

Artigo Científico

Influência da composição de resíduos alimentares de grandes geradores na produção de metano em biodigestor de garagem

Influence of food waste composition from large generators on methane production in a garage-scale biodigester

Fernanda Lopes da Costa Peixoto^{1*} , Wilkson Sousa dos Santos¹ , Letícia dos Santos Macedo¹ , Adilson Vicente da Silva¹ , Claudia Echevengúá Teixeira¹ 

RESUMO

O Brasil gerou, em 2023, cerca de 34 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos – fração orgânica (FORSU), em sua maioria destinados a aterros sanitários. Essa biomassa poderia gerar entre 1 e 3 bilhões de m³ de biogás por meio da digestão anaeróbia, configurando-se como alternativa estratégica para recuperação energética e mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Este estudo avaliou o potencial metanogênico de resíduos alimentares provenientes de grandes geradores urbanos, tratados em biodigestor anaeróbio do tipo garagem, operado em regime de batelada extrasseca. Inicialmente foi realizada a caracterização física e gravimétrica dos resíduos, seguida da preparação de oito misturas com diferentes composições, submetidas a ciclos operacionais com monitoramento da produção e composição do biogás. Os resultados indicam diferenças significativas na composição dos resíduos conforme sua origem, com escolas e restaurantes apresentando maior proporção de restos de alimentos processados, enquanto o supermercado apresentou predominância de frutas, legumes e verduras cruas. Na fase inicial de comissionamento operacional do sistema houve baixa produção de biogás em 2023 (≈ 7 m³/t), seguida de aumento expressivo da produção específica em 2024 (≈ 36 m³/t), indicando a estabilização do processo. O melhor desempenho foi observado no ciclo T2C2, que atingiu até 63% de metano no biogás e apresentou predominância de resíduos alimentares processados e uso de digestato como material estruturante. Os resultados reforçam a importância da caracterização prévia dos resíduos e do adequado comissionamento de sistemas anaeróbios para maximizar a eficiência energética da FORSU.

Palavras-chave: biodigestão; tratamento anaeróbio; fração orgânica de resíduos, biogás.

ABSTRACT

Brazil generated approximately 34 million tons of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) in 2023, most of which was disposed of in landfills. This biomass could generate between 1 and 3 billion m³ of biogas through anaerobic digestion, representing a strategic pathway for energy recovery and greenhouse gas (GHG) mitigation. This study evaluated the methanogenic potential of food waste from large urban generators treated in a garage-type anaerobic digester operated under dry-batch conditions. Initially, a physical and gravimetric characterization of the waste was performed, followed by the preparation of eight mixtures with different compositions, which were subjected to operational cycles with monitoring of biogas production and composition. The results indicated significant differences in waste composition according to their source, with schools and restaurants presenting a higher proportion of processed food residues, while supermarket waste was predominantly composed of raw fruits and vegetables. During the initial operational commissioning phase of the system, biogas production was low in 2023 (≈ 7 m³/t), followed by a substantial increase in specific biogas production in 2024 (≈ 36 m³/t), indicating process stabilization. The best performance was observed in cycle T2C2, which reached methane concentrations of up to 63% in the produced biogas, higher proportion of processed food waste and use of digestate as a structuring material. These results highlight the importance of prior waste characterization and proper commissioning of anaerobic systems to maximize the energy recovery efficiency of the OFMSW.

Keywords: biodigestion; anaerobic treatment; organic fraction of waste; biogas.

¹Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – São Paulo (SP), Brasil.

***Endereço para correspondência:** Avenida Professor Almeida Prado, 532 – Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Núcleo de Sustentabilidade e Baixo Carbono – Prédio 59, sala 14. CEP: 05508-901, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: fpeixoto@ipt.br

INTRODUÇÃO

O Brasil gerou aproximadamente 75 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) em 2023, dos quais cerca de 45% correspondem à fração orgânica (FORSU), totalizando aproximadamente 34 milhões de toneladas de resíduos com elevado potencial de degradação biológica (Brasil, 2022; Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico, 2024). Apesar da publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), na qual estabelece a destinação apenas de rejeitos aos aterros (BRASIL, 2010); além das diretrizes estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), pelo Plano Nacional de Redução e Reciclagem de Resíduos Orgânicos Urbanos (PLANARO) e por instrumentos estaduais voltados à redução da disposição de resíduos em aterros sanitários, grande parte destes ainda é destinada para esses locais, resultando em emissões significativas de metano, um gás de efeito estufa de alto potencial, além de representar perda de oportunidades de recuperação energética e de nutrientes contidos na biomassa orgânica (Brasil, 2022; 2025; São Paulo, 2020).

Nesse contexto, o tratamento biológico da fração orgânica dos RSU destaca-se como alternativa estratégica para a valorização desses materiais. Entre as principais tecnologias disponíveis, a compostagem promove a estabilização aeróbia da matéria orgânica, enquanto a digestão anaeróbia possibilita a recuperação energética por meio da produção de biogás, além da geração de digestato, que pode ser utilizado como condicionador de solo. A digestão anaeróbia é considerada uma tecnologia consolidada para a valorização energética de resíduos orgânicos e para a integração entre a gestão de resíduos e a geração de energia renovável (Andreazzi *et al.*, 2017; Silva-Martínez *et al.*, 2020).

