INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIAS DA VIDA E NATUREZA (ILACVN)

QUÍMICA-LICENCIATURA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DE RESTAURANTE: EFEITO DO BIOCHAR DE ACETATO DE CELULOSE E DO CARVÃO ATIVADO

GABRIELA ALEJANDRA CHACON NAVA

Foz do Iguaçu
Ano 2025

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIAS
DA VIDA E NATUREZA (ILACVN)

QUÍMICA-LICENCIATURA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DE RESTAURANTE: EFEITO DO BIOCHAR DE ACETATO DE CELULOSE E DO CARVÃO ATIVADO

GABRIELA ALEJANDRA CHACON NAVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Ciências de Vida e da Natureza da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciatura em Química

Orientadora: Prof. Dra. Márcia Regina Becker

Foz do Iguaçu
Ano 2025

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

GABRIELA ALEJANDRA CHACON NAVA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DE RESTAURANTE: EFEITO DO BIOCHAR DE ACETATO DE CELULOSE E DO CARVÃO ATIVADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Ciências da vida e natureza da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciada em Química.

BANCA EXAMINADORA

_____
Orientadora: Profa. Dra. Márcia Regina Becker
UNILA

_____
Profa. Dra. Paula Andrea Jaramillo Garcia
UNILA

_____
Profa. Dra. Gilcélia Aparecida Cordeiro
UNILA

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

“Dedico este trabajo para mi familia”

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha orientadora, Profa. Dra. Márcia Regina Becker, pela orientação dedicada, paciência e apoio constante durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço, de forma especial, aos meus pais, Juana e Jorge, e à minha irmã, Mariangel, pelo apoio incondicional desde a minha saída de minha terra. O amor, a força e a presença deles foram essenciais para que eu pudesse chegar na final da minha formação.

Aos meus amigos e colegas de curso, agradeço por estarem presentes nos dias difíceis, pelas risadas compartilhadas e pelas conquistas celebradas juntos. Deixo também um carinho especial para Lílian e Luisa, que foram fundamentais em quase toda a minha trajetória acadêmica. Elas estiveram ao meu lado, oferecendo apoio tanto acadêmico quanto emocional, tornando-se parte da família que construí aqui.

Para minha turma de 2021 (Nathalia, Woodly e Fhaby), que me acompanharam em todos esses anos. Obrigada por me suportarem nos momentos bons e nos difíceis. Levarei cada um de vocês no coração, porque foram presenças indispensáveis em toda essa caminhada.

Agradeço também aos demais professores do curso de Química, que contribuíram para a minha formação acadêmica

Por último, mas não menos importante, agradeço à UNILA Universidade da Integração Latino-Americana por me proporcionar a melhor oportunidade da minha vida. No caminho, conheci um sem-fim de pessoas incríveis. Também para CIBiogas Muito obrigada.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.

Robert Collier

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

RESUMO

A sociedade moderna gera anualmente grandes quantidades de resíduos provenientes de diferentes atividades domésticas, industriais e agropecuárias. Entre eles, os resíduos orgânicos destacam-se por representarem uma fração significativa e, quando manejados inadequadamente, tornam-se uma importante fonte de poluição ambiental. A decomposição desses materiais em condições anaeróbias libera gases de efeito estufa, como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), que contribuem para o aquecimento global e o agravamento do efeito estufa. No Brasil, diversas políticas e legislações ambientais têm sido implementadas com o objetivo de minimizar esses impactos e incentivar o uso de fontes de energia renovável. Nesse contexto, a digestão anaeróbia (DA) surge como uma alternativa promissora, pois, além de reduzir a carga orgânica dos resíduos, possibilita a geração de biogás, uma mistura composta principalmente por CH_4 e CO_2 que pode ser utilizada como fonte de energia limpa e sustentável. A adição de materiais carbonáceos na DA pode favorecer a reação. Este trabalho teve como objetivo principal avaliar os efeitos da adição de biochar ou carvão ativado na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos provenientes de restaurante universitário com e sem carvão ativado ou biochar. Os resultados mostraram que a adição de 5% de carvão ativado na DA favoreceu a reação, produzindo até 223,80 ± 0,04 mL g^{-1} SV de biogás em comparação com a amostra de controle que produziu 66,7 ± 0,8 mL g^{-1} SV. Esses resultados reforçam o potencial de aditivos à base de carbono como agentes estratégicos para uma produção de bioenergia mais limpa e eficiente.

Palavras-chave: digestão anaeróbia, aproveitamento energético, resíduos orgânicos, tratamento de resíduos, sustentabilidade

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

RESUMEN

La sociedad moderna genera anualmente grandes cantidades de residuos provenientes de diversas actividades domésticas, industriales y agropecuarias. Entre ellos, los residuos orgánicos se destacan por representar una fracción significativa y, cuando son manejados de forma inadecuada, se convierten en una importante fuente de contaminación ambiental. La descomposición de estos materiales en condiciones anaerobias libera gases de efecto invernadero, como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), que contribuyen al calentamiento global y al agravamiento del efecto invernadero. En Brasil, diversas políticas y legislaciones ambientales han sido implementadas con el objetivo de minimizar estos impactos e incentivar el uso de fuentes de energía renovable. En este contexto, la digestión anaerobia (DA) surge como una alternativa prometedora, ya que, además de reducir la carga orgánica de los residuos, permite la generación de biogás, una mezcla compuesta principalmente por CH_4 y CO_2 que puede ser utilizada como una fuente de energía limpia y sostenible. La adición de materiales carbonáceos en la DA puede favorecer la reacción. Este trabajo tuvo como objetivo principal evaluar los efectos de la adición de biochar o carbón activado en la digestión anaerobia de residuos orgánicos provenientes de un restaurante universitario, con y sin carbón activado o biochar. Los resultados mostraron que la adición del 5% de carbón activado en la DA favoreció la reacción, produciendo hasta 223,80 ± 0,04 mL g^{-1} SV de biogás en comparación con la muestra de control, que produjo 66,7 ± 0,8 mL g^{-1} SV. Estos resultados refuerzan el potencial de los aditivos a base de carbono como agentes estratégicos para una producción de bioenergía más limpia y eficiente.

Palabras clave: digestión anaeróbica, recuperación de energía, residuos orgánicos, tratamiento de residuos, sostenibilidad

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

ABSTRACT

Every year, modern society generates large amounts of waste annually from domestic, industrial, and agricultural activities. Among these, organic waste stands out for representing a significant fraction and, when improperly managed, becoming an important source of environmental pollution. The decomposition of these materials under anaerobic conditions releases greenhouse gases such as methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2), which contribute to global warming and intensify the greenhouse effect. In Brazil, several environmental policies and regulations have been implemented to mitigate these impacts and encourage the use of renewable energy sources. In this context, anaerobic digestion emerges as a promising alternative as it not only reduces the organic load of waste but also enables the production of biogas – a mixture composed mainly of methane and carbon dioxide – which can be used as a clean and sustainable energy source. The addition of carbonaceous materials to the anaerobic digestion process may enhance reaction efficiency. This study aimed to evaluate the effects of adding biochar or activated carbon to the anaerobic digestion of organic waste from a university restaurant, with and without these additives. The results showed that the addition of 5% activated carbon improved the digestion process, producing up to 223.80 ± 0.04 mL g^{-1} VS of biogas compared to the control sample, which produced 66.7 ± 0.8 mL g^{-1} VS. These findings underscore the potential of carbon-based additives as strategic enhancers for cleaner and more efficient bioenergy production.

Key words: anaerobic digestion, energy recovery, organic waste, waste treatment, sustainability

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Consumo global de energia primária por fonte. 15
Figura 2- Participação de geração de RSU no Brasil no ano de 2023. 17
Figura 5 – Mecanismos de DIET entre bactérias doadoras de elétrons e arqueas metanogênicas; (A) DIET via conexão bioelétrica, (B) via conexão condutiva abiótica. 22
Figura 6 -Representação de possíveis grupos funcionais orgânicos na superfície do carvão. 23
Figura 7- Resíduo de restaurantes (a) na coleta, (b) na trituração e (c) após a trituração. 25
Figura 8- Frasco com inóculo a) na coleta e b) na ambientação. 26
Figura 9 - Aparato dos biodigestores no banho-maria. 31
Figura 10- Manômetro para medição do biogás. 32
Figura 11-Micrografia da superfície do (a) biochar e do (b) carvão ativado. 33
Figura 12-Espectro por FTIR da superfície do biochar e do carvão ativado. 34
Figura 13 - Produção acumulada do biogás. 37
Figura 14 - Produção diária de biogás. 38

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição de biogás 16
Tabela 2- Quantidades de resíduos de restaurante, material carbonáceo, solução de $NaHCO_3$ e inóculo adicionados nos biodigestores. 30
Tabela 3 - Teor de sólidos do RR, inóculo e celulose. 35
Tabela 4 - Produção acumulada de biogás 36
Tabela 5 - pH final dos biodigestores 36

