

Prospecção Tecnológica e Científica de Bioprocessos de Conversão do Bagaço de Malte com Ênfase em Compostagem e Biodigestão

Technological and Scientific Prospecting – Brewers’ Spent Grains Conversion Bioprocesses with Emphasis on Composting and Biodigestion

Santiago Alcides da Costa,^a Rafael Benjamin Werneburg Evaristo,^a Márcio Lima da Silva,^b Patricia Regina Sobral Braga,^{b,c} Grace Ferreira Ghesti^{a,b,*}

^a Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Química, Laboratório de Bioprocessos Cervejeiros e Catálise em Energias Renováveis, CEP 70910-900, Brasília – DF, Brasil

^b Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Programa de Mestrado Profissional em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação - PROFNIT - Ponto Focal UnB, CEP 70910-900, Brasília – DF, Brasil

^c Universidade de Brasília, Faculdade UnB – Gama, Engenharia de Energia, CEP 72444-210, Brasília – DF, Brasil

*E-mail: grace@unb.br

Recebido: 24 de Abril de 2023

Aceito: 18 de Outubro de 2023

Publicado online: 17 de Novembro de 2023

Brewer’s spent grain (BSG) is one of the main solid residues in the beer industry. In Brazil, the number of beer-producing has grown, intensifying the generation of waste, mostly going to landfills and animal feed after the brewing process. Aiming to fit the global guidelines for applying a circular economy within the brewing scenario, the objective of this article was to carry out a technological and scientific prospection using BSG as a raw material in bioprocesses such as composting and biodigestion. As most of the registered establishments are small and medium-sized, economically viable sustainable processes were sought to manage this waste. A search was carried out on the Orbit® Intelligence and Web of Science platform on to collect the related bibliometric data, 95 patent documents and 1073 scientific works on BSG were found during the period from 2001 to 2021. However, it was observed that large beer-producing countries are the largest patent applicants, but they are not the largest producers of articles. It can be observed that BSG can be used for energy applications and as a raw material for bioprocesses. Therefore, it is important to analyze the sustainable development of the beer industry as it has a great economic impact.

Keywords: Brewer’s spent grains; waste management; bioprocesses.

1. Introdução

Indústrias no mundo todo estão se adequando a um novo modelo de desenvolvimento baseado na bioeconomia, que trata da transformação de recursos biologicamente renováveis em produtos que tenham um valor econômico e bioenergético possível. Além disso, a demanda do setor industrial de recursos básicos para a produção de produtos químicos, energia e materiais vêm aumentando proporcionalmente ao mercado. Atualmente, uma alternativa para substituir a dependência do petróleo é usar biomassa. Essas biomassas podem ir desde a cana-de-açúcar até os resíduos da indústria.¹

O modelo de produção predominante desde o fenômeno da industrialização é linear, assim, com o aumento da produção e do consumo, ocorre o aumento da extração de recursos naturais e da deposição de resíduos, provenientes do processo produtivo e do pós-consumo. Dois fatores fomentam e multiplicam os impactos negativos dos processos produtivos no meio ambiente, o aumento populacional e a intensificação do consumo per capita.²

O sistema produtivo adota a economia linear, que visa a transformação da matéria-prima, venda do produto, utilização e posteriormente o descarte. Esse modelo econômico não leva em consideração o aumento do desperdício, a poluição e o consumo desenfreado de matérias-primas. Ou seja, extrai-se a matéria prima, produz-se um bem, tal bem é consumido e em seguida descartado. Com isso, há a geração de resíduos e rejeitos e a dissipação de energia ao longo do processo produtivo. Tal modelo de produção pressupõe a depleção contínua de recursos naturais e se caracteriza pelo descarte acelerado e precoce dos bens consumidos. Ao utilizar um produto que seria descartado, há a diminuição do consumo de matérias-primas e a redução da poluição, seguindo a tendência mundial de sustentabilidade.²

Diante do exposto, surgiu o conceito e utilização da economia circular, do modelo de produção e do consumo que visa à sustentabilidade econômica, ambiental e social caminham para o desenvolvimento sustentável de impacto. Na agroindústria, a sua aplicação tem explorado o desperdício de alimentos, além de suas estratégias para evitar impactos na cadeia

alimentícia. A avaliação de tecnologias pode ser empregada no gerenciamento de resíduos, a fim de gerar valor para o que está sendo descartado.³

Diferente da economia linear que visa a produção em fluxo linear, um dos meios de contribuir/adaptar o sistema é a proposição de reaproveitamento sustentável, a qual visa transformar resíduos sem o uso, ou com o mínimo possível, de compostos e manter o ciclo de vida útil dos materiais. Ou seja, trata-se de reuso, redução, reciclagem de rejeitos de modo que ao final do processo os produtos possam recircular sem prejuízo de crescimento econômico e com menor impacto ambiental possível, definindo os princípios básicos da economia circular.^{4,5}

O setor cervejeiro tem bastante tradição no Brasil, com grande relevância para a economia brasileira, apresentando cerca de 2,7 milhões de empregos ao longo da cadeia produtiva.^{6,7} A agroindústria da cervejaria tem se destacado por apresentar um crescimento significativo nos últimos 20 anos. Na Figura 1 pode-se observar um aumento exponencial de registros de estabelecimentos produtores de cerveja, verificando um processo de expansão de cervejarias no Brasil, conforme o anuário da cerveja publicado em 2021 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA.⁸ A partir do ano de 2020, foi observada a presença de cervejarias em todos os estados brasileiros e no Distrito

Federal, destacando-se o estado do Acre com o primeiro estabelecimento desse setor.⁸

Segundo a Cervbrasil,⁷ cerca de 14 bilhões de litros de cerveja são produzidos anualmente no Brasil com o aumento do número de cervejarias. Levando-se em conta que para cada 100 litros de cerveja são gerados de 14 a 20 kg de resíduos,⁹ apresenta-se um cenário de aumento na quantidade de resíduos, os quais geram um passivo ambiental.

O processo cervejeiro pode ser resumido brevemente como a obtenção de um mosto fermentável através da quebra enzimática do amido presente pela ação das enzimas contidas no malte. Este mosto é então fervido com a adição de lúpulo, resfriado e posteriormente fermentado pela adição de leveduras cervejeiras. Após a fermentação, a cerveja pode ser separada fisicamente da levedura e estabilizada biologicamente por pasteurização.¹⁰ A Figura 2 apresenta o processo de produção de cerveja e de resíduos agregados ao processo.

