

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**ALEX HENRIQUE CINTRA
KARINA DO VALE PEREIRA**

**IMPACTO DO PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO NA EFICIÊNCIA CINÉTICA E NO
RENDIMENTO ESPECÍFICO DE BIOGÁS A PARTIR DE SUBSTRATO EXAURIDO
DE *AGARICUS BISPORUS***

PONTA GROSSA

2026

**ALEX HENRIQUE CINTRA
KARINA DO VALE PEREIRA**

**IMPACTO DO PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO NA EFICIÊNCIA CINÉTICA E NO
RENDIMENTO ESPECÍFICO DE BIOGÁS A PARTIR DE SUBSTRATO EXAURIDO
DE *AGARICUS BISPORUS***

**Impact of Alkaline Pretreatment on the Kinetic Efficiency and Specific Biogas
Yield from Spent *Agaricus bisporus***

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Juliana Martins Teixeira de Abreu
Pietrobelli

Coorientador(a): Natália de Oliveira Cirqueira

PONTA GROSSA

2026



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ALEX HENRIQUE CINTRA
KARINA DO VALE PEREIRA**

**IMPACTO DO PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO NA EFICIÊNCIA CINÉTICA E NO
RENDIMENTO ESPECÍFICO DE BIOGÁS A PARTIR DE SUBSTRATO EXAURIDO
DE *AGARICUS BISPORUS***

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15 de julho de 2026

Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Érica Roberta Lovo da Rocha Watanabe
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José Carlos Alberto de Pontes
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA
2026**

Dedico este trabalho à minha família, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, por nos conceder força, saúde e perseverança para enfrentar todos os desafios ao longo desta trajetória.

À nossa família, nossa mais profunda gratidão. Mesmo à distância, em razão da mudança de cidade necessária para a realização deste sonho, nunca deixaram de nos oferecer apoio, incentivo e amor incondicional. Cada palavra de encorajamento, cada gesto de carinho e cada demonstração de confiança foram essenciais para que permanecêssemos firmes nos momentos mais difíceis. Esta conquista também pertence a vocês.

Aos nossos orientadores, pela dedicação, paciência e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos pela confiança depositada, pelas orientações técnicas e científicas e pelo incentivo constante, fundamentais para nossa formação acadêmica e profissional.

A todos os professores do curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram significativamente para nossa formação. Em especial, agradecemos àqueles que, além do ensino, ofereceram apoio, compreensão e palavras de incentivo nos momentos em que as dificuldades pareciam maiores que nossas próprias capacidades. Houveram períodos em que duvidamos da nossa capacidade de concluir esta etapa, e o acolhimento e a confiança demonstrados por esses profissionais foram determinantes para que não desistíssemos.

Aos nossos colegas e amigos, pela convivência, pelas trocas de conhecimento, pelas conversas e pelo apoio mútuo ao longo da graduação. Em especial, à colega Natália Cirqueira, por ter nos proporcionado a oportunidade de participar deste projeto como ajudante, pela confiança depositada, pelo incentivo e pelos conhecimentos compartilhados ao longo dessa experiência.

Ao laboratório de solos (LabSolos) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco pela disponibilidade em realizar as análises elementares das amostras de resíduos da produção de cogumelo Champignon de Paris.

Por fim, agradecemos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta importante etapa da vida.

"A ciência não conhece o país, porque o conhecimento pertence à humanidade."

(PASTEUR, 1871).

RESUMO

A crescente geração de resíduos agroindustriais e a necessidade de ampliar a participação de fontes renováveis na matriz energética impulsionam o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aproveitamento energético da biomassa. Nesse contexto, o substrato exaurido proveniente do cultivo de *Agaricus bisporus* apresenta potencial para produção de biogás por digestão anaeróbia, embora sua elevada fração lignocelulósica limite a biodegradação da matéria orgânica. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do pré-tratamento alcalino com solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1% sobre a eficiência da produção de biogás a partir do substrato exaurido de *Agaricus bisporus*. Inicialmente foi realizada a caracterização gravimétrica do resíduo, seguida da condução de ensaios de digestão anaeróbia em reatores em batelada de 250 mL mantidos a 35 °C. O desempenho do substrato pré-tratado foi comparado ao do material *in natura* por meio da produção acumulada de biogás e da modelagem cinética utilizando o modelo de Gompertz modificado, permitindo estimar o potencial máximo de produção, a taxa máxima de geração e a fase *lag* do processo. Os resultados indicaram que o pré-tratamento alcalino promoveu alterações favoráveis à biodisponibilidade da biomassa, refletindo em maior eficiência de conversão da matéria orgânica e melhoria dos parâmetros cinéticos da digestão anaeróbia quando comparado ao substrato sem tratamento. Os resultados obtidos corroboram estudos da literatura sobre a aplicação de pré-tratamentos em biomassas lignocelulósicas e demonstram o potencial do substrato exaurido de *Agaricus bisporus* como matéria-prima para geração de energia renovável. Dessa forma, conclui-se que o pré-tratamento alcalino representa uma estratégia promissora para aumentar o aproveitamento energético desse resíduo agroindustrial, contribuindo para a valorização de resíduos e para os princípios da economia circular.

Palavras-chave: digestão anaeróbia; biogás; *Agaricus bisporus*; biomassa lignocelulósica; pré-tratamento alcalino.

ABSTRACT

The increasing generation of agro-industrial waste and the need to expand the share of renewable sources in the energy matrix are driving the development of technologies aimed at the energetic use of biomass. In this context, the spent substrate from *Agaricus bisporus* cultivation has potential for biogas production through anaerobic digestion, although its high lignocellulosic fraction limits the biodegradation of organic matter. Thus, this study aimed to evaluate the effect of alkaline pre-treatment with a 1% sodium hydroxide (NaOH) solution on the efficiency of biogas production from the spent substrate of *Agaricus bisporus*. Initially, a gravimetric characterization of the waste was performed, followed by anaerobic digestion tests in 250 mL batch reactors maintained at 35 °C. The performance of the pre-treated substrate was compared to that of the untreated material through cumulative biogas production and kinetic modeling using the modified Gompertz model, allowing the estimation of the maximum production potential, the maximum generation rate, and the lag phase of the process. The results showed that alkaline pre-treatment promoted changes favorable to the biomass's bioavailability, leading to higher efficiency in organic matter conversion and improved kinetic parameters of anaerobic digestion compared to the untreated substrate. The results support studies in the literature on the use of pre-treatments in lignocellulosic biomass and show the potential of exhausted *Agaricus bisporus* substrate as a raw material for renewable energy generation. In this way, it can be concluded that alkaline pre-treatment represents a promising strategy to increase the energy use of this agro-industrial residue, contributing to the valorization of waste and to the principles of the circular economy.

Keywords: anaerobic digestion; biogas; *Agaricus bisporus*; lignocellulosic biomass; alkaline pre-treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Representação esquemática da economia linear e da economia circular aplicada ao reaproveitamento energético de resíduos agroindustriais por meio da digestão anaeróbia	18
Figura 2 - Ciclo de digestão anaeróbia.....	23
Figura 3 - Efeito do pré-tratamento na fibra da biomassa lignocelulósica	32
Figura 4 - Materiais utilizados nos testes de potencial bioquímico de biogás ..	36
Figura 5 - Resíduos da produção de cogumelo champignon de Paris.....	37
Figura 6 - Etapas de preparação do substrato exaurido de Agaricus bisporus para os ensaios de digestão anaeróbia - (A) Substrato exaurido in natura; (B) Substrato triturado; (C) Substrato após pré-tratamento alcalino com NaOH 1%.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição elementar resíduo da produção de Champignon de Paris (<i>Agaricus Bisporus</i>)	42
Tabela 2 - Relação C/N do SMS de <i>Agaricus bisporus</i> presente na literatura ...	43
Tabela 3 - Caracterização gravimétrica do resíduo da produção de Champignon de Paris (<i>Agaricus Bisporus</i>)	44
Tabela 4 - Parâmetros cinéticos do modelo de Gompertz.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla	Significado
AGVs	Ácidos Graxos Voláteis
APHA	American Public Health Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
CH ₄	Metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO ₂	Dióxido de Carbono
EC	Economia Circular
H ₂	Hidrogênio
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio (aparece citado como sulfeto de hidrogênio)
ISO	International Organization for Standardization
LCFAs	Long Chain Fatty Acids (Ácidos Graxos de Cadeia Longa)
Mg	Magnésio
NaOH	Hidróxido de Sódio
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	Sulfato de Sódio Decahidratado
N	Nitrogênio
P	Fósforo
PBM	Potencial Bioquímico de Metano
SMS	Spent Mushroom Substrate (Substrato Exaurido de Cogumelos)
ST	Sólidos Totais
SVT	Sólidos Voláteis Totais
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Associação dos Engenheiros Alemães)

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

Símbolo	Significado
%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
pH	Potencial Hidrogeniônico
L	Litro
mL	Mililitro
g	Grama
kg	Quilograma
mg	Miligrama
gSV	Gramas de sólidos voláteis
mLN	Mililitro normalizado
mLNbiogás/gSVadic	Produção específica de biogás normalizada
gSVadic	Grama de sólido volátil adicionado
R ²	Coeficiente de determinação
λ	Tempo de fase <i>lag</i> do modelo de Gompertz
P	Produção máxima de biogás no modelo de Gompertz
Y(t)	Produção acumulada de biogás no tempo
Ymax	Taxa máxima de produção de biogás
t	Tempo
h	Hora

Símbolo	Elemento
C	Carbono
N	Nitrogênio
P	Fósforo
K	Potássio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
Fe	Ferro
Co	Cobalto
Zn	Zinco
Ni	Níquel
Cu	Cobre
Se	Selênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Introdução	14
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Economia circular	17
2.2	Economia circular no setor agroindustrial	18
2.3	Bioenergia e biogás como aplicações EC	19
2.4	História do biogás	19
2.5	Digestão anaeróbia	22
2.6	Cogumelo champignon de Paris	27
2.7	Biomassa lignocelulósica e substrato exaurido de <i>Agaricus bisporus</i>	30
2.8	Pré-tratamentos de biomassa lignocelulósica	31
2.9	Potencial bioquímico do metano (PBM)	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	Biodigestor	36
3.2	Resíduos da produção de cogumelo champignon de Paris	37
3.3	Lodo	38
3.4	Caracterização do resíduo da produção de cogumelo champignon de Paris	38
3.5	Pré-tratamento Alcalino	38
3.6	Potencial Bioquímico do Biogás	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	Caracterização físico-química do resíduo de <i>Agaricus bisporus</i>	42
4.2	Produção acumulada de biogás	45
4.3	Ajuste do modelo cinético	46
4.4	Comparação entre substrato <i>in natura</i> e pré-tratado	49
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A crescente demanda energética mundial, associada à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, tem impulsionado a busca por fontes renováveis e sustentáveis de energia. Nesse contexto, a bioenergia destaca-se como alternativa estratégica, especialmente por possibilitar a valorização de resíduos agroindustriais por meio de processos biotecnológicos (Angelidaki *et al.*, 2018). Entre as tecnologias disponíveis, a digestão anaeróbia apresenta-se como uma solução consolidada para conversão de matéria orgânica em biogás.

O crescimento da produção agrícola e agroindustrial tem resultado em volumes expressivos de resíduos orgânicos. Dentre as produções agrícolas que mais cresceram mundialmente nos últimos anos, destaca-se a produção de cogumelos com um aumento de 13,8 vezes entre 1990 e 2020 (FAOSTAT, 2022), sendo os cogumelos *Lentinula edodes*, *Pleurotus spp*, *Auricularia spp*. e *Agaricus bisporus* com maior taxa de crescimento de produção (Royse *et al.*, 2017).

No Brasil, acompanhando a tendência mundial, a cadeia produtiva de cogumelos comestíveis encontra-se em expansão. A produção nacional está concentrada em São Paulo e Paraná, com destaque para o cultivo do *Agaricus bisporus* que representa 66% da produção nacional (ANPC, 2024). No estado do Paraná tivemos um aumento de 106% entre 2014 e 2024 na produção deste cogumelo, evidenciando o crescimento e consolidação deste tipo no mercado brasileiro (PARANÁ, 2025).

Esse substrato exaurido apresenta elevada fração lignocelulósica, constituída principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, além de nutrientes remanescentes do processo produtivo, características que evidenciam seu potencial para aplicações biotecnológicas e para aproveitamento energético por meio da digestão anaeróbia (Vieira, 2021).

A digestão anaeróbia constitui uma alternativa promissora para a valorização energética do substrato exaurido de *Agaricus bisporus*, permitindo sua conversão em biogás e digestato com potencial uso agrícola, além de contribuir para a redução dos impactos ambientais associados à disposição desse resíduo. Entretanto, a eficiência

do processo pode ser limitada quando se utilizam substratos lignocelulósicos, visto que a presença de lignina reduz a acessibilidade dos microrganismos às frações biodegradáveis da biomassa. Em decorrência dessa característica estrutural, a hidrólise é frequentemente considerada a etapa limitante da digestão anaeróbia de materiais lignocelulósicos (Sun; Cheng, 2002; Hendriks; Zeeman, 2009).

