

# **MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM PROTÓTIPO INTELIGENTE SUBMETIDO A CONDIÇÕES OPERACIONAIS ADVERSAS**

*MONITORING OF BIOGAS PRODUCTION IN AN INTELLIGENT BENCH-SCALE PROTOTYPE SUBJECTED TO ADVERSE OPERATING CONDITIONS*

*SURVEILLANCE DE LA PRODUCTION DE BIOGAZ DANS UN PROTOTYPE INTELLIGENT SOUMIS À DES CONDITIONS OPÉRATIONNELLES ADVERSES*

Luciane Lanser<sup>1</sup>  
Marcos Baroncini Proença<sup>2</sup>

## **Resumo**

A utilização de biodigestores tem se destacado como uma solução econômica e eficiente na gestão de resíduos orgânicos e produção de energia sustentável, alinhando-se às metas de sustentabilidade dos ODS 7 e ODS 13 da Agenda 2030. O presente estudo avaliou a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de uma mistura de resíduos alimentares e capim-elefante (*Cenchrus purpureus*). Para isso, analisaram-se três tratamentos distintos (T1, T2 e T3) pelo período de 21 dias. No caso do T1, caracterizado por um teor de sódio reduzido e isolamento térmico, uma melhor produção de biogás foi observada, com variação da temperatura interna dentro do intervalo esperado e pH relativamente neutro. Em termos numéricos, alcançou-se uma concentração máxima de CH<sub>4</sub> correspondente a 733,14 ppm. Enquanto isso, T2 registrou uma queda brusca na produção de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> por volta do 13º dia, associada à instabilidade térmica provocada pelo não-isolamento do protótipo trabalhado. Por sua vez, T3 exibiu uma produção insuficiente de biogás ao longo dos primeiros 10 dias de operação. Após este período, as medições foram interrompidas devido a problemas no equipamento, provavelmente relacionados ao elevado teor de sódio do substrato aplicado. Observou-se o desenvolvimento de espécies fúngicas na parte superficial de todas as amostras, ao longo de todo o período de estudo. Os resultados indicam que o isolamento térmico e a composição do substrato desempenham funções importantes na manutenção de condições adequadas para o processo fermentativo, influenciando diretamente o rendimento da operação. O uso de microcontroladores mostrou-se eficiente para o monitoramento da biodigestão, fornecendo respostas assertivas e consistentes.

**Palavras-chave:** tecnologias emergentes; energia renovável; processos fermentativos; microcontroladores.

## **Abstract**

The use of biodigesters is an economical and efficient solution for organic waste management and sustainable energy production, in alignment with the sustainability goals of SDG 7 and SDG 13 from the 2030 Agenda. This study evaluated the production of biogas from the anaerobic digestion of a mixture made of food waste and elephant grass (*Cenchrus purpureus*). Three treatments (T1, T2, and T3) were analyzed for 21 days. In the case of T1, which has thermal insulation and reduced sodium content, better biogas production could be observed, with internal temperature variation within the expected range and a relatively neutral pH. In numerical terms, a maximum CH<sub>4</sub> concentration of 733.14 ppm was achieved. Meanwhile, T2 recorded a sharp drop in CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> production around the 13º day, associated with the thermal instability caused by the non-insulation of the prototype. On the other hand, T3 showed insufficient biogas production over the first 10 days of operation. After this period, measurements had to be interrupted due to equipment problems, probably related to the high sodium content of the substrate applied. Fungal species were observed on the surface of all the samples throughout the study period. The results indicate that thermal insulation and substrate composition play important roles in maintaining suitable conditions for the fermentation process, directly influencing the performance of the operation. The use of microcontrollers proved to be efficient for monitoring biodigestion, providing assertive and consistent responses.

**Keywords:** emerging technologies; renewable energy; fermentative processes; microcontrollers.

<sup>1</sup> Tecnóloga em Agricultura pelo Centro Universitário Internacional UNINTER. Mestranda em Engenharia Química pela Universidade Regional de Blumenau (FURB).

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Professor e Orientador da Escola Superior Politécnica, Centro Universitário Internacional UNINTER.

## Resumen

El uso de biodigestores se ha destacado como una solución económica y eficiente en la gestión de residuos orgánicos y en la producción de energía sostenible, alineándose con los objetivos de sostenibilidad de los ODS 7 y ODS 13 de la Agenda 2030. El presente estudio evaluó la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de una mezcla de residuos alimentarios y pasto elefante (*Cenchrus purpureus*). Para ello, se analizaron tres tratamientos distintos (T1, T2 y T3) durante un período de 21 días. En el caso de T1, caracterizado por un contenido reducido de sodio y aislamiento térmico, se observó una mejor producción de biogás, con variación de la temperatura interna dentro del intervalo esperado y un pH relativamente neutro. En términos numéricos, se alcanzó una concentración máxima de CH<sub>4</sub> correspondiente a 733,14 ppm. Mientras tanto, T2 registró una caída brusca en la producción de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> alrededor del día 13, asociada a la inestabilidad térmica provocada por la falta de aislamiento del prototipo trabajado. Por su parte, T3 mostró una producción insuficiente de biogás durante los primeros 10 días de operación. Después de este período, las mediciones fueron interrumpidas debido a problemas en el equipo, probablemente relacionados con el elevado contenido de sodio del sustrato aplicado. Se observó el desarrollo de especies fúngicas en la parte superficial de todas las muestras a lo largo de todo el período de estudio. Los resultados indican que el aislamiento térmico y la composición del sustrato desempeñan funciones importantes en el mantenimiento de condiciones adecuadas para el proceso fermentativo, influyendo directamente en el rendimiento de la operación. El uso de microcontroladores demostró ser eficiente para el monitoreo de la biodigestión, proporcionando respuestas precisas y consistentes.

