



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## UMA REVISÃO SOBRE O BAGAÇO DE MALTE E A SUA APLICAÇÃO COMO SUBSTRATO E COSUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS POR MEIO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.9.26.XII-009>

Paula Polastri (\*), Juliane Patrícia de Oliveira, Vanessa Campagnoli Ursulino, Jocilene Louize Bach Fafarão, Daniel Tait Vareschini

\* Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química. Secretaria das Cidades do Estado do Paraná, Diretoria de Edificações Públicas, Coordenação de Fiscalização de Obras e Edificações Públicas, Curitiba, Paraná, Brasil, [paula.polastri@secid.pr.gov.br](mailto:paula.polastri@secid.pr.gov.br)

### RESUMO

A crescente geração de resíduos sólidos na indústria cervejeira, especialmente o bagaço de malte (BDM), demanda alternativas sustentáveis para sua destinação. Este resíduo lignocelulósico representa cerca de 85% dos resíduos sólidos do processo cervejeiro, com geração estimada em 2,95 milhões de toneladas no Brasil em 2024. Este estudo teve por objetivo realizar uma revisão da literatura para identificar, sintetizar e analisar criticamente a produção científica existente sobre a mono e a codigestão anaeróbia (monoDA e coDA) por meio de ensaios de potencial bioquímico de metano (em inglês, *biochemical methane potential* - BMP), utilizando como substrato o BDM resultante do processo de produção de cerveja. A metodologia compreendeu em uma revisão bibliográfica foi realizada nas bases de dados *ScienceDirect* e *Scopus*, considerando publicações entre 2015 e 2025, limitando-se a artigos científicos revisados por pares. Foram utilizados descritores em inglês como "*brewery spent grain*", "*biochemical methane potential*", "*anaerobic mono-digestion*" e "*anaerobic co-digestion*", combinados com operadores booleanos. Foram excluídos artigos de revisão e aqueles que não aplicavam ensaios de BMP. O BDM apresenta características favoráveis para a digestão anaeróbia, com destaque para o alto teor de sólidos totais voláteis (STV), indicando alta biodegradabilidade. Ensaios de BMP mostraram rendimentos de metano variando de 88 a 429 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup>, considerando a monoDA e a coDA com outros substratos. A codigestão com outros resíduos melhora o equilíbrio nutricional e a produção de metano. Conclui-se que o BDM é um mono e cosubstrato promissor para digestão anaeróbia, contribuindo para a gestão sustentável de resíduos e geração de energia renovável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Codigestão anaeróbia, Cosubstrato, Metano, Potencial bioquímico de metano, Resíduos de cervejaria.

### ABSTRACT

The increasing generation of solid waste in the brewing industry, especially brewery spent grains (BSG), demands sustainable alternatives for its disposal. This lignocellulosic residue represents approximately 85% of the solid waste from the brewing process, with an estimated generation of 2.95 million tons in Brazil in 2024. This study aimed to conduct a literature review to identify, synthesize, and critically analyze the existing scientific production on anaerobic mono- and co-digestion (monoDA and coDA) through biochemical methane potential (BMP) assays, using BSG from the beer production process as a substrate. The methodology comprised a bibliographic review conducted in the *ScienceDirect* and *Scopus* databases, considering publications between 2015 and 2025, limited to peer-reviewed scientific articles. English descriptors such as "*brewery spent grain*," "*biochemical methane potential*," "*anaerobic monodigestion*," and "*anaerobic codigestion*" were used, combined with boolean operators. Review articles and those that did not apply BMP assays were excluded. BSG presents favorable characteristics for anaerobic digestion, notably its high volatile total solids (TVS) content, indicating high biodegradability. BMP assays showed methane yields ranging from 88 to 429 NmL<sub>CH<sub>4</sub></sub> g<sub>TVS</sub><sup>-1</sup>, considering mono- and co-digestion with other substrates. Co-digestion with other residues improves nutritional balance and methane production. It is concluded that BSG is a promising mono- and co-substrate for anaerobic digestion, contributing to sustainable waste management and renewable energy generation.

**KEY WORDS:** Anaerobic co-digestion, Co-substrate, Methane, Biochemical methane potential, Brewery waste.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## INTRODUÇÃO

A crescente demanda global de energia, mudanças climáticas, insegurança energética e esgotamento de recursos naturais não renováveis, como os combustíveis fósseis, estão impulsionando o desenvolvimento de energias renováveis. Frente às exigências ambientais cada vez mais rígidas, a valorização de resíduos sólidos orgânicos por meio do aproveitamento energético tem sido crescentemente aplicada, pois contribui na composição da matriz energética no âmbito de energias renováveis e na destinação final ambientalmente adequada destes resíduos. Assim como na melhoria do gerenciamento de resíduos sólidos nos processos produtivos com a implantação de uma tecnologia *waste-to-energy* (sigla W2E, em português, resíduos para energia) visando uma economia circular (Hoang *et al.*, 2022).