Os resíduos produzidos pela indústria cervejeira necessitam tanto de gestão ecológica/ambiental como econômica. O bagaço de malte de cervejarias (BSG) é o principal resíduo sólido da produção de cerveja (corresponde a 93% da massa total de resíduos).¹¹ A produção de cerveja contabiliza ainda outros resíduos orgânicos oriundos

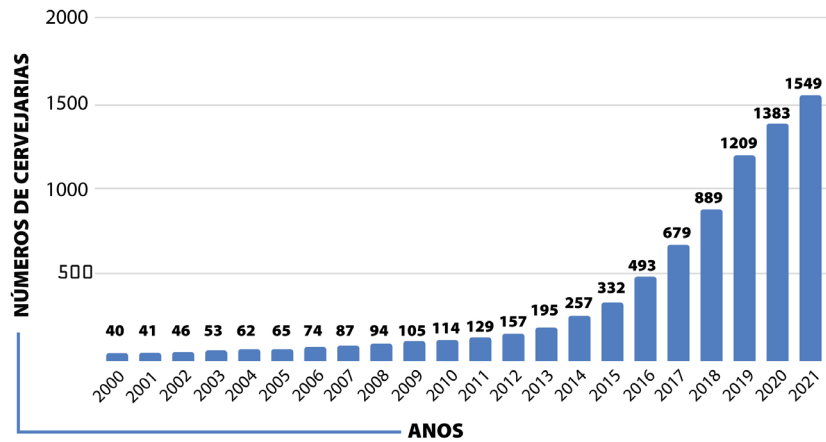


Figura 1. Número de registros de cervejarias formais funcionando por ano no Brasil⁸

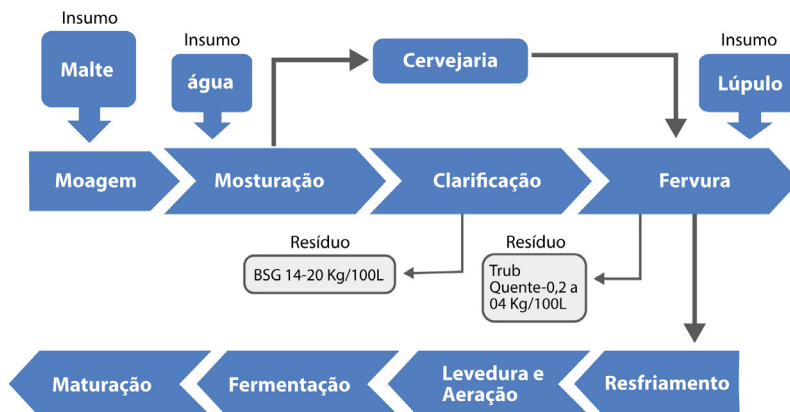


Figura 2. Processo de fabricação de cerveja. BSG - Bagaço de malte de cervejarias¹⁰

dos processos: de fervura (*trub quente*), de fermentação (leveduras residuais) e de maturação (*trub frio*).¹¹ O grande volume desse resíduo, que se deteriora em um prazo curto, gera perda nas cervejarias, mesmo ele apresentando potencial para seu uso em produção de produtos de maior valor agregado, ração animal, alimentação humana, combustíveis, tratamento de biomassa, dentre outras aplicações, conforme Figura 3.¹²⁻¹⁴



Figura 3. Possíveis utilização para BSG - Bagaço de malte de cervejarias. Adaptado¹³

A gestão de resíduos em economias lineares, que funcionam no modelo de extração, transformação, consumo e descarte não considera que os recursos são finitos,¹⁵ e tem mostrado problemas quanto ao descarte e/ou reaproveitamento dos resíduos gerados. Isso resulta no depósito em aterros sanitários, redes de esgoto ou de áreas de despejo ilegais não-mapeadas como destino final para resíduos industriais em geral. Estas ações ocasionam prejuízos ao meio ambiente, atingindo os solos, os rios, os mares e o ar.¹⁶

Grandes cervejarias possuem maior capacidade de investimento e estão interessadas na ecoeficiência de sua indústria, logo investem em algumas práticas sustentáveis que demandam mais tempo e recurso. Já as cervejarias artesanais e de pequeno porte não têm as mesmas condições de investimento, fazendo com que esses estabelecimentos busquem alternativas mais economicamente acessíveis, através de processos mais simples.¹⁷

Uma maneira simples de aproveitar esses resíduos sólidos é através da utilização de tratamentos de biomassa a partir de dois bioprocessos, compostagem e digestão anaeróbica (ou biodigestão). A compostagem é um bioprocessos que permite a decomposição biológica da matéria orgânica, utilizando microrganismos em condições controladas. É um processo aeróbico e exotérmico que dá origem ao produto final estabilizado, livre de fitotoxidades e patógenos, além de ser rico em nutrientes.¹⁴ Nos últimos anos, a compostagem vem demonstrando uma estratégia promissora no gerenciamento de resíduos com bons potenciais econômicos e ambientais, pois esse processo é facilmente aplicável a vários subprodutos da agroindústria, como restos de vegetais, legumes, frutas, bagaços pós-processamentos, palhagens, entre outros. Além de gerar como produto um fertilizante que pode agregar valor à cadeia produtiva, seguindo os preceitos da química verde e da economia circular.¹⁴ Já a digestão anaeróbica ou biodigestão é um processo biológico natural que acontece

na ausência de oxigênio, onde bactérias promovem uma fermentação estável, a gerar uma produção de biogás para aproveitamento energético.¹⁸

O intuito deste artigo foi realizar uma prospecção tecnológica e científica relacionando o BSG como biomassa para aplicar os tratamentos de compostagem e de digestão anaeróbica com finalidades energéticas e de gestão de resíduos. Além disso, buscou-se mostrar o potencial dessa aplicação a resíduos agroindustriais e as tendências econômicas e sustentáveis, a fim de propor medidas relacionadas a uma economia circular para a indústria cervejeira no Brasil, a qual, hoje, está pautada em uma economia linear. Logo, o artigo apresenta um levantamento de dados inédito no que tange ao acervo patentário, grau de maturidade/prontidão tecnológica a fim de propor uma rota de economia circular apta a ser aplicada as cervejarias nacionais, especialmente as de pequeno e médio portes ou as que buscam gerar menor impacto ambiental com menor custo de implantação e sem necessidade de mudança na área de geração de energia, uma vez que o biogás pode ser queimado nas caldeiras que geram calor para a cervejaria. Diante do cenário apresentado de crescimento das cervejarias e que não há artigo que aborde sobre o tema possível de ser aplicado ao setor produtivo, esse estudo se mostra com bastante aplicabilidade para o desenvolvimento tecnológico do setor no que tange a mudança de um sistema econômico linear para um circular reduzindo custos tanto de gestão de resíduos como na redução do gasto com sistema de geração de energia elétrica.

2. Parte Experimental

Para a realização desse trabalho foi empregada uma metodologia de prospecção baseada em duas perspectivas: (i) tecnológica e (ii) científica. Para a análise prospectiva tecnológica, o procedimento empregado foi a busca de documentos patentários utilizando a plataforma *Orbit® Intelligence*¹⁹ e para a análise científica foram utilizadas buscas por publicações na base *Web of Science*, da *Clarivate Analytics*.²⁰ A plataforma *Orbit® Intelligence*¹⁹ foi utilizada para se obter um panorama mundial das patentes relacionadas às tecnologias envolvendo BSG e serviu de suporte para indicar os setores de interesse para a busca na plataforma *Web of Science*.²⁰ A busca e a análise das patentes abrangeram o período de janeiro de 2001 a dezembro de 2021 e foram conduzidas com a utilização de combinações de palavras-chave. Com o intuito de restringir a pesquisa e obter melhores resultados durante a busca, foram empregados o operador booleano (AND) e o operador de truncamento (*).