**Palabras clave:** tecnologías emergentes; energía renovable; procesos fermentativos; microcontroladores.

## 1 Introdução

O crescimento acelerado da população mundial, aliado ao progresso econômico e à intensificação da urbanização, tem provocado alterações profundas no panorama mundial nas últimas décadas. Essas transformações manifestam-se, entre outros aspectos, no expressivo aumento da geração de resíduos orgânicos e na crescente demanda por energia (Gueri *et al.*, 2021; Marques, 2012). Esse cenário impõe desafios ambientais significativos, exigindo soluções que integrem tecnologia e sustentabilidade para atender às demandas da sociedade contemporânea, preservando o equilíbrio ecológico e a saúde pública (Gueri *et al.*, 2021).

Uma alternativa de grande relevância econômica é a utilização de biodigestores. Esses sistemas empregam o processo de digestão anaeróbica para reduzir a carga orgânica presente nesses materiais, gerando como subprodutos o biogás, fonte de energia limpa e renovável, e a matéria orgânica estabilizada, amplamente utilizada como fertilizante agrícola (Kretzer *et al.*, 2016; Soares; Proença, 2024).

O pH e a temperatura são parâmetros-chave no processo de biodigestão, impactando diretamente no metabolismo microbiano. Como consequência, o monitoramento do processo mostra-se essencial, visto que pequenas oscilações podem afetar significativamente a eficiência da operação, comprometendo a qualidade e a quantidade do biogás produzido (Gueri *et al.*, 2021; Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

A aplicação da inteligência artificial (IA) permite o acompanhamento contínuo de variáveis importantes, além de prever comportamentos do sistema e ajustar parâmetros de

maneira dinâmica. Seu uso otimiza o desempenho do processo e a qualidade do biogás, além de contribuir para a redução de custos e riscos operacionais envolvidos (Wang *et al.*, 2023).

Nesse sentido, procurando mitigar os impactos ambientais mencionados, além de contribuir para as metas de sustentabilidade da ONU, estabelecidas pelos ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) da Agenda 2030, o presente estudo visou monitorar a produção de biogás em um protótipo de bancada inteligente submetido a condições operacionais adversas, incluindo exposição a variações da temperatura externa e uso de substrato com elevado teor de sódio.

## 2 Fundamentação teórica

O biogás é uma fonte energética renovável empregada na geração de energia térmica e elétrica, além de atuar como combustível alternativo. Sua utilização representa uma solução promissora na produção de energia limpa e conservação dos recursos naturais disponíveis (Sharma *et al.*, 2023; Lancer; Proença, 2024). Ele pode ser naturalmente encontrado em pântanos, aterros sanitários, sedimentos aquáticos, esterqueiras e intestinos de animais ruminantes (Araújo, 2017). Resíduos sólidos orgânicos, como restos agrícolas e de alimentos domésticos, possuem excelente aplicabilidade como substrato para sua produção (Morales-Polo; Cledera-Castro; Soria, 2019).

A produção de biogás é resultado da digestão anaeróbica, processo metabólico complexo relacionado à decomposição da matéria orgânica pela ação de microrganismos específicos (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Essa transformação envolve quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A hidrólise promove a quebra de macromoléculas, como carboidratos, lipídeos e proteínas, em componentes de menor complexidade estrutural. Na acidogênese, os produtos resultantes dessa etapa são metabolizados pelos microrganismos em compostos orgânicos simples, como álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos graxos voláteis de cadeia curta, hidrogênio ( $H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e amônia ( $NH_3$ ). Esse processo contribui para o crescimento de novas comunidades microbianas, dado que a fermentação é conduzida por um grupo diversificado de bactérias (Fongaro, 2016). Na acetogênese, os produtos da etapa anterior são oxidados em ácido acético ( $CH_3COOH$ ),  $H_2$  e  $CO_2$ . Alcançando a metanogênese, os intermediários da acetogênese são transformados em metano ( $CH_4$ ) e outros gases pela ação de arqueias metanogênicas (Fongaro, 2016; Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

A composição aproximada do biogás encontra-se descrita na Tabela 1. Em sua maior parte, o biogás é composto por aproximadamente 50 a 75 % de  $CH_4$  e 25 a 40 % de  $CO_2$  (Gênero

*et al.*, 2013). O metano encontra-se estreitamente relacionado ao poder calorífico do biogás, caracterizando-se como o componente de maior interesse da mistura (Cremonez *et al.*, 2013). Outros compostos também podem estar presentes em menores quantidades, além de vapor de água (Gênero *et al.*, 2013; Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). A eficiência da conversão da energia contida no biogás em eletricidade é de aproximadamente 25 %. Quando convertida em energia térmica, chega a 65 % (Gênero *et al.*, 2013).

**Tabela 1:** Composição aproximada do biogás

Composto Químico	Fórmula Química	Composição (%)
Metano	CH <sub>4</sub>	50,00 – 75,00
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	25,00 – 40,00
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	1,00 - 3,00
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	0,50 - 2,50
Oxigênio	O <sub>2</sub>	0,10 - 1,00
Sulfeto de hidrogênio	H <sub>2</sub> S	0,10 - 0,50
Amônia	NH <sub>3</sub>	0,10 - 0,50
Monóxido de carbono	CO	0,00 - 0,10
Água	H <sub>2</sub> O	Variável

Fonte: Adaptado de Gênero *et al.* (2013).

O processo de digestão anaeróbia é fortemente influenciado por variáveis como temperatura, pH e composição do substrato (Fongaro, 2016; Wang *et al.*, 2023). Esses fatores devem ser mantidos em níveis específicos para cada etapa da biodigestão, garantindo a viabilidade dos microrganismos. Na hidrólise e acidogênese, a temperatura ideal varia entre 25 e 35 °C. Na metanogênese, a faixa ótima é de 32 a 42 °C. O pH deve ser conservado em faixas mais ácidas nas etapas iniciais do processo e próximo à neutralidade durante a metanogênese (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019; Cremonez *et al.*, 2013). Desvios nesses parâmetros podem comprometer o equilíbrio microbiano, reduzindo a produção de biogás e gerando subprodutos indesejáveis. Essas e outras condições operacionais importantes encontram-se detalhadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Características operacionais das etapas de digestão anaeróbica

PARÂMETRO	Hidrólise/Acidogênese	Metanogênese
Temperatura (°C)	25 - 35	32 - 42
pH	5,2 - 6,3	6,8 - 7,5
Relação C:N	10 - 45	20 - 30
Concentração de matéria seca (%)	< 40	< 30

Fonte: Adaptado de Kunz, Steinmetz & Amaral (2019) e Cremonez *et al.* (2013).