Neste cenário, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores de cerveja do mundo, atrás apenas da China e dos Estados Unidos. Em 2024, foram produzidos 14,74 bilhões de litros de cerveja (Barthhaas, 2025). No entanto, associado à produção industrial, os resíduos sólidos de cervejarias estão continuamente a crescer. O bagaço de malte (BDM), um resíduo sólido lignocelulósico, representa 85% do total dos resíduos sólidos gerados no processo, sendo que para cada 100 litros de cerveja produzidos são gerados aproximadamente 20 kg de BDM (Mussatto, 2014). Assim, considerando a produção de cerveja no Brasil em 2024, a geração de BDM é estimada em 2,95 milhões de toneladas (base úmida). Este resíduo sólido, normalmente é destinado à alimentação animal devido ao seu alto teor de proteínas (Mussatto, 2014). Porém, também pode ser destinado para compostagem, pode ser seco e incinerado para recuperação energética, dentre outras aplicações (Bachmann; Calvete; Féris, 2022).

Devido a ampla geração de resíduos na indústria cervejeira, tecnologias de transformação W2E tem se tornado uma opção viável para o tratamento de resíduos sólidos e geração de energia (Hoang *et al.*, 2022). Entre elas, a conversão de resíduos orgânicos em biogás pela digestão anaeróbia (DA). A DA pode ser aplicada a uma ampla variedade de substratos orgânicos, incluindo resíduos sólidos e efluentes líquidos orgânicos. Logo, esta tecnologia de tratamento, possibilita de forma simultânea a destinação final ambiental adequada e oferece maior potencial de valorização para os resíduos, assim como a produção de energia renovável e o menor consumo de combustíveis fósseis (Hoang *et al.*, 2022).

Adicionalmente, a codigestão anaeróbia (coDA) pode oferecer uma oportunidade para superar as desvantagens da monodigestão, pois neste processo, dois ou mais substratos são digeridos simultaneamente proporcionando um balanço nutricional mais consistente para manutenção da estabilidade no processo de DA (Karki *et al.*, 2021). A coDA além de aumentar a estabilidade microbiana, possibilita maior solubilidade de fibras e compostos recalcitrantes, a capacidade de tamponamento, a biodegradabilidade, assim como promover efeitos sinérgicos nutricionais, corrigindo desequilíbrios na relação carbono/nitrogênio (C/N), melhora o pH e dilui agentes inibidores (Karki *et al.*, 2021; Mata Alvarez *et al.*, 2014).

O BDM tem se apresentado como um cosubstrato adequado para DA, e tem sido utilizado na coDA com dejetos bovino e suíno (Poulsen; Adelard; Wells, 2017), soro de queijo ácido e lodo de esgoto (Szaja; Montusiewicz, 2019), resíduos sólidos da produção de gin seco (Montes; Rico, 2021), lodo de esgoto (Szaja *et al.*, 2021), águas residuárias de cervejaria (Sganzerla *et al.*, 2023) e resíduo ruminal bovino (Polastri *et al.*, 2024).

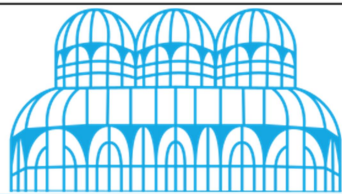
Portanto, a aplicação do BDM como cosubstrato na DA pode contribuir para a estabilidade do processo, melhoria no equilíbrio de nutrientes e produção de metano (Szaja; Montusiewicz, 2019). A ampla disponibilidade durante todo o ano e a sua composição química, uma possível alternativa à destinação do BDM é a sua reinserção em um novo processo que permita a recuperação de energia por meio da DA, seja como mono ou cosubstrato.

## OBJETIVO

Este estudo teve por objetivo realizar uma revisão da literatura para identificar, sintetizar e analisar criticamente a produção científica existente sobre a mono e a codigestão anaeróbia (monoDA e coDA) por meio de ensaio de potencial bioquímico de metano, utilizando como substrato o bagaço de malte (BDM) resultante do processo de produção de cerveja.

## METODOLOGIA

A revisão bibliográfica utilizou as bases de dados *ScienceDirect* e *Scopus*, considerando tanto o contexto global quanto o brasileiro. O período considerado compreendeu publicações entre 2015 e 2025, limitando-se a artigos científicos e de revisão, revisados por pares, usando descritores sobre a temática em estudo e operadores booleanos pertinentes (Quadro 1).