A busca empregada na plataforma *Orbit® Intelligence*¹⁹ utilizou os termos “*brew*AND spent AND grain*” (índice da pesquisa 1), nos campos “título” e “resumo”. Já as pesquisas na base de publicações científicas da *Web of Science*, *Clarivate Analytics*,²⁰ foram realizadas combinações de

palavras em três campos de pesquisa: (i) bagaço; (ii) bagaço e compostagem, e (iii) bagaço e biodigestão, conforme apresentado na Tabela 1.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise dos documentos patentários

A partir da busca na plataforma *Orbit® Intelligence*¹⁹, utilizando o termo “*brew* AND spent AND grain*” foram obtidas 95 famílias de patentes. A evolução do número de famílias publicadas por ano, apresentada na Figura 4, mostra que entre 2001 e 2021, houve uma tendência de aumento de proteções nessa área. Destaque para os períodos de 2007 a 2010, e de 2014 a 2020, que apresentaram, respectivamente, uma média de 5 e 6 publicações por ano. Esse aumento do número de publicações pode ser interpretado como o

resultado do maior interesse da indústria neste segmento, o que pode proporcionar em um aumento no financiamento às pesquisas nessa área.

Na Figura 5 são apresentados os 10 países que mais publicaram patentes, na área em análise, entre 2001 e 2021. Destaque para a China e os Estados Unidos, que juntos, foram responsáveis por mais de um terço das publicações de patentes no período observado. Pode-se avaliar também que os centros de pesquisas e as indústrias desses países foram as que mais investiram no desenvolvimento de tecnologias baseadas no bagaço de malte, oriundo da indústria cervejeira.

Em relação à aplicação industrial das tecnologias desenvolvidas com o uso do bagaço de malte, estão apresentadas, na Figura 6, as 10 áreas tecnológicas que apresentaram maior uso para o BSG. Dentre elas, destaca-se o setor de alimentos, respondendo por cerca de 77% das patentes publicadas no período analisado. A partir da análise

Tabela 1. Pesquisas realizadas na *Web of Science, Clarivate Analytics*,²⁰ no período de 01/01/2001 a 31/12/2021

Campo de pesquisa	Índice da Pesquisa	Termos de pesquisa
Bagaço	#1	brew* AND spent AND grain
Bagaço e Compostagem	#2	#1 AND (organic AND fertilizer)
	#3	#1 AND (biofertilizer)
	#4	#1 AND (composting)
	#5	#1 AND (humic AND substances)
	#6	#1 AND (compost)
Bagaço e biodigestão	#7	#1 AND biogás
	#8	#1 AND co-digestion
	#9	#1 AND anaerobicdigestion
	#10	#1 AND biodigest*

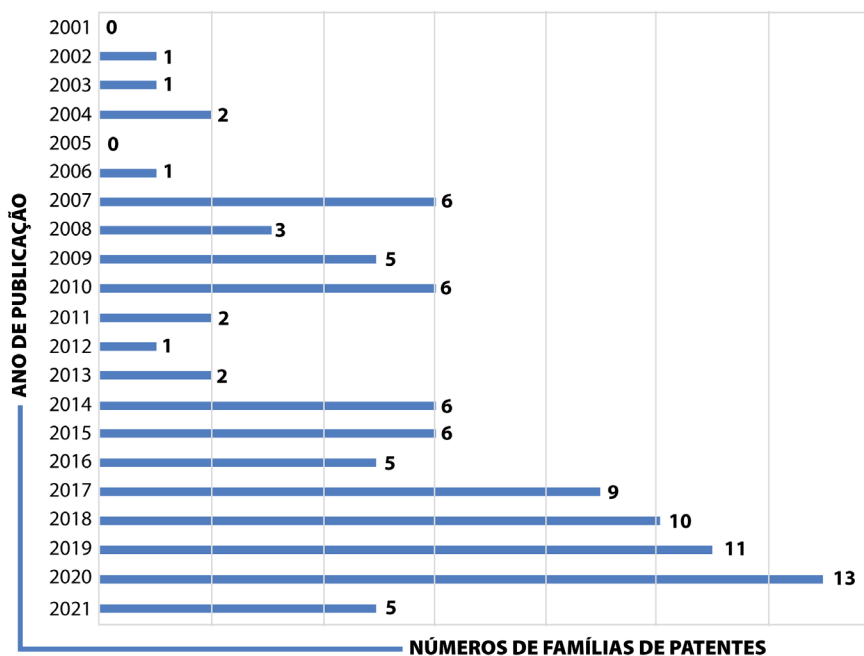


Figura 4. Número de famílias de patentes por ano de publicação. Adaptado de *Orbit® Intelligence*¹⁵

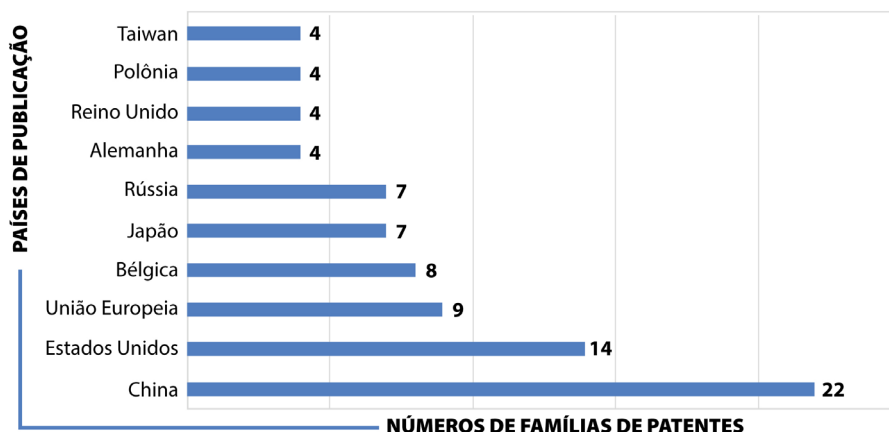


Figura 5. Número de famílias de patentes por países de publicação. Adaptado de *Orbit® Intelligence*¹⁵

desses dados, pode-se observar um interesse crescente em tecnologias de reaproveitamento do bagaço de malte, em especial por parte da China e dos Estados Unidos, com aplicações direcionadas para a área de alimentos. Esses resultados motivaram uma pesquisa mais aprofundada sobre o assunto nas bases de artigos científicos, com foco em estudos relacionados ao bagaço de malte, como matéria-prima, bem como nos processos de compostagem e de biodigestão.