Diante dessa limitação estrutural, diferentes estratégias de pré-tratamento têm sido estudadas com o objetivo de aumentar a biodegradabilidade de biomassas lignocelulósicas e favorecer sua conversão anaeróbia. Entre essas estratégias, destacam-se os pré-tratamentos físicos, químicos e biológicos, empregados para reduzir a recalcitrância estrutural da biomassa e aumentar a disponibilidade da matéria orgânica aos microrganismos. O pré-tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH) tem sido amplamente investigado devido à sua capacidade de promover alterações estruturais na biomassa lignocelulósica, favorecendo a digestão anaeróbia subsequente. Diversos estudos reportam melhorias na biodegradabilidade e no aproveitamento energético de resíduos lignocelulósicos submetidos a tratamentos alcalinos, especialmente aqueles com elevado teor de lignina (Hendriks; Zeeman, 2009).

Apesar da existência de estudos que avaliam a digestão anaeróbia de resíduos lignocelulósicos, ainda são limitadas as investigações específicas sobre o impacto do pré-tratamento alcalino aplicado ao resíduo da planta de cogumelo Champignon de Paris (*Agaricus Bisporus*). Considerando o potencial energético desse resíduo e a necessidade de otimização do processo de digestão anaeróbia, torna-se relevante avaliar quantitativamente o efeito do pré-tratamento alcalino sobre a eficiência de produção de biogás.

Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar a eficiência da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do resíduo da cultura de cogumelo Champignon de Paris (*Agaricus bisporus*) submetido a pré-tratamento alcalino com NaOH, comparando os resultados obtidos com o material *in natura*. (Zwietering *et al.*, 1990) Dessa maneira, espera-se ampliar o conhecimento sobre as possibilidades de valorização energética deste resíduo agroindustrial.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito do pré-tratamento alcalino com NaOH 1% na eficiência da produção de biogás a partir do resíduo de plantação do cogumelo Champignon de Paris (*Agaricus Bisporus*).

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1) Quantificar a fração orgânica do resíduo de plantação do cogumelo Champignon de Paris (*Agaricus Bisporus*) por meio de gravimetria;
- 2) Avaliar a influência do pré-tratamento alcalino com NaOH sobre a produção acumulada de biogás do substrato exaurido de *Agaricus bisporus* por meio de ensaios de digestão anaeróbia;
- 3) Comparar os resultados obtidos com tratamentos alcalinos de biomassa lignocelulósica disponíveis na literatura;
- 4) Modelar a cinética da produção do biogás pelo modelo de Gompertz.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

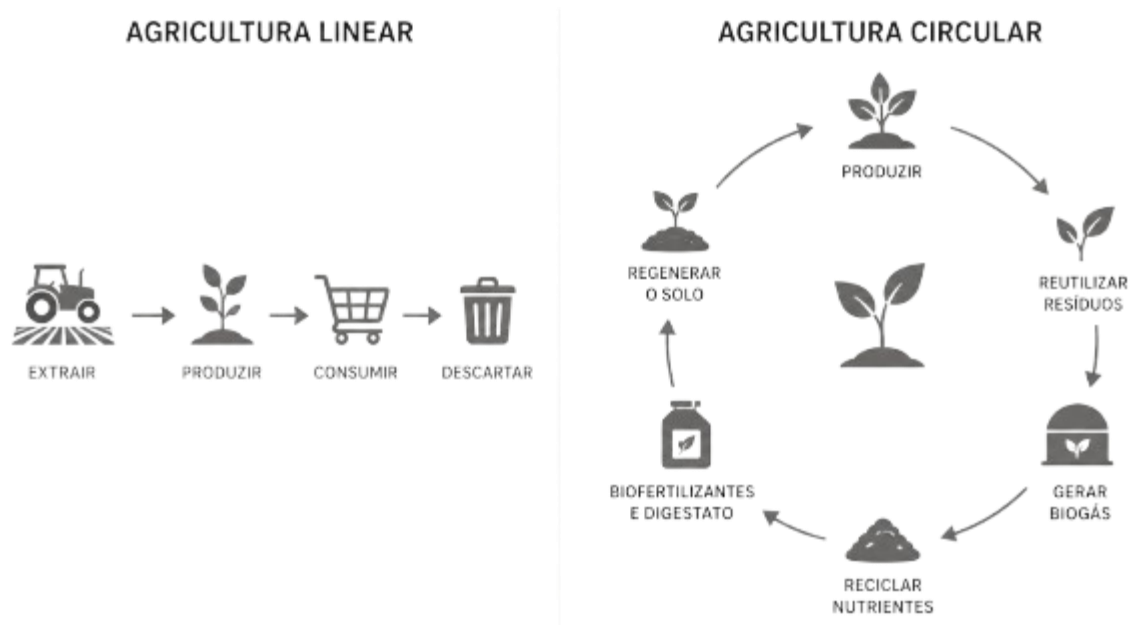
2.1 Economia circular

Ao longo das últimas seis décadas, os sistemas de produção agropecuários foram em sua maioria estruturados segundo uma lógica linear, onde os insumos percorrem etapas até chegarem em produtos finais, enquanto as questões ambientais e sociais recebiam pouca atenção (Bakan *et al.*, 2022). Com o avanço das discussões sobre desenvolvimento sustentável, o conceito de Economia Circular passou a ser discutido como alternativa frente às limitações da lógica linear, buscando atender a novas demandas socioambientais (European P., 2015).

Nesse contexto, a Economia Circular (EC) promove o reaproveitamento de materiais, o aumento da eficiência e a redução dos impactos socioambientais. Diferentes estudos mostram que a circularidade é especialmente promissora na agroindústria, em razão da quantidade de resíduos orgânicos e subprodutos gerados, que podem ser inseridos nos ciclos produtivos (Esposito *et al.*, 2020; Hamam *et al.*, 2021).

A Economia Circular propõe um sistema no qual os fluxos de materiais e energia são desacelerados, fechados ou estreitados, de modo que recursos sejam mantidos em uso pelo maior tempo possível. Essa concepção busca evitar o modelo extrair-produzir-descartar, característico da economia linear, substituindo-o por estratégias como manutenção, reutilização, remanufatura, conserto, condicionamento e reciclagem como mostra a figura 1 (Ellen M. F., 2013).

Figura 1- Representação esquemática da economia linear e da economia circular aplicada ao reaproveitamento energético de resíduos agroindustriais por meio da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Esposito *et al.*, (2020); Hamam *et al.*, (2021).

De acordo com a Ellen Macarthur Foundation (2013), a circularidade proporciona benefícios econômicos, ambientais e sociais. Para avaliá-los de forma consistente, torna-se fundamental a utilização de indicadores que contemplem essas três dimensões e permitam mensurar os ganhos resultantes da transição para modelos produtivos circulares (Esposito *et al.*, 2020).

2.2 Economia circular no setor agroindustrial

A aplicação da EC à agroindústria envolve a reestruturação de práticas de produção e gestão, reconhecendo que resíduos e subprodutos não são descartes inevitáveis, mas potenciais recursos reaproveitáveis. Em cadeias agroindustriais, essa abordagem tem potencial expressivo, considerando a abundância de materiais residuais utilizados e outros coprodutos provenientes do processamento (Esposito *et al.*, 2020; Hamam *et al.*, 2021).

Estudos apontam que grande parte desses resíduos pode ser transformada em novos insumos produtivos, tais como fertilizantes, condicionadores de solo, biofertilizantes, biomassa energética ou matérias-primas para outras indústrias (Hamam *et al.*, 2021). Assim, promove-se simultaneamente:

- a redução do desperdício;
- a diminuição da dependência de insumos externos;
- a diversificação de produtos e fontes de renda;
- e a mitigação de impactos ambientais.

2.3 Bioenergia e biogás como aplicações EC

Dentre uma das aplicações da EC no meio rural está a biodigestão anaeróbia, capaz de converter resíduos orgânicos em biogás e digestato. O biogás constitui um vetor energético renovável que pode substituir fontes fósseis, enquanto o digestato gera produtos agrícolas como biofertilizantes, fechando o ciclo de matéria e energia (Hamam *et al.*, 2021).

A integração do biogás aos sistemas produtivos rurais otimiza o uso de resíduos agropecuários e agroindustriais, reduz emissões e melhora a gestão ambiental. Segundo Hamam *et al.* (2021), a biodigestão anaeróbia de resíduos agroindustriais é um exemplo relevante de aplicação da EC.

2.4 História do biogás

A trajetória do biogás remonta aos primeiros experimentos de fermentação de matéria orgânica, quando se observou a liberação de gases inflamáveis a partir de resíduos animais e vegetais. No século XIX, com o avanço dos estudos em microbiologia, tornou-se possível compreender os processos bioquímicos que resultam na formação do metano, principal componente do biogás. Essa descoberta impulsionou a aplicação do biogás em pequenas escalas, especialmente em áreas rurais, onde o aproveitamento energético de resíduos se mostrava viável para iluminação e aquecimento. O desenvolvimento técnico e a compreensão das etapas microbiológicas estabeleceram as bases para o uso controlado desse recurso renovável em diferentes contextos produtivos (Gustafsson *et al.*, 2024).

Com o início do século XX, o biogás passou a integrar discussões sobre autonomia energética e aproveitamento de resíduos agrícolas. A crise do petróleo nas

décadas de 1970 e 1980 estimulou governos e centros de pesquisa a buscarem alternativas que reduzissem a dependência de combustíveis fósseis, favorecendo o aprimoramento dos biodigestores. Esses equipamentos foram adaptados às condições climáticas e estruturais de cada país, o que diversificou as tecnologias e consolidou linhas de investigação voltadas à eficiência e ao aproveitamento integral da biomassa (Jameel *et al.*, 2024).

O avanço dos sistemas automatizados marcou uma nova etapa no aproveitamento do biogás, integrando sensores e monitoramento contínuo aos reatores. Essas inovações permitiram maior controle sobre variáveis críticas, como temperatura, pH e tempo de retenção hidráulica, aprimorando a estabilidade dos processos. Na Engenharia Química, tais parâmetros se tornaram determinantes para a maximização da conversão energética e para a caracterização do biometano. A integração entre ciência e tecnologia consolidou novas abordagens para o uso de resíduos orgânicos na geração de energia (Sher *et al.*, 2024).

No contexto brasileiro, o biogás passou a ocupar espaço crescente em políticas públicas e pesquisas aplicadas, com destaque para programas de incentivo à produção descentralizada. Experiências desenvolvidas no estado do Paraná têm reunido esforços entre universidades e empresas para expandir o uso de biodigestores em áreas rurais e industriais. Essa articulação vem contribuindo para o aperfeiçoamento dos modelos de gestão energética e para o aproveitamento de resíduos agroindustriais em diferentes cadeias produtivas (Marcucci *et al.*, 2025).

A comparação entre países evidencia que a consolidação do biogás depende tanto da estrutura institucional quanto do investimento em inovação tecnológica. Regiões que mantêm programas de pesquisa e incentivos econômicos apresentam resultados mais consistentes quanto ao volume e à qualidade do biometano. Essa relação mostra como fatores técnicos, regulatórios e econômicos se interligam no desenvolvimento do setor, configurando uma dinâmica global de aprimoramento constante (Swinbourn; Li; Wang, 2024).

A ampliação do uso do biogás também se associa aos objetivos de redução das emissões de gases de efeito estufa. A substituição gradual de combustíveis fósseis por alternativas de origem biológica reflete uma tendência mundial de reestruturação das matrizes energéticas. Nesse cenário, o biogás passou a ser objeto de estudos que investigam sua eficiência ambiental e as condições ideais de

purificação, compressão e transporte, consolidando seu papel nas estratégias de mitigação de impactos atmosféricos (Huang, 2024).

O aprimoramento técnico observado nas últimas décadas decorre de investimentos contínuos em pesquisa aplicada e em engenharia de processos. Os estudos sobre purificação e compressão do biometano permitiram ampliar o uso do biogás em setores de transporte e geração elétrica. O desenvolvimento de novas ligas metálicas e materiais resistentes à corrosão também contribuiu para a durabilidade dos equipamentos, o que elevou a confiabilidade operacional das plantas de produção (Sher *et al.*, 2024).

A compreensão da digestão anaeróbia, principal processo de formação do biogás, foi aprofundada com o avanço das técnicas de biologia molecular. A aplicação de abordagens metagenômicas possibilitou mapear os microrganismos responsáveis por cada etapa bioquímica, oferecendo uma visão detalhada das interações metabólicas. Essa caracterização científica aprimorou o controle das reações e a previsibilidade do sistema, tornando possível ajustar variáveis de acordo com o substrato utilizado (Ostos; Flórez-Pardo; Camargo, 2024).

Com o acúmulo de conhecimento sobre os microrganismos e suas interações, a engenharia de biodigestores evoluiu para modelos mais eficientes e de menor impacto ambiental. O uso de materiais de construção mais resistentes, sistemas de agitação e controle térmico mais precisos permitiu maior uniformidade nos processos. A combinação entre microbiologia e engenharia tem possibilitado o desenvolvimento de reatores com maior capacidade de processamento e melhor rendimento energético (Archana *et al.*, 2024).

A relação entre biogás e bioeconomia tem sido objeto de análise em estudos que buscam compreender as potencialidades do aproveitamento de resíduos. O conceito de circularidade produtiva sustenta a ideia de que subprodutos orgânicos podem ser reinseridos nas cadeias industriais, reduzindo desperdícios. Essa perspectiva tem orientado o desenvolvimento de projetos que visam à integração entre o setor agroindustrial e a geração de energia renovável, ampliando o escopo das aplicações do biogás (Alengbawy *et al.*, 2024).