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGVs	Ácidos graxos voláteis
BC	Biochar
CA	Carvão ativado
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
CSTR	Biodigestor de mistura completa
DA	Digestão anaeróbia
DIET	Transferência direta de elétrons
EET	Extracelular transferência de elétrons
EPS	Poliestireno expandido
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
GEE	Gases de efeito estufa
IFT	Transferência interespecífica de formiato
IHT	Transferência interespecífica de hidrogênio
KBr	Brometo de potássio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIET	Transferência Mediada de elétrons
MUrr	Massa úmida do resíduo de restaurante
$NaHCO_3$	Bicarbonato de sódio
PBB	Potencial biológico de biogás
pH	Potencial de hidrogênio
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RR	Resíduos de restaurante
RSO	Resíduo sólido orgânico
RSU	Resíduo sólido urbano
SF	Sólidos fixos
SSA	Área de superfície específica
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 OBJETIVOS 14
2.1 OBJETIVOS GERAL 14
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA 15
3.1 BIOGÁS 15
3.1.1 Aplicações de Biogás 16
3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) 16
3.3 DIGESTÃO ANAERÓBICA 17
3.3.1 Hidrólise 17
3.3.2 Acidogênese 18
3.3.3 Metanogênese 18
3.3.4 Metanogêneses 19
3.4 BIOCHAR 19
3.5 CARACTERÍSTICAS DO BIOCHAR 19
3.6 CARVÃO ATIVADO 20
4 METODOLOGIA 22
4.1 Caracterização e definição do substrato e inóculo 22
4.1.1 Coleta do substrato. 22
4.1.2 Coleta do inóculo. 23
4.2 CARACTERIZAÇÃO DE BIOCHAR E CARVÃO ATIVADO 24
4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV 24
4.2.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR 24
4.3 ENSAIO FÍSICO QUÍMICO 24
4.4 MONTAGEM DOS BIODIGESTORES 25
4.6 Ajuste de pH 28
4.7 Ensaio potencial bioquímico de biogás - PBB 28
5 RESULTADOS 29
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 35
REFERÊNCIAS 36

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

1 INTRODUÇÃO

Cerca de 3.000 compostos químicos afetam de forma negativa a atmosfera do nosso ecossistema, sendo a maioria deles compostos orgânicos (GUARIEIRO; VASCONCELLOS, SOLCI,2011). Entre os compostos químicos os combustíveis fósseis contribuem para a problemática enfrentada pela humanidade, o efeito estufa, resultado da produção exagerada de gases como o dióxido de carbono (CO_2) (DIAS, 2006).

Nesse contexto, o uso de fontes de energia sustentável, em substituição ao petróleo, se apresenta como uma escolha sensata. Entre as diferentes fontes energéticas, o biogás consiste em uma alternativa viável para mitigar os impactos ambientais causados pela poluição. O biogás pode ser obtido por meio do processo de digestão anaeróbia (DA) da matéria orgânica. Esse processo consiste na ação de diferentes microrganismos que a degradam, convertendo-a em compostos como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (KUNZ; STELNETZ; AMARAL, 2019). O metano produzido pode ser utilizado para a geração de energia elétrica e térmica e, se purificado, como combustível para automóveis, além da produção de fertilizantes de alta qualidade (KHALEEL, 2024).

Por outro lado, no Brasil, o tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma preocupação central nas políticas públicas, com destaque para a Política Nacional de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS Lei nº 12.305/2010). Estima-se que aproximadamente 46% do RSU seja composto por material orgânico, o qual, na maioria, ainda é destinado a aterros sanitários. Os resíduos sólidos orgânicos (RSO) constituem matéria-prima para a produção de biogás e, seu uso em biodigestores (SMANIOTTO; BECKER, 2025), ainda evita que ocupem espaço nos aterros sanitários já tão saturados.

Na busca constante por aprimorar a eficiência dos processos de digestão anaeróbia, destaca-se o uso de materiais carbonáceos, como o biochar e o carvão ativado. Esses materiais apresentam elevada área superficial e diversos grupos funcionais, características que favorecem tanto a adsorção de compostos quanto o desenvolvimento de comunidades microbianas. Além disso, devido à sua condutividade elétrica, o biochar e o carvão ativado podem facilitar a transferência direta de elétrons (DIET) entre microrganismos metanogênicos e acidogênicos, promovendo uma maior eficiência na conversão da matéria orgânica em biogás (GAHLOT et al., 2020).

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

O presente trabalho visa avaliar a influência da presençade biochar de acetato de celulose ou carvão ativado, em diferentes proporções, no processo de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos do restaurante na Itaipu Parquetec, investigando seus efeitos sobre a produção do biogás.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de produção de biogás a partir de resíduos de sólidos orgânicos do restaurante da Itaipu Parquetec com biochar de acetato de celulose ou carvão ativado, pela digestão anaeróbia, em reatores de batelada.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

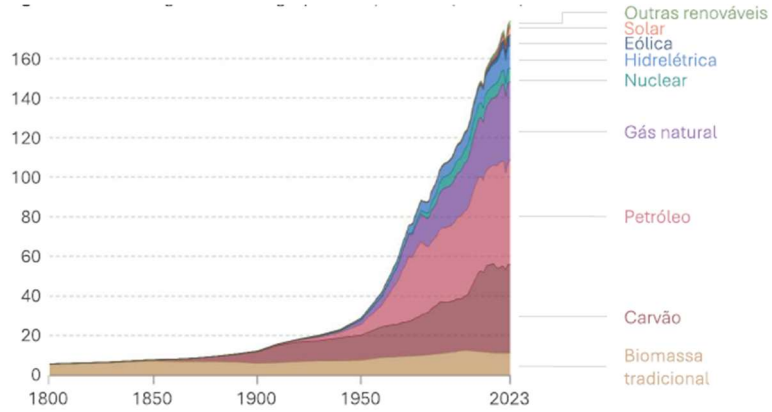
- Caracterizar a superfície do biochar de acetato de celulose e do carvão ativado.
- Analisar os teores de sólidos do resíduo de restaurante e do inóculo.
- Avaliar a eficiência da digestão anaeróbia do resíduo de restaurante com biochar de acetato de celulose ou carvão ativado pelo seu Potencial Bioquímico de Metano.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As mudanças climáticas causadas pelas atividades antropogênicas causam prejuízos incomensuráveis ao meio ambiente. Uma das principais causas dessas mudanças, o aquecimento global, é em razão da emissão de gases de efeito estufa (GEE), com destaque para a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento, a agropecuária e os processos industriais. Essas atividades liberam gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), que acumulam na atmosfera e intensificam o aquecimento global. Entre os principais combustíveis fósseis para a produção de energia destacam-se derivados do petróleo e carvão. Em termos globais, essas fontes energéticas ainda constituem a maioria daquelas consumidas, mesmo com o passar dos anos (Figura 1) (EPE/MME, 2025).

Figura 1- Consumo global de energia primária por fonte.



Fonte: Adaptado de Cenário energético (2025).

Ao longo dos anos, observa-se que a transição energética tem sido um processo gradual. A busca por novas fontes renováveis de energia consiste em um balanço entre a necessidade urgente de reduzir rapidamente as emissões de GEE e atender a demanda econômica e social de cada região. O biogás é um combustível renovável e promissor para a transição energética podendo ser considerado estratégicos para a segurança nacional. Além disso, o biogás pode contribuir de forma significativa para atingir as metas de descarbonização do Acordo de Paris consolidadas no compromisso brasileiro assumido na Contribuição Nacionalmente (LEMOS et al., 2024).

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

3.1 BIOGÁS

A produção de biogás requer necessariamente matéria orgânica, sendo um processo natural que ocorre por meio da digestão anaeróbia (DA). Esse processo resulta, principalmente, na geração de diferentes gases, como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), os quais podem ser utilizados em contextos domésticos, agrícolas (GADIRLI et al., 2024) e industriais, na Tabela 1 apresenta a composição do biogás.

Tabela 1 - Composição de biogás

Composto	%
Metano	55-70
Dióxido de carbono	35-40
Nitrogênio	0-3
Hidrogênio	0-1
Oxigênio	0-1
H_2S	0-1

Fonte: Tabela adaptada de KHALEEL 2024.

3.1.1 Aplicações do Biogás

O biogás possui diversas aplicações que surgiram da necessidade da sociedade de buscar alternativas energéticas mais limpas, eficientes e sustentáveis. Segundo Smaniotto e Becker (2024), as formas mais apropriadas de aproveitar o biogás produzido são por meio da geração de energia térmica, energia elétrica ou ainda como combustível para veículos automotivos

3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os resíduos sólidos urbanos (RSUs) são aqueles gerados nas áreas urbanas, como resultado das atividades domésticas, comerciais e institucionais. Esses resíduos incluem materiais como papel, papelão, plástico, vidro, materiais orgânicos, entre outros.