3.2. Análise das publicações sobre o BSG e sua correlação com a compostagem e a biodigestão

O quantitativo inicial dos documentos recuperados por meio das combinações de palavras-chave utilizadas na base de publicações científicas da *Web of Science*, *Clarivate Analytics*,²⁰ estão apresentados na Tabela 2. A utilização de terminologias e de sinônimos ao campo de pesquisa bagaço possibilitou analisar, inicialmente, a relevância

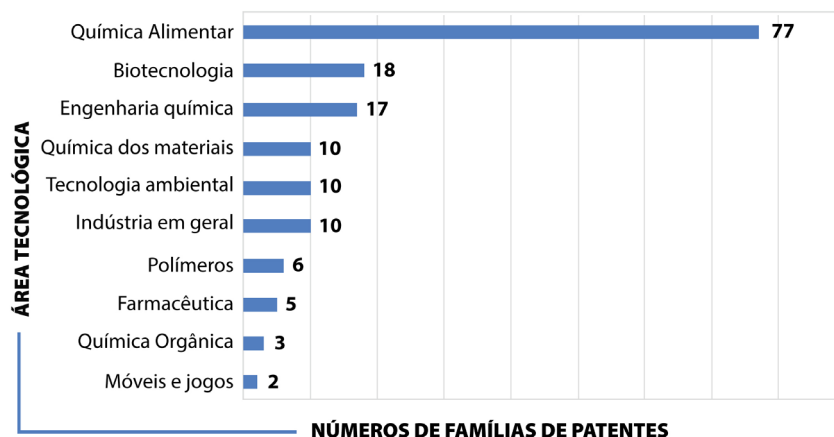


Figura 6. Número de famílias de patentes por área tecnológica. Adaptado de *Orbit® Intelligence*¹⁵

Tabela 2. Resultados das pesquisas realizadas na *Web of Science*, *Clarivate Analytics*,²⁰ no período de 01/01/2001 a 31/12/2021

Campo de pesquisa	Índice da Pesquisa	Termos de pesquisa	Número de publicações
Bagaço	#1	brew* AND spent AND grain	1073
	#2	#1 AND (organic AND fertilizer)	16
	#3	#1 AND (biofertilizer)	2
	#4	#1 AND (composting)	22
	#5	#1 AND (humic AND substances)	2
	#6	#1 AND (compost)	22
Bagaço e Compostagem	#7Aj	#1 AND biogás	64
	#8	#1 AND co-digestion	29
	#9	#1 AND anaerobicdigestion	72
	#10	#1 AND biodigest*	1

Fonte: (Autores, 2022)

dessa tecnologia nos cenários tecnológico e científico de maneira abrangente.²¹

A prospecção de publicações científicas, apresentada na Tabela 2, obteve 1073 publicações como resultado para a estratégia de busca “brew* AND spent AND grain”. Após a aplicação do filtro “review article” a este resultado, a fim de refinar a busca²¹, foram identificados 93 artigos. Os resultados observados demonstraram que o BSG está dentro de áreas voltadas para: (i) definição; (ii) composição química; (iii) rotas de gestão de resíduos, aplicações e tecnologias; (iv) adsorção de metais; (v) utilização na indústria de alimentos através da transformação em farinha e em fonte de proteína; (vi) meio de cultura de fungos e bactérias para produção de enzimas e fármacos; (vii) produção de biocarvão, biogás, e combustível dentro da perspectiva energética; (viii) desenvolvimento de cosméticos; e (ix) produção de moléculas plataforma a partir do bagaço como açúcares, aminoácidos e polifenóis na ótica da degradação enzimática, sendo esta a maior parte dos resultados encontrados. Também foram observados artigos relacionados ao BSG como gerador de impactos econômicos, uma vez que seu descarte é destinado a aterros sanitários, bem como ao descarte diretamente às redes de esgoto, aumentando muito a demanda química de oxigênio (DQO), capaz de promover a eutrofização de rios e lagos.²² Vários autores demonstraram essas várias aplicações do BSG em diferentes rotas tecnológicas alternativas, a fim de se utilizar esse resíduo como fonte de matéria-prima para outros processos, conforme Quadro 1. No Brasil, o interesse em pesquisa sobre o tema também é incentivado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNGRS), regida pela Lei nº 12.305 de 2010, que deixa claro a obrigação do governo em financiar pesquisas na área de resíduos sólidos.²³

Quadro 1. Aplicações do BSG em diversas áreas tecnológicas²⁴

Aplicações	Referências
Nutrição animal	25-27
Pirólise	28-30
Bioetanol, Biobutanol	31-33
Produção de enzimas, hidrólise enzimática	34-37
Celulose e derivados	38,39
Materiais carbonáceos/materiais adsorptivos	40-42
Materiais poliméricos	43-45

Relacionando os resultados obtidos com outro trabalho desenvolvido pelo nosso grupo²², pode-se observar que doze patentes já foram depositadas com temas afetos ao BSG, na base de dados do Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI)⁴⁶, dentre elas, cinco envolvem bioprocessos. Dentre os cinco resultados obtidos, três foram arquivados, um foi concedido e outro foi depositado, porém ainda em período de avaliação. Essas duas patentes, que ainda estão válidas, (PI 0005374-0 - Produção de pellets usando o bagaço e BR 10 2018 073305 2 - Hidrólise de casca de mandioca e cascas usando enzimas amilolíticas produzidas por fungos), abordam

processos biotecnológicos bastante robustos e as tecnologias foram desenvolvidas apenas a nível de bancada, ou seja, com baixo grau de maturidade tecnológica. Nenhuma patente envolve o processo de biodigestão e compostagem. Logo, para fins comerciais, ainda precisam escalonar os processos e avaliar as viabilidades técnicas e econômicas das tecnologias. Em sua grande maioria, as patentes depositadas exploraram processos térmicos e otimização para aumentar a validade do bagaço por meio de secagem e peletização. Segundo Evaristo e colaboradores²² quando se avaliam as patentes e trabalhos relacionados a esse resíduo agroindustrial, observa-se que prevalece: (i) o desenvolvimento de tecnologias que aumentam a densidade energética, (ii) a utilização na indústria alimentícia (extraíndo os constituintes buscando diversas aplicações) e (iii) utilizam como substrato para o desenvolvimento de microrganismos para processos biotecnológicos.

Com relação a biodigestão e compostagem, observa-se que não há documentos patentários que abordam sobre o tema. Sabe-se que são tecnologias com grau de maturidade e prontidão tecnológica altos (8-9) e são adotadas para qualquer tipo de resíduo orgânico, logo o estudo mais específico de uma biomassa não atende os requisitos de patenteabilidade, conforme Lei nº 9279/96, logo sua proteção é inviável. Porém, são tecnologias que são empregadas em cervejarias como os estudos listados a seguir, o qual relatam o uso do bagaço de malte para a geração de energia por digestão anaeróbica e outras tecnologias.

Em relação aos estudos correlacionados com o conceito de economia circular, alguns autores relataram melhorias relativas às propostas energéticas. Ortiz *et al.* (2019)⁴⁷ exploraram, em seu trabalho, a demanda energética de uma cervejaria na Espanha e quais tecnologias deveriam ser implementadas, a fim de reduzir o gasto energético utilizando seu próprio resíduo. Os autores sugeriram que, para a valorização termoquímica do BSG, fosse implementado, nessa cervejaria, uma secagem do resíduo seguida pelo processo de peletização do BSG com posterior gaseificação dos pellets em um reator de leito fluidizado. Essa solução proposta diminuiria a quantidade de resíduo de 100,8 ton por ano para 0,7 ton por ano e geraria uma energia líquida de 1,9 kWh_{th} kg⁻¹, para uma fábrica de capacidade de 5040 hL por ano. O estudo de Gómez *et al.* (2010)⁴⁸ também avaliou o resíduo de uma cervejaria espanhola como sendo um produto agroindustrial com potencial energético na produção de energia a partir da biomassa. Os autores mostraram que o processo tecnológico para a recuperação energética do BSG é a digestão anaeróbica com máquina de combustão interna, o qual permite a geração de energia elétrica na faixa de 130-540 kWh, dependendo da capacidade de produção da cervejaria (500.000 a 2.000.000 hL por ano), respectivamente. Assim, os processos apresentados demonstraram que o BSG pode ser utilizado como parte da fonte de energia de uma cervejaria.