A digestão anaeróbia da FORSU apresenta potencial de produção de biogás entre 50 e 100 m³ por tonelada de resíduo tratado, com concentrações médias de metano entre 54 e 70 % (Silva; de Lucas Junior, 2022). No contexto brasileiro, esse potencial poderia resultar em uma produção anual estimada entre 1 e 3 bilhões de m³ de biogás, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

A eficiência do processo está diretamente relacionada às características físico-químicas do substrato e às condições

operacionais do sistema. Diferentes composições de resíduos alimentares influenciam o rendimento metanogênico, uma vez que resíduos de frutas e verduras apresentam potencial de produção de metano em torno de 420 L kg⁻¹ de sólidos voláteis, enquanto resíduos alimentares processados alcançam cerca de 530 L kg⁻¹ (Bouallagui *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2014). Alguns experimentos também demonstram que variações na composição do substrato influenciam na produção e na qualidade do biogás (Monteiro *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, sistemas de digestão anaeróbia com alto teor de sólidos (*High Solid Anaerobic Digestion* — HSAD), frequentemente implementados em biodigestores do tipo garagem ou em túneis de metanização operados em batelada, têm se destacado no tratamento da FORSU por permitirem o processamento de resíduos heterogêneos com elevado teor de sólidos (Silva-Martínez *et al.*, 2023). Apesar do avanço tecnológico, sua adoção na América Latina ainda enfrenta barreiras institucionais, regulatórias e econômicas (Bottausci *et al.*, 2022; Silva-Martínez *et al.*, 2020). Além disso, fatores como pré-tratamento do substrato, seleção de inóculo e estabilidade da comunidade microbiana influenciam o desempenho dos reatores (Ventorino *et al.*, 2018).

Nessa perspectiva, a caracterização adequada dos resíduos orgânicos é considerada etapa essencial para o planejamento e o dimensionamento de sistemas de digestão anaeróbia, permitindo avaliar o potencial de produção de biogás e subsidiar estratégias de mitigação de metano (United States Environmental Protection Agency; Global Methane Initiative, 2024).

Diante desse cenário, o presente estudo avaliou o potencial metanogênico de oito misturas de resíduos alimentares tratadas em túneis de metanização de um biodigestor localizado em Bertioga (SP), incluindo a caracterização gravimétrica dos resíduos, o acompanhamento do processo durante a etapa de comissionamento e o monitoramento da composição do biogás ao longo de ciclos operacionais sucessivos. O objetivo foi compreender a influência da composição do substrato no desempenho do processo e contribuir para o fortalecimento da base técnico-científica necessária à expansão da digestão anaeróbia da FORSU no Brasil.

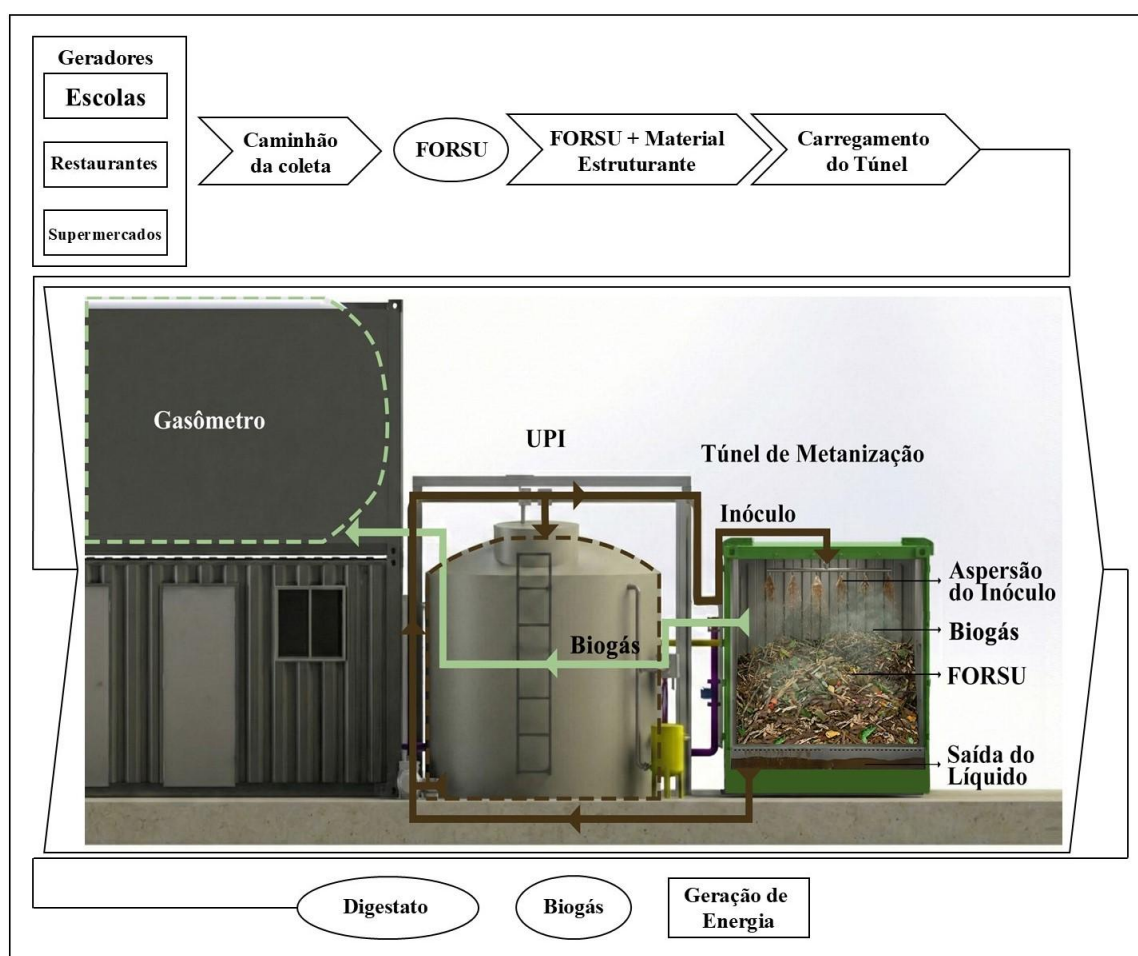
O presente estudo teve como objetivo principal avaliar, em escala piloto, a influência da composição de resíduos alimentares provenientes de grandes geradores, e de estratégias operacionais (uso de material estruturante e recirculação de inóculo) na produção e qualidade do metano gerado em biodigestor do tipo garagem operado em sistema de batelada extrasseca.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado em um biodigestor de tratamento anaeróbio de FORSU localizado em Bertioga (SP), com capacidade de até 60 t/mês, operando em sistema de batelada com quatro túneis de metanização extrassecos, cada um com capacidade aproximada de 15 toneladas. Foram avaliados 8 ciclos operacionais, sendo 3 em 2023 e 5 em 2024.