Nos últimos anos, a incorporação de tecnologias emergentes vem se intensificando em diversos setores, especialmente no controle e predição de processos bioquímicos (Offie *et al.*, 2023). Nesse contexto, destaca-se a inteligência artificial (IA), ramo da ciência da computação

dedicado ao desenvolvimento de sistemas que simulam a inteligência humana por meio de algoritmos avançados, capazes de analisar dados, identificar padrões e tomar decisões com base em informações complexas (Wang *et al.*, 2023).

A escolha do modelo de IA adequado encontra-se atrelada às necessidades específicas de cada aplicação. Para a digestão anaeróbica, algoritmos de *machine learning* (ML) podem prever a produção de biogás com base em dados históricos e ajustar automaticamente os parâmetros do processo, otimizando o desempenho da operação (Offie *et al.*, 2023). Entre as principais abordagens relacionadas estão as redes neurais artificiais (RNAs), as máquinas de vetores de suporte (SVM) e os algoritmos baseados em árvores de decisão, como as Random Forests (Avinash; Mishra, 2024; Offie *et al.*, 2023).

### 3 Metodologia

Esta seção apresenta os procedimentos experimentais que nortearam a realização do presente estudo, incluindo o preparo das amostras, a caracterização dos substratos, a configuração do sistema experimental e as análises quantitativas e qualitativas realizadas ao longo do processo de digestão anaeróbica.

#### 3.1 Preparo das amostras

Para a produção das amostras, considerou-se a elaboração de três tratamentos distintos: **T1**: *Blend* composto por 0,7 kg de resíduos de alimentos (R1), incluindo arroz e macarrão cozidos, acrescido de 0,3 kg de capim-elefante (*Cenchrus purpureus*) triturado. Esse tratamento foi isolado termicamente, mantendo a temperatura externa controlada; **T2**: *Blend* composto por 0,7 kg de resíduos alimentares (R2), incluindo arroz e macarrão cozidos, acrescido de 0,3 kg de capim-elefante (*Cenchrus purpureus*) triturado, sem isolamento térmico aplicado; **T3**: *Blend* composto por 0,7 kg de resíduos de alimentos (R3), incluindo arroz e sopa industrializada cozidos, acrescido de 0,3 kg de capim-elefante (*Cenchrus purpureus*) triturado. Esse tratamento foi isolado termicamente, mantendo a temperatura externa controlada.

Cada amostra foi adequadamente homogeneizada, garantindo uma distribuição uniforme dos materiais utilizados, sendo então introduzida no biodigestor desenvolvido. Vale ressaltar que os compostos orgânicos aplicados tiveram sua seleção realizada com antecedência de aproximadamente 24 horas.

### 3.2 Caracterização do substrato

A composição centesimal dos resíduos utilizados foi estimada com o auxílio da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA). Essa base de dados disponibiliza informações padronizadas em relação a composição de alimentos, sendo um referencial confiável para a determinação da composição centesimal dos substratos estudados.

As características físico-químicas do capim-elefante podem ser significativamente influenciadas por diversos fatores, incluindo o estágio de desenvolvimento da planta, as condições climáticas, as práticas de manejo e as características do solo (Deresz *et al.*, 2006). Nesse sentido, adotou-se uma estimativa fundamentada em valores disponibilizados pela literatura para a caracterização desta gramínea.

### 3.3 Construção do protótipo

O protótipo empregado no processo de digestão anaeróbica (Figura 1) consistiu em um reservatório de vidro com capacidade de 2 litros, hermeticamente vedado e internamente equipado com um medidor de solo analógico e microcontroladores, vinculados à placa de prototipagem Arduino Mega 2560. Para o isolamento térmico de T1 e T3, implementou-se ainda um reservatório de poliestireno expandido.

**Figura 1:** Protótipo de bancada



**Fonte:** Os autores (2023).

### 3.4 Obtenção das informações digitais

A coleta dos dados digitais foi realizada diariamente, pelo período de 21 dias. Para isso, utilizaram-se códigos processados pelo software Arduino IDE, conforme metodologia explorada por Amaral e Proença (2023). As informações auferidas incluem a temperatura interna do reator ( $^{\circ}\text{C}$ ) e as concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  (ppm).

### 3.5 Obtenção das informações analógicas

A coleta das informações analógicas foi realizada diariamente, pelo período de 21 dias. Para isso, utilizou-se de um medidor de solo da marca Nobrand. O equipamento, composto por dois eletrodos, informou o potencial hidrogeniônico (pH) do substrato equivalente à cerca de 5 centímetros de profundidade.

### 3.6 Crescimento fúngico

O crescimento fúngico foi monitorado por meio de observações visuais realizadas ao longo de todo o período de operação. Alterações relevantes, como variações na coloração, textura ou extensão das colônias, foram documentadas por meio de anotações e registros fotográficos. Tais observações serviram como complemento qualitativo às demais análises realizadas, permitindo uma avaliação mais abrangente do processo estudado.

### 3.7 Análise de dados

Para uma análise detalhada das respostas alcançadas, os dados processados pelos sensores digitais e analógicos foram exportados e organizados na planilha eletrônica Microsoft Excel 365. Por meio dessa ferramenta, aplicou-se a modelagem matemática necessária para a adequada apresentação dos resultados, facilitando a identificação de tendências e padrões, além de permitir a comparação das informações com achados disponíveis na literatura.