As políticas de incentivo à inovação tecnológica reforçam o vínculo entre pesquisa científica e aplicação industrial. A criação de redes colaborativas tem favorecido a troca de informações e o desenvolvimento de equipamentos mais

acessíveis e eficientes. A interação entre universidades, agências governamentais e empresas contribui para a continuidade das investigações e para o aprimoramento das práticas de aproveitamento energético de resíduos orgânicos (Marcucci *et al.*, 2025).

A adaptação dos sistemas de biogás a pequenas propriedades rurais tem se mostrado uma estratégia relevante para ampliar o acesso à energia. O uso de biodigestores compactos e de fácil manutenção estimula a geração descentralizada e o aproveitamento local dos recursos disponíveis. Essa dinâmica tem impacto direto na gestão de resíduos e na diversificação das fontes energéticas, promovendo maior eficiência no uso da biomassa (Gustafsson *et al.*, 2024).

Os estudos de viabilidade econômica voltados à produção de biogás apontam para uma tendência de expansão gradual. A análise dos custos de instalação, operação e manutenção indica que os investimentos em tecnologia e capacitação técnica influenciam diretamente a produtividade dos sistemas. A combinação entre retorno financeiro e estabilidade operacional tem orientado novas pesquisas e atraído o interesse de diferentes segmentos industriais (Sher *et al.*, 2024).

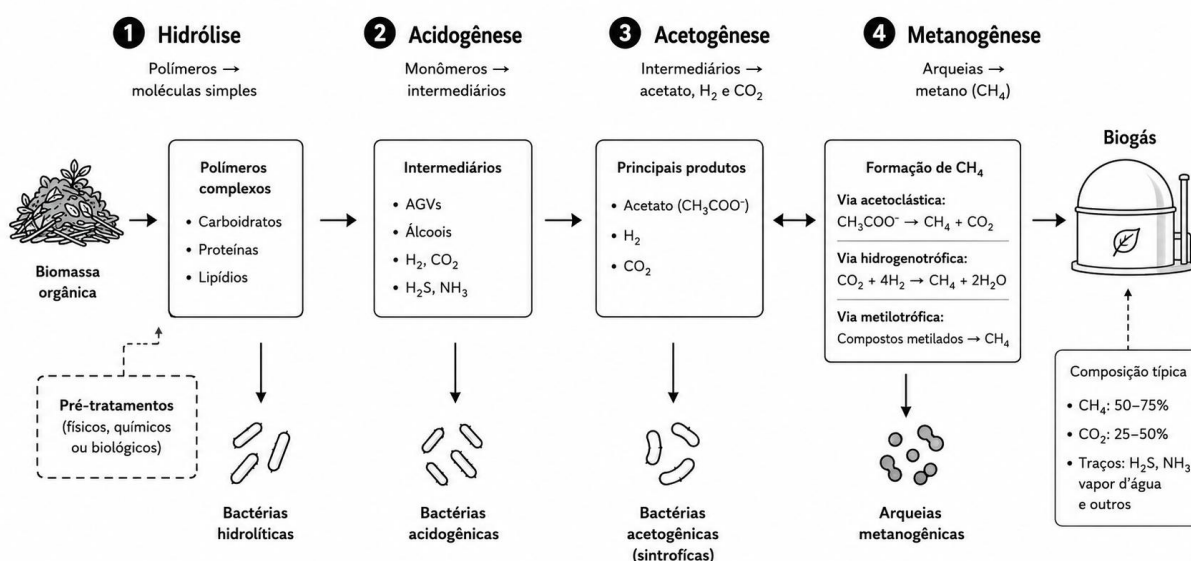
A trajetória do biogás reflete um processo contínuo de aprimoramento técnico e científico, que integra contribuições de diferentes áreas do conhecimento. O avanço da engenharia química, aliado à compreensão dos fenômenos biológicos e à regulação ambiental, tem permitido o desenvolvimento de sistemas cada vez mais eficientes e seguros. Essa evolução demonstra como o conhecimento acumulado ao longo de décadas transformou o biogás em uma fonte energética consolidada no cenário contemporâneo (Jameel *et al.*, 2024).

2.5 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biotecnológico no qual microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo biogás e um efluente estabilizado. Trata-se de um fenômeno natural que ocorre em ambientes como pântanos, sedimentos e trato digestivo de animais ruminantes, mas que foi sistematizado pela engenharia química para fins de geração energética e tratamento de resíduos. O controle das variáveis operacionais, como temperatura e tempo de retenção, é determinante para o equilíbrio entre as comunidades microbianas e a eficiência da conversão da matéria orgânica em metano (Archana *et al.*, 2024).

A compreensão científica desse processo evoluiu a partir da identificação das quatro principais fases que compõem o ciclo de digestão: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, como mostra a figura 2. Na hidrólise, macromoléculas como proteínas, lipídios e carboidratos são decompostas em unidades menores; nas etapas seguintes, os produtos intermediários são convertidos em ácidos graxos voláteis e, por fim, em metano e dióxido de carbono. Cada fase é desempenhada por grupos específicos de microrganismos, cuja interação simbiótica determina o sucesso da conversão energética (Ostos; Flórez-Pardo; Camargo, 2024).

Figura 2 - Ciclo de digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Ostos; Flórez-Pardo; Camargo, (2024).

A eficiência da digestão depende também da natureza do substrato utilizado. Resíduos agrícolas, efluentes domésticos e lodos de estações de tratamento são frequentemente empregados, e cada tipo de matéria orgânica exige ajustes específicos de tempo de retenção e agitação. A composição química influencia diretamente a taxa de degradação e a qualidade do biogás produzido. A caracterização prévia dos substratos, associada à escolha de microrganismos adequados, contribui para otimizar a conversão energética e reduzir a formação de compostos inibitórios (Alengbawy *et al.*, 2024).

Durante a primeira etapa, a hidrólise, a biomassa orgânica que contém polímeros complexos que não são facilmente acessíveis pelos microrganismos passam por um processo de conversão dessas macromoléculas orgânicas em seus

componentes menores, que podem ser utilizados pelas bactérias acidogênicas. No decorrer do processo, as bactérias hidrolíticas secretam enzimas extracelulares capazes de converter carboidratos, lipídios e proteínas em açúcares, ácidos graxos de cadeia longa (LCFAs) e aminoácidos, respectivamente (Kasinath *et al.*, 2021).

Após a quebra enzimática, os produtos da hidrólise podem difundir-se através das membranas celulares dos microrganismos acidogênicos. No entanto, é importante observar que certos substratos, como lignina, celulose e hemicelulose, podem ser difíceis de degradar e inacessíveis aos micróbios devido à suas estruturas complexas. Assim, pré-tratamentos são realizados para aumentar a hidrólise desses carboidratos (Meegoda *et al.*, 2018).

Devido à importância da hidrólise na cinética da digestão anaeróbia, muita atenção tem sido dedicada ao desenvolvimento de métodos para acelerar esse processo nos digestores anaeróbios. Diversas opções de pré-tratamento de resíduos estão sendo pesquisadas e utilizadas para otimizar a hidrólise, especialmente em casos de resíduos com alto teor de lignocelulose (Meegoda *et al.*, 2018).

Na acidogênese os monômeros resultantes são utilizados como substratos por diferentes bactérias anaeróbias e facultativas. Nessa etapa, ocorre a degradação dos monômeros, formando ácidos orgânicos de cadeia curta, como ácidos butírico, propiônico e acético, além de álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono (Kunz *et al.*, 2022).

A etapa de acetogênese corresponde à terceira fase da digestão anaeróbia e envolve a atuação de microrganismos acetogênicos, responsáveis pela conversão de compostos intermediários gerados nas etapas anteriores em substratos adequados para a metanogênese. Durante essa fase, ácidos graxos voláteis, como propionato e butirato, além de outros compostos orgânicos, são transformados principalmente em acetato, hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2), que posteriormente serão utilizados pelas arqueias metanogênicas para a formação de metano (Kunz *et al.*, 2022).

A etapa final do processo, chamada de metanogênese, é responsável pela conversão de uma mistura contendo CO_2 , H_2 , metanol e acetato no produto final, que é o metano. Essa etapa é realizada principalmente por três vias metabólicas: acetoclástica, hidrogenotrófica e metilotrófica. As arqueas metanogênicas, um grupo de microrganismos unicelulares, são responsáveis por essa fase e pertencem

principalmente a seis ordens (Methanosarcinales, Methanobacteriales, Methanomicrobiales, Methanococcales, Methanopyrales e Methanocellales) do filo *Euryarchaeota* (Kasinath *et al.*, 2021).

Para obter um processo de fermentação ideal, é essencial considerar e controlar diversos parâmetros, uma vez que o metabolismo de microrganismos anaeróbios é influenciado por uma série de fatores, tais como: temperatura, pH, nutrientes, agitação do sistema e materiais tóxicos (Kunz *et al.*, 2022).

Temperatura: A digestão anaeróbia acontece em reatores que funcionam em condições de temperatura mesofílica (30 °C - 40 °C, principalmente 35 °C - 37 °C) ou termofílica (50 °C - 60 °C, principalmente 52 °C - 55 °C). É crucial selecionar e controlar a temperatura de operação de forma estável, uma vez que esses parâmetros exercem um impacto significativo no desenvolvimento da estrutura microbiana dos digestores (Levén *et al.*, 2007).

A digestão termofílica apresenta várias vantagens em relação à digestão mesofílica, tais como: (I) uma fermentação mais rápida do que na digestão mesofílica; (II) maior rendimento de biogás; (III) uma redução efetiva da matéria orgânica e dos sólidos suspensos voláteis (VSS); (IV) melhoria das propriedades reológicas do lodo digerido; (V) capacidade de suportar cargas orgânicas mais elevadas devido a taxas de reação mais rápidas; e (VI) alta eficiência na inativação de patógenos (Kasinath *et al.*, 2021).

Por outro lado, o tratamento termofílico apresenta algumas desvantagens, tais como: (I) o consumo adicional de energia necessário para manter a temperatura elevada; (II) a necessidade de introduzir a biomassa de alimentação a altas temperaturas; e (III) a dificuldade em manter uma temperatura estável para a produção de biogás. Levando em consideração os benefícios de manter uma temperatura adequada durante a digestão anaeróbia, é importante ressaltar que os digestores mesofílicos oferecem maior estabilidade dos parâmetros e benefícios econômicos, incluindo uma produção de biogás mais consistente (Kasinath *et al.*, 2021).

pH: A produção de biogás ocorre dentro de uma faixa estreita de pH, geralmente entre 6 e 8,5. Se o pH do reator ultrapassar esses limites, o processo será prejudicado, resultando em uma diminuição significativa na produção de metano. Mudanças no pH podem estar relacionadas a outros parâmetros operacionais. Por

exemplo, o acúmulo de ácidos orgânicos (acidificação) normalmente reduzirá o pH, enquanto o aumento das concentrações de amônia ou a remoção de CO₂ podem elevar os valores de pH (Kougias; Angelidaki, 2018).

Nutrientes: A disponibilidade de nutrientes influencia diretamente na eficiência da digestão anaeróbia, uma vez que os microrganismos envolvidos no processo necessitam de elementos químicos para a manutenção celular, síntese enzimática e realização das reações metabólicas (Bohrz, 2010). Entre os macronutrientes de maior importância destacam-se o nitrogênio e o fósforo, cuja disponibilidade deve ser compatível com a quantidade de matéria orgânica presente no sistema, pois esses elementos estão relacionados ao crescimento e à atividade da biomassa microbiana (Louzada, 2006).

Além do nitrogênio e fósforo, o enxofre apresenta papel relevante no metabolismo anaeróbio, sendo necessário em concentrações adequadas para o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica (Malina; Pohland, 1992). Elementos traço, como ferro, cobalto, níquel, zinco, cobre e selênio, também são requeridos em pequenas quantidades, atuando como cofatores enzimáticos e contribuindo para a atividade dos grupos microbianos envolvidos na produção de biogás (Salomon, 2007).

Agitação do sistema: A incorporação de mecanismos de agitação no meio reacional proporciona diversos benefícios operacionais. Entre eles, destaca-se a intensificação do contato entre a biomassa ativa e o material de alimentação. Além disso, promove homogeneização física, química e biológica em todo o reator, permitindo a rápida difusão dos produtos gerados pela digestão e de quaisquer substâncias tóxicas que possam entrar no sistema. Isso minimiza os efeitos inibidores da atividade microbiana. A agitação também previne a formação de espuma, que são bolhas esbranquiçadas que impedem o desenvolvimento de gradientes de temperatura dentro do reator (Monnet, 2003).

Materiais tóxicos: Quando encontrados em concentrações suficientemente altas, qualquer composto presente no substrato pode se tornar tóxico. E para reduzir essas substâncias a uma faixa admissível para o crescimento microbiano é possível utilizar de diferentes mecanismos como: a formação de compostos insolúveis por precipitação, adaptação da comunidade microbiana e a utilização de substâncias antagônicas (Chen et al., 2008).

Existem compostos inorgânicos tóxicos, como cromo, cromatos, arsênio, cianeto, entre outros, que podem afetar negativamente o tratamento anaeróbio em baixas concentrações. No entanto, quando esses compostos estão combinados com sulfetos, formando compostos insolúveis (sais de sulfeto), eles se tornam toleráveis e não prejudicam o processo (Vitoratto, 2004).