O sistema conta com uma Unidade de Produção de Inóculo (UPI), responsável por aquecer (37°C), homogeneizar e recircular o percolado, que é aspergido nos túneis para acelerar a atividade microbiana e a produção de metano. A aspersão ocorre na fase de ativação metanogênica, até o biogás atingir 30% de metano, iniciando a fase metanogênica, e quando ocorre a queda do volume e da qualidade do biogás, o processo é encerrado.

Cada ciclo operacional é composto, em geral, das etapas de abastecimento (5 dias), fase aeróbia (2 dias), ativação metanogênica (2 dias) e fase metanogênica (21 dias), intervalos que podem variar conforme operação real da planta. Após o abastecimento, a operação é toda monitorada remotamente por um sistema automatizado. A Figura 1



Fonte: elaborada pelos autores.

FORSU: fração orgânica de resíduos sólidos urbanos; UPI: Unidade de Produção de Inóculo.

Figura 1 – Sistema operacional do biodigestor

apresenta um esquema ilustrativo dos ciclos operacionais no interior dos túneis de metanização.

Durante a fase metanogênica, todo o biogás produzido é medido e direcionado a um gasômetro com capacidade de 25 m³, onde ocorre a mistura do biogás proveniente dos túneis de metanização e da UPI, que produz biogás de maior qualidade e quantidade. Para viabilizar o reaproveitamento energético, a mistura deve conter, pelo menos, 60% de metano.

O material tratado nos túneis é composto de cerca de 70% de restos alimentares e 30% de material estruturante, utilizado para evitar a compactação e melhorar a atuação do inoculante. Inicialmente foi utilizado resíduo de poda triturado como estruturante e, nos ciclos posteriores, passou-se a utilizar o próprio digestato recirculado no processo.

A capacidade estimada de produção de biogás, pelo biodigestor, quando em pleno funcionamento, é de até 4.800 m³/mês, com potencial de geração energética de aproximadamente 5 MWh/mês (Figura 2). O biogás armazenado no gasômetro é convertido em energia elétrica a partir de um gerador, que abastece a própria planta.

Obtenção e caracterização dos materiais de entrada e saída dos túneis

Os materiais de entrada e saída dos túneis de metanização são referentes aos resíduos alimentares (entrada) e ao inóculo, digestato e biogás (saída). Os ensaios e a referência das metodologias, realizados em cada uma das matrizes, estão apresentados na Tabela 1.

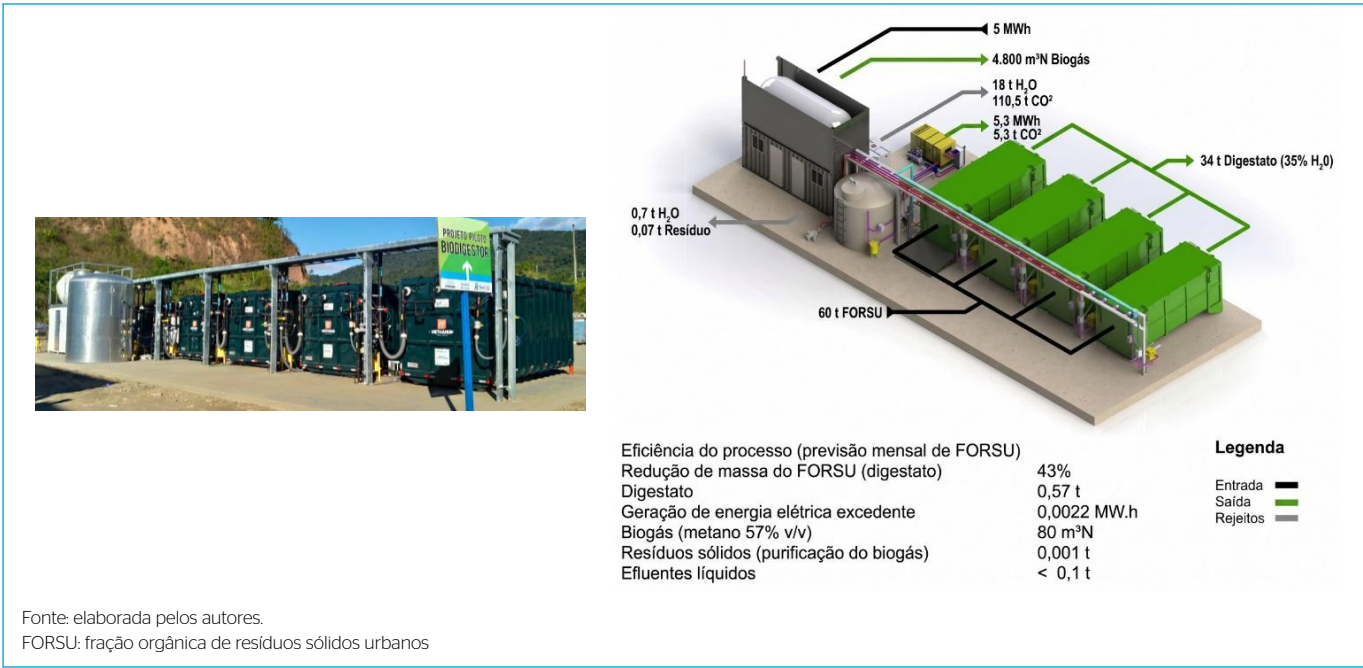


Figura 2 - Planta de biodigestão de FORSU

Tabela 1 - Referências para a realização dos ensaios

Ensaio	Matriz	Metodologia
Determinação da composição física e gravimétrica	Resíduos alimentares	NBR/ABNT 10.007/2004; ASTM D5231-92/2016, Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Compromisso Empresarial para Reciclagem (2018)
Determinação de sólidos totais	Inóculo	Agência Nacional de Energia Elétrica (2020)
pH	Inóculo e digestato	Lima (1997)
Volume do biogás	Biogás	Equipamento de medição: G4 (LAO Indústrias)
Composição do biogás	Biogás	Analisador GA3000

Fonte: elaborada pelos autores.