A Figura 7 apresenta a evolução do número de publicações científicas, entre 2001 e 2021, relacionados ao

BSG. Pode-se observar um aumento expressivo de 2500% no número de artigos publicados, na quantidade de artigos entre 2001 (7 publicações) e 2021 (182 publicações). Pode-se inferir desse crescimento, um aumento no número de editais de pesquisa voltados para sustentabilidade, em especial, os relacionados ao uso de biomassa.

Analisando os países que mais publicaram artigos científicos sobre o BSG, Figura 8, se destacaram os países europeus Portugal (14,1%), Espanha (13,6%), Itália (10,3%), Irlanda (8,3%), Alemanha (7,8%), e Polónia (7,2%), os quais representam a segunda maior potência produtora de cerveja do mundo atrás apenas da China.⁴⁹ Contudo, o país que mais se destacou foi o Brasil com 15,1% dos trabalhos publicados no período analisado, evidenciando que os processos cervejeiros da indústria brasileira buscam por alternativas de como tratar seu principal resíduo, o BSG, a fim de gerar melhorias para o meio ambiente.⁹

Analisando o campo de pesquisa “bagaço e compostagem”, foram observados 64 artigos científicos na base de dados *Web of Science, Clarivate Analytics*²⁰. Essa tecnologia também tem sido empregada como alternativa para a economia circular das cervejarias, permitindo correlacionar processo, produtos obtidos e rotas usando

BSG. Dentre os artigos analisados, pode-se perceber que o BSG é utilizado como substrato para compostagem direta. Além disso, a utilização de misturas de BSG com fertilizantes também já foi reportada, sendo aplicados como bioestimulante e biocontrolador.⁵⁰ Outro bioprocessos encontrado na literatura foi da vermicompostagem, que consiste em um processo de decomposição da matéria orgânica por meio de microrganismos e minhocas.⁵¹ Esse bioprocessos utiliza o BSG como matéria-prima, pois este contém uma grande quantidade de umidade, obtendo como resultado um vermicomposto rico em nitrogênio, o qual é indicado para uso como corretivo de solo.⁵²

Considerando os 166 resultados na base de dados *Web of Science, Clarivate Analytics*,²⁰ para o campo de pesquisa “bagaço e biodigestão” da Tabela 2, pode-se compreender que o BSG também pode ser utilizado como substrato para a digestão anaeróbica ou biodigestão. O BSG apresenta uma dificuldade na fase de hidrólise, pois é um material lignocelulósico, o qual dificulta a sua degradação.⁵³ Os artigos analisados mostraram principalmente que há necessidade de pré-tratamentos físicos/mecânicos, químicos e enzimáticos. Nos pré-tratamentos mecânicos demonstrou-se um alto rendimento de gás, mas em compensação existe uma alta

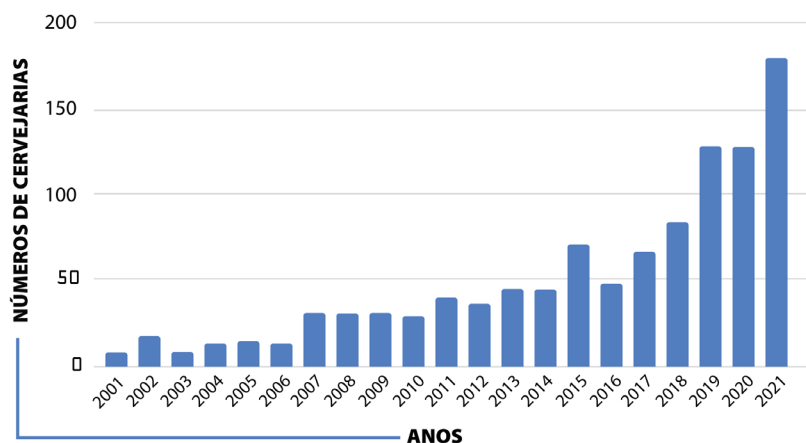


Figura 7. Número de publicações ao longo dos anos analisados

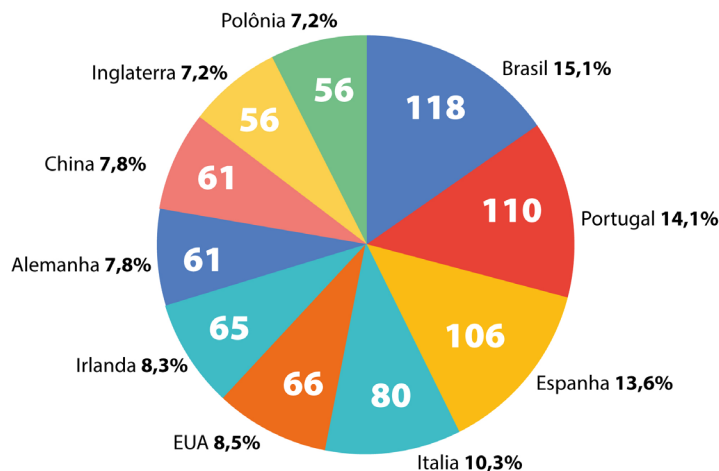


Figura 8. Número de publicações científicas dos 10 países que mais publicaram entre 2001 e 2021

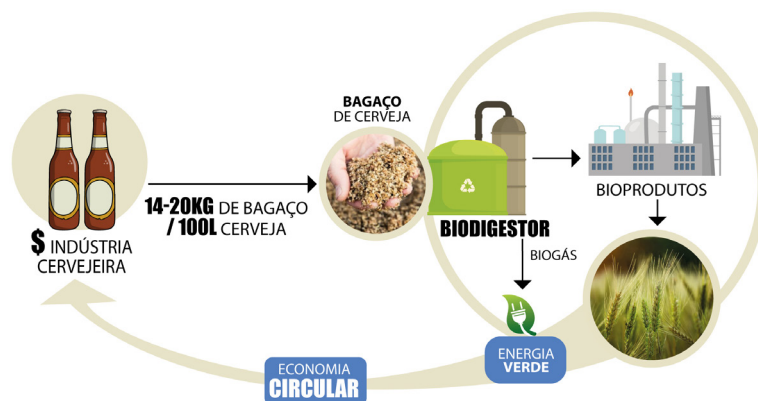


Figura 9. Fluxograma de economia circular de tecnologias viáveis. Fonte: (Autores, 2023)