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



**Quadro 1 – Estratégia de busca aplicada na revisão sistemática da literatura**

Período	Termos de busca	Base de dados
2015 - 2025	<i>TITLE-ABS-KEY (“brewery spent grain” OR “brewer’s spent grains” OR “malt waste” OR “malte bagasse”) AND (“biochemical methane potential” OR BMP) AND (“anaerobic mono-digestion” OR “anaerobic co-digestion”)</i> <i>AND PUBYEAR &gt; 2015 AND PUBYEAR &lt; 2026</i>	Scopus
2015 - 2025	<i>Title, abstract or author-specified keywords = (brewery spent grain OR brewer’s spent grains OR malt waste OR malte bagasse) AND (biochemical methane potential OR BMP) AND (anaerobic mono-digestion OR anaerobic co-digestion)</i>	ScienceDirect

Nota: *brewery spent grain*, *brewer’s spent grains*, *malt waste*, *malte bagasse* – bagaço de malte; *biochemical methane potential*, BMP – potencial bioquímico de metano; *anaerobic mono-digestion* – monodigestão anaeróbia; *anaerobic co-digestion* – codigestão anaeróbia; *TITLE-ABS-KEY* - título, resumo e palavras-chave; *OR* - ou; *AND* - e; *PUBYEAR* - ano de publicação; *Title, abstract or author-specified keywords* - título, resumo e palavras-chave.

A busca avançada nas bases foi realizada, restrita a artigos revisados por pares e publicados nos últimos 10 anos, com descritores sobre a temática da pesquisa e termos sinônimos em inglês, com a aplicação de operadores booleanos “E” e “OU” (Quadro 1). O resíduo sólido orgânico do processo cervejeiro, bagaço de malte (BDM), foi selecionado, por ser o objeto de estudo, e por ser gerado em grande volume na produção de cerveja e por diversos trabalhos de pesquisa terem sido realizados para viabilizar sua aplicação como mono e cosubstrato na digestão anaeróbia para produção de biogás.

A partir dos resultados obtidos, os seguintes critérios de exclusão foram aplicados: artigos que são revisões de literatura, e se a aplicação do resíduo não for em ensaios em batelada de potencial bioquímico de metano (PBM) (em inglês, *biochemical methane potential* - BMP), e artigos de ensaios BMP que não fossem realizados em temperatura mesofílica.

## RESULTADOS

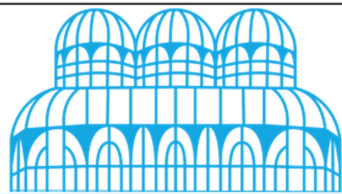
### Geração do bagaço de malte na indústria cervejeira

O processo de fabricação da cerveja utiliza cevada maltada e/ou cereais, grãos não maltados e/ou xaropes de açúcar/milho (adjuntos), lúpulo, água e levedura para produzir cerveja, assim como a terra diatomácea para a filtração da cerveja (Olajire, 2012). No entanto, nas cervejarias artesanais, utilizam a cevada maltada como principal matéria-prima, não havendo a presença de adjuntos.

O processo de produção de cerveja é um processo fermentativo realizado por microrganismos, especificamente, leveduras, consistindo em quatro etapas principais: moagem, mosturação, fervura e fermentação. Os grãos de malte de cevada são moídos na etapa de moagem para expor as enzimas e melhorar a superfície de contato para as etapas subsequentes. O grão de malte de cevada moído é misturado com água e aquecido gradualmente sob condições de pH e temperatura pré-determinadas. O objetivo da mosturação é promover a hidrólise do malte em açúcares fermentáveis por enzimas específicas, como  $\alpha$ -amilase e  $\beta$ -amilase.

Em seguida, a fase líquida (mosto) é separada dos grãos de malte utilizados e, posteriormente, enviada para a etapa de fervura. Os principais objetivos da fervura são a evaporação de substâncias voláteis com sabor indesejável, a esterilização do mosto, a inativação enzimática e a formação de substâncias corantes e aromatizantes. Por fim, a etapa de fermentação é onde os açúcares são convertidos pela levedura em etanol, CO<sub>2</sub> e outros subprodutos minoritários. Após a fermentação, a cerveja passa pelas etapas de maturação e clarificação para estar pronta para o consumo (Bachmann; Calvete; Féris, 2022).

Cerca de 85% dos resíduos sólidos gerados no processo cervejeiro têm origem na etapa de mosturação, e consistem principalmente em grãos residuais de malte, denominados bagaço de malte (BDM), os quais representam a fração sólida após a filtração do mosto (Mussatto; Dragone; Roberto, 2006). Portanto, para cada 100 litros de cerveja produzidos são gerados aproximadamente 20 kg de BDM (20 kg BDM por hL de cerveja produzida) (Mussatto, 2014; Xiros; Christakopoulos, 2012).