Os resíduos alimentares foram obtidos já segregado na fonte, por meio de coleta seletiva de orgânicos em grandes geradores, com monitoramento da massa coletada em cada um deles. A coleta foi realizada em 36 escolas municipais, um supermercado, um restaurante e uma rede hoteleira.

Foi realizada determinação da composição física e gravimétrica dos resíduos coletados em cada um dos estabelecimentos — com exceção da rede hoteleira, pois esta foi interrompida — a partir da separação da FORSU por classes pré-determinadas, conforme apresentado na Tabela 2, seguida da pesagem do material segregado, e assim obtida a porcentagem de cada um.

As amostragens de inóculo no ano de 2023 foram realizadas na UPI (em pontos na base, no meio e no topo), considerando-se a média aritmética dos três pontos. Em 2024, as amostras passaram a ser coletadas diretamente das válvulas de entrada de inóculo em cada túnel, a fim de se obter um resultado mais individualizado e representativo.

A determinação de ST foi feita por secagem da amostra em estufa a 105°C até peso constante. O pH foi medido com pHmetro digital previamente calibrado (pH 4 e 7), com leitura após estabilização. Para o digestato, o pH foi determinado após diluição, filtração e medição na fração filtrada.

O volume de biogás foi dimensionado por medidores de diafragma, modelo G4 (LAO), certificados pelo INMETRO, instalados nas saídas dos túneis e da UPI, em

direção ao gasômetro, operando pelo princípio de deslocamento positivo. Ou seja, apenas quando o biogás é encaminhado para reaproveitamento energético. A composição do biogás foi determinada diariamente na UPI e nos túneis durante a ativação e a fase metanogênica, por equipamento GEOTECH GA3000, tecnologia infravermelho não dispersivo, calibrado para mistura padrão de 60% CH₄ e 40% CO₂.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme resultados da determinação da composição física e gravimétrica realizada nos resíduos coletados nos grandes geradores do município de Bertiooga, verificou-se que as escolas e o restaurante têm uma composição similar, com uma média de, respectivamente: 6 e 2% de recicláveis; 16 e 5% de frutas; 2 e 7% de proteína animal; 26 e 45% de vegetais; e 50 e 41% de alimento processado (Figura 3). Esses resultados são similares aos apresentados por Saeteros-Hernández *et al.* (2025), no qual demonstrou que os restos de alimentos provenientes de um restaurante no Equador continham 21 a 24% de recicláveis; 34 a 38% de vegetais; 10 a 15% de frutas; 15 a 20% de proteína animal; e 12 a 16% de proteína vegetal (grãos). Quanto aos resíduos do supermercado, estes apresentaram maiores porcentagens de frutas (56%) e vegetais crus (37%), e menores proporções de resíduos processados (0%) e proteína animal (1%).

A origem do material tratado em cada ciclo foi estimada a partir da pesagem dos resíduos por estabelecimento e do rastreamento de sua entrada nos túneis de metanização (Tabela 3). Com base nesses dados e nos de composição gravimétrica de cada estabelecimento, foi possível determinar a composição dos materiais tratados em cada ciclo de operação (Tabela 4).

Os resíduos alimentares coletados permaneceram armazenados em um dos túneis de metanização até atingirem massa suficiente para o início do ciclo, evitando-se assim a presença de grande volume vazio no interior dos túneis, no qual o biogás permaneceria confinado. Para o primeiro ciclo, o período de armazenamento foi relativamente grande, visto que o início da coleta de orgânicos estava em fase de consolidação. Conforme apresentado

Tabela 2 – Materiais segregados no ensaio de determinação da composição física e gravimétrica

Classes de resíduo	Descrição
Casca de banana	-
Coco	Inteiro ou pedaços de casca
Outras frutas	Diversas
Ovo	Inteiro e/ou casca
Peixe	Espinha e carne
Carne (frango, porco, carne vermelha)	Diversas
Legumes e verduras	Inteiras
Resto de preparação de alimentos	Cascas de legumes e verduras
Resto de alimento processado	Sobras de alimentos de pratos e panelas
Outros orgânicos (especificar)	-

Fonte: elaborada pelos autores.

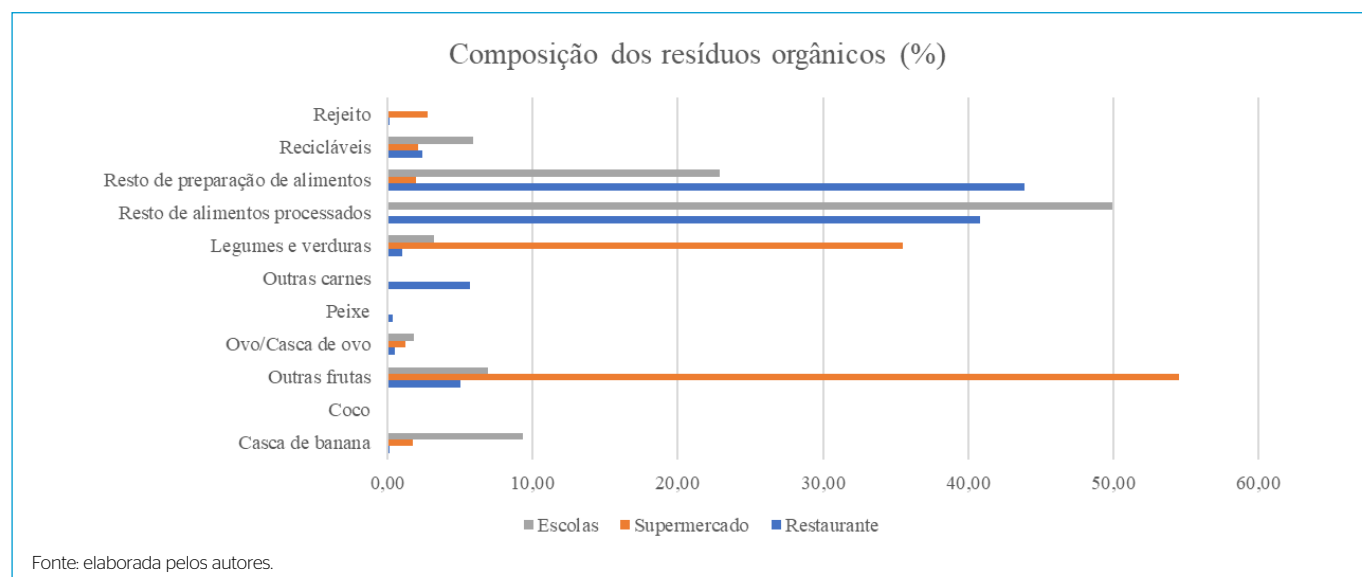


Figura 3 - Composição dos resíduos orgânicos dos grandes geradores

Tabela 3 - Origem da massa de resíduos alimentares tratados em cada um dos ciclos de operação