## 4 Resultados e discussão

Os resultados obtidos no presente estudo são apresentados em detalhe nas subseções seguintes. Um resumo sobre as condições analisadas em cada tratamento pode ser verificado na Tabela 3. Tais informações incluem características do sistema, comportamento do pH, presença de crescimento fúngico e níveis de produção de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ .

**Tabela 3:** Resumo comparativo do desempenho e comportamento dos tratamentos avaliados

PROTÓTIPO	T1	T2	T3
<b>Isolamento térmico</b>	Sim	Não	Sim
<b>Produção de CO<sub>2</sub></b>	Suficiente	Suficiente (até 13º dia) Insuficiente (13 – 21º dia)	Insuficiente
<b>Produção de CH<sub>4</sub></b>	Suficiente	Suficiente (até 13º dia) Insuficiente (13 – 21º dia)	Insuficiente
<b>pH</b>	Neutro	Levemente ácido (0 – 12º dia) Ácido moderado (13 – 21º dia)	Levemente ácido (até 10º dia)
<b>Condensação</b>	Alta	Média	Média (até 10º dia)
<b>Crescimento fúngico</b>	Coloração branca Morfologia arredondada (5 – 21º dia)	Coloração branca Morfologia arredondada (3 – 9º dia)	Coloração branca Morfologia arredondada (3 – 5º dia)
		Coloração cinza-escura Morfologia filamentosa (11 – 21º dia)	Coloração cinza-escura Morfologia filamentosa (6 – 10º dia)

**Fonte:** Os autores (2024).

#### 4.1 Caracterização dos substratos

A Tabela 4 demonstra as composições centesimais aproximadas dos substratos em estudo. O capim-elefante apresenta, de maneira geral, um teor de umidade por volta de 75 %. O percentual remanescente corresponde à matéria seca (MS), caracterizada em sua maior parte por compostos estruturais como celulose, hemicelulose e lignina (Deresz *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2016). De acordo com Kunz, Steinmetz e Amaral (2019), materiais com conteúdo significativo de lignocelulose e lignina são hidrolisados de forma mais lenta e, em muitos casos, de maneira incompleta. No presente estudo, é possível observar que os teores de fibras totais relacionados aos substratos preparados são relativamente superiores aos verificados para os resíduos de alimentos, evidenciando a influência da adição desta gramínea. Morales-Polo, Cledera-Castro e Soria (2019) relataram que, na digestão anaeróbica de resíduos hortícolas, duas fases distintas foram observadas durante a hidrólise, sendo uma característica recorrente em processos que envolvem materiais com graus de biodegradabilidade distintos.

**Tabela 4:** Composição centesimal aproximada dos substratos

COMPONENTE	RESÍDUO ALIMENTAR			CAPIM-ELEFANTE	SUBSTRATO		
	R1	R2	R3		T1	T2	T3
Umidade (g/100g)	67,42	67,42	69,43	75,00	69,69	69,69	71,10
Cinzas (g/100g)	0,63	0,63	3,16	1,75	0,97	0,97	2,74
Proteínas (g/100g)	3,45	3,45	3,35	2,00	3,02	3,02	2,95
Fibras Totais (g/100g)	2,45	2,45	0,92	16,25	6,59	6,59	5,52
Lípideos (g/100g)	1,50	1,50	2,11	0,50	1,20	1,20	1,63
Carboidratos (g/100g)	24,43	24,43	19,73	4,50	18,45	18,45	15,16
Sódio (g/100g)	0,12	0,12	1,31	-	0,08	0,08	0,92

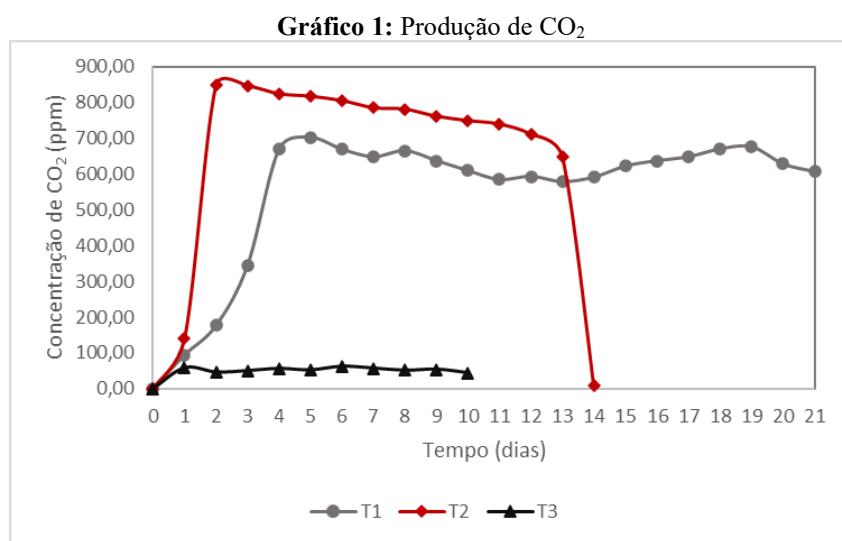
**Fonte:** Os autores (2024).

Todos os tratamentos analisados revelaram altos níveis de umidade, evidenciando uma presença significativa de água em sua composição. No caso do T3, a utilização de um resíduo de consistência mais líquida resultou em um teor de umidade superior, correspondente a 71,10 g/100 g. Deve-se observar que, como T1 e T2 são provenientes da mesma matriz, expressam a mesma proporção de nutrientes para os componentes avaliados.

Em relação aos carboidratos, T1 e T2 apresentaram valores mais elevados em comparação ao T3. Este último, por sua vez, destacou-se por um teor de sódio significativamente superior, apresentando 0,92 g/100 g. Segundo Li *et al.* (2019), a inibição da digestão anaeróbica pode ser comprometida em concentrações de sódio entre 3,5 e 5,5 g/L. Níveis acima de 8 g/L resultam em uma significativa queda na produção de CH<sub>4</sub>.