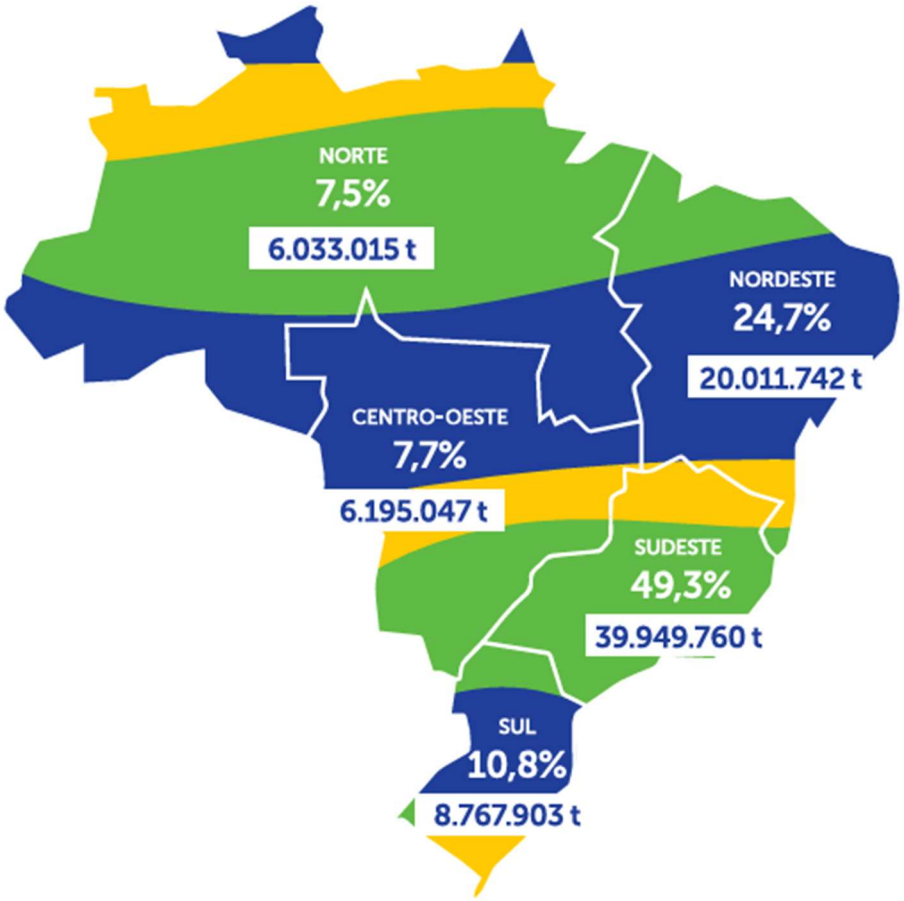
Segundo dados da ABREMA (2023), houve uma queda no índice de desemprego no Brasil, indicando um aumento no poder de compra da população.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

Considerando essa variação, estima-se que a geração média de resíduos sólidos urbanos (RSU) per capita no país apresentou um leve crescimento de menos de um ponto percentual, alcançando, em média, 1,047 kg de RSU por pessoa ao dia. Ao multiplicar esse valor pela população estimada para 2023 (já com as correções do IBGE), obtém-se uma geração anual aproximada de 383,2 kg de resíduos por habitante, o que corresponde a cerca de 221 milhões de toneladas produzidas no ano ou aproximadamente 382 kg de RSU por habitante ao ano.

Também, o Sudeste permanece como o maior gerador de RSU do Brasil, tanto em volume total quanto per capita. Em 2023, houve um aumento de cerca de 0,6% na geração per capita na região, passando para aproximadamente 1,237 kg por habitante ao dia. Em termos absolutos, isso representa um crescimento de 0,9% em relação a 2022, totalizando cerca de 39,9 milhões de toneladas de resíduos no ano, aproximadamente 109 mil toneladas por dia, o que equivale a quase 50% de toda a geração nacional.

Figura 2- Participação de geração de RSU no Brasil no ano de 2023.



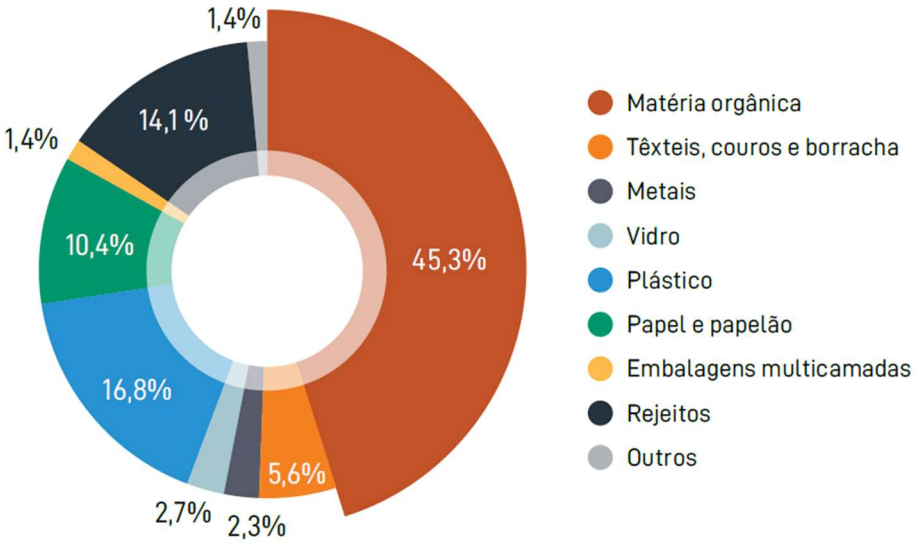
Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

Fonte: ABREMA, 2024.

No contexto dos RSUs é importante abordar a sua composição gravimétrica, pois diz respeito ao percentual da massa de cada componente em relação à massa total. Sua identificação permite o adequado planejamento, e o estabelecimento de estratégias e soluções que assegurem a destinação ambientalmente adequada dos resíduos.

De acordo com os dados disponíveis, nota-se que a fração orgânica, os resíduos sólidos orgânicos (RSO), abrangendo sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras, é a principal componente dos RSUs, com 45,3%. Os resíduos recicláveis secos somam 33,6%, sendo compostos principalmente por plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidros (2,7%), metais (2,3%), e embalagens multicamadas (1,4%). Outros resíduos somam 21,1%, dentre os quais resíduos têxteis, couros e borrachas, que representam 5,6%, e aqueles compostos por resíduos sanitários, que somam 15,5%. A gravimetria nacional foi estimada com base na média ponderada a partir da geração total de RSU por faixa de renda dos municípios e respectivas composições, levando-se em consideração a população e geração per capita (ABRELPE, 2020). A Figura 3 apresenta a avaliação gravimétrica dos diferentes resíduos que compõem os RSUs.

Figura 3 – Composição gravimétrica dos diferentes resíduos que compõe os RSUs.



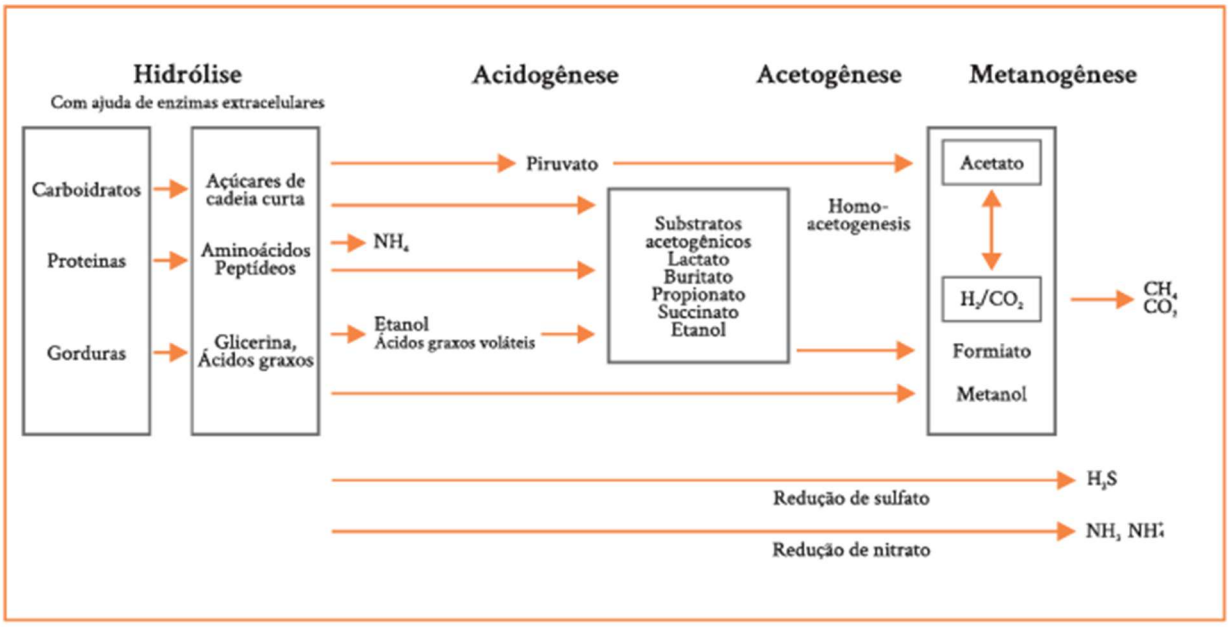
Fonte: ABRELPE (2020)

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

3.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo metabólico que depende da ação de diferentes microrganismos responsáveis pela transformação da matéria orgânica em compostos como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S). Além dos gases formados, ao final do processo, tem-se o digestato, um subproduto rico em nutrientes que pode ser usado como fertilizante. Esse processo ocorre em quatro etapas distintas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (KUNZ; STELNETZ; AMARAL, 2019) que podem ocorrer de forma simultânea. A Figura 4 apresenta um esquema com as etapas da DA e seus reagentes e produtos de reação.

Figura 4 – Etapas da digestão anaeróbia.



Fonte: KUNZ; STELNETZ; AMARAL, 2019.