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



### Características do bagaço de malte aplicado na digestão anaeróbia

A composição química do BDM varia de acordo com variedade de cevada, tempo de colheita, condições de maltagem e trituração, bem como quanto a qualidade e tipo de adjuntos adicionados no processo de fabricação de cerveja. Porém, independentemente dessas variações, o BDM consiste basicamente em cascas de grãos de cevada, sendo constituído principalmente de carboidratos como celulose (glicose), hemicelulose (xilanas e arabinosilanas) e lignina. Também é constituído de quantidades significativas de proteínas e lipídeos, bem como amido residual do endosperma, minerais e vitaminas também podem ser encontrados (Mussatto, 2014).

A Tabela 1 apresenta a composição físico-química, elementar e bioquímica do BDM, conforme relatado por diversos autores em estudos de digestão anaeróbia.

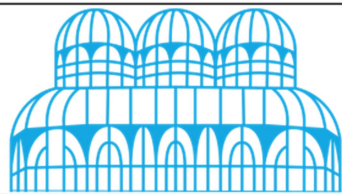
**Tabela 1 - Características do BDM como substrato na digestão anaeróbia, segundo diversas referências da literatura**

Parâmetro	Vitanza <i>et al.</i> (2016)	Diego-Díaz <i>et al.</i> (2017)	Bougrier <i>et al.</i> (2018)	Mainardis <i>et al.</i> (2019)	Montes e Rico (2021)	Sganzerla <i>et al.</i> (2023)	Polastri <i>et al.</i> (2024)
ST (%)	18,7	25,4	22,9-26,2	15,9-23,0	25,2	-	22,3-26,1
STV (%)	18,2	25,0	21,9-24,9	15,5-18,1	24,2	-	21,5-25,1
STV (%ST)	97,5	98,4	95,0-96,6	78,7-97,5	96,0	95,96	96,0
STF (%ST)	2,5	1,8	3,4-5,0	2,5-21,3	4,0	-	4,0
Umidade (%)	81,3	74,6	73,8-77,1	77,0-84,1	74,8	-	73,9-77,8
Densidade (g m <sup>-3</sup> )	-	-	568-872	-	-	-	-
pH (-)	-	5,4	-	5,8	-	6,25	5,5-5,6
AT (gCaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	-	0,5	-	0,3	-	0,15	0,02-0,03
AGV (gCH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-	-	0,10-0,13
DQOt (gO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	-	68,8	292,9- 356 <sup>(a)</sup>	-	-	6,5-5	-
DQOs (gO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	-	32,5	-	41,5	-	6,49	1,6-1,7
NTK (gN kg <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	9,0	-	3,8-4,1 <sup>(b)</sup>
NT (gN kg <sup>-1</sup> )	-	-	9,7-12,4	-	-	-	-
NAT (mgNH <sub>4</sub> -N L <sup>-1</sup> )	-	-	-	78	-	0,007	28,9-29,7
C (%ST)	-	-	-	45,6-47,5	-	-	45,7-47,1
H (%ST)	-	-	-	6,5-6,7	-	-	6,1
N (%ST)	-	-	-	2,4-2,9	-	-	3,6-4,0
S (%ST)	-	-	-	< 1	-	-	0,15-0,16
O (%ST)	-	-	-	-	-	-	38,8-43,6
C/N (-)	12,4	-	-	16,4-19,0	-	-	11,7-12,5
Carboidratos (%ST)	49,2	-	52,7-61,7	-	-	-	62,4-66,5
Proteínas (%ST)	25,0	-	24-25	-	-	-	23,7-25,8
Lipídeos (%ST)	11,0	-	9-12	-	-	-	7,0-9,9
Celulose (%ST)	-	-	17,4-23,8	-	-	-	16,5-17,0
Hemicelulose (%ST)	-	-	29,9-38,7	-	-	-	34,8-36,0
Lignina (%ST)	12,3	-	5,1-11,9	-	-	-	9,9-10,3

Nota: (-) não reportado pelos autores; ST: sólidos totais; STV: sólidos totais voláteis; STF: sólidos totais fixos; AT: alcalinidade total; AGV: ácidos graxos voláteis; DQOt : demanda química de oxigênio total; DQOs: demanda química de oxigênio solúvel; NTK: nitrogênio total Kjeldahl; NT: nitrogênio total; NAT: nitrogênio amoniacal; C/N: relação carbono/nitrogênio; C: carbono; H: hidrogênio; N: nitrogênio; S: enxofre; O: oxigênio; (b) dado reportado em g kg<sup>-1</sup>; (a) dado reportado em %ST.

