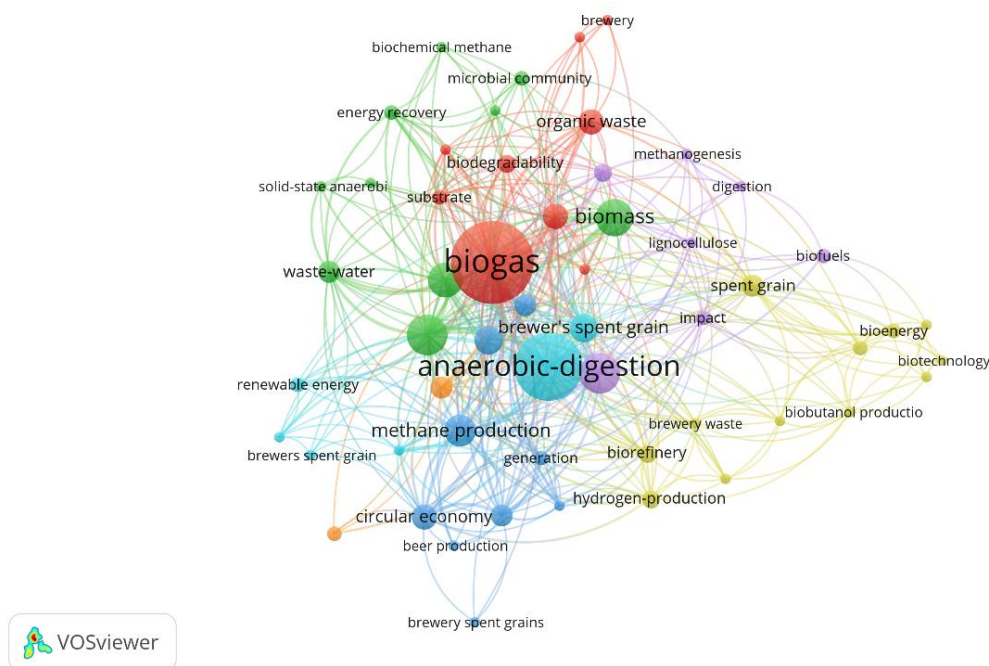
ANÁLISE DAS PALAVRAS-CHAVE

A rede de co-ocorrência de todas as palavras-chave (Figura 7) demonstra as principais discussões temas da produção científica relativa à utilização de resíduos da indústria cervejeira, com destaque para os termos "*biogas*" e "*anaerobic digestion*", que ocuparam posições relevantes e apresentam o maior número de conexões com outras palavras. Isso indica que a digestão anaeróbia é bastante reconhecida para a conversão de resíduos orgânicos em energia renovável, principalmente para a produção de biogás.

O termo "*brewer's spent grain*", bagaço de malte, frisa sua importância entre diferentes estudos, reforçando seu papel como principal substrato nos estudos analisados. Além disso, conceitos como os de "*circular economy*", "*biorefinery*" e "*methane*" atestam a preocupação com análises sustentáveis e integradas para o reaproveitamento de resíduos, bem como o interesse em seu rendimento energético e na valorização de subprodutos. A presença de palavras como "*biochar*", "*kinetics*", "*microbial community*" e "*lignocellulose*" indicam a especialização técnica dos estudos, compreendendo desde aspectos microbiológicos até parâmetros de desempenho e valorização dos resíduos lignocelulósicos.

Essa configuração demonstra uma rede com ênfase na sustentabilidade, refletindo o alinhamento da área com os princípios da bioeconomia e da transição energética.

Figura 7. Distribuição da co-ocorrência das palavras-chave



Fonte: Os autores (2025)