Túnel/Ciclo	Material estruturante		Resíduos alimentares		Origem dos resíduos alimentares (kg)			
	(kg)	(%)	(kg)	(%)	Escolas	Sesc	Supermercado	Restaurante
T1/C1	3.738	27	9.981	73	5.865	2.666	-	-
T1/C2	2.620	18	12.310	82	4.385	2.975	4.560	390
T1/C3	3.935	41	5.690	59	2.920	1.515	1.256	-
T1/C4	2.250	31	5.120	69	3.587	-	1.532	-
T1/C5	3.167	30	7.390	70	6.071	-	1.225	94
T1/C6	3.680	44	4.600	56	4.600	-	-	-
T2/C1	6.935	49	7.110	51	2.146	2.018	2.946	-
T2/C2	3.120	25	9.240	75	8.191	-	1.049	-

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 4 - Composição dos resíduos alimentares tratados em cada ciclo (kg)

Classes de resíduos	T1C1	T1C2	T1C3	T1C4	T1C5	T1C6	T2C1	T2C2
Casca de banana	586	523	315	384	626	457	269	833
Coco	0	5	1	2	1	0	3	1
Outras frutas	564	3.037	993	1.118	1.134	339	1.903	1.187
Ovo/Casca de ovo	129	163	82	90	136	90	91	175
Peixe	11	13	6	0	0	0	8	0
Outras carnes	192	196	88	0	5	0	117	0
Legumes e verduras	227	1.840	571	678	652	156	1.164	659
Resto de alimentos processados	4.334	3.731	2.181	1.902	3.259	2.439	1.981	4.344
Resto de preparação de alimentos	2.481	2.668	1.415	902	1.541	1.117	1.486	2.010
Recicláveis	0	0	0	0	0	0	0	0
Rejeito	6	135	39	44	35	0	87	30
TOTAL	8.531	12.310	5.690	5.120	7.390	4.600	7.110	9.240

Fonte: elaborada pelos autores.

na Tabela 5, o período de cada fase de cada ciclo de operação, após o abastecimento, variou de 19 a 100 dias, considerando a fase aeróbia, a ativação metanogênica e a fase metanogênica.

Conforme apresentado na Figura 4, que mostra o monitoramento dos ciclos operacionais em ordem cronológica, o biodigestor passou por uma fase de comissionamento em 2023, com melhoria progressiva dos resultados ao longo dos ciclos, especialmente na produção de biogás.

Os ciclos operacionais realizados em 2023, correspondentes aos três primeiros ciclos do túnel 1 e ao primeiro ciclo do túnel 2, apresentaram apenas um dia de biogás com concentração de CH_4 acima de 30%, no ciclo T1C1, que atingiu 54%, com encaminhado de 1 m^3 deste para o gasômetro. Esse pico de CH_4 no T1C1 ocorreu após monitoramento remoto contínuo da temperatura interna do túnel por quase 24 horas, com intervenções na aspersão automatizada de inóculo para corrigir variações térmicas, que oscilaram entre 18°C durante a noite e 100°C nos períodos mais quentes do dia. Essa alta temperatura foi atingida no início do processo de ativação metanogênica, em período com dias de muito sol e altas temperaturas externas ao túnel, que impactaram consideravelmente a temperatura interna deste, devido à permanência em local externo e com incidência de sol direto. Nos ciclos subsequentes, manteve-se o monitoramento da temperatura interna dos túneis, que permaneceu entre 18 e 45°C, controlada por meio de aspersão de inóculo. A temperatura não foi registrada diariamente, apenas a sua variação.

Para o ano de 2024, o cenário se mostrou mais promissor, com um reaproveitamento de 36 m^3 de biogás proveniente dos túneis de metanização e um total de 78 dias de fase metanogênica neste ano, com produção de biogás e concentrações máximas de CH_4 de 63% no T2C2 e 18 m^3 de biogás reaproveitado; 37% no T1C4 e 4 m^3 de biogás reaproveitado; 42% no T1C5 e 45% no T1C6, ambos com 7 m^3 de biogás reaproveitado em cada.

O ciclo com melhor desempenho na produção de biogás, tanto em volume quanto em concentração de CH_4 , foi o T2C2, que tratou cerca de 9 toneladas de resíduos alimentares, valor inferior apenas ao T1C2 (12 toneladas). O material estruturante representou 25% da mistura e foi constituído exclusivamente de digestato do ciclo anterior, o que pode ter favorecido o processo ao aportar maior carga microbiana ativa. O volume de inóculo aspergido também foi significativamente superior aos ciclos anteriores, atingindo aproximadamente 36 mil litros, enquanto nos demais variou entre 500 e 8 mil litros. O inóculo apresentou concentração de ST de 10.739 mg L^{-1} . Estudos indicam que a inserção de inóculo pode melhorar a qualidade do biogás e aumentar o rendimento do processo em cerca de 12% (Di Maria; Segoloni; Pezzolla, 2016).