2.6 Cogumelo champignon de Paris

A cadeia produtiva do *Agaricus bisporus*, popularmente conhecido como cogumelo Champignon de Paris, representa um segmento de crescente importância para o setor agroindustrial em razão da elevada demanda por esse alimento e do volume de resíduos gerados durante seu cultivo. O processo produtivo utiliza um substrato composto principalmente por materiais lignocelulósicos e fontes orgânicas de nutrientes que, após sucessivos ciclos de colheita, originam o denominado substrato exaurido (*Spent Mushroom Substrate* - SMS). Embora esse material ainda apresente elevado teor de matéria orgânica, seu aproveitamento permanece subutilizado em muitas cadeias produtivas. Nesse contexto, a digestão anaeróbia destaca-se como uma alternativa para a valorização deste resíduo, permitindo a produção de biogás e biofertilizante e promovendo a integração entre a produção de alimentos e a geração de energia renovável (Bhagarathi; Subramanian; Da Silva, 2023).

A integração entre a agricultura e a bioenergia tem despertado interesse na engenharia química, pois permite analisar o potencial de resíduos agrícolas e agroindustriais em sistemas de produção circular. O ciclo produtivo do Champignon de Paris ilustra essa possibilidade, já que o material residual do cultivo pode ser convertido em fonte energética renovável. Esse tipo de simbiose tecnológica reforça o papel dos processos biológicos como alternativas de baixo impacto ambiental, associando produtividade agrícola à eficiência energética (Marcucci et al., 2025).

Ao relacionar o cultivo do cogumelo ao tema do biogás, observa-se que o substrato residual, após os ciclos de colheita, mantém elevado teor de matéria orgânica passível de fermentação. Essa característica o torna um insumo adequado para biodigestores, especialmente em modelos de co-digestão com outros resíduos agrícolas. A possibilidade de integrar a produção de alimentos e energia em um mesmo sistema técnico demonstra como o reaproveitamento de materiais orgânicos

pode reduzir perdas e aumentar a sustentabilidade do processo produtivo (Huang, 2024).

A produção comercial de *Agaricus bisporus* ocupa posição de destaque na fungicultura mundial, refletindo sua elevada produtividade e importância econômica para o setor de alimentos. Sua produção ocorre em substratos compostos por palha de trigo, esterco, gesso e outros materiais orgânicos que passam por um processo de compostagem controlada. Esse substrato fornece os nutrientes necessários ao crescimento micelial e à formação dos corpos de frutificação, resultando em colheitas cíclicas com potencial de aproveitamento energético posterior (Suwannarach et al., 2022).

Durante o cultivo, a eficiência depende da manutenção de condições ambientais estáveis, como temperatura, umidade e aeração. O controle desses parâmetros influencia diretamente o desenvolvimento do micélio e a produtividade final. A engenharia química contribui com técnicas de controle de processo e modelagem de sistemas, garantindo uniformidade e previsibilidade na produção. A relação entre as condições operacionais e o desempenho do cultivo reforça a importância de métodos precisos de monitoramento e automação (Young et al., 2024).

O substrato utilizado para o Champignon de Paris passa por uma etapa de pasteurização, que elimina microrganismos indesejáveis e estabiliza o material. Esse processo cria um ambiente favorável para o crescimento seletivo do fungo, permitindo melhor aproveitamento dos nutrientes disponíveis. Após o ciclo produtivo, o substrato exaurido mantém alto valor energético e químico, podendo ser direcionado a processos de digestão anaeróbia. Essa complementaridade entre cultivo e bioenergia fortalece a visão integrada da economia circular (Bhagarathi; Subramanian; Da Silva, 2023).

O avanço tecnológico tem promovido inovações no controle de variáveis ambientais do cultivo de cogumelos, especialmente por meio de sistemas automatizados de ventilação, irrigação e climatização. Esses mecanismos permitem o ajuste contínuo das condições ideais para o desenvolvimento micelial, otimizando o uso de energia e recursos hídricos. A busca por maior eficiência produtiva tem impulsionado o desenvolvimento de equipamentos mais precisos e sustentáveis, aproximando o cultivo da lógica de produção limpa (Young et al., 2024).

O estudo de materiais alternativos para a cobertura e o substrato do *Agaricus bisporus* tem se intensificado nos últimos anos. Pesquisas apontam que resíduos agroindustriais, como cascas de arroz, bagaço de cana e serragem, podem substituir parcialmente o esterco e reduzir o custo de produção. Essa substituição também favorece a reutilização de resíduos agrícolas, diminuindo o impacto ambiental e estimulando a inovação em sistemas de cultivo controlado (Young et al., 2024).

Além da importância econômica, o Champignon de Paris possui valor nutricional significativo, sendo fonte de proteínas, vitaminas do complexo B e minerais essenciais. Sua composição bioquímica o torna um alimento de alta qualidade, associado a dietas balanceadas e saudáveis. O aproveitamento de seus subprodutos em processos biotecnológicos amplia a sustentabilidade da cadeia produtiva e diversifica as formas de uso da biomassa gerada (Young et al., 2024).

A caracterização química do substrato pós-colheita é essencial para avaliar sua aplicabilidade em processos de biodigestão. Estudos indicam que o material residual contém lignina, celulose e compostos nitrogenados em proporções adequadas para fermentação anaeróbia. A presença de microrganismos remanescentes e de nutrientes disponíveis favorece a atividade enzimática durante o processo de degradação, potencializando a geração de metano (Marcucci et al., 2025).

A utilização de resíduos fúngicos na digestão anaeróbia reforça a ideia de sinergia entre diferentes segmentos produtivos. O uso de compostos orgânicos provenientes do cultivo de cogumelos como fonte de energia contribui para a diversificação de insumos em biodigestores. Essa abordagem intersetorial amplia a eficiência global do sistema e estimula a adoção de práticas mais integradas na gestão de resíduos (Sher et al., 2024).

Pesquisas recentes têm explorado a aplicação do substrato residual em co-digestão com resíduos agropecuários, visando melhorar o equilíbrio entre carbono e nitrogênio e aumentar a taxa de metanogênese. A combinação de diferentes materiais permite um processo mais estável e com maior rendimento energético. Essa prática representa um exemplo concreto de aplicação dos princípios de circularidade produtiva e otimização de recursos naturais (Alengbawy et al., 2024).

Sob a ótica da engenharia química, o cultivo de *Agaricus bisporus* oferece um modelo de sistema controlado que pode ser correlacionado ao funcionamento dos

biodigestores. Ambos requerem monitoramento contínuo de parâmetros físicos e químicos e dependem da atividade microbiana para a conversão de matéria orgânica. Essa similaridade de fundamentos contribui para o intercâmbio de técnicas e para o desenvolvimento de tecnologias integradas voltadas à eficiência e à sustentabilidade (Archana et al., 2024).

Os avanços nas pesquisas de materiais alternativos para o cultivo de cogumelos também impactam a eficiência da biodigestão. Substratos mais homogêneos e de composição estável tendem a gerar resíduos mais adequados para processos bioenergéticos. A uniformidade química facilita a previsão da taxa de degradação e o controle das variáveis operacionais nos biodigestores. Essa relação direta entre qualidade do substrato e eficiência da conversão energética reforça a interconexão entre os sistemas (Huang, 2024).

O aproveitamento energético dos resíduos do Champignon de Paris representa uma aplicação prática do conceito de biorrefinaria, em que diferentes produtos são extraídos e reaproveitados a partir de um mesmo processo biológico. Nesse contexto, a biomassa residual do cultivo pode gerar energia, fertilizantes e insumos industriais, contribuindo para a redução do desperdício e para o uso mais racional dos recursos naturais (Sher et al., 2024).

2.7 Biomassa lignocelulósica e substrato exaurido de *Agaricus bisporus*

A biomassa lignocelulósica representa a fração estrutural predominante dos tecidos vegetais e constitui uma das fontes renováveis mais abundantes disponíveis para a produção de bioenergia. Sua composição é baseada em três polímeros principais: celulose, hemicelulose e lignina, os quais se encontram organizados em uma matriz tridimensional complexa e altamente resistente à degradação biológica (Manyi-Loh; Lues, 2023).

A celulose representa, em geral, entre 40 e 60% da matéria seca da biomassa lignocelulósica, enquanto a hemicelulose corresponde a aproximadamente 20–35% e a lignina pode representar entre 15 e 40% da composição total. A lignina atua como um polímero estrutural responsável por conferir rigidez à parede celular vegetal e proteger os carboidratos estruturais contra a ação de agentes físicos, químicos e biológicos (Manyi-Loh; Lues, 2023).

A interação entre esses componentes resulta em uma matriz estrutural recalcitrante, dificultando o acesso de enzimas e microrganismos às frações potencialmente biodegradáveis da biomassa. Nesse contexto, a lignina exerce papel fundamental ao atuar como barreira física à degradação da celulose e da hemicelulose, reduzindo a eficiência de processos biológicos como a digestão anaeróbia (Manyi-Loh; Lues, 2023).

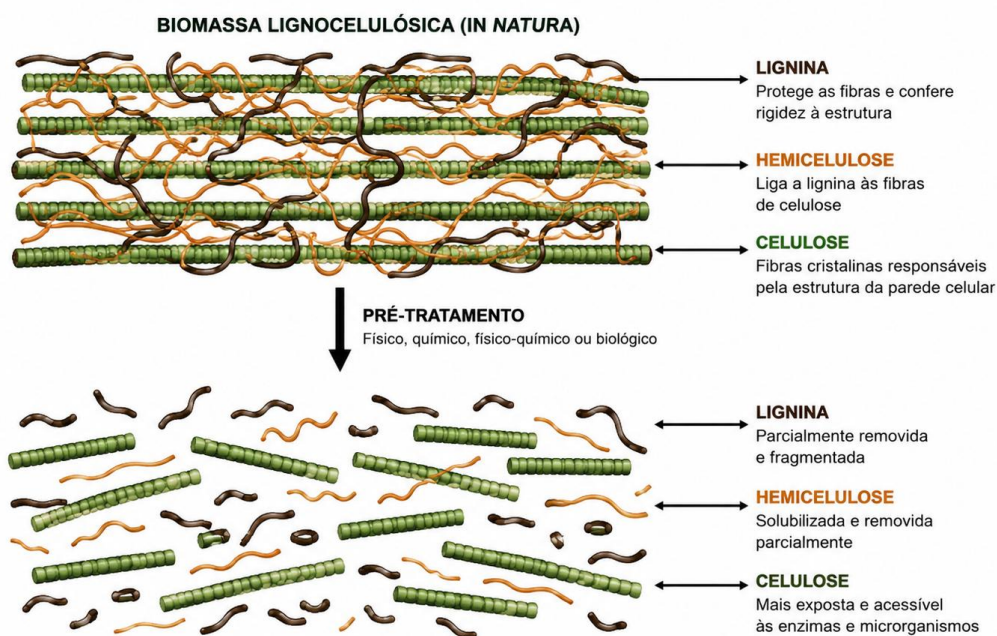
Entre os resíduos lignocelulósicos com potencial para aproveitamento energético destaca-se o substrato exaurido do cultivo de *Agaricus bisporus* (Champignon de Paris). Após a colheita dos cogumelos, parte do material utilizado no cultivo permanece na forma de resíduo, mantendo quantidades significativas de matéria orgânica e compostos lignocelulósicos. Essas características indicam potencial para aplicação do substrato exaurido em processos de valorização energética (Vieira, 2021). Entretanto, a natureza lignocelulósica desse material pode limitar sua biodegradabilidade devido à presença de estruturas recalcitrantes, especialmente lignina, tornando o pré-tratamento uma estratégia potencial para aumentar a eficiência do processo (Hendriks; Zeeman, 2009; Sun, Cheng, 2002).

2.8 Pré-tratamentos de biomassa lignocelulósica

O pré-tratamento, também chamado de processo de preparação, é empregado para otimizar e melhorar a digestão, já que a complexa matéria orgânica presente na biomassa, como celulose, hemicelulose, lignina, proteínas, polissacarídeos e lipídios, precisam ser solubilizadas e hidrolisadas em componentes mais simples, como ácidos graxos de cadeia longa, açúcares e álcoois (Chen, 2017).

O estágio de digestão anaeróbia pode ser encurtado por meio de diferentes métodos de pré-tratamento de biomassa, tanto para mono como para codigestão, os quais devem ser adaptados de acordo com a estrutura e características da biomassa. Portanto, são necessários métodos de pré-tratamento baseados na matéria-prima para facilitar o processo digestão (Pathinvoh, 2017). Na figura 3 está disposto o efeito de um pré-tratamento na biomassa lignocelulósica.

Figura 3 - Efeito do pré-tratamento na fibra da biomassa lignocelulósica



Fonte: adaptado de Gunes *et al.* (2019)

Dentre as tecnologias utilizadas para o pré-tratamento de efluentes, podemos destacar diferentes métodos. No âmbito dos processos mecânicos, temos o ultrassom, micro-ondas, homogeneização eletro-cinética e alta pressão. Os métodos térmicos envolvem variações de temperatura, tanto baixa quanto alta. Já os processos químicos utilizam substâncias como ácido, alcalino e ozonização. Por fim, o pré-tratamento biológico envolve processos como a digestão anaeróbia em fase de temperatura e o uso de células de eletrólise microbiana (Batista *et al.*, 2021).