A relação STV/ST obtida para todos os estudos analisados, indicou boa biodegradabilidade, pois, de acordo com Pavan *et al.* (2000), relações iguais ou acima de 0,7, indicam alta biodegradabilidade dos substratos.

Os valores de pH do BDM relatados, apresentam-se abaixo da faixa ideal de pH entre 6,6 e 7,4 indicada para o crescimento das bactérias metanogênicas (Chernicharo, 2016). Embora o pH ótimo da metanogênese seja em torno de pH 7,0 (Ward *et al.*, 2008), é possível conseguir estabilidade, na formação de metano, em uma faixa mais ampla de pH, entre 6,5 e 8,2 (Mao *et al.*, 2015), ou até mesmo entre 6,0 e 8,0 (Chernicharo, 2016). Logo, mesmo que o BDM apresente baixo pH, a codigestão com um substrato adequado, e a aplicação de um inóculo com valor de pH ideal, podem favorecer o tamponamento do sistema para níveis desejáveis no processo de digestão anaeróbia. Para todos os



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



estudos analisados, eles apresentaram baixa alcalinidade para o BDM, que segundo Mainardis *et al.* (2019), indicam uma possível tendência de acidificação nos ensaios BMP se uma baixa relação RIS for adotada.

Para a relação C/N, valores superiores foram relatados por Mainardis *et al.* (2019) (16,40-19,00). A relação C/N ideal para o crescimento das bactérias metanogênicas encontra-se entre 20 e 30, de forma que, uma relação C/N inadequada, pode causar acúmulo AGV e alta liberação de amônia (NH<sub>3</sub>) (Parkin; Owen, 1986). Os substratos caracterizados pela alta relação C/N tem baixa capacidade tampão e produz grandes quantidades de AGV durante o processo de DA (Hagos *et al.*, 2017). Ainda, a falta de nitrogênio, leva à rápida degradação deste pelos microrganismos, resultando em menor produção de biogás (Deublein; Steinhauser, 2008; Mao *et al.*, 2015).

Por outro lado, na degradação de substratos com baixa relação C/N, a concentração de amônia e o pH aumentam durante o processo de DA, podendo inibir o crescimento microbiano (Hagos *et al.*, 2017). Assim a inibição por amônia e o acúmulo de AGV podem ser evitados otimizando a relação C/N no processo DA (Mao *et al.*, 2015). Considerando a relação C/N ótima, para relações C/N baixas, como no caso da obtida para o BDM, é indicado a adoção de RIS mais altas em ensaios de BMP (Mainardis *et al.*, 2019), assim como é indicada a codigestão (Mata-Alvarez *et al.*, 2014).

Na composição bioquímica, o teor de proteínas foi similar em todos os estudos, havendo variação para o teor de carboidratos e lipídeos. De acordo com a composição do BDM, os produtos intermediários da digestão anaeróbia podem limitar ou inibir a produção de metano, como na degradação de lipídios, que pode levar à formação de ácidos graxos de cadeia longa (AGCL) (Bougrier *et al.*, 2018). Ainda, a conversão de proteínas e lipídeos é mais lenta, quando comparada aos carboidratos, podendo ocorrerem em dias ou até semanas (Deublein; Steinhauser, 2008; VDI, 2016).

A composição de fibras, celulose, hemicelulose e lignina, foi superior a 60%ST para os estudos analisados. O principal composto fibroso do BDM foi a hemicelulose, seguida pela celulose. Em relação ao teor de lignina, foi relatado por Bougrier *et al.* (2018), o menor teor de lignina (5,1%ST).

### **Aplicação do bagaço de malte como substrato e cosubstrato na digestão anaeróbia**

A biodegradabilidade de substratos orgânicos, objetivando a produção metano, tem sido avaliada por meio do ensaio de potencial bioquímico de metano (PBM) (em inglês, *biochemical methane potential* - BMP) (Angelidaki *et al.*, 2009). Este ensaio, busca determinar a biodegradabilidade de resíduos sólidos orgânicos e o potencial de produção de metano em condições anaeróbias. De forma que, o BMP dos substratos digeridos podem ser utilizados para projetar diferentes componentes de plantas de digestão anaeróbia em larga escala, como tamanho e operação de reatores (Holliger *et al.*, 2017).

No ensaio de BMP, sob condições anaeróbias, o substrato (resíduo sólido ou efluente líquido orgânico) é incubado em frascos fechados (biorreatores), sendo este misturado a uma cultura de bactérias anaeróbias (inóculo), em que são mantidos a temperatura mesofílica ou termofílica e misturados por um período de tempo pré-estabelecido (Holliger *et al.*, 2016).