entrada de energia para que esse pré-tratamento aconteça.^{54,55} Os pré-tratamentos químicos mais comuns utilizaram ácidos fortes (HCl, H₂SO₄, HNO₃); bicarbonatos ou carbonatos de sódio ou de potássio e NaOH, com o intuito de melhorar a cinética das reações e/ou degradar compostos do BSG.^{54,55} Já o pré-tratamento biológico utiliza-se de enzimas para degradar os materiais lignocelulósicos.⁵⁵ Além destes, também existe a possibilidade de pré-tratamento térmico, o qual coloca o material próximo a 100 °C ou em temperaturas mais baixas, para desintegrar a estrutura do BSG.⁵⁵ A literatura evidencia também outras alternativas que utilizaram menos etapas de pré-tratamentos, como a da co-digestão, que também é um processo de digestão anaeróbica, porém com dois substratos ou mais adicionados, sendo os mais citados o lodo de esgoto e o esterco de bovinos.^{55,56} Assim, essas publicações demonstraram que uma microcervejaria pode sim realizar a gestão dos seus resíduos, especialmente BSG, com baixo investimento e com benefício próprio, conforme observado no trabalho de Mainardis *et al.*⁵⁷

Tomando como base os resultados obtidos para os dois campos de pesquisa, “bagaço e compostagem” e “bagaço e biodigestão”, pode-se perceber que existem poucos documentos que abordaram ou estudaram o tema somente através de tecnologias de baixa complexidade (compostagem e biodigestão) com alto grau de maturidade tecnológica. Logo, a exploração comercial é bastante difundida, o que torna uma prática bastante usada rotineiramente, a qual não recebe uma atenção tão grande de pesquisas e novos desenvolvimentos, afinal, o custo é baixo e de baixa complexidade para implementar em processos produtivos apresentando resultados satisfatórios quanto a finalidade. Além disso, o fato das patentes que abordam compostagem e biodigestão relatarem a possibilidade de uso de biomassa orgânica, esse fato acaba inviabilizando a proteção de novas patentes que possam usar bagaço de malte como matéria-prima.

A Figura 9 apresenta a biodigestão/compostagem como tecnologias viáveis e que apresentam a maior prontidão e maturidade tecnológica, com base no levantamento de dados, como proposta de economia circular. Logo, os produtos gerados podem ser utilizados: biogás na cervejaria

(o qual será queimado nas caldeiras para a geração de calor e eletricidade) e os bioprodutos são aplicados ao cultivo de cevada (passará pelo processo de malteação) ou de lúpulo (passará pelo processo de peletização) e serão usados na produção da cerveja.

Portanto, o que mais se observou foram publicações de artigos relacionadas ao monitoramento da composição do bagaço e/ou blendas com outras biomassas e os produtos gerados, porém sem alterações na tecnologia em si. Portanto, as rotas selecionadas, tanto biodigestão quanto compostagem, podem ser empregadas a fim de aumentar o retorno financeiro à indústria cervejaria, reduzindo o passivo ambiental e agregando valor, uma vez que os produtos do bioprocessamento podem ser comercializados ou usados em lavouras de lúpulo e cevada, fornecedores de insumos para cervejarias, conforme Figura 10.

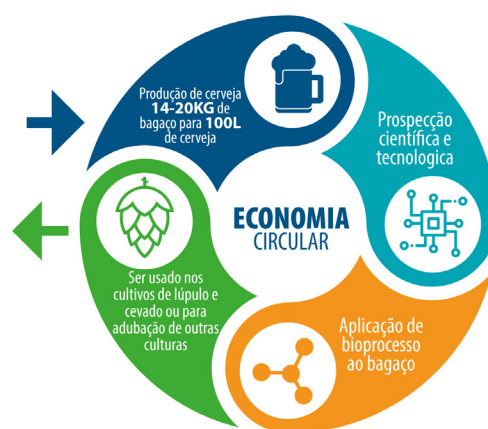


Figura 10. Proposta de economia circular por meio dos resultados obtidos pela prospecção tecnológica

4. Conclusão

As informações levantadas através da prospecção tecnológica e científica permitiram verificar a relevância da utilização do BSG como biomassa para fonte energética e também como para as tecnologias de compostagem e digestão anaeróbica.

Ao realizar a prospecção tecnológica a fim de identificar como o bagaço de malte está sendo pesquisado mundialmente, pode-se perceber que há uma tendência de aumento na proteção, destacando-se os períodos de 2007 a 2010 e 2014 a 2020. Também foi identificado que a China é o país dominante para os documentos patentários e que a área que mais concentra trabalhos está relacionada com a química alimentar em função de sua política de propriedade intelectual.

A análise científica utilizando as pesquisas realizadas na *Web of Science*, *Clarivate Analytics*, no período de 01/01/2001 a 31/12/2021 demonstrou que o BSG pode ser usado para diversas aplicações, destacando a nutrição animal, a produção de gás, a produção de enzimas, as melhorias energéticas e o uso como matéria-prima para os processos de compostagem e biodigestão. Esses bioprocessos permitem uma gestão racional do resíduo, minimizando os problemas ambientais e maximizando os ganhos das microcervejarias.

As diretrizes mundiais para a aplicação de uma economia circular e sustentável vêm aumentando. Para tanto, este trabalho evidencia algumas tendências para o BSG como uso na área energética e nos bioprocessos, os quais têm contribuído para um desenvolvimento sustentável, corroborando para que seja alcançada uma economia circular dentro do setor cervejeiro.

No que tange ao Brasil, observa-se que não é o país que mais produz patentes sobre o tema, porém com o crescimento de cervejarias de portes variados, políticas de resíduos sólidos e necessidade de adequação aos descartes, se observa uma grande preocupação em buscar alternativas, afinal a grande maioria dos pequenos e médios estabelecimentos descartam, em aterros sanitários, essa biomassa residual a qual gera custo para a produção. Além disso, a política de propriedade intelectual do Brasil tem seus critérios de proteção que inviabilizam o desenvolvimento de tecnologias relacionadas a bagaço de malte, biodigestão e compostagem pelo requisito de anterioridade. Porém, pode-se observar também que fomentos voltados para biomassa e geração de energia estão sendo empregados na forma de editais de pesquisa, resultando em políticas públicas e publicações (o Brasil é o país que mais publica artigos sobre bagaço de malte) voltadas para o desenvolvimento e crescimento da economia circular nesses processos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF), Decanato de Pesquisa e Inovação (DPI/UnB), Decanato de Pós-Graduação (DPG/UnB) e Instituto de Química da Universidade de Brasília (IQ/UnB).