O pré-tratamento físico, tem como objetivo principal a separação de fases e a remoção de sólidos indesejáveis, como papéis, plásticos e outros materiais. Além disso, esse processo visa também a redução do teor de sólidos totais, promovendo a homogeneidade do efluente. Diversas técnicas físicas são empregadas nesse pré-tratamento, tais como gradeamento, tanque de equalização, decantação, peneiramento e extrusão (Oliveira, 2008).

O pré-tratamento químico, por sua vez, tem como objetivo principal realizar uma pré-hidrólise, utilizando processos ácidos ou alcalinos. A pré-hidrólise ácida apresenta uma alta eficiência na solubilização da lignina, porém há o risco de formação de inibidores que podem afetar a digestão anaeróbia (Cardona *et al.*, 2010). Em contraste, a pré-hidrólise alcalina apresenta benefícios ao ampliar a

disponibilidade da celulose, principalmente por meio da eliminação da lignina, e constitui uma alternativa econômica em comparação ao emprego de ácido. No entanto, é relevante salientar que esse método demanda um período de retenção hidráulica mais prolongado (Balat *et al.*, 2008; Mood *et al.*, 2013).

No pré-tratamento biológico, é utilizado a atividade metabólica de microrganismos com o intuito de aumentar a disponibilidade de nutrientes no efluente, promovendo a degradação parcial da matriz lignocelulósica. Exemplos desse tipo de pré-tratamento incluem a compostagem e a pré-hidrólise com recirculação do efluente tratado pelo biodigestor. Essa última técnica é amplamente adotada devido à sua facilidade de operação e baixo custo. Contudo, pode apresentar eficiência reduzida em biomassas com alto teor de fibras, além da necessidade de um tempo maior de retenção hidráulica (Pathinvoh, 2017). Um resumo das técnicas de pré-tratamento está disposto no quadro 1.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens dos pré-tratamentos

Método	Mecanismo de ação	Principais benefícios	Principais limitações
Físico	Promove alterações estruturais por processos mecânicos, para reduzir a granulometria da biomassa, aumentando a exposição das fibras lignocelulósicas.	Aumenta a área superficial da biomassa, com o intuito de melhorar a acessibilidade das enzimas ao substrato sem o uso de reagentes químicos.	Elevado consumo energético, especialmente em partículas muito finas, e baixa capacidade de remoção da lignina quando empregado isoladamente.
Químico	Promove alterações estruturais por agentes químicos, capazes de solubilizar a hemicelulose e/ou lignina, tornando a celulose mais acessível.	Elevada eficiência na desestruturação da biomassa, favorecendo o aproveitamento da fração celulósica nos processos biológicos posteriores.	Pode causar corrosão dos equipamentos, demanda tratamento de efluentes e pode formar compostos inibidores da fermentação.
Biológico	Promove alterações estruturais empregando microrganismos produtores de enzimas ligninolíticas que degradam seletivamente a lignina.	Baixo consumo energético, reduzido impacto ambiental e pequena formação de compostos tóxicos.	Processo lento, difícil controle das condições microbiológicas e possibilidade de consumo parcial da celulose e hemicelulose pelos próprios microrganismos.

Fonte: adaptado de Brodeur *et al.* (2011), Hendriks e Zeeman (2009), Kumar (2014) e Gueri *et al.* (2021)

O emprego de processos de pré-tratamento em compostos lignocelulósicos pode aumentar significativamente as possibilidades de aplicabilidade desses materiais. No contexto da digestão anaeróbia, a implementação do pré-tratamento nos resíduos resulta em um aumento na produção de biogás e viabiliza a utilização de novos substratos acessíveis localmente. Além disso, o pré-tratamento minimiza

obstáculos como a flotação de materiais no biodigestor, resultando em redução do consumo energético na operação de mecanismos de mistura, entre outros benefícios (Montgomery; Bochmann, 2014).

Para ser adequado aos processos de digestão anaeróbia, um pré-tratamento precisa satisfazer os seguintes critérios: maximizar a geração de reagentes que estimulem a ação enzimática nas fibras celulósicas; preservar a integridade da hemicelulose e celulose, evitando sua degradação; prevenir a formação de inibidores potenciais da fermentação, como substâncias tóxicas; minimizar a exigência energética do processo; reduzir o consumo de energia associado ao pré-tratamento físico; diminuir os gastos relacionados aos reatores químicos; gerar menos resíduos e diminuir a utilização de produtos químicos durante o pré-tratamento (Taherzadeh; Karimi, 2008).

A análise dos impactos dos pré-tratamentos na produção de biogás pode ser realizada a partir de ensaios laboratoriais, com destaque para o teste de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) que fornece dados tanto em termos de taxa de produção quanto de produção acumulada de metano (Gueri *et al.*, 2021).

2.9 Potencial bioquímico do metano (PBM)

O potencial bioquímico de metano (PBM), também designado *Biochemical Methane Potential* (BMP), é um padrão experimental que quantifica a competência máxima de um substrato orgânico gerar metano (CH_4) sob circunstâncias controladas de digestão anaeróbia. O PBM é geralmente expresso em litros de metano por grama de sólidos voláteis adicionados ($\text{L CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ SV}$) ou por grama de demanda química de oxigênio (DQO) (Magalhães, 2018; Cárdenas-Cleves *et al.*, 2016).

Esse ensaio laboratorial constitui uma ferramenta essencial para avaliar a biodegradabilidade de resíduos, comparar diferentes substratos e fornecer parâmetros para o dimensionamento e a otimização de biodigestores (Cabrita; Santos, 2023).

Embora existam diferentes protocolos para a realização dos ensaios de PBM, como as normas ISO 11734, ASTM e VDI 4630, esta última permanece como a principal referência para pesquisas envolvendo digestão anaeróbia. A norma estabelece procedimentos relacionados à caracterização dos substratos, preparo do inóculo, condições de incubação, monitoramento da produção de biogás, critérios de

validação e correção dos volumes produzidos para condições normais de temperatura e pressão, favorecendo a comparabilidade entre diferentes estudos (VDI, 2016; Cabrita; Santos, 2023).

De acordo com a VDI 4630, a confiabilidade dos resultados depende da adoção de práticas de controle de qualidade, como a utilização de reatores contendo apenas o inóculo (ensaio em branco), a inclusão de um substrato padrão, geralmente celulose microcristalina, para verificar a atividade metanogênica do inóculo, além da manutenção de condições estritamente anaeróbias durante todo o experimento (VDI, 2016).

O inóculo empregado deve apresentar elevada atividade microbiológica e estar previamente adaptado às condições de operação do ensaio, sendo normalmente obtido de biodigestores ou reatores anaeróbios em funcionamento. Além disso, a relação entre os sólidos voláteis do substrato e do inóculo deve ser cuidadosamente ajustada para evitar sobrecarga orgânica e acúmulo de ácidos graxos voláteis, fatores que podem comprometer a atividade metanogênica e influenciar negativamente a produção de metano (Steindl *et al.*, 2023).

Estudos recentes ressaltam que a padronização das metodologias, o controle das condições experimentais e a adequada caracterização do inóculo são fundamentais para reduzir a variabilidade entre laboratórios e aumentar a confiabilidade dos valores de PBM reportados na literatura. Apesar dos avanços na padronização dos testes, diferenças na origem do inóculo, nas condições operacionais e nos métodos de quantificação do biogás ainda representam importantes fontes de variação entre os resultados obtidos (Cabrita, Santos, 2023; Liu *et al.*, 2024).

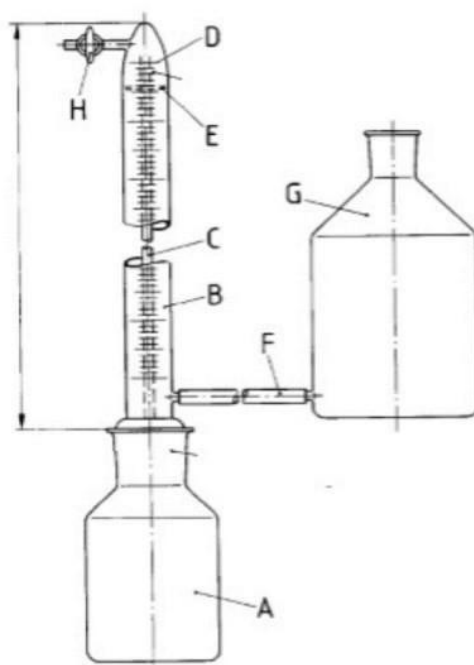
3 METODOLOGIA

3.1 Biodigestor

Os ensaios de digestão anaeróbia foram realizados no Laboratório C-005 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Ponta Grossa.

A montagem do sistema experimental seguiu as recomendações estabelecidas pela norma VDI 4630 (VDI, 2016), com adaptações baseadas nas metodologias descritas por Vieira (2021) e Cirqueira (2025). A figura 4 representa o biodigestor após a montagem, em que A representa o frasco com amostra, B o tubo eudiômetro, C o tubo de conexão, D a marca de referência, E o separador entre os tubos, F a mangueira de silicone que conecta os frascos, G o recipiente de nível e H a válvula destinada à amostragem de gases.

Figura 4 - Materiais utilizados nos testes de potencial bioquímico de biogás



Fonte: Adaptado EDWIGES (2017)

O recipiente de nível (G) e o tubo eudiômetro (B) foram preenchidos com uma solução barreira composta por ácido sulfúrico (H_2SO_4), sulfato de sódio decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e alaranjado de metila. Essa solução foi utilizada para minimizar a dissolução dos constituintes do biogás durante o ensaio, contribuindo para maior precisão na quantificação do volume de gás produzido. O frasco de fermentação (A)

foi mantido em banho-maria a 35 °C, condição correspondente à faixa mesofílica de operação adotada nos ensaios, conforme as recomendações da VDI 4630 (VDI, 2016).

3.2 Resíduos da produção de cogumelo champignon de Paris

O substrato utilizado neste estudo constituiu de um resíduo da produção de cogumelos, ilustrado pela figura 5, fornecido por um agricultor de cogumelos comestíveis da região dos Campos Gerais. Para garantir a estabilidade e a precisão analítica, a amostra foi para um processo de secagem a 60 °C por 6h, seguido de trituração e armazenamento refrigerado a 4 °C até o momento de utilização.

De acordo com Triolo *et al.* (2011; 2016), as etapas de secagem e redução do tamanho das partículas não promovem alterações significativas no potencial de produção de metano da biomassa, porém contribuem para a homogeneização da amostra, aumentando a precisão e a reprodutibilidade dos resultados analíticos.

As análises da composição química, poder calorífico e Potencial Bioquímico de Metano (PBM) foram realizadas com a fração seca e triturada da amostra.

Figura 5 - Resíduos da produção de cogumelo champignon de Paris



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.3 Lodo

O inóculo utilizado nos ensaios consistiu em lodo proveniente da estação de tratamento de esgoto (ETE) do município de Ponta Grossa - PR. Após a coleta, o material foi armazenado sob refrigeração (4 °C) até sua utilização, com o objetivo de preservar a viabilidade da comunidade microbiana e minimizar alterações em suas características físico-químicas. Antes do início dos ensaios, o inóculo foi incubado nas condições experimentais para restabelecimento da atividade microbiológica, conforme recomendado pela VDI 4630 (VDI, 2016).

3.4 Caracterização do resíduo da produção de cogumelo champignon de Paris

Para o substrato foi realizada a análise elementar no laboratório de solos (Labsolos) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Pato Branco.

Para a análise de sólidos totais (ST), as amostras foram secas em estufa por 24h a 105 °C e a partir da massa seca e úmida foi utilizado a equação 1. Em seguida, para a análise de sólidos voláteis totais (SVT), as amostras foram calcinadas a 550 °C até atingirem massa constante, conforme o procedimento padrão descrito no Standard Methods (APHA, 2022) e a partir da massa seca e calcinada foi utilizado a equação 2.

O cálculo foi realizado conforme:

$$ST = \frac{\text{massa seca}}{\text{massa amostra úmida}} \quad (1)$$

A fração volátil foi calculada por:

$$SVT = \frac{(\text{massa seca} - \text{massa calcinada})}{\text{massa seca}} \quad (2)$$

3.5 Pré-tratamento Alcalino

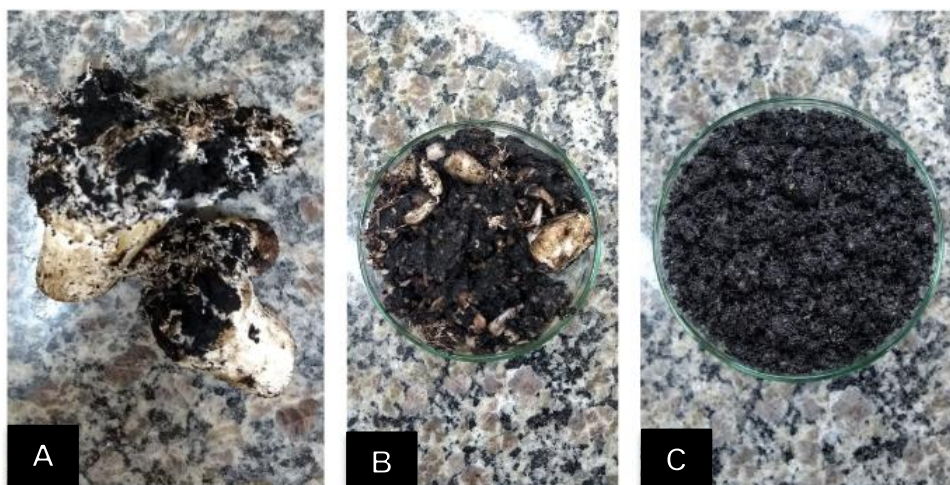
O pré-tratamento alcalino foi conduzido utilizando uma proporção de 1:9 (m/m), de acordo com a metodologia adotada por Cirqueira (2025), entre o resíduo de produção de cogumelo champignon de Paris (*Agaricus bisporus*) e uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) a 1%. Após a homogeneização, a mistura foi

submetida à autoclavagem a 121 °C durante 30 minutos, visando promover a desestruturação parcial da biomassa lignocelulósica.