#### 4.2 Concentração de CO<sub>2</sub>

O Gráfico 1 ilustra a variação da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo. Os dados coletados demonstram que, após um crescimento exponencial, no quinto dia de operação T1 alcançou uma produção de CO<sub>2</sub> igual a 702,22 ppm, mantendo-se em intervalos próximos nos dias subsequentes. Testes preliminares apontaram que concentrações em torno de 700,00 ppm são recorrentes para a composição de substrato estudada (Lanser; Proença, 2024).



**Fonte:** Os autores (2024).

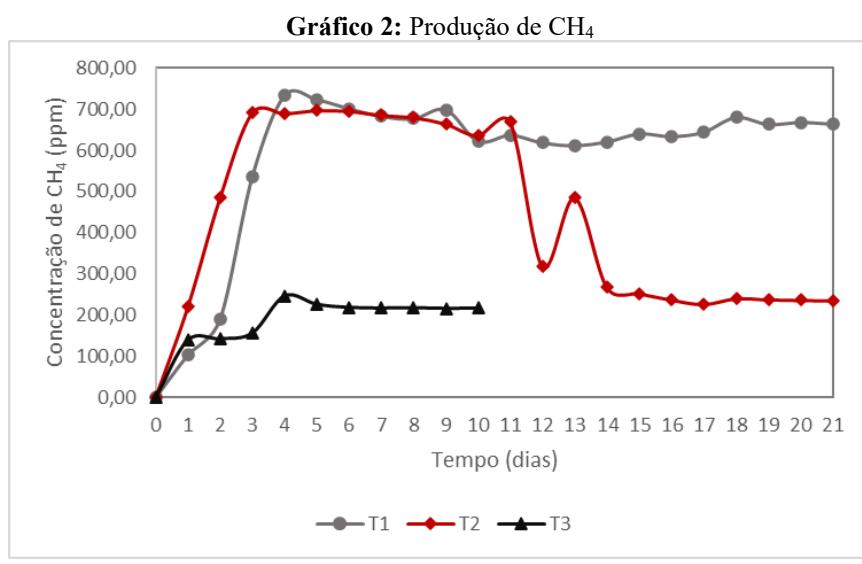
A curva referente ao T2 evidencia um desenvolvimento acelerado do processo fermentativo, com a obtenção de uma concentração de CO<sub>2</sub> igual a 847,85 ppm ainda no segundo dia. Esse comportamento pode ser atribuído às variações da temperatura externa, visto que o protótipo esteve intencionalmente exposto ao ambiente. Segundo Kunz, Steinmetz e Amaral (2019), a temperatura externa exerce uma influência significativa sobre a taxa de

reações bioquímicas envolvidas na geração de biogás. Nesse sentido, à medida que a temperatura aumenta, o equilíbrio químico é deslocado de  $\text{NH}_4^+$  para  $\text{NH}_3$ . O composto  $\text{NH}_3$ , conhecido também como amônia livre, é tóxico para as arqueias metanogênicas, dado que se difunde facilmente por meio de suas membranas celulares (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Assim, embora a aceleração inicial do processo tenha sido estimulada pela exposição a temperaturas mais altas, ela pode ter contribuído para um ambiente desfavorável ao longo do tempo. Isso ficou evidente entre os dias 13 e 14, quando uma queda abrupta na concentração de  $\text{CO}_2$  pôde ser observada. Nesse estágio, a produção do gás partiu de 648,35 ppm para praticamente zero. Adicionalmente, é importante considerar que outros fatores podem ter influenciado nos resultados reportados.

Enquanto isso, T3 apresentou produção insuficiente do gás avaliado, alcançando um valor máximo de 61,84 ppm. O alto teor de sódio verificado nesse substrato possivelmente elevou a pressão osmótica do meio, levando à desidratação das células microbianas, prejudicando sua atividade e, consequentemente, a produção de biogás. Além disso, a alta concentração de sódio encontra-se intimamente relacionada à inibição de enzimas fundamentais relacionadas ao processo (Li *et al.*, 2019; Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Vale ressaltar que as análises efetuadas nesse tratamento necessitaram ser totalmente descontinuadas após o décimo dia, devido ao desempenho inadequado dos sensores envolvidos, ocasionado pela projeção de partículas e impurezas do substrato nestes equipamentos.

#### 4.3 Concentração de $\text{CH}_4$

O Gráfico 2 demonstra a variação da concentração de  $\text{CH}_4$  ao longo do período analisado.