Destaca-se que, no ensaio de BMP, para encontrar o potencial máximo de metano é necessário um equilíbrio correto entre microrganismos e substrato. Em outras palavras, existe uma relação inóculo/substrato (RIS) apropriada para conduzir os ensaios de BMP. A RIS corresponde à razão entre a massa, em gramas, do teor de sólidos totais voláteis (STV) do inóculo e do substrato (gSTV do inóculo/gSTV do substrato). Na realização do ensaio, recomenda-se que a razão STV do inóculo seja superior do que a do substrato, para minimizar problemas de acidificação ou inibição por excesso de substrato (Holliger *et al.*, 2016), sendo a RIS  $\geq 2$  considerada como padrão (VDI, 2016).

A produção de biogás e metano a partir do BDM foi avaliada em estudos que utilizaram o ensaio de BMP. Os resultados obtidos na mono e codigestão anaeróbia, em que o BDM foi utilizado como mono e cosubstrato, respectivamente, são apresentados na Tabela 2.

Vitanza *et al.* (2016) avaliaram a digestão anaeróbia de BDM como substrato e como inóculo, lodo de biorreator anaeróbio operando na codigestão de lodo de resíduos sólidos e da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU). O ensaio de BMP ocorreu em temperatura mesofílica (35 °C), e o rendimento acumulado médio de metano para o BDM foi de 429 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup>. Bougrier *et al.* (2018) avaliaram a adição de solução de nutrientes na digestão anaeróbia de 4 amostras diferentes de BDM como substratos e inóculo de lodo de esgoto. O ensaio de BMP foi



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



realizado em temperatura mesofílica (35 °C). O BMP médio para as 4 amostras de BDM foi de 328 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup>, apresentando resultados bem homogêneos entre amostras.

**Tabela 2 – Produção de biogás e metano em ensaio de potencial bioquímico de metano usando o BDM como substrato na mono e codigestão anaeróbia, segundo diversas referências da literatura**

Substrato	RIS (base STV)	Proporção da mistura (base STV)	BMPT (mL <sub>N</sub> CH <sub>4</sub> g <sub>STV</sub> <sup>-1</sup> )	PAB (mL <sub>N</sub> g <sub>STV</sub> <sup>-1</sup> )	PAM (mL <sub>N</sub> CH <sub>4</sub> g <sub>STV</sub> <sup>-1</sup> )	Teor de metano (%CH <sub>4</sub> )	BD (%)	Referência
MonoDA								
BDM	-	NA	408,0	-	429,0	52,4	86,9	Vitanza <i>et al.</i> (2016)
BDM	-	NA	460,0-480,0	-	320,0-333,0	-	70,0	Bougrier <i>et al.</i> (2018)
BDM	-	NA	-	-	301,0	-	-	Oliveira, Alves e Costa (2018)
BDM	3	NA	-	-	306,4-356,2	-	-	Mainardis <i>et al.</i> (2019)
BDM	2	NA	-	-	171,60	-	79,1	Gomes <i>et al.</i> (2021)
BDM	2	NA	-	-	> 350,0	-	-	Montes e Rico (2021)
BDM	4	NA	445,6	524,8	304,2	61,1	68,3	Polastri <i>et al.</i> (2024)
CoDA								
GDRB:BDM	2	20:90	-	-	350,0	-	-	Montes e Rico (2021)
ARC:BDM	-	60:12,5*	-	-	88,0	-	-	Sganzerla <i>et al.</i> (2023)
RRB:BDM	4	25:75	-	426,4	254,8	57,4	-	Polastri <i>et al.</i> (2024)

Nota: (-) não reportado pelos autores; NA - não aplicável; RIS - relação inóculo/substrato com base em sólidos totais voláteis (STV); BMPT - potencial bioquímico de metano teórico, em inglês *biochemical methane potential*; BD - biodegradabilidade; PAB - produção acumulada de biogás; PAM - produção acumulada de metano; BDM: monoDA - mono digestão anaeróbia; coDA - codigestão anaeróbia; BDM - bagaço de malte; GDRB - grão destilado de resíduos botânicos (DGSB) do processo de destilação do gim; ARC - águas residuais tratamento de efluentes da cervejaria; (\*) 60 mL de água residual bruta e 12,5% (em peso seco) de BDM (24 g BDM L<sup>-1</sup>); RRB - resíduo ruminal bovino.

Adicionalmente, Vitanza *et al.* (2016) relataram um valor de BMPT para BDM de 408 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup> e um grau de conversão ou biodegradabilidade de 86,90%, enquanto, Polastri *et al.* (2024) reportaram o maior valor de 68,26% na RIS 4. Além disso, Bougrier *et al.* (2018) relataram valores de BMPT de 460–480 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup> para o BDM e biodegradabilidade em torno de 70%.