Concluído o tratamento térmico, o material sólido foi separado e submetido a sucessivas etapas de lavagem com água até que o efluente apresentasse pH próximo da neutralidade, removendo o excesso de hidróxido de sódio e os compostos solubilizados.

Em seguida, a biomassa pré-tratada foi seca em estufa de circulação de ar a 50 °C por 24h e posteriormente armazenada em recipiente adequado até a realização das etapas experimentais subsequentes, conforme metodologia descrita por Silva *et al.* (2016). A figura 6 mostra o resíduo do cogumelo *in natura*, triturado e após o pré-tratamento.

Figura 6 - Etapas de preparação do substrato exaurido de *Agaricus bisporus* para os ensaios de digestão anaeróbia - (A) Substrato exaurido *in natura*; (B) Substrato triturado; (C) Substrato após pré-tratamento alcalino com NaOH 1%.



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.6 Potencial Bioquímico do Biogás

O ensaio PBM foi conduzido conforme as recomendações da norma VDI 4630 (2016). Os experimentos foram realizados utilizando concentrações de 6% de sólidos totais (ST) e uma relação entre a massa de sólidos voláteis totais (SVT) do inóculo/substrato não superior a 0,5, atendendo aos critérios estabelecidos pela norma. Assim como Vieira (2021) e Cirqueira (2025), a biodigestão foi feita nas seguintes condições: substrato de cogumelos e lodo; substrato de cogumelos pré-tratados e lodo; celulose microcristalina (mcc102) e lodo e somente o lodo. O Potencial

Bioquímico de Biogás foi obtido através da razão entre volume de biogás produzido e a massa de sólidos voláteis adicionados na fermentação.

Durante o experimento, os frascos foram submetidos à agitação diária manual, com a finalidade de impedir o acúmulo de gás no interior dos recipientes. O volume de biogás produzido foi determinado diariamente por meio do deslocamento da coluna de líquido no tubo eudiômetro. Conforme ilustrado na Figura 4, o biogás gerado durante a digestão anaeróbia no frasco de digestão (A) aumenta a pressão interna do sistema, deslocando a solução barreira presente no tubo eudiômetro (B) em direção ao frasco de retenção (G). Esse deslocamento da solução permite a leitura direta do volume de biogás produzido por meio da escala graduada do eudiômetro.

As medições foram realizadas até que as variações diárias de volume se tornassem mínimas. Posteriormente, os volumes de biogás acumulados de cada ensaio foram corrigidos para as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), seguindo a norma VDI 4630 (2016).

Conforme descrito por Vieira (2021) e Cirqueira (2025), a cinética de produção de biogás foi descrita utilizando um modelo de regressão não linear. A simulação foi fundamentada no modelo cinético modificado de Gompertz conforme equação 3. Esse modelo matemático foi utilizado para descrever o comportamento da produção acumulada de biogás em sistemas anaeróbios, sendo possível prever a produção de biogás no decorrer do tempo.

$$P(t) = P \times \exp \left[- \exp \left(\frac{R_m \times e \times (\lambda - t)}{P} + 1 \right) \right] \quad (3)$$

Nessa equação:

$P(t)$: Produção acumulada de biogás (L/kgSV_{adic}) no tempo t (dias);

t : tempo da digestão anaeróbia (dias);

P : Potencial máximo de produção de biogás (L/kgSV_{adic});

R_m : Taxa máxima de produção de biogás (L/kgSV_{adic}.dia);

λ : Tempo da fase *lag* em (dias).

e : constante de Euler

Os parâmetros P , R_m e λ foram estimados por ajuste não linear utilizando o método dos mínimos quadrados no Microsoft Excel. Com base nos parâmetros estimados, foi determinada a produção acumulada de biogás pelo modelo de Gompertz. A qualidade do ajuste foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), calculado a partir da comparação entre os valores experimentais e os estimados pelo modelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização físico-química do resíduo de *Agaricus bisporus*

A caracterização físico-química do substrato exaurido de *Agaricus bisporus* foi realizada com a finalidade de avaliar seu potencial para conversão anaeróbia em biogás, considerando parâmetros diretamente relacionados à biodegradabilidade da biomassa lignocelulósica.

A análise elementar do resíduo foi realizada pelo Laboratório de Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (LAB nº 1852P), cujos resultados encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição elementar resíduo da produção de Champignon de Paris (*Agaricus Bisporus*)

Identificação	N(%)	P(%)	K(%)	Ca(%)	Mg(%)	C
Amostra 1*	3,22	1,67	1,79	4,53	0,45	29,41

Fonte: Autoria própria (2026)

Com base nos valores de carbono e nitrogênio, estimou-se uma relação C/N aproximada de 9,13. Esse valor encontra-se abaixo da faixa ideal para digestão anaeróbia, normalmente entre 20 e 30, podendo indicar excesso relativo de nitrogênio e potencial formação de nitrogênio amoniacal durante o processo anaeróbio (Yang *et al.*, 2024). Na literatura, os estudos com SMS de *Agaricus Bisporus* indicam o mesmo comportamento, uma relação C/N entre 10 e 22, como apresentado na Tabela 2.

O nitrogênio é fundamental para o crescimento microbiano, porém com relações C/N reduzidas como os casos da Tabela 2 o acúmulo de nitrogênio amoniacal total e amônia livre é favorecido, podendo causar efeitos tóxicos sobre as comunidades anaeróbias. Com concentrações altas de amônia livre a atividade metanogênica é reduzida resultando na queda da eficiência global do processo anaeróbio (Yang *et al.*, 2024). Além disso, a inibição da atividade metanogênica favorece o acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs), uma vez que sua taxa de produção passa a superar sua taxa de consumo. Esse desequilíbrio pode resultar na redução da produção de metano, instabilidade do processo e, em casos mais severos, na falha operacional do biodigestor (Zhang *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a codigestão com substratos ricos em carbono, como palha de milho, bagaço de cana, entre outros, pode representar uma estratégia promissora

para adequar a relação C/N do sistema, reduzindo os riscos associados à inibição por amônia e favorecendo o equilíbrio nutricional necessário ao desenvolvimento da comunidade microbiana anaeróbia. Além de melhorar a estabilidade operacional do processo, a codigestão pode promover efeitos sinérgicos entre os substratos, aumentando a deterioração da matéria orgânica e a produção de metano, especialmente quando resíduos ricos em nitrogênio são combinados com materiais lignocelulósicos de elevada relação C/N (Yenigün; Demirel, 2013; Mata-Alvarez *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014).

Embora a relação C/N do *Agaricus Bisporus* seja relativamente baixa, os resíduos provenientes do cultivo de cogumelos frequentemente apresentam elevada disponibilidade de nutrientes e compostos orgânicos biodegradáveis. Essas características favorecem o crescimento e a atividade metabólica dos microrganismos anaeróbios, contribuindo para a conversão da matéria orgânica em biogás (Vieira, 2021). Apesar da relação C/N inferior à faixa ideal, observou-se incremento na produção de biogás após o pré-tratamento, indicando que a maior disponibilidade da fração orgânica biodegradável, exerceu maior influência sobre o desempenho da digestão anaeróbia do que a limitação nutricional imposta pela relação C/N. Assim, nas condições avaliadas, não foram observados indícios de que a baixa relação C/N tenha comprometido a eficiência do processo.

Tabela 2 - Relação C/N do SMS de *Agaricus bisporus* presente na literatura

Autor/Ano	Tipo de SMS	Carbono (%)	Nitrogênio (%)	C/N
Andrade et al. (2008)	SMS de <i>A. bisporus</i> (composto exaurido)	40,3	2,17	18,6
Andrade et al. (2008)	SMS de <i>A. bisporus</i> (composto exaurido)	43,3	2,44	17,7
Elaamer (2020)	Spent Mushroom Compost (SMC)	8,34	0,384	21,7
Yagüe et al. (2025)	SMS de <i>A. bisporus</i>	24,0	1,8	13,3
Yagüe et al. (2025)	SMS compostado de <i>A. bisporus</i>	30,0	2,7	11,1
Hernández et al. (2021)	SMS de <i>A. bisporus</i> durante compostagem	—	—	<15–20 (final)

Fonte: Andrade et al (2008), Elaamer (2020), Yagüe et al (2025) e Hernández et al. (2021).

A caracterização gravimétrica do substrato foi feita por meio da determinação de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis totais (SVT), apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização gravimétrica do resíduo da produção de Champignon de Paris (*Agaricus Bisporus*)

Parâmetro	<i>In natura</i> (m/m)	Pré-tratado (NaOH 1%) (m/m)
ST	0,474 ± 0,042	0,536 ± 0,076
SVT	0,384 ± 0,029	0,415 ± 0,028

Fonte: Autoria própria (2026)

Observou-se aumento aproximado de 13,1% no teor de ST e de 8,1% no teor de SVT após o pré-tratamento alcalino.

O aumento relativamente discreto da fração de SVT sugere que o tratamento alcalino não promoveu degradação significativa da matéria orgânica total, mas provocou alterações estruturais na matriz lignocelulósica do substrato.

O NaOH atua predominantemente sobre a estrutura da biomassa lignocelulósica por meio da solubilização parcial da lignina e da ruptura de ligações éster entre lignina e hemicelulose, sem necessariamente ocasionar grandes alterações quantitativas na massa orgânica total (Sambusiti *et al.*, 2013).

Aumentos moderados nos sólidos voláteis após pré-tratamento alcalino de biomassa lignocelulósica também foram observados, sendo esse comportamento associado à maior disponibilidade da fração orgânica biodegradável (Sambusiti *et al.*, 2013).

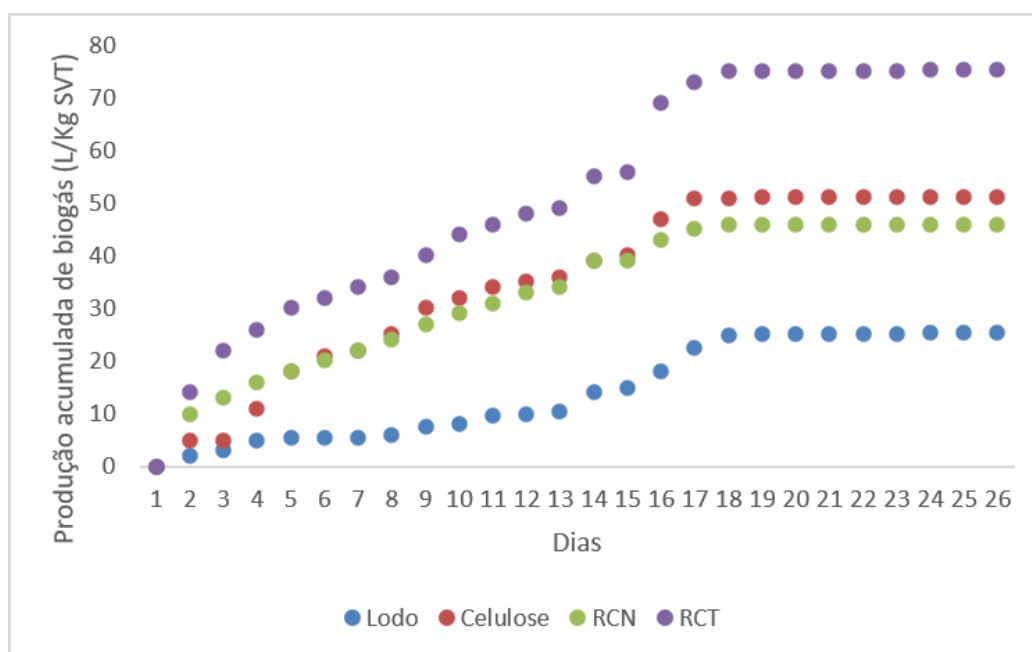
Resultados semelhantes foram reportados para resíduos lignocelulósicos submetidos à aplicação de NaOH, nos quais foi verificado aumento da biodegradabilidade em decorrência da desestruturação parcial da parede celular vegetal (Zheng *et al.*, 2014).

A quantificação de ST e SVT foi fundamental para determinação da carga orgânica aplicada nos ensaios PBM e para padronização da massa de substrato utilizada nos biodigestores.

4.2 Produção acumulada de biogás

A produção acumulada de biogás, gráfico 1, foi utilizada como principal parâmetro de avaliação da eficiência da digestão anaeróbia do substrato exaurido de *Agaricus bisporus* submetido ao pré-tratamento alcalino.

Gráfico 1: Produção acumulada de biogás



Fonte: Autoria própria (2026)

Os resultados demonstraram que o tratamento contendo resíduo pré-tratado com NaOH 1% (RCT) apresentou produção acumulada final de 75,3 L/KgSV_{adic}, enquanto o tratamento contendo resíduo *in natura* (RCN) apresentou produção acumulada de 46 L/KgSV_{adic}.

Os resultados indicaram incremento de aproximadamente 63,7% na produção acumulada de biogás após aplicação do pré-tratamento alcalino no em comparação com o substrato *in natura*.