ANÁLISE DAS PALAVRAS-CHAVE DOS AUTORES

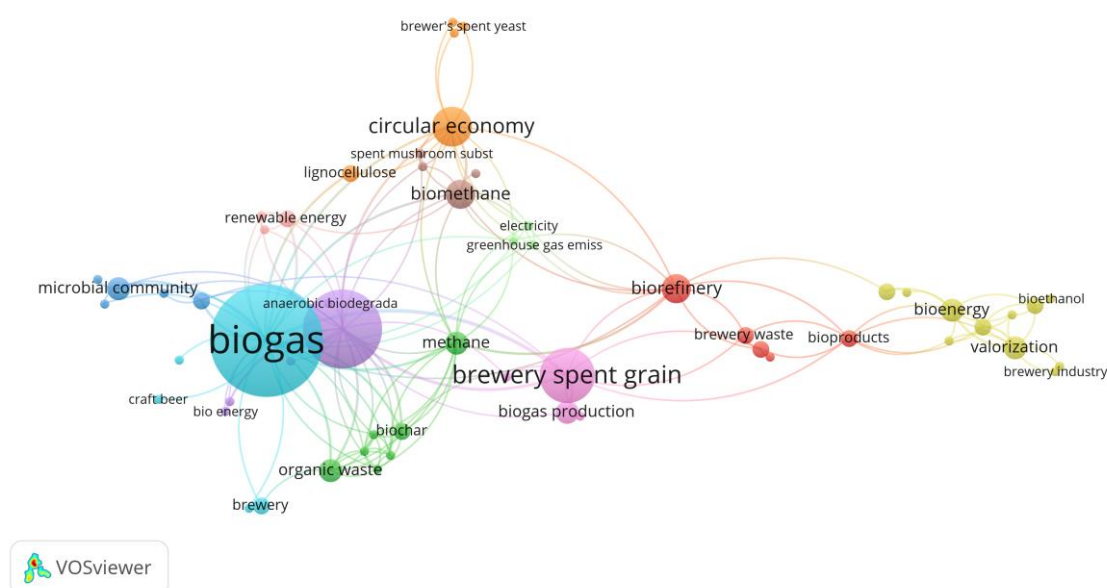
A Figura 8 revela uma rede temática formada em volta da expressão central “*biogas*”, que aparece como o conceito mais frequentemente interligado. A associação com o termo “*brewery spent grain*” destaca a importância do resíduo da indústria cervejeira como substrato na produção de biogás, afirmando seu papel no reaproveitamento de resíduos orgânicos.

As palavras “*organic waste*”, “*biochar*”, “*anaerobic biodegradation*” e “*methane*” indicam destaque nos processos microbiológicos e físico-químicos relacionados à digestão anaeróbia.

A rede também revelou uma conexão com perspectivas sustentáveis, onde termos como “*circular economy*”, “*valorization*”, “*biorefinery*” e “*bioenergy*”, também sinalizam e orientam pesquisas com princípios da economia circular e transição energética. Outras palavras como “*greenhouse gas emiss*” e “*renewable energy*” demonstram a preocupação em reduzir os impactos das emissões e promover fontes energéticas limpas.

A variedade de termos distribuídos em *clusters* interligados demonstra a complexidade do tema e a integração entre aspectos técnicos, ambientais e industriais na valorização de resíduos lignocelulósicos como o bagaço de malte.

Figura 8. Distribuição da co-ocorencia das palavras-chave dos autores



Fonte: Os autores (2025)

Na Tabela 3 apresenta-se a que comparação de todas as palavras-chave utilizadas nos documentos analisados e palavras-chave usadas pelos autores.

Tabela 2. Comparação entre os rankings das palavras-chave do texto e do autor

Palavra-chave	Palavras-chave dos autores	Todas as palavras-chave	Observações
biogas	1º	1º	Termo mais frequente e conectado em ambas.
anaerobic digestion	2º	2º	Tema central nos dois grupos.
brewery spent grain	3º	4º	Essencial em ambas, mais central nas palavras-chave dos autores.
organic waste	4º	5º	Presente nos dois grupos, foco em substratos.
methane production	6º	7º	Reforça o papel técnico e energético
biomass	5º	3º	Tratado com mais ênfase no grupo que contempla todas as palavras-chave
biorefinery	8º	9º	Ligada à aplicação industrial
circular economy	9º	-	Mais ressaltada nas palavras-chave dos autores (perspectiva sustentável)

Fonte: Os autores (2025)

CONCLUSÕES

A pesquisa bibliométrica realizada sobre a temática do uso do bagaço de malte na produção de biogás resultou na descoberta de recentes publicações baseadas no assunto, bem como de um número ainda pequeno, mas crescente de publicações.

Dentre os periódicos analisados, houve destaque maior para o *Journal of Cleaner*

Productions com maior número de publicações seguido pelo *Journal of environmental Chemical engineering*. Dentre os documentos encontrados, o intitulado “*Biotechnological Potential of Brewers Spent Grain and its Recent Applications*” do autor Charilaos Xiros (2012), evidencia-se como uma referência bastante significativa na área, sendo o mais citado, com 96 citações.

A análise das redes de coautoria mostrou a consolidação de grupos de pesquisa bem estruturados e a crescente articulação internacional na área de digestão anaeróbia aplicada ao bagaço de malte, demonstrando o fortalecimento da área e seu potencial para impulsionar a valorização energética de resíduos agroindustriais.

Analizando a rede temática nota-se o papel central do biogás como eixo integrador das pesquisas, destacando o bagaço de malte como substrato relevante na conversão de resíduos orgânico. Logo, a estrutura da rede confirma a natureza multidisciplinar do tema e seu alinhamento com estratégias voltadas à valorização de resíduos e à transição energética.

Dessa forma, este trabalho fortalece a importância da valorização energética do bagaço de malte, contribuindo para estratégias de aproveitamento sustentável de resíduos da indústria cervejeira.