Oliveira, Alves e Costa (2018) estudaram a mono e a codigestão anaeróbia de lodo anaeróbio do tratamento de águas residuárias de cervejaria (inóculo) com BDM e levedura excedente como substratos (ambos resíduos gerados na cervejaria). A mistura de ambos os resíduos produziu diferenças significativas nos valores de BMP, visto que o rendimento de metano do BDM foi de 301 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup> e de ambos os resíduos 411 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup>.

Em comparação, de acordo com os dados da Tabela 2, Oliveira, Alves e Costa (2018), Mainardis *et al.* (2019) e Polastri *et al.* (2024), relataram um rendimento de metano similares (301,0; 306,4 e 304,2 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup>, respectivamente). Por outro lado, Sganzerla *et al.* (2023), relataram um rendimento de metano menor (88,03 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup>), assim como em Gomes *et al.* (2021), em que alcançaram um rendimento de metano de 171,60 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup>. No entanto, melhores resultados foram reportados por Vitanza *et al.* (2016), Bougrier *et al.* (2018) e Montes e Rico (2021) (429,0; 320–333 e maior que 350,0 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup>).

Montes e Rico (2021) avaliaram a produção de metano em ensaios de BMP em 38 °C, aplicando como inóculo, o efluente anaeróbio de um digestor em escala laboratorial que tratava dejetos líquidos de gado leiteiro e resíduos alimentares. Os autores relataram o comportamento para diferentes proporções da mistura de resíduos sólidos da produção de gim seco e BDM na RIS 2, em que obtiveram um melhor rendimento de metano para a monodigestão de



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



BDM e um aumento no rendimento de metano conforme houve um aumento de BDM na mistura (20% GDRB, 80% BDM).

Sganzerla *et al.* (2023) avaliaram em ensaio de BMP, conduzido em condições mesofílicas (35 °C), misturando efluentes de cervejaria e lodo da estação de tratamento de efluentes de cervejaria (1:1, v/v), com a adição de diferentes proporções de BDM. Os resultados demonstram que o maior rendimento de metano (88,02 mL<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> g<sub>STV</sub><sup>-1</sup>) foi obtido com a maior quantidade de BDM adicionada na mistura (12,5% de BDM, 24 g BDM L<sup>-1</sup>).

Por fim, Polastri *et al.* (2024) avaliaram a digestão anaeróbia em ensaios de BMP em condições mesofílicas (37 °C), aplicando o BDM como substrato e cosubstrato. Para o inóculo, foi utilizada uma mistura de volumes iguais (1:1 %STV) de lodo de esgoto doméstico e lodo de dejetos suínos digerido, compreendendo em um inóculo mesofílico aclimatado. No primeiro ensaio de BMP, a variável investigada foi a RIS na monodigestão de BDM, com o ensaio sendo realizado em quatro RIS diferentes (4, 3, 2 e 1). No segundo ensaio de BMP, o ensaio foi realizado em três RIS diferentes, 4, 2 e 1, e três níveis de mistura entre resíduo ruminal bovino e BDM, 25%, 50% e 75%, em termos de STV. O aumento no rendimento de metano foi diretamente proporcional ao aumento do BDM na mistura com RRB, bem como ao aumento da RIS. O aumento da concentração de BDM de 25% para 75% na coDA e RIS 4, resultou em um aumento de quase duas vezes no rendimento de metano. A adição de um substrato mais biodegradável à coDA, neste caso, o BDM melhorou o rendimento de metano, podendo estar associado a um melhor equilíbrio de nutrientes, sendo a suplementação de nutrientes contidos no BDM adequada para o crescimento dos microrganismos.

## CONCLUSÕES

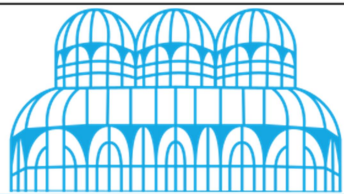
Estudos sobre ensaios de BMP aplicando o BDM como substrato foram avaliados em diferentes RIS, por meio da monoDA e coDA, para avaliar a produção de biogás e metano. A partir dos estudos avaliados, pode-se verificar o potencial de produção de metano e a influência do BDM na coDA na melhoria da produção de metano juntamente com outros resíduos e efluentes.

A adição de um substrato mais biodegradável na coDA, como o BDM, pode promover o aumento na produção de metano devido ao melhor equilíbrio de nutrientes, capacidade tamponante e aumento da solubilidade das fibras, promovendo o crescimento adequado de microrganismos de digestão anaeróbia.