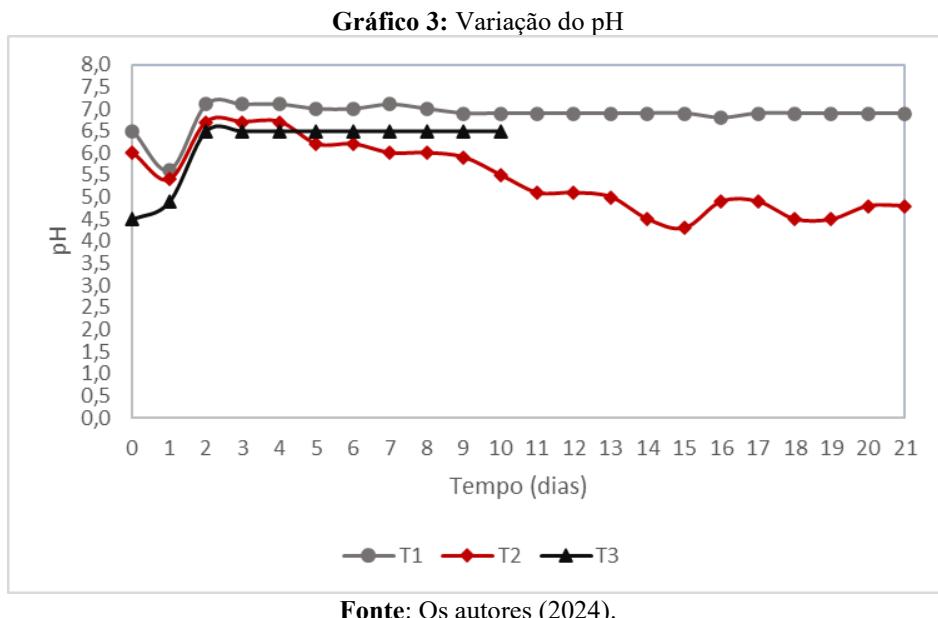


Nesse caso, T1 alcançou estabilização na produção do composto ainda no quarto dia, atingindo 733,14 ppm. Estudos realizados por Morales-Polo, Cledera-Castro e Soria (2019) e Tian *et al.* (2025) apresentaram curvas de padrão semelhante, com a estabilização da matéria orgânica ocorrendo por volta do décimo dia. Os substratos utilizados nos respectivos trabalhos foram resíduos hortícolas e um *blend* de palha seca e esterco bovino. Conforme evidenciado por Kunz, Steinmetz e Amaral (2019), a velocidade da degradação encontra-se associada à duração da etapa de hidrólise, que varia de acordo com as características do substrato trabalhado. Para carboidratos, essa etapa ocorre em poucas horas, enquanto para proteínas e lipídios um período mais prolongado pode ser necessário. Compreendendo que T1, T2 e T3 apresentaram níveis de carboidratos consideráveis, considera-se que essa seja a principal variável envolvida na rápida estabilização observada.

Em relação ao decaimento da produção de CH<sub>4</sub> em T2 e T3, as mesmas conclusões apontadas para a produção de CO<sub>2</sub> podem ser assumidas. Vale ressaltar que, em ambos os tratamentos, uma concentração residual do composto foi observada após a desestabilização do processo fermentativo. Esse fenômeno pode estar associado a diversos fatores, incluindo a atividade de microrganismos produtores de metano em níveis reduzidos. A súbita redução na produção de biogás é um problema frequente na operação de biodigestores, sendo amplamente associado à presença de agentes inibidores, bem como à sobrecarga ou subcarga no sistema (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

#### 4.4 pH

A variação do pH ao longo do tempo é apresentada no Gráfico 3. Na fase inicial do processo, mais especificamente entre os dias 0 e 3, todos os tratamentos demonstraram uma leve redução no parâmetro relatado. Esse é um comportamento recorrente em processos anaeróbicos, podendo ser atribuído à formação de ácidos orgânicos durante as etapas de hidrólise e acidogênese (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).



Nos dias subsequentes, o pH de T1 manteve-se relativamente neutro, apresentando valores próximos de 7,0. Enquanto isso, T3 apresentou pH estável, com valores por volta de 6,5. De acordo com Cremonez *et al.* (2013), o pH ótimo para o processo de biodigestão encontra-se entre 6,8 e 7,5. Essa escala é condizente com as condições toleradas pelas arqueas metanogênicas (Brandão, 2014). Desta forma, ainda que T3 tenha alcançado determinada estabilidade em relação ao pH do substrato, a queda para níveis inferiores a 6,6 provavelmente prejudicou o metabolismo dos microrganismos (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Esse efeito pode ser claramente confirmado pela curva de evolução dos gases, demonstrada pelos Gráficos 1 e 2. Considerando a alta concentração de sódio verificada nesse tratamento, o fenômeno em questão pode estar diretamente vinculado ao aumento da pressão osmótica no reator, visto que as arqueas metanogênicas mostram-se particularmente sensíveis a alterações no equilíbrio iônico (Li *et al.*, 2019; Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

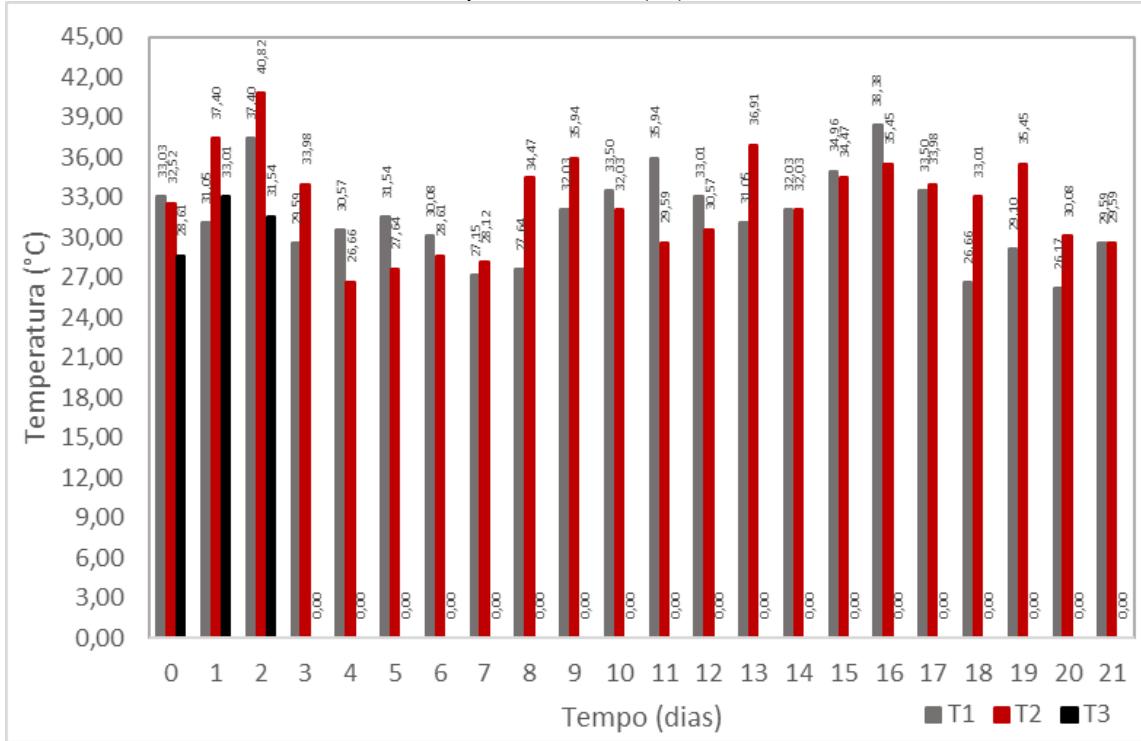
A curva de pH relacionada ao T2, por outro lado, apresentou queda contínua ao longo do período avaliado, alcançando valores abaixo de 5 após o décimo quarto dia. Nesse caso, é muito provável que flutuações térmicas tenham interferido na eficiência do processo, dado que esse tratamento permaneceu isento de isolamento térmico, ou seja, sujeito às variações da temperatura externa. Essa condição impactou negativamente no rendimento da operação, impossibilitando a obtenção de concentrações adequadas para os componentes de interesse do biogás. Os resultados obtidos evidenciam a importância do controle de temperatura em processos fermentativos (Wang *et al.*, 2019).