3.3.1 Hidrólise

Na primeira etapa, diferentes compostos de cadeia longa, como celulose, proteínas e gorduras, são decompostos em monômeros solúveis em água por meio da ação de exoenzimas (hidrolases), produzidas por bactérias facultativas e anaeróbias estritas. Nessa etapa, as ligações covalentes são quebradas por reações de hidrólise, nas quais a água participa diretamente do processo. (DEUBLEIN, STENHAUSER,2008).

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

3.3.2 Acidogênese

Nessa etapa os monômeros formados na hidrólise são degradados por bactérias acidogênicas em compostos de cadeia curta como açúcares simples, aminoácidos e ácidos graxos voláteis (AGV). A formação dos AGVs como o butírico, propiônico e acético (KUNZ; STELNETZ; AMARAL, 2019) constitui uma etapa essencial para preparar o material para a produção de metano.

3.3.3 Acetogênese

Os produtos gerados na fase acidogênica são consumidos como substratos por outros microrganismos ativos na terceira fase. Essa terceira fase, também chamada de fase de oxidação anaeróbia, envolve reações de oxidação realizadas sem a presença de oxigênio. Produtos que não podem ser convertidos diretamente em metano pelas bactérias metanogênicas são transformados em substratos metanogênicos; os ácidos graxos voláteis (AGVs) e os álcoois são oxidados em compostos como acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Os AGVs, com cadeias de carbono maiores que um átomo, são oxidados em acetato e hidrogênio.

É essencial que os organismos que realizam essas reações de oxidação anaeróbia colaborem com o grupo seguinte, os microrganismos formadores de metano. Essa colaboração depende da pressão parcial do hidrogênio presente no sistema. Durante a oxidação anaeróbia, os prótons atuam como aceptores finais de elétrons, resultando na produção de H_2. No entanto, essas reações só ocorrem de forma eficiente se a pressão parcial de hidrogênio for baixa. Por isso, a interação com os metanogênicos é fundamental, pois eles consomem continuamente o hidrogênio para formar metano. Dessa forma, ocorre uma transferência interespécies de hidrogênio dentro dessa relação simbiótica (ADUKUNLE; OKILIE, 2015).

3.3.4 Metanogênese

Essa etapa é considerada uma das últimas no processo de digestão anaeróbica, sendo conduzida por microrganismos arqueias metanogênicas, os quais são responsáveis pela formação do metano (CH_4) e do dióxido de carbono

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

(CO_2) (CAVALEIRO; ALVES, 2020).

3.4 BIOCHAR

Biochar é um tipo de carvão vegetal produzido pela queima controlada de biomassa como restos de madeira, palha, cascas e outros resíduos orgânicos, em ambiente com pouco ou nenhum oxigênio, num processo chamado pirólise, geralmente em reator fechado. Esse processo ocorre em temperaturas que variam entre 350 °C e 650 °C (NAGAPPAN et al., 2021).

O biochar apresenta elevada capacidade de adsorção e imobilização, atribuída à sua elevada área de superfície específica (SSA) e à abundante porosidade (ZHAO et al., 2021). Estudos indicam que microrganismos, como arqueias metanogênicas e microbiota hidrofóbica, conseguem se alojar facilmente nos poros do biochar, conforme observado por microscopia eletrônica de varredura (PYTLAK et al., 2020). Além disso, análises de sequenciamento demonstraram que a abundância e a diversidade da comunidade microbiana em reatores com adição de biochar são significativamente maiores do que naqueles sem o aditivo, o que pode contribuir para a aceleração da produção de biogás (CHEN et al., 2021). Além disso, o BC, devido à sua elevada porosidade, atua como um material de suporte para o crescimento microbiano, além de contribuir para a tolerância à amônia (XIE et al., 2022). Conforme observado por GAHLOT et al. (2020).

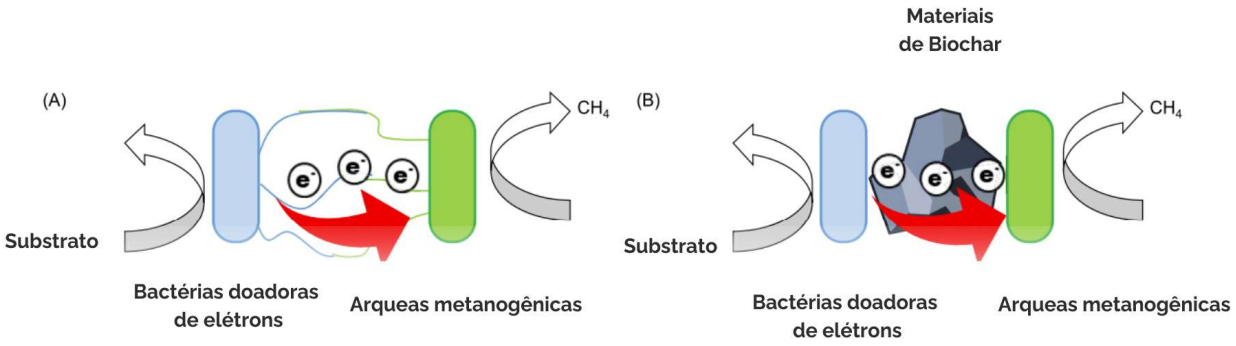
O biochar apresenta uma notável habilidade de fornecer condutos de elétrons para a transferência direta de elétrons entre espécies (DIET), atribuída tanto à presença de grupos funcionais eletroquimicamente ativos, produzidos durante a pirólise, como quinonas, fenólicos, piridinas e fenazinas quanto aos elétrons π conjugados que compõem sua estrutura aromática condensada (ZHAO et al., 2021). Também pode fornecer mediadores redox para a transferência mediada de elétrons entre espécies (MIET) e estimular secreções microbianas extracelulares (ZANG, 2023). A transferência extracelular de elétrons (Extracellular Electron Transfer — EET) é um fenômeno amplamente observado na natureza, no qual microrganismos possuem a capacidade de transferir elétrons para uma superfície sólida (por exemplo, materiais minerais) ou entre diferentes microrganismos. A EET desempenha um papel crucial na degradação de matéria orgânica complexa por comunidades microbianas anaeróbias. Por exemplo, a transferência interespecífica de

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

hidrogênio (IHT) e a transferência interespecífica de formiato (IFT) entre arqueias metanogênicas e bactérias sintróficas são mecanismos essenciais de transferência extracelular de elétrons (EET) na digestão anaeróbia (DA). A Figura 4 apresenta a transferência extracelular de elétrons entre espécies microbianas, por meio de citocromos e nanofios microbianos, e intermediada por biochar.

Figura 5. Mecanismos de transferência direta de elétrons entre espécies (DIET) entre bactérias doadoras de elétrons e arqueas metanogênicas; (A) via conexões bioelétricas, (B) via conexões condutivas abióticas.

Figura 3 – Mecanismos de DIET entre bactérias doadoras de elétrons e arqueas metanogênicas; (A) DIET via conexão bioelétrica, (B) via conexão condutiva abiótica.



Fonte: Adaptado de Zang et al (2023).

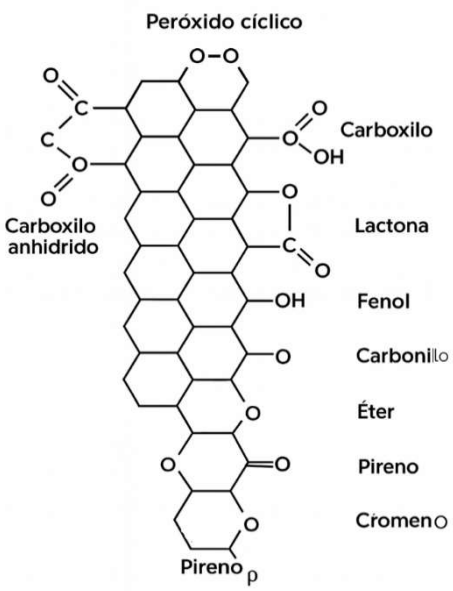
O biochar mostra elevada capacidade de tamponamento contra variações bruscas de acidez, comuns em sistemas de digestão anaeróbia (DA). Essa propriedade decorre da grande quantidade de grupos funcionais ácidos e básicos, bem como de íons metálicos presentes em sua estrutura. Os grupos funcionais fenólicos (X–OH), carboxílicos (–COOH) e aminas ($–NH_2$) são os que constituem a principal base dessa resistência a choques ácidos. Além disso, a presença significativa de íons de metais alcalinos (Na^+, Mg^{2+}, K^+) e de metais alcalino-terrosos (Ca^{2+}) reforça ainda mais essa capacidade tamponante do biochar.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

3.5 CARVÃO ATIVADO

O carvão ativado (CA) é um material carbonáceo e poroso preparado pela carbonização e ativação de substâncias orgânicas, principalmente de origem vegetal. A estrutura do carvão ativado é basicamente constituída por camadas hexagonais paralelas formadas de carbono tetraédrico, que estão interligadas pelos vértices dos átomos de carbono. Embora sua composição principal seja carbono, ele pode conter pequenas quantidades de outros elementos como oxigênio e hidrogênio, resultantes do processo de ativação. O oxigênio é o principal átomo que aparece na rede de carbono, aparecendo principalmente como grupos funcionais carbonila, carboxila, hidroxila e enóis. Estes grupos influenciam nas propriedades de adsorção do material e também na sua reatividade. Possuem alta porosidade, grande área superficial específica, excelente condutividade elétrica e abundância de grupos funcionais de superfície, o que lhes permite, de forma análoga ao biochar, desempenhar múltiplas funções na digestão anaeróbica e melhorar seu desempenho (ZANG, 2023). O carvão ativado é um material condutor de baixo custo, leve, quimicamente estável e com elevada biocompatibilidade, que pode atuar como adsorvente de compostos tóxicos e permitir a fixação de microrganismos sem formar agregados. A Figura 6 apresenta a estrutura química de carvão ativado e possíveis grupos funcionais em sua superfície.