REFERÊNCIAS (VERIFICAR SE ALGUMAS SAIU COM OS CORTES QUE FIZ)

BACHMANN, S. A. E; CALVETE, T; FÉRIS, L. A. **Potential applications of brewery spent grain: Critical an overview.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106951>.

BELTRAMELLI, Mauricio. **Cervejas, brejas e birras**. 2.ed. São Paulo: Leya, 2014, p. 24.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Anuário da Cerveja 2023*. Brasília, Ministério da Agricultura e Pecuária, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/anuarios-de-produtos-de-origem-vegetal-pasta/anuario-da-cerveja-2024-ano-referencia-2023/view>. Acesso em: 20 mar 2025.

CARLINI, M; MONARCA, D; CASTELLUCCI, S; MENNUNI, A; CASINI, L; SELLI, S. **Beer spent grains biomass for biogas production: Characterization and anaerobic digestion-oriented pre-treatments.** *Energy Reports*, v. 7, s. 5, p. 921-929, 2021.

EMMANUEL, J. K; NGANYIRA, P.D; SHAO, G.N. **Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogas generation, food and biotechnology industry: A review.** *Heliyon*, v. 8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11140>

GOURMET, G. **As 10 bebidas mais consumidas no mundo - Grão Cafés**. Disponível em: <https://graocafes.com.br/bebidas-mais-consumidas-mundo/>. Acesso em: 25 mar. 2025.

HASAN, Camila *et al.* **Evaluation of the biogas production potential from beer manufacture residues**, 2018.

HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. **The future of anaerobic digestion and biogas utilization.** *Bioresource Technology*, v. 100, n. 22, p. 5478-5484, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>

JATUNARACHCHI, T.S.S; SENARATNE, A. U; DE ALWIS, A. **Study of Anaerobic digestion of Brewery Spent Grains.** *International Energy Journal*, v. 7 p.279-287, 2006

KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWOOD, A. **The anaerobic digestion of solid organic waste.** *Waste Management*, v. 31, n. 8, p. 1737-1744, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>

KUNZ,A; STEINMETZ,R.L.R; DO AMARAL, A.C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2ª Edição, 2022.211 p. ISBN 978-65-88-155-02-8.

MARTINS, Izadora F., FUZIOKA, Pâmela U., SILVA, Alexsandro M. **Processo de Produção da Cerveja.** II Simpósio da Assistência Farmacêutica, Centro Universitário São Camilo, 2014. Disponível em: Acesso em 19 mar 2025.

MATOS, Ricardo Augusto Grasel et al. **Cerveja: panorama do mercado, produção artesanal, e avaliação de aceitação e preferência.** 2011.

MERIGÓ, José M.; PEDRYCZ, Witold; WEBER, Richard; LASOTTA, Catalina de. **Fifty years of Information Sciences: a bibliometric overview.** *Information Sciences*, [S.L.], v. 432, p. 245-268, mar. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2017.11.054>.

MORADO, Ronaldo. **Larousse da cerveja.** São Paulo: Larousse do Brasil, 2009. p. 357.

MUSSATTO, S. I. **Brewer's spent grain: A valuable feedstock for industrial applications.** *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 94, n. 7, p. 1264–1275, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.6486>.

NGANYIRA, P. D; MAHUSHI, D. J; BALENGAYABO, J. G; SHAO, G. N; EMMANUEL, J. K. **Quality of biogas generated through co-digestion of Brewer's spent grain and cattle dung.** *Energy Reports*, v. 10, p. 2330-2336, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.012>.

PINHEIRO, Bruno Hideaki Okoti. **Processo cervejeiro e a comercialização da cerveja.** 2019.

PIMENTA, A. A., Portela, A. R. M. R, Oliveira, C. B., & Ribeiro, R. M. (2017). **A bibliometria nas pesquisas acadêmicas.** *SCIENTIA: Revista de Ensino, Pesquisa e Extensão*, 4(7), 1-13.

SGANZERLA, W.G.; BULLER, L. S.; MUSSATTO, S. I.; FORSTER-CARNEIRO, T. **Techno-economic assessment of bioenergy and fertilizer production by anaerobic digestion of brewer's spent grains in a biorefinery concept.** *Journal of Cleaner Production*, v. 297, 15 May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126600>.

TOZETTO, Luciano Moro et al. **Produção e caracterização de cerveja artesanal adicionada de gengibre (Zingiber officinale).** 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VERONEZE, Maria Luiza et al. **Avaliação da produção de biogás a partir de água residuária de cervejaria.** 2019.

WEILAND, P. **Biogas production: current state and perspectives.** *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 85, n. 4, p. 849-860, 2010. DOI: [https://doi.org/ 10.1007/s00253-009-2246-7](https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7).