Esse aumento expressivo demonstra que o principal efeito do NaOH foi qualitativo, relacionado à modificação estrutural da biomassa lignocelulósica, e não apenas quantitativo, uma vez que o aumento dos SVT foi relativamente pequeno quando comparado ao aumento observado na produção de biogás.

A hidrólise é considerada a principal etapa limitante da digestão anaeróbia de resíduos lignocelulósicos devido à elevada recalcitrância estrutural da lignina. Dessa

forma, processos capazes de reduzir essa barreira estrutural tendem a aumentar significativamente a biodegradabilidade da biomassa (Hendriks; Zeeman, 2009).

O pré-tratamento alcalino promove a solubilização parcial da lignina, o aumento da porosidade das fibras e maior acessibilidade da celulose e da hemicelulose à degradação microbiana (Hendriks; Zeeman, 2009).

Resultados semelhantes foram observados em resíduos agrícolas lignocelulósicos submetidos a pré-tratamento alcalino, nos quais foi reportado aumento aproximado de 65% na produção de biogás após a aplicação de NaOH (Sambusiti *et al.*, 2013).

Incrementos entre 30 e 80% na produção de metano também foram observados em diferentes biomassas submetidas a pré-tratamento com NaOH, variando em função da concentração alcalina empregada e do tempo de exposição do substrato ao tratamento (Zheng *et al.*, 2014).

Adicionalmente, foi observado aumento significativo da digestibilidade anaeróbia após a desestruturação parcial da lignina em substratos lignocelulósicos, reforçando a importância do pré-tratamento para redução da recalcitrância estrutural da biomassa (Sambusiti *et al.*, 2013).

Comparativamente, o aumento de 63,7% observado no presente estudo mostrou-se superior a diversos resultados reportados na literatura para resíduos agrícolas convencionais, sugerindo elevada sensibilidade do substrato exaurido de *Agaricus bisporus* ao pré-tratamento alcalino.

Esses resultados reforçam a hipótese de que a modificação estrutural promovida pelo NaOH aumentou a disponibilidade da matéria orgânica biodegradável e favoreceu a conversão anaeróbia em biogás.

4.3 Ajuste do modelo cinético

A dinâmica temporal da produção de biogás foi avaliada por meio da modelagem cinética utilizando o modelo de Gompertz. Os parâmetros cinéticos foram estimados no Microsoft Excel por meio de ajuste não linear, conforme descrito na metodologia, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros cinéticos do modelo de Gompertz

Tratamento	P (L/KgSV _{adic})	R _m (L/KgSV _{adic} .dia)	λ (dias)	R ²
RCT	86,6	11,1	5,6	0,96
RCN	50,1	8,1	4,7	0,98
Celulose	54,8	9,8	5,4	0,98
Lodo	33,8	4,0	10,8	0,96

Fonte: Autoria própria (2026).

Os parâmetros cinéticos estimados pelo modelo de Gompertz evidenciaram diferenças entre as análises realizadas quanto ao potencial máximo de produção de biogás (P), à taxa máxima de produção (R_m) e ao tempo de fase *lag* (λ) (adaptação microbiana).

O substrato submetido ao pré-tratamento alcalino (RCT) apresentou o maior potencial máximo de produção de biogás (86,6 L/KgSV_{adic}), superando o resíduo sem pré-tratamento (RCN), cujo potencial estimado foi de 50,1 6 L/KgSV_{adic}. Esse resultado confirma que o pré-tratamento aumentou a fração biodegradável do substrato, favorecendo sua conversão em biogás.

Resultados semelhantes foram observados em substratos lignocelulósicos submetidos à desestruturação parcial da lignina, nos quais foi verificado aumento da taxa de degradação anaeróbia e melhoria da digestibilidade da biomassa (Sambusiti *et al.*, 2013).

O potencial máximo de produção de biogás obtido para a análise RCT foi superior ao da celulose microcristalina utilizada como controle positivo no ensaio. Esse resultado merece atenção, uma vez que a celulose microcristalina apresenta composição conhecida e elevada pureza, sendo utilizada como substrato de referência para avaliação da atividade do inóculo e para garantir a confiabilidade dos ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (VDI, 2016). Embora a maior produção observada para o RCT possa estar associada ao aumento da disponibilidade de compostos biodegradáveis promovido pelo pré-tratamento alcalino, esse comportamento também evidencia a complexidade da relação entre a estrutura do substrato e sua biodegradabilidade durante a digestão anaeróbia. Mesmo materiais considerados de fácil degradação, como a celulose, podem apresentar limitações relacionadas à sua estrutura cristalina, que dificulta o acesso dos microrganismos às

cadeias poliméricas, reduzindo a eficiência da etapa de hidrólise durante a digestão anaeróbia (Zabed *et al.*, 2016).

A fase *lag* representa o período necessário para a adaptação e ativação dos microrganismos antes do início da produção acelerada de biogás, sendo influenciada por fatores como composição do substrato, disponibilidade de compostos biodegradáveis, presença de compostos inibidores e interação entre inóculo e substrato (Zwietering *et al.*, 1990; Li *et al.*, 2018).

Em relação ao tempo da fase *lag* (λ), observou-se que o tratamento RCT apresentou período de adaptação microbiana de 5,6 dias, enquanto o resíduo sem pré-tratamento (RCN) apresentou valor de 4,7 dias. Embora o pré-tratamento alcalino tenha promovido aumento do potencial máximo de produção de biogás e da taxa máxima de produção, não foi observada redução no período inicial de adaptação dos microrganismos. Segundo Li *et al.* (2018), as alterações na estrutura da biomassa podem modificar a dinâmica inicial da digestão anaeróbia, pois a maior disponibilidade de compostos solúveis nem sempre resulta em menor tempo de adaptação microbiana.

Além disso, esse comportamento pode estar relacionado às alterações promovidas pelo tratamento alcalino na estrutura do substrato, que apesar de favorecer a solubilização da matéria orgânica e aumentar sua biodegradabilidade, pode também modificar as características químicas do meio, exigindo um período adicional de adaptação da comunidade microbiana (Hendriks e Zeeman, 2009; Carrere *et al.*, 2016).

O valor de λ obtido para o RCT foi próximo ao observado para a celulose microcristalina (5,4 dias), indicando comportamento semelhante quanto ao período inicial de adaptação do sistema. Por outro lado, o lodo apresentou maior fase *lag* (10,8 dias), o que pode estar associado à menor disponibilidade de matéria orgânica facilmente biodegradável e à necessidade de adaptação da microbiota às condições do ensaio.

Dessa forma, os resultados indicam que o pré-tratamento alcalino atuou principalmente no aumento da disponibilidade do substrato e na aceleração da conversão da matéria orgânica, refletido pelos maiores valores de P e R_m, sem alterar significativamente a etapa inicial de adaptação microbiana. Do ponto de vista operacional, esse comportamento é relevante, pois maiores taxas de degradação

podem reduzir o tempo de retenção hidráulica e aumentar a produtividade volumétrica dos biodigestores.

Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos variaram entre 0,96 e 0,98 para todos os tratamentos, indicando excelente ajuste do modelo de Gompertz aos dados experimentais de produção acumulada de biogás. Valores de R^2 próximos de 1 evidenciam que o modelo foi capaz de explicar a variabilidade observada, reproduzindo adequadamente o comportamento sigmoidal característico da digestão anaeróbia. Esses resultados demonstram que as estimativas dos parâmetros cinéticos, como potencial máximo de produção (P), taxa máxima de produção (R_m) e fase *lag* (λ), apresentam elevada confiabilidade para a interpretação do processo.

4.4 Comparação entre substrato *in natura* e pré-tratado

A análise conjunta dos resultados demonstra que o pré-tratamento alcalino exerceu influência significativa sobre a digestão anaeróbia do substrato exaurido de *Agaricus bisporus*.

Embora o aumento observado nos sólidos voláteis tenha sido relativamente discreto, o expressivo incremento na produção acumulada de biogás evidencia que o principal efeito do NaOH ocorreu sobre a estrutura da biomassa lignocelulósica.

O pré-tratamento alcalino promove a ruptura parcial das ligações entre lignina e carboidratos estruturais, reduzindo a recalcitrância da biomassa e favorecendo a acessibilidade microbiana às frações potencialmente biodegradáveis (Hendriks; Zeeman, 2009).

No presente estudo, essas alterações estruturais refletem diretamente no aumento da produção acumulada de biogás, da produção específica e da taxa máxima de degradação.

Os resultados obtidos corroboram estudos prévios envolvendo biomassa lignocelulósica submetida a pré-tratamento alcalino, nos quais foram observadas melhorias significativas na digestibilidade anaeróbia e no aproveitamento energético da matéria orgânica após a aplicação de hidróxido de sódio (Sambusiti *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2014).

Do ponto de vista tecnológico, os resultados demonstram que o pré-tratamento alcalino representa uma estratégia promissora para intensificação do aproveitamento energético do resíduo proveniente da produção de cogumelos.

Além da geração de energia renovável, o aproveitamento anaeróbio do substrato exaurido pode contribuir para a redução de passivos ambientais e para o fortalecimento da economia circular na cadeia produtiva de cogumelos.

Entretanto, a aplicação em escala ampliada ainda depende da otimização das condições operacionais, da redução do consumo de reagentes químicos e da avaliação técnico-econômica do processo.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu avaliar o potencial do substrato exaurido de *Agaricus bisporus* como matéria-prima para produção de biogás por digestão anaeróbia, bem como investigar a influência do pré-tratamento alcalino com NaOH a 1% sobre a eficiência do processo. Os resultados obtidos demonstram que o substrato apresenta características compatíveis com seu aproveitamento energético, reforçando seu potencial como alternativa para a valorização de resíduos provenientes da cadeia produtiva de cogumelos.

A aplicação do pré-tratamento alcalino favoreceu a disponibilidade da matéria orgânica aos microrganismos anaeróbios, reduzindo parcialmente as limitações impostas pela estrutura lignocelulósica da biomassa. Como consequência, observou-se melhora no desempenho da digestão anaeróbia, refletida no aumento da produção acumulada de biogás e na melhoria dos principais parâmetros cinéticos estimados pelo modelo de Gompertz modificado, evidenciando maior potencial de aproveitamento energético do substrato.

A modelagem matemática mostrou-se uma ferramenta eficiente para descrever o comportamento da produção de biogás, permitindo comparar quantitativamente os tratamentos e compreender os efeitos do pré-tratamento sobre o potencial máximo de produção, a taxa máxima de geração e a dinâmica do processo anaeróbio.

Sob a perspectiva ambiental, o aproveitamento do substrato exaurido para geração de energia contribui para reduzir a disposição inadequada desse resíduo, promover a recuperação de recursos e fortalecer práticas alinhadas aos princípios da economia circular e da bioeconomia. Além disso, sua utilização amplia as possibilidades de integração entre a produção agrícola e a geração descentralizada de energia renovável.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar diferentes concentrações de NaOH, tempos de pré-tratamento e condições operacionais, bem como investigar a codigestão do substrato exaurido com outros resíduos agroindustriais. Também se recomenda quantificar o volume de água empregado nas etapas de lavagem após o pré-tratamento e avaliar possíveis perdas de matéria

orgânica solubilizada durante esse procedimento, permitindo uma análise mais completa do balanço de massa e da eficiência global do processo.

Além disso, futuras pesquisas devem considerar a sustentabilidade do próprio pré-tratamento alcalino. Embora o NaOH tenha promovido ganhos expressivos na produção de biogás, seu consumo em larga escala pode representar custos adicionais e gerar passivos ambientais, especialmente em relação ao uso de reagentes químicos e à geração de efluentes. Nesse contexto, torna-se relevante investigar estratégias para reduzir o consumo de NaOH, recuperar ou reutilizar o reagente, bem como avaliar alternativas de menor impacto ambiental, de forma que os benefícios obtidos com o aumento da biodegradabilidade sejam compatíveis com os princípios da Economia Circular, que preconizam a redução do consumo de recursos e da geração de resíduos ao longo de todo o ciclo produtivo.

De modo geral, conclui-se que o pré-tratamento alcalino constitui uma alternativa promissora para aumentar o potencial energético do substrato exaurido de *Agaricus bisporus*, contribuindo para a otimização da digestão anaeróbia e para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis de aproveitamento de resíduos agroindustriais. Entretanto, sua aplicação em escala industrial deverá ser acompanhada da otimização do consumo de água e de reagentes químicos, de forma a conciliar ganhos energéticos, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

- ALENGEBAWY, A.; MOHAMED, A. A.; EL-RAMADY, H.; EL-MONEM, A. A.; ELTOHAMY, K. Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 22, n. 6, p. 2641–2668, dez. 2024.
- ANDRADE, M. C. N.; MINHONI, M. T. A. KUPPER, K. C.; FIGUEIREDO, M. B. Caracterização química do composto exaurido da produção de *Agaricus bisporus*. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 2, p. 197–201, 2008.
- ANGELIDAKI, I.; TREU, L.; TSAPEKOS, P.; LUO, G.; CAMPANARO, S.; WENZEL, H.; KOUGIAS, P. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452–466, fev. 2018.
- ANPC. Associação Nacional dos Produtores de Cogumelos. **Cogumelos no Brasil**. Disponível em: <https://www.anpccogumelos.com.br/cogumelos>. Acesso em: 31 maio 2026.
- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- ARCHANA K. *et al.* A review on recent technological breakthroughs in anaerobic digestion of organic biowaste for biogas generation: Challenges towards sustainable development goals. **Fuel**, v. 358, p. 130298, fev. 2024.
- BAKAN, B. *et al.* Circular economy applied to organic residues and wastewater: research challenges. **Waste and Biomass Valorization**, v. 13, p. 1267-1276, fev. 2022.
- BALAT, M.; BALAT, H.; OZ, C.. Progress in Bioethanol Processing. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.34, n.5, p.551-573, out. 2008.
- BATISTA, A. C. M. *et al.* Pré-tratamentos de biomassa lignocelulósica para obtenção de biocombustíveis: revisão bibliográfica. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 4., 2021, Campina Grande. **Anais do IV Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Campina Grande: Realize Editora, 2021. p. 163–177. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/74962>. Acesso em: 07 jul. 2026.
- BHAGARATHI, Lakhnarayan Kumar; SUBRAMANIAN, Gomathinayagam; DASILVA, Phillip NB. A review of mushroom cultivation and production, benefits and therapeutic potentials. **World J. Biol. Pharm. Health Sci**, v. 15, p. 01-056, ago. 2023.
- BRODEUR, G.; YAU, E.; BADAL, K. *et al.* Chemical and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. **Enzyme Research**, v. 2011, art. 787532, 2011.