Figura 4 -Representação de possíveis grupos funcionais orgânicos na superfície do carvão.



Fonte: Adaptada CORTÉS et al (2008).

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

A literatura demonstra que o uso de materiais carbonáceos, como biochar e carvão ativado, pode contribuir para a remoção de compostos inibidores, para o tamponamento do meio e para a facilitação de interações microbianas, resultando em possíveis ganhos na estabilidade e na produtividade da digestão anaeróbia. Apesar disso, poucos estudos exploram sua aplicação específica em resíduos de restaurantes, que possuem características próprias e elevada variabilidade. Dessa forma, a presente pesquisa buscará preencher essa lacuna ao avaliar se a adição de biochar ou carvão ativado à digestão anaeróbia desse resíduo é capaz de aprimorar o processo e aumentar a produção de biogás.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

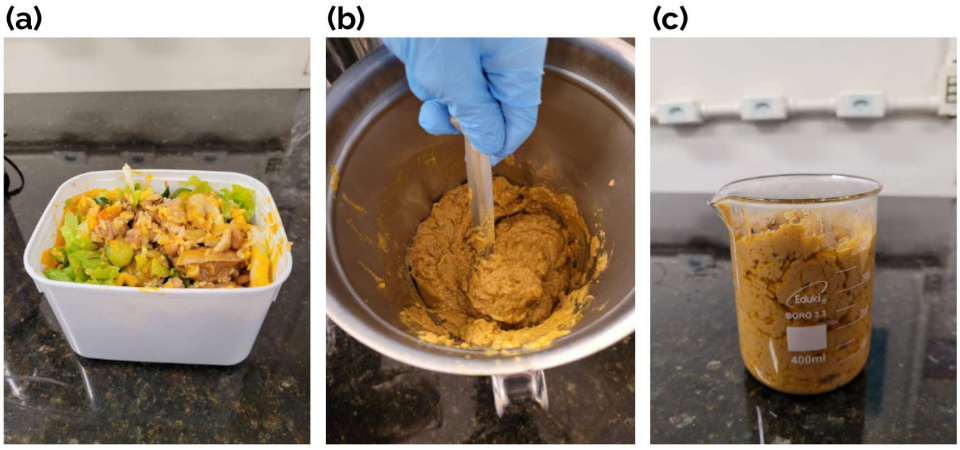
4 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido nos laboratórios de Síntese e Caracterização de Materiais (SiCaMat), de Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (LFTIR) e de Microscopia Eletrônica de Varredura (LMEV), da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), localizado em Foz do Iguaçu/PR.

4.1 Coleta e preparo do substrato orgânico

O substrato orgânico utilizado foi o resíduo de restaurante (RR) proveniente do restaurante universitário (RU) da instituição, constituído por diferentes tipos de alimentos (arroz, feijão, carne de boi, alface, entre outros), localizados nas instalações da Itaipu Parquetec. O substrato utilizado foi coletado no mês de junho de 2025 e posteriormente liquidificado utilizando o Liquidificador Industrial Shop Alta Rotação até a obtenção de uma mistura homogênea. Após, o substrato foi mantido a −18 °C em congelador para manter suas características até a utilização nos ensaios. A Figura 7 mostra o resíduo do restaurante coletado, no momento da trituração e após ser triturado.

Figura 5- Resíduo de restaurantes (a) na coleta, (b) na trituração e (c) após a trituração.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2 Coleta e aclimatação do inóculo

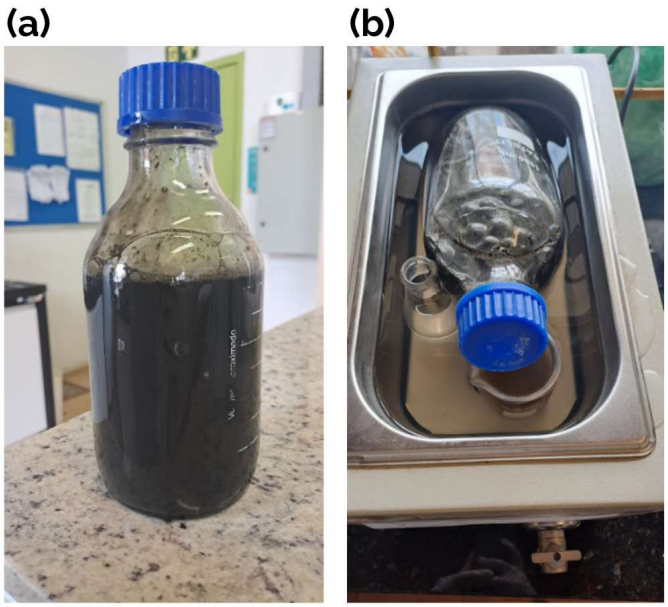
Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

O inóculo foi obtido do biodigestor de mistura completa (CSTR) da empresa Centro Internacional de Energias Renováveis e Biogás (CIBiogás), que é principalmente um lodo anaeróbio estabilizado. Após a coleta, o material foi armazenado em frascos de 1 L e mantido sob refrigeração a 4 °C.

Antes do uso o inóculo foi aclimatado por um período de 7 dias em temperatura de 37,0 ± 1,0 °C. (VDI 4630, 2006).

A Figura 8, apresenta o inóculo armazenado no frasco de coleta e no período de aclimatação.

Figura 6- Frasco com inóculo a) na coleta e b) na ambientação.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR E CARVÃO ATIVADO

O biochar (BC) utilizado neste estudo foi obtido a partir da pirólise (500 ºC) do acetato de celulose proveniente de filtros de cigarro não usados e poliestireno expandido (EPS) proveniente de embalagens da linha branca, pelo grupo de pesquisa da UNILA.

O carvão ativado P.A. (CA), com pureza de 90%, foi obtido comercialmente da marca Êxodo Científica.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A morfologia superficial do biochar e do carvão ativado foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o microscópio eletrônico de varredura Zeiss Evo-MA10 com aproximação de 7 500 vezes (1 μm). A faixa de operação das tensões de aceleração foi de 1-20 kV.

4.2.2 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR

A avaliação da estrutura química da superfície do biochar e do carvão ativado foi realizada por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier, utilizando um espectrofotômetro modelo Frontier MIR+SP10 STD, da Perkin Elmer. As amostras foram preparadas em pastilhas de KBr.

4.3 ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS DO SUBSTRATO E DO INÓCULO

A caracterização físico-química do resíduo de restaurante (RR) e do inóculo foi realizada por meio da determinação de seus teores de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV), conforme a metodologia 2540 descrita no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005; VDI 4630, 2006). A celulose microcristalina também foi avaliada para ser usada como padrão positivo na DA. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

Inicialmente, os cadinhos foram calcinados a 570 °C na mufla por 2 h e, em seguida, resfriados em dessecador. Cerca de 2 g de cada amostra foram pesadas em cada cadinho e levadas à estufa a 105 °C por 2 h. Após o resfriamento, as amostras foram pesadas novamente e, posteriormente, levadas à mufla a 570 °C por 2 h. Após novo resfriamento, as amostras foram pesadas. Os teores de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) foram calculados, conforme as Equações 1, 2 e 3.

$$\mathrm{ST}\% = \frac{\text{Massa da amostra seca}}{\text{Massa da amostra umida}} \times 100 \quad \text{(Eq. 1)}$$

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

$$SV\% = \frac{\text{Massa da amostra seca} - \text{Mass da amostra queimada}}{\text{Massa da amostra queimada}} \times 100 \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$SF\% = \frac{\text{Massa da amostra queimada}}{\text{Massa da amostra seca}} \times 100 \quad \text{(Eq. 3)}$$

4.4 MONTAGEM DOS BIODIGESTORES

A determinação das proporções do substrato de RR e do inóculo foi realizada com base na norma VDI 4630, que recomenda um teor de 9% de sólidos totais (ST) no reator. Assim, para uma massa de 24 g de substrato de RR e solução de bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) 0,1 mol/L, 2,16 g de massa seca (MS) foram colocados em um biodigestor de 121 mL. A partir da Equação 4, foi possível avaliar a massa de resíduo de restaurante (RR) úmido (MU_{RR}) a ser adicionada aos biodigestores.

$$MU_{RR} = \frac{2{,}16\ g}{ST} \times 100 \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Onde:

ST: sólidos totais

Após a adição ao reator das quantidades de RR ou de celulose, foi adicionada solução de $NaHCO_3$ 0,1 mol L^{-1} até completar 24 g. A celulose microcristalina foi utilizada como controle positivo. O inóculo foi utilizado como controle negativo.