Para os ciclos posteriores, o que apresentou desempenho inferior foi o T1C4, provavelmente associado à menor massa de material tratada, que foi de 5 toneladas de resíduos alimentares e, além disso, dentre os demais ciclos operados em 2024, foi o único que continha a presença de poda como material estruturante, misturado a uma parte de digestato do ciclo anterior. O volume de

Tabela 5 – Ciclos de tratamento

Túnel	Ciclo/Datas de coleta	Armazenamento antes de iniciar o processo	Quantidade de dias de cada fase			
			Fase aeróbia	Ativação metanogênica	Fase metanogênica	Total
1	1: 22/05 a 31/08/23	101	3	28	01	32
	2: 1º/09 a 06/10/23	36	2	83	0	85
	3: 11/10 a 24/10/23	14	3	27	0	30
	4: 19/02 a 04/03/24	15	2	95	03	100
	5: 04/03 a 12/06/24	16	2	31	23	56
	6: 1º/07 a 16/08/24	47	2	5	12	19
2	1: 1º/9 a 11/10/23	5	4	48	0	52
	2: 03/05 a 09/08/24	24	2	22	44	68

Fonte: elaborada pelos autores.

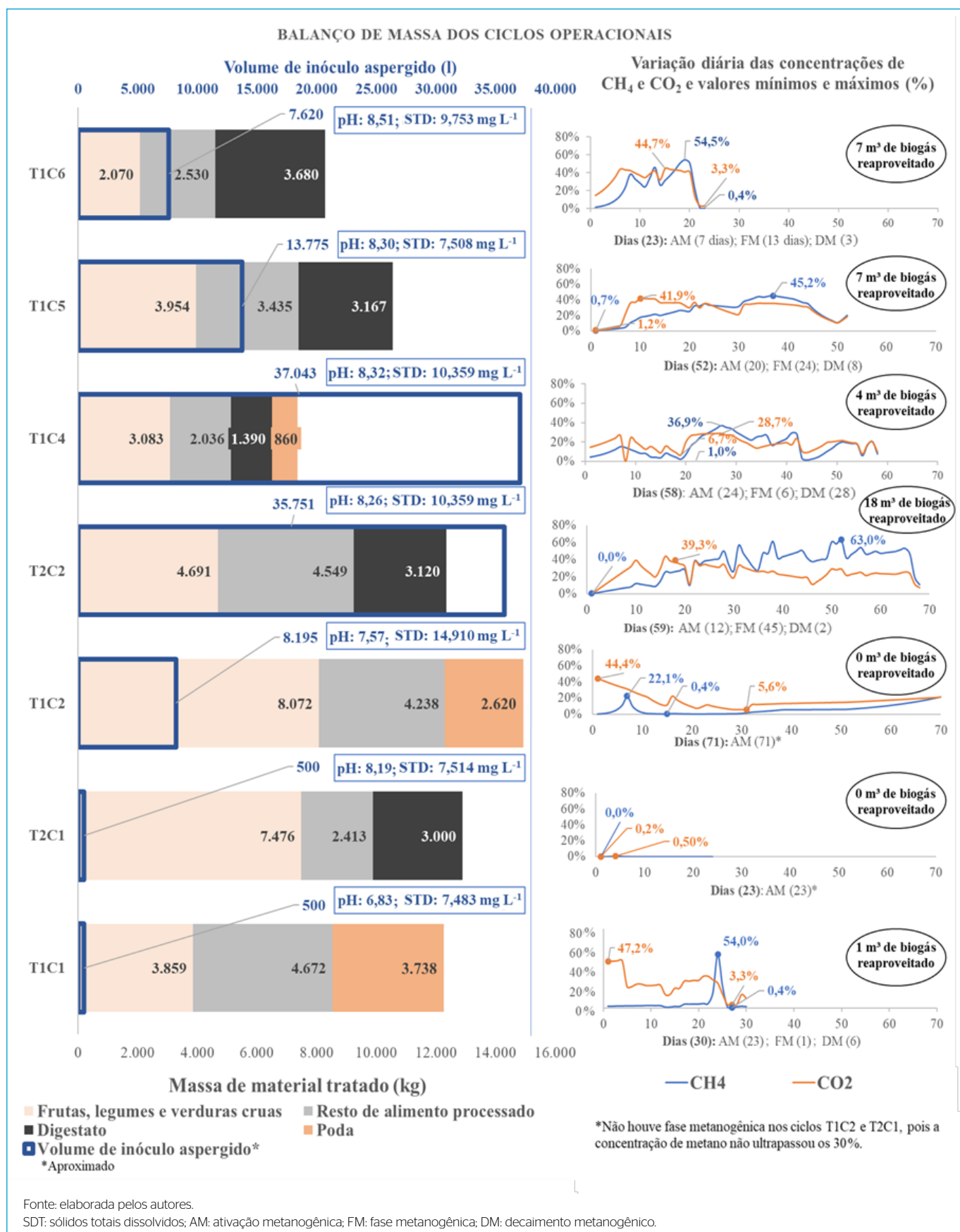


Figura 4 - Composição do material tratado e picos de geração de metano. Não houve acompanhamento da composição do biogás na amostra T1C3 devido à manutenção do analisador.

inóculo aspergido foi superior aos outros três ciclos do ano de 2024, sendo de 37 mil litros, com uma massa de ST de 10.359 mg L⁻¹.

Os ciclos T1C5 e T1C6 apresentaram produção de biogás semelhante, apesar da diferença na massa tratada, de aproximadamente 7 e 5 toneladas, respectivamente. Em ambos os ciclos, o material estruturante foi constituído integralmente de digestato do ciclo anterior. O volume de inóculo aspergido foi maior no T1C5 (≈ 14 mil L; ST de 7.508 mg L⁻¹) em comparação ao T1C6 (≈ 8 mil L; ST de 9.753 mg L⁻¹). Quanto à composição do substrato, o T1C6 apresentou maior proporção de resíduos alimentares processados em relação aos resíduos crus, ao contrário do T1C5, o que pode ter contribuído para maior qualidade do biogás produzido, mesmo com menor massa tratada e menor volume de inóculo. Esse comportamento está de acordo com estudos que indicam menor potencial metanogênico para frutas e verduras cruas em comparação a resíduos alimentares processados (Bouallagui *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2014).