## 4.5 Temperatura

As temperaturas internas dos protótipos avaliados encontram-se descritas no Gráfico 4. Ao longo do estudo, a temperatura interna de T1 demonstrou flutuações entre 26,17 e 38,38 °C. Enquanto isso, T2 apresentou um intervalo de 26,66 a 40,82 °C. No caso do T3, as medições foram conduzidas somente até o dia 2, em decorrência do comprometimento do equipamento.

Os valores registrados para T1 encontram-se de acordo com a literatura, que apresenta uma faixa de 25 a 35 °C para as etapas de hidrólise, acidogênese e acetogênese, e entre 32 e 42 °C para a metanogênese (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Para T2, ainda que valores adequados para a atividade metanogênica tenham sido alcançados, a instabilidade térmica enfrentada pelo protótipo possivelmente prejudicou o desempenho geral da operação.

**Gráfico 4:** Temperatura interna (°C) dos tratamentos



**Fonte:** Os autores (2024).

Em sua forma bruta, o biogás contém vapor de água em sua composição (Gênero *et al.*, 2013; Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Devido à natureza exotérmica das reações envolvidas, em condições em que a temperatura de biodigestão excede à alcançada externamente, o vapor de água tende a se condensar nas paredes internas do equipamento. Esse fenômeno foi amplamente observado em todos os tratamentos estudados (Figuras 2 e 3).

**Figura 2:** T1 no dia 0



**Fonte:** Os autores (2023).

**Figura 3:** T1 no dia 21



**Fonte:** Os autores (2023).

No caso de T2, registrou-se ainda o acúmulo de líquido no fundo do reator por volta do décimo sexto dia. Diversas técnicas encontram-se disponíveis para a remoção de água do biogás. Quando não removido, seu conteúdo pode se acumular nas tubulações, resultando em problemas como corrosão e entupimento (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

#### 4.6 Crescimento fúngico

Além das análises quantitativas, realizaram-se algumas verificações qualitativas ao longo do processo, possibilitadas pela transparência do material do protótipo trabalhado. Uma das observações mais relevantes corresponde ao crescimento fúngico. Em todos os tratamentos houve o crescimento de unidades formadoras de colônia (UFCs) de coloração e características morfológicas específicas.

Uma quantidade expressiva de colônias fúngicas de coloração branca e morfologia arredondada (Figura 4) foi verificada na parte superficial de T1 entre os dias 5 e 21. No caso de T2, verificou-se a presença de microrganismos com características semelhantes a partir do dia 3 (Figura 5), com redução significativa no dia 9. A partir do dia 11 o crescimento de outra espécie pode ser verificado, apresentando coloração cinza-escura e estruturas elevadas. Em T3 o substrato apresentou expressivas alterações ainda nos primeiros dias (Figura 6). Assim, observou-se a formação do fungo branco por volta do dia 3, com drástica redução por volta do dia 5. Na sequência, o desenvolvimento de estruturas acinzentadas semelhantes às do T2 foi evidenciado.

**Figura 4:** Fungos em T1



**Fonte:** Os autores (2023).

**Figura 5:** Fungos em T2



Fonte: Os autores (2023).

**Figura 6:** Fungos em T3



Fonte: Os autores (2024).

Em estudos recentes, Tian *et al.* (2025) relataram que a presença de fungos em sistemas de digestão anaeróbica contribuiu para a degradação dos substratos, especialmente de resíduos lignocelulósicos, ao passo que a cooperação sinérgica entre bactérias e fungos elevou a taxa de produção de biogás. No entanto, a função exata desses microrganismos ainda precisa ser mais bem compreendida, o que destaca a importância de estudos complementares para a correta identificação das espécies envolvidas.

## 5 Considerações finais

Os resultados alcançados demonstram que a utilização de microcontroladores mostra-se eficiente no monitoramento do processo de digestão anaeróbica, apresentando respostas confiáveis para diferentes condições de operação. Nesse contexto, a implementação da inteligência artificial possibilitou o acompanhamento da evolução da biodigestão em tempo real, representando uma alternativa de baixo custo para implementação em propriedades com disponibilidade limitada de recursos financeiros.

Adicionalmente, os achados indicam que a presença de sódio no substrato, quando em concentrações elevadas, pode limitar a produção de biogás, enquanto o desenvolvimento de determinadas espécies fúngicas pode favorecer a produção de CH<sub>4</sub>. Estudos mais abrangentes mostram-se importantes para a completa compreensão das correlações apontadas, considerando um planejamento experimental capaz de avaliar a influência de níveis distintos do nutriente nas amostras, bem como compreender o impacto de diferentes microrganismos no rendimento do processo.

## Referências

AMARAL, K. S.; PROENÇA, M. B. Biodigestores inteligentes: geração tecnológica de biogás e biofertilizantes através da co-digestão de biomassa lignocelulósica e bactérias ácido lácticas (BAL). **Caderno Progressus**, Curitiba, v. 3, n. 5, p. 48-58, 2023. Disponível em: <https://www.cadernosuninter.com/index.php/progressus/article/view/2129>. Acesso em: 26 dez. 2025.

ARAÚJO, A. P. C. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. 42 f. 2017. **Monografia** (Bacharelado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20292>. Acesso em: 26 dez. 2025.

