



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATOR SEMICONTÍNUO A PARTIR DE
CODIGESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS (RSO)**

FRANCIELE NATIVIDADE LUIZ

Foz do Iguaçu

2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATOR SEMICONTÍNUO A PARTIR DA CODIGESTÃO
DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS (RSO)**

FRANCIELE NATIVIDADE LUIZ

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientadora: Profa. Dra. Márcia Regina Becker

Foz do Iguaçu

2025

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - CENTRAL

L953

Luiz, Franciele Natividade.

Produção de biogás em reator semicontínuo a partir de codigestão de resíduos sólidos orgânicos (RSO) / Franciele Natividade Luiz. - Foz do Iguaçu, 2025.
68 f.: il., color.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu - PR, 2025.

Orientadora: Márcia Regina Becker.


1. Resíduo sólido orgânico. 2. Digestão anaeróbia. 3. Biogás. 4. Reator CSTR. 5. Metano. 6. Gestão de resíduos. I. Becker, Márcia Regina. II. Título.

CDU 620.952


PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATOR SEMICONTÍNUO A PARTIR DA CODIGESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS (RSO)

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARCIA REGINA BECKER**
Data: 26/06/2025 20:04:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Orientadora: Profa. Dra. Márcia Regina Becker
UNILA

 Documento assinado digitalmente
MICHEL RODRIGO ZAMBRANO PASSARINI
Data: 27/06/2025 08:41:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Michel Rodrigo Zambrano Passarini
UNILA

Documento assinado digitalmente
 **CESAR ADOLFO RODRIGUEZ SOTOMONTE**
Data: 27/06/2025 09:15:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cesar Adolfo Rodriguez Sotomonte
UNILA

Documento assinado digitalmente
 **GABRIELA BONASSA**
Data: 30/06/2025 08:56:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Gabriela Bonassa
IVRI

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO PEREIRA LINS**
Data: 27/06/2025 09:52:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Leonardo Pereira Lins
CIBiogás

Foz do Iguaçu, 27 de fevereiro de 2025.

Dedico este trabalho à minha família, especialmente meus pais **Francisco** e **Marcia** que sempre foram meu porto seguro e grandes incentivadores da minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo privilégio da vida!

Este trabalho não seria possível sem o apoio, incentivo e colaboração de muitas pessoas e instituições, às quais expresso aqui minha profunda gratidão.

À minha orientadora, Professora Márcia, meu sincero agradecimento por sua humanidade, dedicação, paciência e orientação ao longo de todo o desenvolvimento desta pesquisa. Seu conhecimento e incentivo foram essenciais para que este trabalho se tornasse realidade.

Agradeço à Universidade Federal da Integração Latino Americana - UNILA e ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território pelo suporte institucional. Minha gratidão também à Itaipu Binacional, pelo apoio para realização deste trabalho.

Sou grata ao Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás pelo incentivo à formação acadêmica de seus colaboradores e por proporcionar um ambiente corporativo que valoriza a pesquisa e o desenvolvimento. Aos meus colegas de equipe - Rafaela, Giovanna, Ana Caroline, João Victor, Heveli, Carmelo - e a todos que passaram pelo laboratório de biogás nestes quatro anos, meu sincero reconhecimento, sem vocês, nada disso seria possível.

Aos amigos, namorado e colegas de jornada, agradeço pela parceria, pelo apoio incondicional e pelos momentos de descontração (e desabafo) que tornaram este caminho mais leve e significativo.

Um agradecimento especial à minha amiga, madrinha, parceira de treino, colega de graduação, PROFOP, mestrado, trabalho e doutorado, Emilene. Que orgulho em compartilhar essa caminhada com você!

A minha família, especialmente meus pais, que sempre acreditaram e me apoiaram em todos os momentos, expresso minha eterna gratidão pelo amor, paciência e incentivo.

Aos meus filhos, **Davi e Helena**, as razões do meu viver: obrigada por serem minha maior inspiração, por me ensinarem diariamente o verdadeiro significado do amor e por darem um novo sentido à minha vida. A mamãe ama vocês mais que tudo!

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero agradecimento. Esta é uma conquista que carrego com orgulho e que divido com vocês.

“Se teus olhos forem bons, todo o teu corpo terá luz. Se os teus olhos forem maus, todo o teu corpo estará em trevas. Veja a vida com bons olhos! Isso fará muito bem a você”

MT 6:22,23

LUIZ, Franciele N. Produção de biogás em reator semicontínuo a partir da codigestão de Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO). 2025. 72 f. Tese (Doutorado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.