O pH do inóculo variou entre 6,83 e 8,51, faixa próxima à neutralidade e favorável à atividade de microrganismos metanogênicos. Valores mais baixos de pH podem reduzir significativamente a produção de metano devido à

predominância de microrganismos acidogênicos e à redução da população metanogênica (Latif; Mehta; Batstone, 2017). O pH do digestato apresentou valores semelhantes, variando entre 7,20 e 8,51 (Tabela 6).

Em relação à produção de biogás na UPI, foram registrados 247 m³ em 2023 e 909 m³ em 2024 (Figura 5). Em 2023, o tratamento de 33,64 toneladas de resíduos alimentares resultou na produção total de 248 m³ de biogás, correspondente a cerca de 7 m³/t.

Já em 2024, o tratamento de 26,35 toneladas resultou na produção de 945 m³ de biogás, com média de 36 m³/t, evidenciando melhoria significativa no desempenho do sistema. Embora inferiores aos valores tipicamente reportados para digestão anaeróbia de resíduos alimentares, geralmente entre 50 e 100 m³/t, os valores observados são compatíveis com sistemas em fase inicial de operação, nos quais o processo microbiológico ainda se encontra em fase de adaptação e estabilização (Silva-Martínez *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2014). Esses resultados refletem as condições operacionais iniciais do sistema e a variabilidade na composição dos resíduos alimentares provenientes de diferentes geradores, fatores reconhecidamente determinantes para o desempenho da digestão anaeróbia.

Tabela 6 - pH nas amostras de digestato

Amostras de digestato	T1C1	T2C1	T1C3	T1C4	T2C2	T1C6
pH	7,20	8,19	8,28	8,32	8,26	8,51

Fonte: elaborada pelos autores.

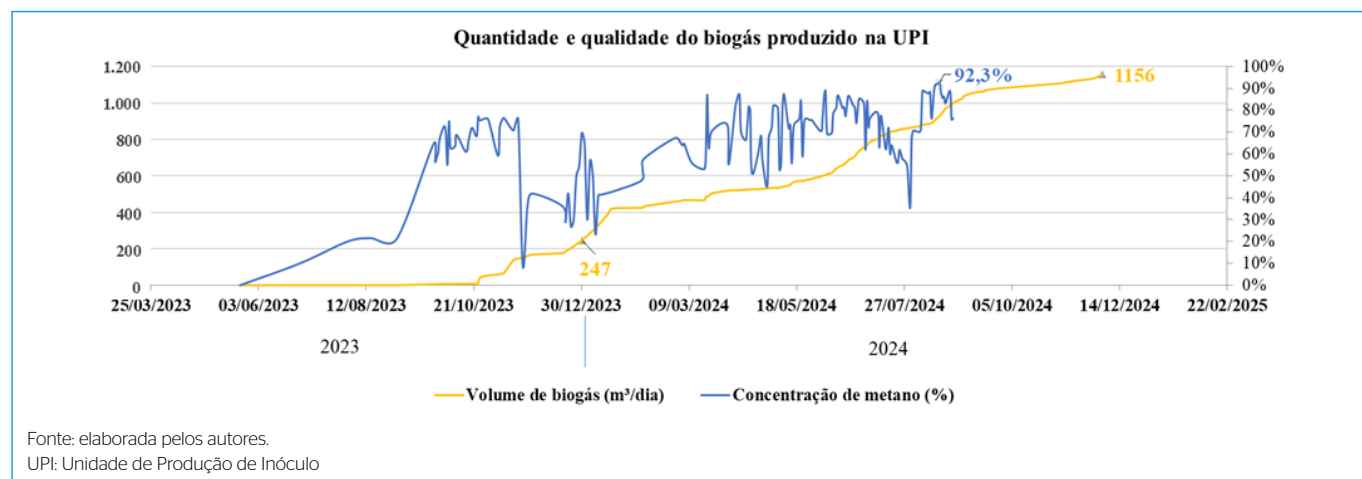


Figura 5 - Volume e composição do biogás produzido na Unidade de Produção de Inóculo

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam diferenças na composição dos resíduos alimentares provenientes dos diferentes grandes geradores avaliados. As escolas e o restaurante apresentaram maior proporção de restos de alimentos processados e de preparação de refeições, enquanto o supermercado apresentou predominância de frutas, verduras e legumes crus e inteiros.

Nos ciclos operacionais, observou-se que a substituição do material estruturante de poda pelo digestato proveniente de ciclos anteriores mostrou-se tecnicamente favorável, contribuindo com o incremento da carga microbiana ativa e a melhoria da qualidade e o aumento do volume de biogás produzido. De forma complementar, maiores volumes de inóculo aspergido estiveram associados a melhores resultados em determinados ciclos, indicando que a recirculação controlada do percolado, após homogeneização e aquecimento à 37°C, desempenha papel relevante na aceleração da atividade metanogênica e na estabilidade do processo.

Em alguns ciclos operacionais analisados, observou-se que os substratos com maior conteúdo de resíduos alimentares processados resultaram em biogás com maior teor de metano, atingindo valores de até 63%, enquanto misturas com predominância de frutas e verduras apresentaram desempenho inferior.

Observou-se ainda que o período inicial de operação correspondeu à fase de comissionamento do sistema, caracterizada por baixa produção de biogás e reduzida concentração de metano. A partir da consolidação das rotinas operacionais em 2024, verificou-se aumento expressivo da produção específica de biogás, indicando a estabilização microbiológica do processo e a melhoria do desempenho operacional do sistema, passando de aproximadamente 7 m³ por tonelada de resíduo tratado em 2023 para 36 m³ por tonelada em 2024, justificando a importância

da estabilização do sistema para o alcance de desempenho satisfatório.

Os resultados reforçam a importância da caracterização prévia dos resíduos, do controle das variáveis operacionais (temperatura, pH e volume de inóculo) e da adequada definição do material estruturante para a maximização da eficiência energética em sistemas de digestão anaeróbia.