BOHRZ, G. I. **Geração de metano em lagoa anaeróbia**: um estudo de caso em abatedouro de bovinos. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2010.

CABRITA, T. M.; SANTOS, M. T. **Biochemical Methane Potential Assays for Organic Wastes as an Anaerobic Digestion Feedstock**. *Sustainability*, v. 15, n. 15, 11573, 2023.

CÁRDENAS-CLEVES, L. M. *et al.* Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano-PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. **Revista Ion**, v. 29, n. 1, p. 95-108, 2016.

CARDONA, C. A.; QUINTERO, J. A.; PAZ, I. C.. Production of Bioethanol from Sugarcane Bagasse: Status and Perspectives. **Bioresource Technology**, v.101, n.13, p.4754- 4766, jul. 2010.

CARRÈRE, H.; DUMAS, C.; BATTIMELLI, A.; BATSTONE, D. J.; DELGENÈS, J. P.; STEYER, J. P.; FERRER, I. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: **A review**. **Journal of Hazardous Materials**, v. 183, p. 1–15, nov. 2010.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4044–4064, jul. 2008.

CIRQUEIRA, Natália de Oliveira. **Codigestão anaeróbia do resíduo da produção de cogumelos *Agaricus bisporus* e soro de leite para a produção de biogás**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2025.

ELLEN M. F. **Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition**. 2013. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>. Acesso em: 20 dez. 2025.

ESPOSITO, B.; SESSA, M. R.; SICA, D.; MALANDRINO, O. Towards circular economy in the agri-food sector: a systematic literature review. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7401, set. 2020.

EUROPEAN PARLIAMENT. Circular economy: definition, importance and benefits. **Brussels**, 2015. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/>. Acesso em: 28 jun. 2026.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Database**. 2022. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: jun. 2026.

GUERI, M. V. D.; SCHIRMER, W. N.; TORRES, L. M. G.; FURTADO, A. C. Pré-tratamentos de resíduos lignocelulósicos visando ao aumento da geração de metano

nos processos de digestão anaeróbia: uma revisão. **Revista Geama**, v. 7, n. 3, p. 13–27, dez. 2021.

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**, v. 113, art. 109281, 2019.

GUSTAFSSON, M. et al. **A perspective on the state of the biogas industry from selected member countries**. IEA Bioenergy Task 37, 2024. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/10/IEA_Bioenergy_T37_CountryReportSummary_2024.pdf. Acesso em: nov. 2025.

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**, v. 13, n. 6, p. 3453, mar. 2021.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 1, p. 10–18, jan. 2009.

HERNÁNDEZ, T.; CHOCANO, C.; MORENO, J. L.; GARCÍA, C. Agricultural use of spent mushroom substrate: a review on its composition, characteristics and applications. **Agronomy, Basel**, v. 11, n. 4, 2021.

HUANG, X. The promotion of anaerobic digestion technology upgrades in waste stream treatment plants for circular economy in the context of “dual carbon”: global status, development trend, and future challenges. **Water**, v. 16, n. 24, p. 3718, dez. 2024.

JAMEEL, M. K.; MUSTAFA, M. A.; AHMED, H. S.; MOHAMMED, A. J.; GHAZY, H.; SHAKIR, M. N.; LAWAS, A. M.; MOHAMMED, S. K.; IDAN, A. H.; MAHMOUD, Z. H.; SAYADI, H.; KIANFAR, E. Biogas: production, properties, applications, economic and challenges: a review. **Results in Chemistry**, v. 7, p. 101549, maio 2024.

KASINATH, A.; FUDALA-KSIAZEK, S.; SZOPINSKA, M.; BYLINSKI, H.; ARTICHOWICZ, W.; REMISZEWSKA-SKWAREK, A.; LUCZKIEWICZ, A. Biomass in biogas production: pretreatment and codigestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111509, out. 2021.

KOUGIAS, P. G.; ANGELIDAKI, I. Biogas and its opportunities—A review. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 12, n. 3, p. 14, abr. 2018.

KUMAR, P.; BARRETT, D. M.; DELWICHE, M. J.; STROEVE, P. An overview of key pretreatment processes for biological conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol. **Industrial Crops and Products**, v. 62, p. 139–159, 2014.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. **Fundamentals of anaerobic digestion, biogas purification, use and treatment of digestate**. Concórdia: Technical Editors, jun. 2022.

LEVÉN, L.; ERIKSSON, A. R.; SCHNÜRER, A. Effect of process temperature on bacterial and archaeal communities in two methanogenic bioreactors treating organic household waste. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 59, n. 3, p. 683–693, mar. 2007.

LI, Y.; PARK, S. Y.; ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 821–826, 2011.

LIU, Y. et al. **Biochemical methane potential database: A public platform**. *Bioresource Technology*, v. 393, 130111, 2024.

LOUZADA, A. G. **Avaliação da atividade metanogênica específica de lodos com condicionamento hidrolítico provenientes do sistema UASB + BFs**. 2006. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2006.

MAGALHÃES, G. V. V. **Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real**. 2018. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MALINA, J. F.; POHLAND, F. G. **Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes**. Lancaster: Technomic, 1992. v. 7. 142 p.

MANYI-LOH, C. E.; LUES, R. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: substrate characteristics (challenge) and innovation. **Fermentation**, v. 9, n. 8, p. 755, ago. 2023.

MARCUCCI, S. M. P.; ROSA, R. A.; LENZI, G. G.; BALTHAZAR, J. M.; FUZIKI, M. E. K.; TUSSET, A. M. Biogas overview: global and Brazilian perspectives with emphasis on Paraná State. **Sustainability**, v. 17, n. 1, p. 321, jan. 2025.

MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; ROMERO-GÜIZA, M. S.; FONOLL, X.; PECES, M.; ASTALS, S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412–427, ago. 2014.

MEGODA, J. N.; LI, B.; PATEL, K.; WANG, L. B. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 10, p. 2224, out. 2018.

MONNET, F. **An introduction to anaerobic digestion of organic wastes**. Remade Scotland, 2003. 48 p. Disponível em: http://www.biogasmax.co.uk/media/introanaerobicdigestion__073323000_1011_2404_2007.pdf. Acesso em: 07 jul. 2025.

MONTGOMERY, L. F. R.; BOCHMANN, G. **Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production**. IEA Task 37 – Energy from Biogas, IEA Bioenergy, Paris, France, 2014. ISBN 978-1-910154-05-2. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2014/12/pretreatment_web.pdf. Acesso em: 06 jun. 2026.

MOOD, S. H.; GOLFESHAN, A. H.; TABATABAEI, M.; JOUZANI, G. S.; NAJAFI, G. H.; GHOLAMI, M.; ARDJMAND, M. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 77–93, 2013.

OLIVEIRA, L. R. M. **Estudo de alternativas viáveis de pré-tratamento e hidrólise do bagaço e palha de cana-de-açúcar para obtenção de etanol a partir de celulose**. Relatório FAPESP, 2008.

OSTOS, I.; FLÓREZ-PARDO, L. M.; CAMARGO, C. A metagenomic approach to demystify the anaerobic digestion black box and achieve higher biogas yield: a review. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1437098, out. 2024.

PARANÁ. **Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. Departamento de Economia Rural (DERAL). Com quase mil toneladas, Paraná dobra produção de cogumelos em dez anos.** 2025. Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/Audio/Com-quase-mil-toneladas-Parana-dobra-producao-de-cogumelos-em-dez-anos>. Acesso em: 31 maio 2026.

PATINVOH, J. R.; OSADOLOR, O. A.; CHANDOLIAS, K.; HORVÁTH, I. S.; TAHERZADEH, J. M. Innovative pretreatment strategies for biogas production. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 13–24, jan. 2017.

ROYSE, D. J.; BAARS, J.; TAN, Q. Current overview of mushroom production in the world. In: ZIED, D. C.; PARDO-GIMÉNEZ, A. (eds.). **Edible and medicinal mushrooms: technology and applications**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd., p. 5–13, 2017.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2007.

SAMBUSITI, C.; MONLAU, F.; FICARA, E.; CARRÈRE, H.; MALPEI, F. A comparison of different pre-treatments to increase methane production from two agricultural substrates. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 104, p. 62–70, 2013.

SHER, F.; SMJEČANIN, N.; HRNJIĆ, H.; KARADŽA, A.; OMANOVIĆ, R.; ŠEHOVIĆ, E.; SULEJMANOVIĆ, J. Emerging technologies for biogas production: a critical review on recent progress, challenges and future perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 188, p. 834–859, ago. 2024.

STEINDL, M. et al. **The importance of inspecting the inoculum's methane production for estimating kinetic parameters in biochemical methane potential tests**. *Bioresource Technology*, v. 378, 128963, 2023.

SILVA, G. A.; MORAIS JUNIOR, J. A.; ROCHA, E. R. Proposta de procedimento operacional padrão para o teste do Potencial Bioquímico do Metano aplicado a resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 11–16, mar. 2016.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 1–11, mai. 2002.

SUWANNARACH, Nakarin. et al. Impact of cultivation substrate and microbial community on improving mushroom productivity: a review. **Biology**, v. 11, n. 4, p. 569, abr. 2022.

SWINBOURN, R.; LI, C.; WANG, F. A comprehensive review on biomethane production from biogas separation and its techno-economic assessments. **ChemSusChem**, v. 17, n. 19, p. e202400779, out. 2024.

TAHERZADEH, M. J.; KARIMI, K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1621–1651, set. 2008.

TRIOLO, J. M.; SOMMER, S. G.; PEDERSEN, L. Influence of freezing/thawing and drying/milling on biochemical methane potential. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 15, n. 7, p. 1533–1536, jul. 2016.

TRIOLO, J. M.; SOMMER, S. G.; MØLLER, H. B.; WEISBJERG, M. R.; JIANG, X. Y. A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: influence of lignin concentration on methane production potential. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 20, p. 9395–9402, out. 2011.

VDI. **VDI 4630: Fermentation of organic materials**: characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Düsseldorf: Associação Alemã de Engenheiros, 2016.

VIEIRA, S. **Biodigestão anaeróbia do resíduo da produção de cogumelos tipo champignon de Paris (*Agaricus bisporus*)**. 2021. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

VITORATTO, E. **Tratamento de efluentes líquidos orgânicos**: Sistemas Anaeróbios. PROACQUA Processos de Tratamento de Efluentes e Com. Ltda (diretor técnico). São Paulo: Faculdade Oswaldo Cruz, 2004. 13 p.

WANG, X.; LU, X.; LI, F.; YANG, G. Effects of Temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) Ratio on the Performance of Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure, Chicken Manure and Rice Straw: Focusing on Ammonia Inhibition. **PLOS ONE**, v. 9, n. 5, e97265, mai. 2014.

YAGÜE, M. R.; GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A.; ALMENDROS, G.; LOBO, M. C. Assessing the potential agronomic value of spent mushroom substrates: evaluating their

suitability to contribute to soil carbon storage. **Sustainability**, Basel, v. 17, n. 16, art. 7335, ago. 2025.

YANG, J.; ZHANG, J.; DU, X.; GAO, T.; CHENG, Z.; FU, W.; WANG, S. Ammonia inhibition in anaerobic digestion of organic waste: a review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2024.

YENIGÜN, O.; DEMIREL, B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. **Process Biochemistry**, v. 48, n. 5-6, p. 901-911, 2013.

YOUNG, Gabrielle et al. Peat alternative casing materials for the cultivation of *Agaricus bisporus* mushrooms—A systematic review. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v. 9, p. 100100, dez. 2024.

ZABED, H.; SAHU, J. N.; BOYCE, A. N.; FARROKHISARABI, M. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 475–501, 2017.

ZHANG, W.; LANG, Q.; WU, S.; LI, W.; BAH, H.; DONG, R. Anaerobic digestion for agricultural residues: Current status and future trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2016.

ZHENG, Y.; ZHAO, J.; XU, F.; LI, Y. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 42, p. 35–53, 2014.

ZWIETERING, M. H.; JONGENBURGER, I.; ROMBOUTS, F. M.; VAN'T RIET, K. Modeling of the bacterial growth curve. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 56, n. 6, p. 1875–1881, jun. 1990.