RESUMO

O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico têm uma relação direta com o aumento da produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil. Em 2022, o país gerou mais de 77,1 milhões de toneladas de RSU. Um dos maiores desafios é a destinação inadequada desses resíduos, que afeta mais de 35% dos resíduos coletados. Entre os resíduos, a fração orgânica, que inclui material orgânico de diferentes fontes, pode ser reaproveitada e contribuir com o atendimento às legislações ambientais e metas de descarbonização. Uma das alternativas para o aproveitamento da fração orgânica dos RSU é a digestão anaeróbia (DA), um processo biológico que decompõe a matéria orgânica em condições anaeróbias, gerando biogás. O biogás, composto principalmente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), possui diversas aplicações, como a geração de energia térmica, elétrica e combustível veicular. Com os incentivos governamentais e leis como a Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993/24), sancionada em outubro de 2024, há um crescente interesse no desenvolvimento de combustíveis avançados e renováveis, destacando a importância de estudos que explorem o potencial do biogás. Este estudo visa avaliar o potencial de produção de biogás e metano a partir da codigestão de Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO), através da mistura de resíduos alimentares, azeite de oliva e macarrão. Para isso, foram realizados ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), que medem a capacidade de produção de biogás, além de experimentos em um reator do tipo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), que considerou a partida do reator e posterior operação em diferentes condições de Carga Orgânica Volumétrica (COV), com variação de 1,32 g SV/L a 7,88 gSV/L. Os resultados dos ensaios de PBM com os resíduos individuais apresentaram uma produção de biogás entre 669 NL/kg de SV a 1190 NL/kg de SV, com teores de CH_4 acima de 50%. No reator, a condição com o melhor desempenho foi aquela com COV de 4,49 gSV/L e um Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) de 30 dias, enquanto em uma condição de sobrecarga, com COV de 7,88 gSV/L, o rendimento médio de aproveitamento do potencial bioquímico de metano foi de 22% e o meio apresentou indicadores de acidificação. Esses resultados indicam que a digestão anaeróbia, quando aplicada à codigestão de resíduos sólidos orgânicos, é eficiente tanto na quantidade quanto na qualidade do biogás gerado, para operação de biodigestores em regimes semi contínuos o controle analítico do processo pode subsidiar intervenções necessárias para preservar a estabilidade do meio. Além disso, a DA tem o potencial de auxiliar o país a atingir metas ambientais, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e valorizando recursos que, de outra forma, estariam dispostos de maneira inadequada no meio ambiente ou encaminhados a aterros sanitários.

Palavras-chave: Resíduo sólido orgânico; Digestão anaeróbia; Biogás; reator CSTR; metano; Aproveitamento de resíduos.

LUIZ, Franciele N. Producción de biogás en un reactor semicontinuo a partir de la codigestión de Residuos Sólidos Orgánicos (RSO). 2025. 72 f. Tesis (Doctorado en Energía y Sostenibilidad) – Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, Foz do Iguaçu.

RESUMEN

El crecimiento poblacional y el desarrollo económico están directamente relacionados con el aumento de la producción de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Brasil. En 2022, el país generó más de 77,1 millones de toneladas de RSU. Uno de los mayores desafíos es la disposición inadecuada de estos residuos, lo que afecta a más del 35% de los residuos recolectados. Entre los residuos, la fracción orgánica, que incluye material orgánico de diferentes fuentes, puede ser reutilizada y contribuir al cumplimiento de las normativas ambientales y los objetivos de descarbonización. Una de las alternativas para el aprovechamiento de la fracción orgánica de los RSU es la digestión anaeróbica (DA), un proceso biológico que descompone la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), tiene diversas aplicaciones, como la generación de energía térmica, eléctrica y combustible vehicular. Con los incentivos gubernamentales y leyes como la Ley del Combustible del Futuro (Ley 14.993/24), sancionada en octubre de 2024, existe un creciente interés en el desarrollo de combustibles avanzados y renovables, destacando la importancia de estudios que exploren el potencial del biogás. Este estudio tiene como objetivo evaluar el potencial de producción de biogás y metano a partir de la codigestión de Residuos Sólidos Orgánicos (RSO), mediante la mezcla de residuos alimentarios, aceite de oliva y fideos. Para ello, se realizaron ensayos de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), que miden la capacidad de producción de biogás, además de experimentos en un reactor tipo CSTR (Reactor Continuo Agitado por Tanque), que consideró el inicio del reactor y posterior operación en diferentes condiciones de Carga Orgánica Volumétrica (COV), con variación de 1,32 g de SV/L a 7,88 gSV/L. Los resultados de los ensayos de PBM con los residuos individuales mostraron una producción de biogás entre 669 NL/kg de SV a 1190 NL/kg de SV, con concentraciones de CH_4 superiores al 50%. En el reactor, la condición con mejor desempeño fue aquella con COV de 4,49 gSV/L y un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) de 30 días, mientras que en una condición de sobrecarga, con COV de 7,88 gSV/L, el rendimiento promedio de aprovechamiento del potencial bioquímico de metano fue del 22% y el medio presentó indicadores de acidificación. Estos resultados indican que la digestión anaeróbica, cuando se aplica a la codigestión de residuos sólidos orgánicos, es eficiente tanto en la cantidad como en la calidad del biogás generado. Para la operación de biodigestores en regímenes semi-continuos, el control analítico del proceso puede respaldar las intervenciones necesarias para preservar la estabilidad del medio. Además, la DA tiene el potencial de ayudar al país a alcanzar metas ambientales, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y valorizando recursos que, de otro modo, serían dispuestos de manera inadecuada en el medio ambiente o enviados a vertederos sanitarios.