Este estudo contribui para ampliar o conhecimento sobre o desempenho de sistemas de digestão anaeróbia da FORSU em condições reais de operação no Brasil. Ademais, demonstra o potencial de valorização energética de resíduos alimentares provenientes de grandes geradores urbanos, reforçando a relevância de políticas públicas voltadas à segregação na fonte e à implementação de tecnologias de tratamento biológico. Nesse contexto, a expansão de sistemas de digestão anaeróbia pode contribuir simultaneamente para a redução da disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários, a mitigação de emissões de metano e o fortalecimento de estratégias de economia circular no setor de gestão de resíduos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – Processo nº 2021/11967-6) como parte das atividades do Projeto CCD Circula (Centro de Ciências para o Desenvolvimento de Soluções para Resíduos Pós-Consumo: Embalagens e Produtos), que também conta com o apoio financeiro das seguintes empresas: Braskem, Grupo Boticário, Natura, Sonoco e Tetra Pak.

Agradecemos também o Núcleo de Sustentabilidade de Baixo Carbono do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Guia de práticas sedimentométricas**. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. 49-52. Brasília-DF: ANEEL, 2020. 118 p.

ANDREAZZI, Marcia Aparecida; MENDES, Adriano Rogério; OLIVEIRA, Karina Volpe de; LIZAMA, Maria de los Angeles Perez. Energy management: a synthesis of scientific publications on

biodigestion for waste management. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 12, n. 6, p. 964-979, 2017. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1911>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5231-92(2016)**: Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste. West Conshohocken, PA: ASTM, 2016.

BOUALLAGUI, Hassib; TOUHAMI, Youssef; BEN CHEIKH, Ridha; HAMDÍ, Moktar. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 3-4, p. 989-995, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.03.007>

BOTTAUSCI, Sara; MIDENCE, Roger; SERRANO-BERNARDO, Francisco; BONOLI, Alessandra. Organic waste management and circular bioeconomy: a literature review comparison between Latin America and the European Union. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1661, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14031661>

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - PLANARES**. Brasília, DF: MMA, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Nacional de Redução e Reciclagem de Resíduos Orgânicos Urbanos (PLANARO)**. Brasília, DF: MMA, 2025. 27 p.

DI MARIA, Francesco; SEGOLONI, Enrico; PEZZOLLA, Daniela. Solid anaerobic digestion batch of bio-waste as pre-treatment for improving amendment quality: the effect of inoculum recirculation. **Waste Management**, v. 56, p. 106-112, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.024>

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS/COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Lixo Municipal**: Manual para Gerenciamento Integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2018.

LATIF, Muhammad A.; MEHTA, Chirag M.; BATSTONE, Damien J. Influence of low pH on continuous anaerobic digestion of waste activated sludge. **Water Research**, v. 113, p. 42-49, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.002>

LIMA, Luiz Mário Queiroz. **Lixo - tratamento e biorremediação**. 3. ed. Editora Hemus, 1997. 265 p.

MONTEIRO, Pablo Inocência; MARIANO, André Bellin; PADILHA, Bianca do Santos; MORAES, Yann Domingues de; ZAGUINE, Letícia; MELO, Leonardo de Castro; LOPES, Leonardo Rey Oliveira; MORAES, Marcelo Lacerda de; SPIER, Michele Rigon. Anaerobic digestion of food waste for biogas production in glass bottles. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 21, n. 4, p. 1798-1817, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n4-004>

RANIERI, Luigi; MOSSA, Giorgio; PELLEGRINO, Roberta; DIGIESI, Salvatore. Energy recovery from the organic fraction of municipal solid waste: a real options-based facility assessment. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 368, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10020368>

SAETEROS-HERNÁNDEZ, Angélica; CHALEN-MOREANO, Francisco; ZURITA-GALLEGOS, Ronald; BADILLO-ARÉVALO, Pedro; GRANIZO-VILLACRES, Mayra; CEVALLOS-HERMIDA, Carlos; VITERI-NUÑEZ, Diego. Quantitative and qualitative characterization of food waste for circular economy strategies in the restaurant sector of Riobamba, Ecuador: a case study approach. **Biomass**, v. 5, n. 2, p. 18, 2025. <https://doi.org/10.3390/biomass5020018>

SÃO PAULO (Estado). Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. **Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2020.

SILVA, Edmar César Gomes; DE LUCAS JUNIOR, Jorge. Co-digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e dejetos de bovino leiteiro: obtenção e projeção dos resultados em um estudo de caso no município de Penápolis-SP. **Energia na Agricultura**, v. 37, n. 1, p. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2022v37n1p1-8>

SILVA-MARTÍNEZ, Rodolfo Danieel; SANCHES-PEREIRA, Alessandro; ORTIZ, Willington; GÓMEZ GALINDO, Maria Fernanda; COELHO, Suani Teixeira. The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: challenges and opportunities. **Renewable Energy**, v. 156, p. 509-525, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.056>

SILVA-MARTÍNEZ, Rodolfo Daniel; SANCHES-PEREIRA, Alessandro; ORNELAS-FERREIRA, Bernardo; CARNEIRO-PINHEIRO, Breno; COELHO, Suani Teixeira. High solid and wet anaerobic digestion technologies for the treatment of the organic fraction of municipal solid wastes and food wastes: a comparative case study in Brazil. **Bioresource Technology Reports**, v. 21, 101306, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101306>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO. **Manejo dos Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: SINISA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/rs>. Acesso em: 1º set. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. GLOBAL METHANE INITIATIVE. **Waste characterization handbook: understanding municipal waste streams to develop data-driven methane mitigation strategies**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2024. Disponível em: <https://globalmethane.org/resources/details.aspx?resourceid=5399>. Acesso em: 04 mar. 2026.

VENTORINO, Valeria; ROMANO, Ida; PAGLIANO, Giorgia; ROBERTIELLO, Alessandro; PEPE, Ollimpia. Pre-treatment and

inoculum affect the microbial community structure and enhance the biogas reactor performance in a pilot-scale biodigestion of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 73, p. 69-77, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.005>

ZHANG, Cunsheng; SU, Haijia; BAEYENS, Jan; TAN, Tianwei. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 383-392, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>