A proporção entre o inóculo e o substrato (RR) foi de 3:1, em relação aos sólidos voláteis (SV) do inóculo e do substrato, conforme recomendado pela norma VDI 4630 (2006), onde a relação mínima é de 2:1. Essa relação se encontra na Equação 5.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

$$3 = \frac{SV_{inóculo}}{SV_{substrato}} = \frac{\mathrm{MU_{In} \times SVIn}}{\mathrm{MU_{RR} \times SV_{RR}}} \qquad \text{(Eq. 5)}$$

Onde:

MU_{In}: massa úmida do inóculo

MU_{RR}: massa úmida do resíduo de restaurante

SV_{In}: sólidos voláteis do inóculo

SV_{RR}: sólidos voláteis do resíduo de restaurante

Aos reatores foram adicionadas 5, 10 ou 15% em massa de biochar ou carvão ativado por massa de SV do RR. O valor do pH do meio foi conferido com papel indicador Universal, ficando entre 7,0 e 8,0. Após, a atmosfera inerte foi estabelecida no frasco por meio de um fluxo de nitrogênio e os frascos foram lacrados. Todos os ensaios foram feitos em triplicata.

A Tabela 2 apresenta as massas de substrato, celulose, inóculo, BC, carvão ativado e solução de $NaHCO_3$ adicionadas nos reatores. As amostras foram nomeadas conforme a presença ou não de BC e CA sendo o último algarismo o valor percentual de material carbonáceo adicionado.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

Tabela 2- Quantidades de resíduos de restaurante, material carbonáceo, solução de $NaHCO_3$ e inóculo adicionados nos biodigestores.

Amostra	RR (g)	Biochar (g)	Carvão ativado (g)	Celulose (g)	Sol. $NaHCO_3$ (g)	Inóculo (g)
RR	5,006	-	-	-	18,991	21,017
RR+BC_5	5,006	0,243	-	-	18,991	21,017
RR+BC_10	5,006	0,485	-	-	18,991	21,017
RR+BC_15	5,006	0,729	-	-	18,991	21,017
RR+CA_5	5,006	-	0,243	-	18,991	21,017
RR+CA_10	5,006	-	0,485	-	18,991	21,017
RR+CA_15	5,006	-	0,729	-	18,991	21,017
Celulose	-	-	-	4,544	19,610	21,722
Inóculo	-	-	-	-	24,000	21,017

Fonte: Autoria própria, 2025.

Após a montagem dos biodigestores eles foram colocados em banho-maria em temperatura mesofílica de 37,0 ± 1,0 °C. A Figura 9 mostra os biodigestores dispostos no banho-maria.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

Figura 7 - Aparato dos biodigestores no banho-maria.

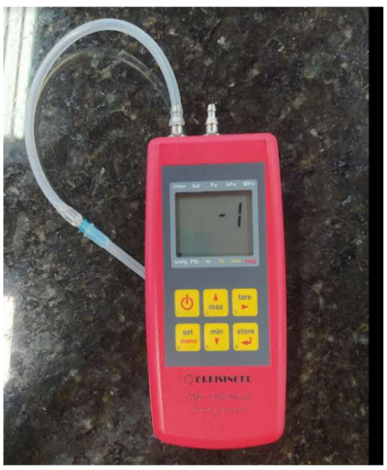
Fonte: autoria própria, 2025.

4.5 Ensaio do potencial bioquímico de biogás - PBB

Foram realizados os ensaios do Potencial Bioquímico de Biogás, conforme a norma VDI 4630 (2006). Os biodigestores foram mantidos no banho-maria por até 31 dias e o processo de produção de biogás foi monitorado diariamente, exceto domingos e feriados, com um manômetro modelo Gehminger GHM-5101 Series Quick Pressure Meter. A Figura 10 mostra a imagem do manômetro.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

Figura 8- Manômetro para medição do biogás.



Fonte: autoria própria, 2025.

O volume de gás produzido foi calculado conforme Equação 6 onde o volume de gás seco produzido foi normalizado para a temperatura de 0 °C e pressão de 1 atm.

$$V_n = V \times \frac{P - P_v}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \qquad \text{(Eq. 6)}$$

Onde:

V_n = volume normalizado de biogás

V = volume medido no reator (121 mL menos o volume ocupado pelos materiais)

P = pressão total (absoluta) do sistema

P_v = pressão de vapor da água na temperatura da medição (37 °C)

P_0 = 1 atm (ou 101,325 kPa)

T_0 = 273,15 K

T = temperatura de medição (em Kelvin)

4.6 Avaliação do pH do digestato

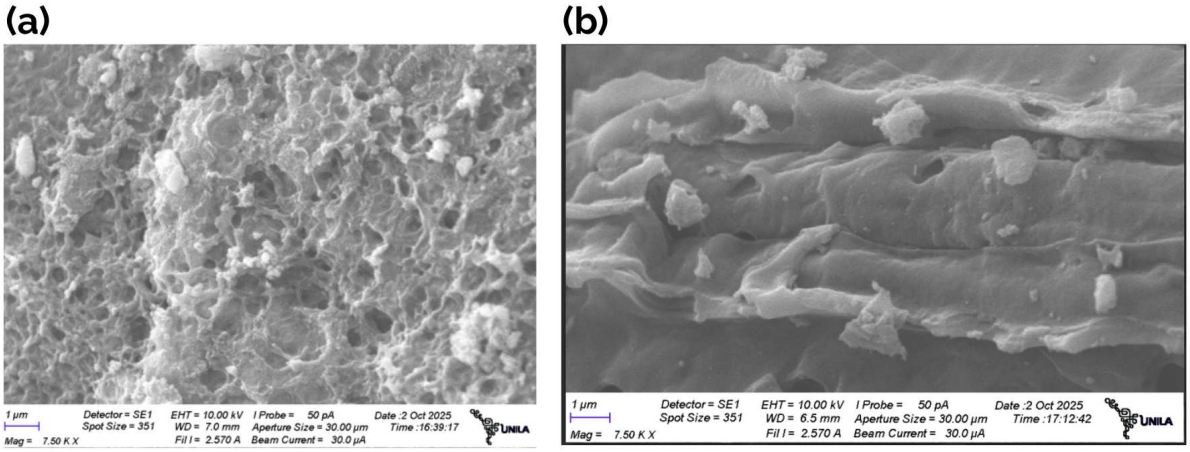
O pH do digestato foi avaliado com papel indicador Universal, ao final da reação.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A morfologia das superfícies dos materiais carbonáceos, biochar e carvão ativado, foi avaliada pela MEV. A Figura 11 apresenta as micrografias dos materiais. O biochar apresentou superfície esponjosa e porosa (Fig. 11a) enquanto o carvão ativado lisa com poucos orifícios (Fig. 11b)

Figura 9-Micrografia da superfície do (a) biochar e do (b) carvão ativado.

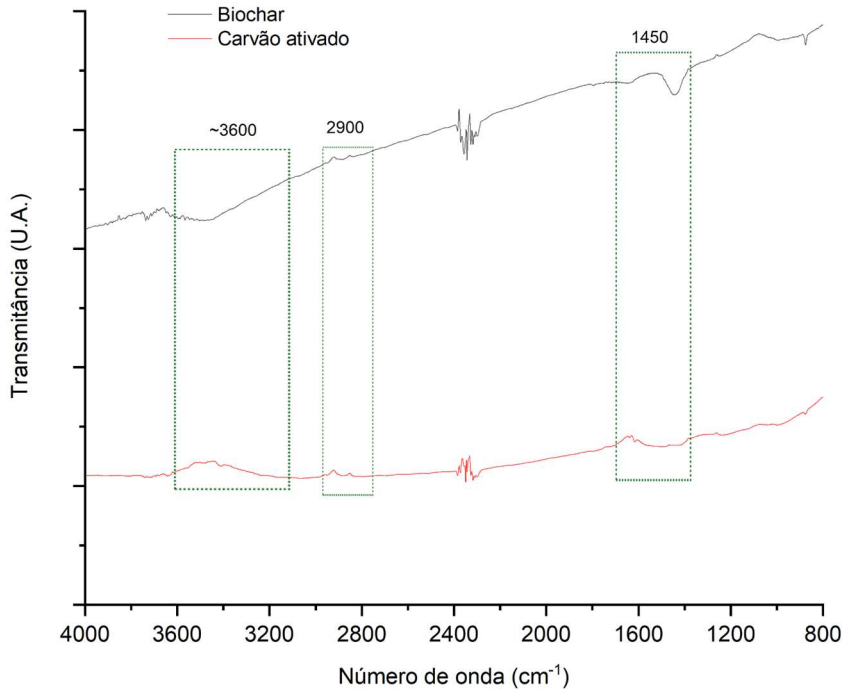


Fonte: Autoria própria, 2025.