Referências Bibliográficas

1. Chetrariu, A.; Dabija, A.; Brewer's Spent Grains: Possibilities of Valorization, a Review. *Applied Sciences* **2020**, *10*, 5619. [Crossref]
2. Sehnem, S.; Pereira, S.C.F.; Rumo à Economia Circular: Sinergia Existente entre as Definições Conceituais Correlatas e Apropriação para a Literatura Brasileira. *Revista Eletrônica de Ciência Administrativa* **2019**, *18*, 35. [Crossref]
3. Hamam, M.; Chinnici, G.; Di Vita, G.; Pappalardo, G.; Pecorino, B.; Maesano, G.; D'Amico, M.; Circular economy models in agro-food systems: A review. *Sustainability* **2021**, *13*, 1. [Crossref]
4. Tavares, A. S.; Borschiver, S.; Elaboração de Roadmap Tecnológico e de Modelo de Negócios de Economia Circular. *Cadernos de Prospecção* **2021**, *14*, 810. [Crossref]
5. Oliveira, F.R.; França, S.L.B.; Rangel, L.A.D.; Princípios de economia circular para o desenvolvimento de produtos em arranjos produtivos locais. *Interações* **2019**, *20*, 1179. [Crossref]
6. Lima, L. A.; Fernandes, T. L.; Silva, M. L.; Tenório, L. X. S.; Evaristo, R. B. W., Martin, A. R.; Ghesti, G. F.; Sinopse do Cenário Cervejeiro: O Advento da Produção e o Mercado na Região Centro Oeste. *Cadernos de Prospecção* **2017**, *4*, 650. [Crossref]
7. CERVBRAZIL, Anuário **2016**. Disponível em: <http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/anuario/>. Acesso em: 25 setembro 2023 .
8. Brasil; Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Anuário da Cerveja 2021, MAPA. Brasília, 2022.
9. Mussatto, S. I.; Dragone, G.; Roberto, I. C.; Brewer's spent grain: generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science* **2006**, *43*, 1. [Crossref]
10. Ghesti, G. F.; Müller, C. V.; Parachin, N. S.; Barros, C. R.; Pinheiro, L. G. S. *Análise Sensorial para Cervejas*, 1a.ed., Universidade de Brasília: Brasília, 2017.
11. Mathias, T. R. S.; Mello, P. P. M.; Sérvulo, E. F. C.; Solid wastes in brewing process: A review. *Journal of Brewing and Distilling* **2014**, *5*, 1. [Crossref]
12. Färçaş, A. C.; Socaci, S. A.; Mudura, E.; Dulf, F. V.; Vodnar, D. C.; Tofană, M.; Salanță, L. C.; Em *Brewing Technology*; Kanauchi, M., eds.; IntechOpen: Londons, 2017, cap. 7.
13. Tombini, C.; Godoy, J.S.; Mello, J.M.M.; Machado Junior, F.R.S.; Lajús, C.R.; Costella, M.F.; Dalcanton, F. Análise da gestão do resíduo bagaço de malte em cervejarias da região oeste e extremo oeste do estado de Santa Catarina. *Conjecturas* **2022**, *22*, 560. [Crossref]
14. Araújo, C. C. O.; Cerqueira, G. S.; Carneiro, C. E. A.; Prospecção Tecnológica para Processos de Compostagem de Resíduos Orgânicos. *Cadernos de Prospecção* **2020**, *13*, 1177. [Crossref]
15. Gonçalves, T.; Barroso, A.; *Anais do XI Simprod*, Sergipe, Brasil, 2018.
16. Mota, J.; Almeida, M.; Alencar, V.; Curi, W.; *Anais do I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo*, São Paulo, Brasil, 2009.
17. Marcusso, E. F.; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2015.

18. Bianco, A.; Budroni, M.; Zara, S.; Mannazzu, I.; Fancello, F.; Zara, G.; The role of microorganisms on biotransformation of brewers' spent grain. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2020**, *104*, 8661. [[Crossref](#)]
19. Questel. Orbit - banco de dados. Disponível em: <<https://www.orbit.com>>. Acesso em: 01 novembro 2022.
20. Clarivate; Web of Science- Banco de dados. Disponível em: <<https://clarivate.com>> Acesso em: 07 abril 2021.
21. Mariano, A. M.; Santos, M. R.; *Anais do XXVI Congresso Internacional de la Academia Europea de Dirección y Economía de la Empresa (AEDEM)*, Região da Calábria, Itália, 2017.
22. Evaristo, R. B. W.; Costa, A. A.; Dantas, P. G. B.; Ghesti, G. F.; Biorefinery development based on brewers' spent grain (BSG) conversion: a forecasting technology study in the Brazilian scenario. *Biomass* **2023**, *3*, 217. [[Crossref](#)]
23. Brasil, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 25 setembro 2023.
24. Lynch, K. M.; Steffen, E. J.; Arendt, E. K.; Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. *Journal of the Institute of Brewing* **2016**, *122*, 553. [[Crossref](#)]
25. Faccenda, A.; Ambom, M. A.; Castagnara, D. D.; Avila, A. S.; Fernandes, T.; Eckstein, E. I.; Anshau, F. A.; Schneider, C. R.; Use of dried brewers' grains instead of soybean meal to feed lactating cows. *Revista Brasileira de Zootecnia* **2017**, *46*, 39. [[Crossref](#)]
26. Gebremedhn, B.; Niguse, M.; Hagos, B.; Tesfamariam, T.; Kidane, T.; Berhe, A.; Gebresilassie, L.; Gebreegziabher, L.; Gebremariam, T.; Gebremeskel, Y.; Effects of Dietary Brewery Spent Grain Inclusion on Egg Laying Performance and Quality Parameters of Bovans Brown Chickens. *Brazilian Journal of Poultry Science* **2019**, *21*, 1. [[Crossref](#)]
27. Ikram, S.; Huang, L. Y.; Zhang, H.; Wang, J.; Yin, M.; Composition and Nutrient Value Proposition of Brewers Spent Grain. *Journal of Food Science* **2017**, *82*, 2232. [[Crossref](#)]
28. Balogun, A. O.; Sotoudehnikarani, F.; McDonald, A. G.; Thermo-kinetic, spectroscopic study of brewer's spent grains and characterisation of their pyrolysis products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2017**, *127*, 8. [[Crossref](#)]
29. Borel, L. D. M. S.; Lira, T.S.; Ribeiro, J. A.; Ataíde, C. H.; Barrozo, M. A. S.; Pyrolysis of brewer's spent grain: Kinetic study and products identification. *Industrial Crops & Products* **2018**, *121*, 388. [[Crossref](#)]
30. Mahmood, A. S. N.; Brammer, J. G.; Hornung, A.; Steele, A.; Poulston, S.; The intermediate pyrolysis and catalytic steam reforming of Brewers spent grain. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2013**, *103*, 328. [[Crossref](#)]
31. Plaza, P. E.; Gallego-Morales, L. J.; Peñuela-Vásquez, M.; Lucas, S.; Garcia-Cubero, M. T.; Coca, M.; Biobutanol production from brewer's spent grain hydrolysates by *Clostridium beijerinckii*. *Bioresource Technology* **2017**, *244*, 166. [[Crossref](#)]
32. Rojas-Chamorro, J. A.; Cara, C.; Romero, I.; Ruiz, E.; Romero-García, J. M.; Mussatto, S. I.; Castro, E.; Ethanol Production from Brewers' Spent Grain Pretreated by Dilute Phosphoric Acid. *Energy & Fuels* **2018**, *32*, 5226. [[Crossref](#)]
33. Wilkinson, S.; Smart, K. A.; Cook, D. J.; Bioethanol Production from Brewers Spent Grains Using a Fungal Consolidated Bioprocessing (CBP) Approach. *Bioenergy Research* **2017**, *10*, 146. [[Crossref](#)]
34. Hassan, S. S.; Tiwari, B. K.; Williams, G. A.; Jaiswal, A. K.; Bioprocessing of brewers' spent grain for production of xylanopectinolytic enzymes by *Mucor* sp. *Bioresource Technology Reports* **2020**, *9*, 100371. [[Crossref](#)]
35. Llimós, J.; Martínez-Avila, O.; Marti, E.; Corchado-Lopo, C.; Llenas, L.; Gea, T.; Ponsá, S.; Brewer's spent grain biotransformation to produce lignocellulolytic enzymes and polyhydroxyalkanoates in a two-stage valorization scheme. *Biomass Conversion and Biorefinery* **2020**, *12*, 3921. [[Crossref](#)]
36. Severini, C.; Azzollini, D.; Joupila, K.; Jussi, L.; Derossi, A.; De Pilli, T.; Effect of enzymatic and technological treatments on solubilisation of arabinoxylans from brewer's spent grain. *Journal of Cereal Science* **2015**, *65*, 162. [[Crossref](#)]
37. Tišma, M.; Jurić, A.; Bucić-Kojić, A.; Panjičko, M.; Planinić, M.; Biovalorization of brewers' spent grain for the production of laccase and polyphenols. *Journal of the Institute of Brewing* **2018**, *124*, 182. [[Crossref](#)]
38. Mishra, P. K.; Gregor, T.; Wimmer, R.; Utilising Brewer's Spent Grain as a Source of Cellulose Nanofibres Following Separation of Protein-based Biomass. *Bioresources* **2017**, *12*, 107. [[Crossref](#)]
39. Santos, D. M.; Bukzem, A. L.; Ascheri, D. P. R.; Signini, R.; Aquino, G. L. B.; Microwave-assisted carboxymethylation of cellulose extractes from brewer's spent grain. *Carbohydrate Polymers* **2015**, *131*, 125. [[Crossref](#)]
40. Fontana, K. B.; Lenzi, G. G.; Watanabe, E. R. L. R.; Lenzi, E. K.; Pietrobelli, J. A. M. T.; Chaves, E. S.; Biosorption and Diffusion Modeling of Pb(II) by Malt Bagasse. *International Journal of Chemical Engineering* **2016**, *1*. [[Crossref](#)]
41. Gonçalves, G. C.; Nakamura, P. K.; Furtado, D. F.; Veit, M. T.; Utilization of brewery residues to produce granular activated carbon and bio-oil. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *168*, 908. [[Crossref](#)]
42. Wakizaka, H.; Miyake, H.; Kawahara, Y.; Utilization of beer lees waste for the production of activated carbons: The influence of protein fractions on the activation reaction and surface properties. *Sustainable Materials and Technologies* **2016**, *8*, 1. [[Crossref](#)]
43. Formela, K.; Hejna, A.; Zedler, L.; Przybysz, M.; Ryl, J.; Saeb, M. R.; Piszczak, L.; Structural, thermal and physico-mechanical properties of polyurethane/brewers' spent grain composite foams modified with ground tire rubber. *Industrial Crops and Products* **2017**, *108*, 844. [[Crossref](#)]
44. Mello, L. R. P. F.; Mali, S.; Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. *Industrial Crops and Products* **2014**, *55*, 187. [[Crossref](#)]
45. Zedler, L.; Colom, X.; Cañavale, J.; Saeb, M. R.; Haponiuk, J. T.; Formela, K.; Investigating the Impact of Curing System on Structure-Property Relationship of Natural Rubber Modified with Brewery By-Product and Ground Tire Rubber. *Polymers* **2020**, *12*, 545. [[Crossref](#)]
46. INPI – Instituto Nacional da Propriedade Intelectual. Busca por Patentes. Disponível em: <<https://busca.inpi.gov.br/pePI/>>.