AVINASH, L. S.; MISHRA, A. Comparative evaluation of artificial intelligence based models and kinetic studies in the prediction of biogas from anaerobic digestion of MSW. **Fuel**, [s. l.], v. 367, p. 131545, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131545>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236124006938?via%3Dihub>. Acesso em: 26 dez. 2025.

BRANDÃO, J. F. M. C. Otimização da Produção de Biogás com Recurso a Redes Neurais Artificiais. **Relatório de Estágio**. Orientador: Professor Jaime Gabriel Silva. Porto, 2014.

CREMONEZ, P. A. *et al.* Biodigestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [s. l.], v. 2, p. 21-35, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5380/rber.v2i4.33901>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/33901>. Acesso em: 26 dez. 2025.

DERESZ, F. *et al.* Composição química, digestibilidade e disponibilidade de capim-elefante cv. Napier manejado sob pastejo rotativo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s. l.], v. 35, n. 3, p. 10-16, 2006. DOI: 10.1590/S1516-35982006000300032. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/X56yKx4Wc3Gyk4Z4R6wVGv/?lang=pt>. Acesso em: 26 dez. 2025.

FONGARO, G. A Higienização de Dejetos suinícidas visando reciclo agrícola sanitariamente seguro. 244 f. 2016. Tese (Programa de Biotecnologia e Biociência) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/173677>. Acesso em: 26 dez. 2025.

GÊNERO, L. C. *et al.* Produção de hidrogênio a partir do biogás. **Acta Iguazu**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 29-42, 2013. DOI: 10.48075/actaiguaz.v2i1.8047. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/8047/5951>. Acesso em: 26 dez. 2025.

GUERI, M. V. D. *et al.* Análise de estabilidade de um protótipo de biodigestor anaeróbio mesofílico digerindo resíduo alimentar. **Revista GEAMA**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 05-12, 2021. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/4298>. Acesso em: 26 dez. 2025.

KRETZER, S. G. *et al.* Produção de Biogás com Diferentes Resíduos Orgânicos de Restaurante Universitário. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [s. l.], v. 5 n. 4, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5380/rber.v5i4.48415> <https://doi.org/10.5380/rber.v5i4.48415>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/48415>. Acesso em: 26 dez. 2025.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R.; AMARAL, A. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato**. Santa Catarina: Embrapa, 2019.

LANSER, L.; PROENÇA, M. B. **Análise do potencial de geração de biogás através da digestão anaeróbica de resíduos alimentares domésticos**. In: XVII ENFOC - Encontro de Iniciação Científica e Fórum Científico. Curitiba: Uninter, 2024. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/enfocuninter2023/720437-analise-do-potencial-de-geracao-de-biogas-atraves-da-digestao-anaerobica-de-residuos-alimentares-domesticos/>. Acesso em: 26 dez. 2025.

LI et at. Effects of Salt on Anaerobic Digestion of Food Waste with Different Component Characteristics and Fermentation Concentrations. **Energies**, [s. l.], v. 12, n. 18, 2019. DOI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/18/3571>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/18/3571>. Acesso em: 26 dez. 2025.

MARQUES, C. A. Microgeração de energia elétrica em uma propriedade rural utilizando biogás como fonte primária de energia elétrica. 91 f. 2012. **Dissertação** (Mestrado em Energia na Agricultura) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2012. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/819>. Acesso em: 26 dez. 2025.

MORALES-POLO, C.; CLEDERA-CASTRO, M. M.; SORIA, B. Y. M. Biogas Production from Vegetable and Fruit Markets Waste—Compositional and Batch Characterizations. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, p. 6790, 2019. DOI: 10.3390/su11236790. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/23/6790>. Acesso em: 26 dez. 2025.

OFFIE, I. *et al.* Development of an artificial intelligence-based framework for biogas generation from a micro anaerobic digestion plant. **Waste Management**, [s. l.], v. 158, p. 66-75, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X22006286?via%3Dihub>. Acesso em: 26 dez. 2025.

SHARMA, V. *et al.* Insights into the recent advances of agro-industrial waste valorization for sustainable biogas production. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 390, p. 129829, 2023. DOI: [10.1016/j.biortech.2023.129829](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129829). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852423012579?via%3Dihub>. Acesso em: 26 dez. 2025.

SILVA, C. A. L. *et al.* Análise da composição química de cinco variedades de capim-elefante por métodos diferentes. In: Encontro de pesquisa e inovação da Embrapa Agroenergia, 3., 2016, Brasília, DF: **Embrapa**, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1057853/analise-da-composicao-quimica-de-cinco-variedades-de-capim-elefante-por-metodos-diferentes>. Acesso em: 26 dez. 2025.

SOARES, D. P.; PROENÇA, M. B. A utilização do biofertilizante de biodigestor para análise do crescimento do feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*). **Caderno Progressus**, Curitiba, v. 4, n. 7, p. 2-13, 2024. Disponível em: <https://www.cadernosuninter.com/index.php/progressus/article/view/3215>. Acesso em: 26 dez. 2025.

TIAN, Y. *et al.* Synergy between bacteria and fungi contributes to biodegradation and methane production of lignocellulosic anaerobic co-digestion exposing to surfactants. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 373, p. 123579, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123579>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724035655?via%3Dihub>. Acesso em: 26 dez. 2025.

WANG, Q. *et al.* Biogas generation from biomass as a cleaner alternative towards a circular bioeconomy: Artificial intelligence, challenges, and future insights. **Fuel**, [s. l.], v. 333, p. 126456, 2023. DOI: [10.1016/j.fuel.2022.126456](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126456). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623612203280X?via%3Dihub>. Acesso em: 26 dez. 2025.

WANG, S. *et al.* Influence of temperature on biogas production efficiency and microbial community in a two-phase anaerobic digestion system. **Water**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.3390/w11010133>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/133>. Acesso em: 26 dez. 2025.

**Data de submissão:** 21/01/2025

**Data de aceite:** 13/06/2025