A estrutura química da superfície dos materiais carbonáceos foi avaliada por FTIR e os espectros são apresentados na Figura 12. Perfis similares foram encontrados no biochar e no carvão ativado com uma banda em, aproximadamente, 3600 cm^{-1} atribuída a grupamentos hidroxila (-OH), apresentando maior intensidade para o biochar. Em, aproximadamente, 2900 cm^{-1} as bandas foram associadas aos estiramentos das ligações C–H em grupos CH_2. As bandas na região de 1450 cm^{-1} são características das ligações aromáticas C=C. Esses resultados estão de acordo com aqueles da literatura (Lima, 2018; Silva, 2025)

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

Figura 10-Espectro por FTIR da superfície do biochar e do carvão ativado.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Segundo Rodrigues et al. (2020), os sólidos voláteis (SV) correspondem à fração orgânica do material, ou seja, à porção carbonácea passível de conversão em energia por meio da biodigestão anaeróbia. Os sólidos fixos, por sua vez, representam a fração mineral ou inorgânica do resíduo. Na produção de biogás, o teor de SV indica o potencial energético do substrato: quanto maior a porcentagem de SV, maior a capacidade de geração de biogás. O teor de sólidos totais (ST) orienta a definição da carga máxima suportada pelo biodigestor, estabelecendo os limites operacionais para a biodigestão. Na rota úmida, são considerados típicos valores entre 2 e 10% de ST no material alimentado ao reator, sendo que, em biodigestores de pequeno porte, laboratoriais e do tipo Reator Contínuo de Tanque Agitado (CSTR), a faixa mais comum situa-se entre 6 e 10% de ST. A Tabela 3 apresenta os valores de sólidos determinados para o RR, o inóculo e a celulose.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

Tabela 3 - Teor de sólidos do RR, inóculo e celulose.

Amostra	SV (%)	ST (%)	SF (%)
RR	97,1 ± 0,1	43,8 ± 0,2	2,9 ± 0,1
Inóculo	69,40 ± 0,03	3,8 ± 0,2	30,62 ± 0,02
Celulose	99,6 ±0,6	94,8 ± 0,2	31,44 ± 0,09

Fonte: Autoria própria, 2025.

Ao analisar os resultados obtidos para os sólidos, observa-se que o resíduo de restaurante (RR) apresenta 97,1% de SV, valor semelhante ao encontrado por Castro e Mateus (2016) em seu estudo sobre a produção de biogás a partir de restos de alimentos coletados em restaurantes, que apresentaram cerca de 96% de SV. Esses resultados indicam que a biomassa utilizada possui um bom potencial para a produção de biogás, devido ao seu alto teor de matéria orgânica biodegradável.

Foi avaliado o potencial bioquímico de biogás (PBB) da biodigestão dos resíduo de restaurante com biochar ou carvão ativado, em diferentes proporções de mistura: 5%, 10% e 15%. Ao início da biodigestão, foi verificado que o pH dos biodigestores se encontrava em torno de 7 e 8. Essa faixa é reconhecida como ótima para o desenvolvimento de microrganismos metanogênicos Xu *et al.* (2018).

Os resultados da produção acumulada de biogás estão apresentados na Tabela 5. Observou-se que a maior produção foi obtida para o tratamento com CA a 5%, com valor de 223,80 ± 0,04 mL g^{-1} SV, seguido por CA 15% 170,5 ± 0,6 mL g^{-1} SV, CA 10% 103,5 ± 0,6 g^{-1} SV e BC 10% 86,5 ± 0,7 mL g^{-1} SV. A amostra controle, aquela sem BC e CA, apresentou valor de 66,7 ± 0,8 mL g^{-1} SV, enquanto os demais tratamentos (BC 5% e BC 15%) apresentaram valores ainda mais inferiores. A melhor produção de biogás nas amostras contendo CA, amostras RR+CA_5, RR+CA_10 e RR+CA_15 pode ser atribuída a capacidade do CA promover uma estabilização do pH do meio (Tabela 4). Estudos apontam que as bactérias metanogênicas sofrem inibição quando o pH cai abaixo de 6, levando a acidificação e instabilidade das reações. A queda nos valores de pH pode ser devida a formação dos ácidos graxos voláteis (AGV), como o butírico e propiônico,

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

provenientes da acidogênese (Yang et al, 2025) sendo que a presença do CA acelera o consumo desses ácidos, segundo Khan e Man (2022) e Zhou *et al.* (2016).

Tabela 4 - Produção acumulada de biogás

Amostra	**Vol mL N / g SV**
RR	66,7 ± 0,8
RR+BC_5	47,50 ± 0,06
RR+BC_10	86,5 ± 0,7
RR+BC_15	45,60 ± 0,01
RR+CA_5	223,80 ± 0,04
RR+CA_10	103,5 ± 0,6
RR+CA_15	170,5 ± 0,6
Celulose	107,5 ± 0,1

Fonte: Própria autoria, 2025.

Tabela 5 - pH final dos biodigestores

Amostra	**pH**
RR	5-6
RR+BC_5	5-6
RR+BC_10	5-6
RR+BC_15	5-6
RR+CA_5	7
RR+CA_10	7
RR+CA_15	7
RR	4
inóculo	5-6

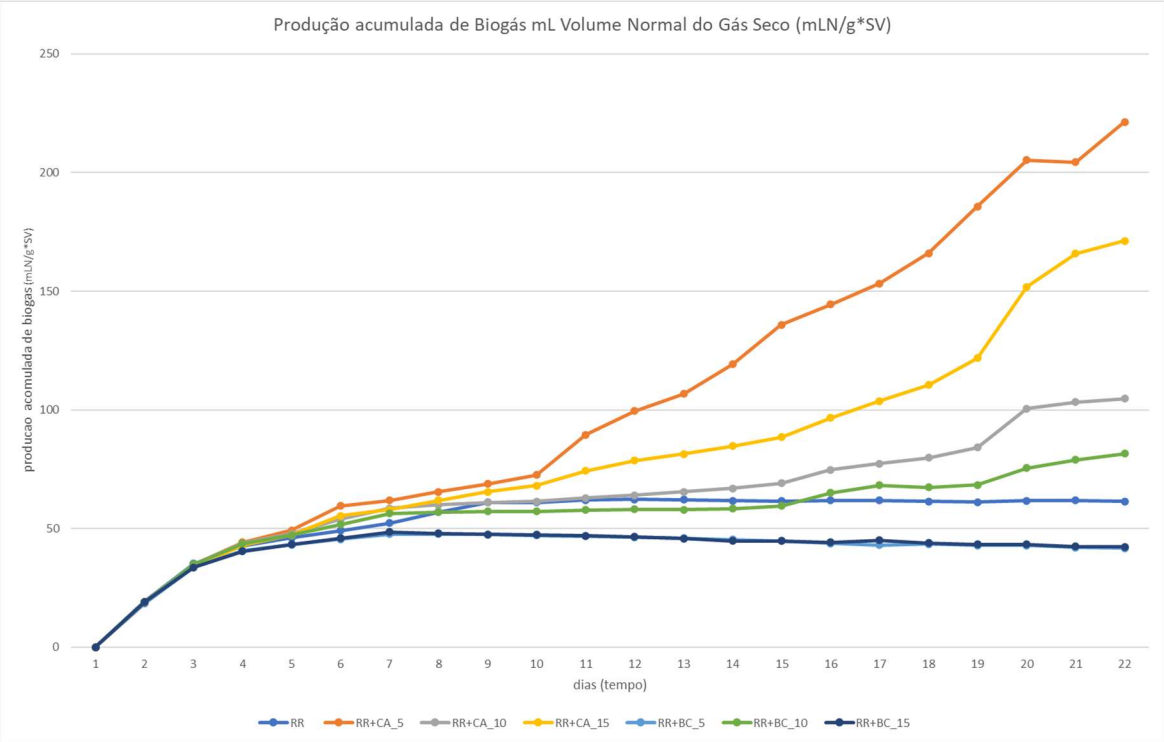
Fonte: Própria autoria, 2025.

Na Figura 13 é apresentada a produção acumulada de biogás ao longo de um período de 31 dias. Conforme mostra o gráfico, até o 4º dia a produção se mantém

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

similar em todos os meios sendo que, a partir desse tempo, a produção de biogás se apresenta maior e crescente nas amostras contendo CA, conforme discutido anteriormente. De acordo com Rasapoor et al. (2020), o uso de biochar e carvão ativado pode melhorar significativamente o desempenho da digestão anaeróbica. O autor destaca que concentrações de carvão ativado em torno de 10 g L^{-1} tendem a aumentar a produção de biogás, enquanto concentrações mais elevadas podem inibir a atividade melanogênica devido ao acúmulo de nitrogênio amoniacal.

Figura 11 - Produção acumulada do biogás.