47. Ortiz, I.; Torreiro, Y.; Molina, G.; Maroño, M.; Sánchez, J. M.; A Feasible Application of Circular Economy: Spent Grain Energy Recovery in the Beer Industry. *Waste and Biomass Valorization* **2019**, *10*, 3809. [Crossref]
48. Gómez, A.; Zubizarreta, J.; Rodrigues, M.; Dopazo, C.; Fueyo, N.; An estimation of the energy potential of agro-industrial residues in Spain. *Resources, Conservation and Recycling* **2010**, *54*, 972. [Crossref]
49. Europe Economics; The Contribution made by Beer to the European Economy, 2020. <<https://brewersofeurope.org/uploads/mycms-files/documents/publications/2020/contribution-made-by-beer-to-EU-economy-2020.pdf>>. Acesso em: 16 dezembro 2022.
50. Assandri, D.; Pampuro, N.; Zara, G.; Cavallo, E.; Budroni, M.; Suitability of Composting Process for the Disposal and Valorization of Brewer's Spent Grain. *Agriculture* **2020**, *11*, 2. [Crossref]
51. Saba, S.; Zara, G.; Bianco, A.; Garau, M.; Bononi, M.; Deroma, M.; Pais, A.; Budroni, M.; Comparative analysis of vermicompost quality produced from brewers' spent grain and cow manure by the red earthworm *Eisenia fetida*. *Bioresource Technology* **2019**, *293*, 122019. [Crossref]
52. Kunz, A.; Steinmetz, R. L. R.; Amara, A. C.; *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*, 1a. ed., Concórdia: Brasil, 2019.
53. Palaniveloo, K.; Amran, M. A.; Norhashim, N. A.; Mohamad-Fauzi, N.; Peng-Hui, F.; Hui-Wen, L.; Kai-Lin, Y.; Jiale, L.; Chian-Yee, M. G.; Jing-Yi, L.; Gunasekaran, B.; Razak, S. A.; Food Waste Composting and Microbial Community Structure Profiling. *Processes* **2020**, *8*, 723. [Crossref]
54. Martín-García, B.; Tylewicz, U.; Verardo, V.; Pasini, F.; Gómez-Caravaca, A. M.; Caboni, M. F.; Dalla Rosa, M.; Pulsed electric field (PEF) as pre-treatment to improve the phenolic compounds recovery from brewers' spent grains. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* **2020**, *64*, 102402. [Crossref]
55. Gunes, B.; Stokes, J.; Davis, P.; Connolly, C.; Lawler, J.; Pre-treatments to enhance biogas yield and quality from anaerobic digestion of whiskey distillery and brewery wastes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2019**, *113*, 109281. [Crossref]
56. Raud, M.; Tutt, M.; Olt, J.; Kikas, T.; Dependence of the hydrolysis efficiency on the lignin content in lignocellulosic material. *International Journal of Hydrogen Energy* **2016**, *41*, 16338. [Crossref]
57. Mainardis, M.; Flaibani, S.; Mazzolini, F.; Peressotti, A.; Goi, D.; Techno-economic analysis of anaerobic digestion implementation in small Italian breweries and evaluation of biochar and granular activated carbon addition effect on methane yield. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2019**, *7*, 103184. [Crossref]