Portanto, os estudos apresentaram que a aplicação do BDM como substrato, assim como associar diferentes resíduos com o BDM no processo de coDA, pode ser uma alternativa na gestão de resíduos sólidos industriais, provendo a geração de energia a partir do biogás, e a valorização dos resíduos em comparação aos métodos tradicionais de tratamento de resíduos orgânicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANGELIDAKI, I. *et al.* Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 927–934, 2009.
2. BARTHHAAS. **The BarthHaas Report 2024/2025**. BarthHaas GmbH & Co. KG, Nuremberg, 2025 Disponível em: <https://www.barthhaas.com/resources/barthhaas-report>. Acesso em: 12 abr. 2026.
3. BACHMANN, S. A. L.; CALVETE, T.; FÉRIS, L. A. Potential applications of brewery spent grain: Critical an overview. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 1, 2022.
4. BOUGRIER, C. *et al.* Use of trace elements addition for anaerobic digestion of brewer's spent grains. **Journal of Environmental Management**, v. 223, p. 101–107, 2018.
5. CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.
6. DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
7. DIEGO-DÍAZ, B. *et al.* Biomethanization of solid wastes from the alcoholic beverage industry: Malt and sloe. Kinetic and microbiological analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 334, p. 650–656, 2018.
8. GOMES, M. M. *et al.* Statistical optimization of methane production from brewery spent grain: Interaction effects of temperature and substrate concentration. **Journal of Environmental Management**, v. 288, 2021.
9. HAGOS, K. *et al.* Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1485–1496, 2017.
10. HOANG, A. T. *et al.* Perspective review on Municipal Solid Waste-to-energy route: Characteristics, management strategy, and role in circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 359, 2022.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9° CONRESOL

9° Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



11. HOLLIGER, C. *et al.* Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 11, p. 2515–2522, 2016.
12. HOLLIGER, C.; DE LACLOS, H. F.; HACK, G. Methane production of full-scale anaerobic digestion plants calculated from substrate's biomethane potentials compares well with the one measured on-site. **Frontiers in Energy Research**, v. 5, n. 12, p. 1–9, 2017.
13. KARKI, R. *et al.* Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 330, p. 125001, 2021.
14. MAINARDIS, M. *et al.* 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**, v. 7, n. 3, p. 103184, 2019.
15. MAO, C. *et al.* Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540–555, 2015.
16. MATA-ALVAREZ, J. *et al.* A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412–427, 2014.
17. MONTES, J. A.; RICO, C. Energetic valorization of solid wastes from the alcoholic beverage production industry: Distilled gin spent botanicals and brewers' spent grains. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 21, 2021.
18. 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, 2006.
19. 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.
20. OLAJIRE, A. A. The brewing industry and environmental challenges. **Journal of Cleaner Production**, p. 1–21, 2012.
21. OLIVEIRA, J. V.; ALVES, M. M.; COSTA, J. C. Biochemical methane potential of brewery by-products. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 2, p. 435–440, 2018.
22. PAVAN, P. *et al.* Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability. **Water Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 75–81, 2000.
23. PARKIN, G. F.; OWEN, W. F. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. **Journal of Environmental Engineering**, v. 112, n. 5, p. 867–920, 1986.
24. POLASTRI *et al.* Anaerobic co-digestion of bovine ruminal waste and brewery spent grain: Effects of inoculum to substrate ratio, mixing ratio, process stability, organic matter removal, and methane yield. **Biochemical Engineering Journal**, v. 210, n. 109414, 2024.
25. POULSEN, T. G.; ADELARD, L.; WELLS, M. Improvement in CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> ratio and CH<sub>4</sub> yield as related to biomass mix composition during anaerobic co-digestion. **Waste Management**, v. 61, p. 179–187, 2017.
26. SGANZERLA, W. G. *et al.* Application of Anaerobic Co-digestion of Brewery by-Products for Biomethane and Bioenergy Production in a Biorefinery Concept. **Bioenergy Research**, 2023.
27. SZAJA, A.; MONTUSIEWICZ, A. Enhancing the co-digestion efficiency of sewage sludge and cheese whey using brewery spent grain as an additional substrate. **Bioresource Technology**, v. 291, p. 121863, 2019.
28. SZAJA, A. *et al.* A combined anaerobic digestion system for energetic brewery spent grain application in co-digestion with a sewage sludge. **Waste Management**, v. 135, p. 448–456, 2021.
29. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 4630**: Fermentation of organic materials: Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Düsseldorf, Germany: VDI, 2016.
30. VITANZA, R. *et al.* Biovalorization of brewery waste by applying anaerobic digestion. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, v. 30, n. 3, p. 351–357, 2016.
31. WARD, A. J. *et al.* Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 7928–7940, 2008.
32. XIROS, C.; CHRISTAKOPOULOS, P. Biotechnological potential of brewers spent grain and its recent applications. **Waste and Biomass Valorization**, v. 3, n. 2, p. 213–232, 2012.