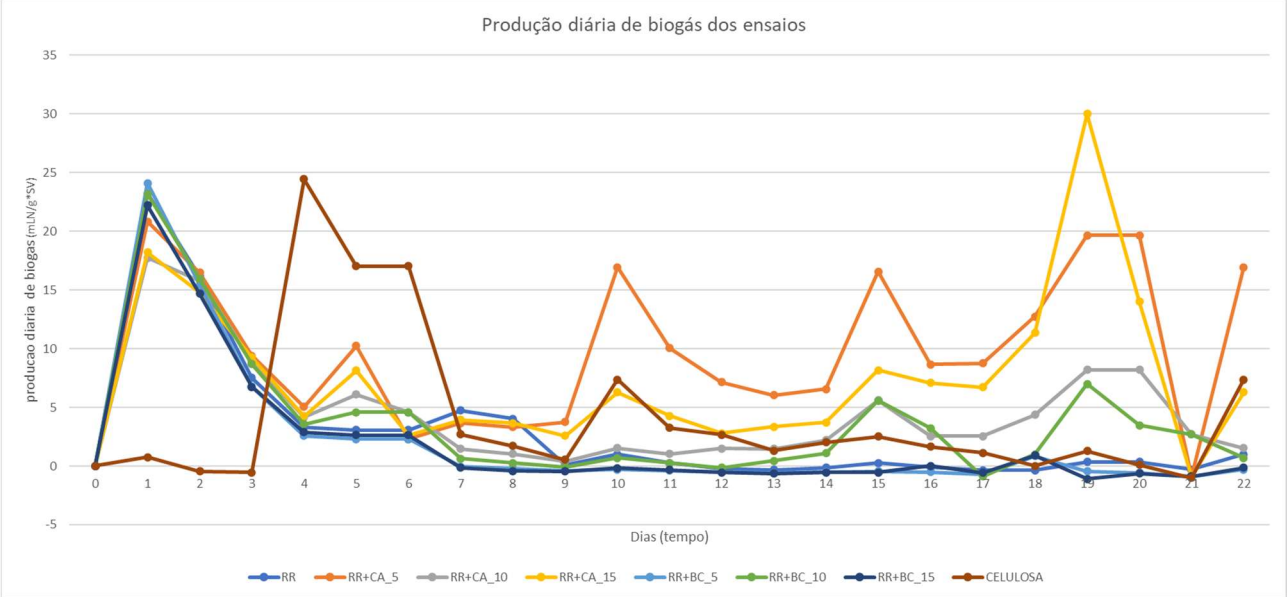


Fonte: Autoria própria, 2025.

A Figura 14 apresenta a produção diária das biodigestão. O máximo da produção de biogás ocorreu nos primeiros 14 dias da biodigestão (Pugliese *et al*., 2015). Após esse período, houve a diminuição da produção diária até atingir os 31 dias, tempo no qual a produção foi menor ou igual a 1% do total acumulado. É possível observar, também, que o tratamento com CA 5% apresentou, a partir do nono dia, uma produção de biogás superior em relação aos demais. De forma semelhante, o tratamento com CA 15% manteve uma produção elevada por um período mais prolongado.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

Figura 12 - Produção diária de biogás.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi avaliada a produção de biogás pela digestão anaeróbia de resíduo de restaurante com estruturas carbonáceas como carvão ativado ou biochar. Os resultados demonstraram que a adição desses materiais, dependendo da concentração, promovem um aumento significativo na produção de biogás.

Entre os tratamentos avaliados com diferentes percentuais de material carbonáceo, destacaram-se aqueles contendo CA 5%, CA 15% e BC 10%, que apresentaram os melhores desempenhos, superando a amostra controle.

Já entre os dois materiais, CA ou BC, o CA ofereceu maior produção de biogás, provavelmente, porque favoreceu o controle do pH do meio.

Esses resultados reforçam o potencial do uso de materiais carbonáceos como uma estratégia viável e de baixo custo para otimizar processos de digestão anaeróbia voltados ao tratamento de resíduos orgânicos.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

REFERÊNCIAS

ADEKUNLE, Kayode. F.; OKOLIE, Jude . A**.** A review of biochemical process of anaerobic digestion**.** ***Advances in Bioscience and Biotechnology***, v. 6, n. 3, p. 205–212, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS E ESGOTOS – ABREMA. ***Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024*****.** São Paulo: Abrema, 2024.

CAVALEIRO, Ana Júlia; ALVES, M. Madalena. Digestão anaeróbia. ***Revista de Ciência Elementar***, v. 8, n. 1, p. 009, mar. 2020.
Disponível em: http://doi.org/10.24927/rce2020.009. Acesso em: 17 jun. 2025.

CASTRO, Diego dos Santos; MATEUS, Viviana Oliveira. Produção de biogás a partir de restos de alimentos coletados em um restaurante: uma experiência a ser disseminada**.** ***XV Seminário Estudantil de Produção Acadêmica – SEPA*****, UNIFACS**, Salvador, 2016.
Disponível em: https://revistas.unifacs.br/index.php/sepa/article/view/4355. Acesso em: 10 nov. 2025.

CHENG, Dongle. et al. Improving sulfonamide antibiotics removal from swine wastewater by supplying a new pomelo peel derived biochar in an anaerobic membrane. ***Bioresource Technology***, v. 319, p. 124203, 2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124203.

CORTÉS, Juan C. et al. Oxidación de un carbón activado comercial y caracterización del contenido de grupos ácidos superficiales. ***Revista Colombiana de Química***, v. 37, n. 1, p. 55–65, 2008.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. ***Biogas from waste and renewable resources: an introduction*****.** Weinheim: Wiley-VCH, 2008. ISBN 978-3-527-31841-4.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *PNE 2055* – ***Caderno Cenários Energéticos***. [S. l.: EPE], 2025.

GADIRLI, Gulnar et al**.** Fundamentals, operation and global prospects for the development of biogas plants: a review. ***Energies***, v. 17, n. 3, p. 1–26, 2024.
DOI: https://doi.org/10.3390/en17030568. Acesso em: 3 ago. 2025.

GAHLOT, Pallavi. et al. Conductive material engineered direct interspecies electron transfer (DIET) in anaerobic digestion: mechanism and application. ***Environmental Technology and Innovation***, v. 20, p. 101056, 2020.

GUARIEIRO, Lilian L. N.; VASCONCELLOS, Pérola C.; SOLCI, Maria Cristina. Air pollutants from the burning of fossil fuels and biofuels: a brief review. ***Revista Virtual de Química*****,** v. 3, n. 5, 2011.

HAO, Weixin et al. A review of biochar in anaerobic digestion to improve biogas production: performances, mechanisms and economic assessments. ***Bioresource Technology***, v. 341, p. 125797, 2021.

KHALEEL, Mohammed. et al. Biogas: production, properties, applications, economic and challenges: a review. ***Results in Chemistry***, v. 7, p. 101549, 2024.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

KUNZ, Airton.; STEINMETZ, Ricardo.; AMARAL, André. ***Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.*** Concórdia: Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2022.

LEMOS, Geraldo. L.; CARDOSO, Maxiane. F. O.; COSTA, Hirdan K. de M. Biogás e biometano no Brasil: panorama e perspectivas. ***Desenvolvimento e Meio Ambiente***, Curitiba, v. 63, p. 464–485, jan./jun. 2024. Disponível em:https://revistas.ufpr.br/made/article/view/88929/52191. Acesso em: 10 nov. 2025.

LI, Yang. et al. Biochar stimulates growth of novel species capable of direct interspecies electron transfer in anaerobic digestion via ethanol-type fermentation. ***Environmental Research***, v. 189, p. 109983, 2020.

MOHAMMED, Nor A. S.; KHAN, M. R.; MAN, H. C**.** Effects of biochar and activated carbon on biogas generation from anaerobic digestion of food waste. ***Sustainability***, v. 14, n. 7, p. 1–17, 2022.

NAGAPPAN, S. et al. A review on biochar production techniques and biochar-based catalyst for biofuel production from algae. ***Fuel***, v. 287, p. 119411, 2021.

OLIVEIRA, Angélica G. et al. Green tools based on graphitic-like carbon/TiO_2/$CaCO_3$ biocomposites as a high-performance platform for CO_2 capture**. *Journal of the Brazilian Chemical Society***, v. 36, n. 11, p. e-20250117, 2025.

RASAPOOR, M. et al. Effects of biochar and activated carbon on biogas generation: a thermogravimetric and chemical analysis approach. ***Energy Conversion and Management*****,** v. 203, p. 112221, 2020.

RODRIGUES, L. N.; GALVIS, L. J. G.; SANTOS, R. C. B.; BECKER, M. R**.** Biofuel production from invasive aquatic plant (*Hydrilla verticillata*). 2020

SMANIOTTO, Bruna; BECKER, Márcia Regina. Viabilidade técnica e econômica de uma planta de biogás para aproveitamento de resíduos orgânicos em Foz do Iguaçu-PR. ***Revista PPC – Políticas Públicas e Cidades***, Curitiba, v. 14, n. 1, p. 01–22, 2025. DOI: https://doi.org/10.23900/2359-1552v14n1-64-2025

SMANIOTTO, Bruna; BECKER, Márcia Regina. Biogás para valorização energética dos resíduos sólidos orgânicos em Foz do Iguaçu-PR. In: CONGRESSO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – CONRESOL, 7. ***Anais*** IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2024.
Disponível em: https://dx.doi.org/10.55449/conresol.7.24.XII-003. Acesso em: 5 nov. 2025.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. Washington, DC: American Public Health Association (APHA), 2005.

VDI 4630**. *Fermentation of organic materials: characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests***. Germany: Verein Deutscher Ingenieure – VDI, 2006.

XIE, Yanqi. et al. A critical review on production, modification and utilization of biochar. ***Journal of Analytical and Applied Pyrolysis***, v. 161, p. 105405, 2022.

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04

XU, Rong. et al. A critical review on the interaction of substrate nutrient balance and microbial community structure and function in anaerobic co-digestion. ***Bioresource Technology*****,** v. 247, p. 1119–1127, 2018.

ZHOU, Jun et al. Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure. ***Bioresource Technology***, v. 217, p. 44–49, 2016.

PYTLAK, Anna. et al.Biochar addition reinforces microbial interspecies cooperation in methanation of sugar beet waste (pulp). ***Science of the Total Environment***, v. 730, art. 138921, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138921

Versão Final Homologada
13/12/2025 17:04