Palabras clave: Residuo sólido orgánico; Digestión anaeróbica; Biogás; reactor CSTR; metano; Aprovechamiento de residuos.

LUIZ, Franciele N. Biogas production in a semi-continuous reactor from the co-digestion of Organic Solid Waste (OSW). 2025. 72 f. Dissertation (PhD in Energy and Sustainability) – Federal University for Latin American Integration, Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

Population growth and economic development are directly related to the increased production of Urban Solid Waste (USW) in Brazil. In 2022, the country generated more than 77.1 million tons of USW. One of the biggest challenges is the improper disposal of these wastes, which affects more than 35% of the waste collected. Among the waste, the organic fraction, which includes organic material from different sources, can be reused and contribute to meeting environmental legislation and decarbonization targets. One alternative for utilizing the organic fraction of USW is anaerobic digestion (AD), a biological process that breaks down organic matter under anaerobic conditions, generating biogas. Biogas, mainly composed of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂), has several applications, such as the generation of thermal energy, electricity, and vehicle fuel. With government incentives and laws like the Future Fuel Law (Law 14.993/24), enacted in October 2024, there is a growing interest in the development of advanced and renewable fuels, highlighting the importance of studies exploring the potential of biogas. This study aims to evaluate the biogas and methane production potential from the co-digestion of Organic Solid Waste (OSW) by mixing food waste, olive oil, and pasta. To this end, Biochemical Methane Potential (BMP) tests were conducted to measure the biogas production capacity, along with experiments in a CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) type reactor, which considered reactor startup and subsequent operation under different Organic Loading Rates (OLR) conditions, ranging from 1.32 g VS/L to 7.88 gVS/L. The results of the BMP tests with individual wastes showed biogas production between 669 NL/kg of VS and 1190 NL/kg of VS, with CH₄ concentrations above 50%. In the reactor, the best-performing condition was the one with a VOL of 4.49 gVS/L and a Hydraulic Retention Time (HRT) of 30 days, while in an overloaded condition, with a OLR of 7.88 gVS/L, the average methane biochemical potential utilization yield was 22%, and the medium showed acidification indicators. These results indicate that anaerobic digestion, when applied to the co-digestion of organic solid wastes, is efficient both in the quantity and quality of the biogas generated. For the operation of biodigesters in semi-continuous regimes, the analytical control of the process can support necessary interventions to maintain the stability of the medium. Furthermore, AD has the potential to help the country achieve environmental goals by reducing greenhouse gas emissions and valorizing resources that would otherwise be improperly disposed of in the environment or sent to landfills.

Keywords: Organic solid waste; Anaerobic digestion; Biogas; CSTR reactor; Methane; Waste recovery.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Unidades de processamento de resíduos sólidos nos municípios participantes do SNIS.	19
Tabela 2: Estudos utilizando reatores CSTR em escala de laboratório	28
Tabela 3: Proporções estimadas da mistura para a codigestão	35
Tabela 4: Especificações do analisador de gás	37
Tabela 5: Condições operacionais para teste em reator CSTR	39
Tabela 6: Metodologias dos ensaios aplicados ao monitoramento do reator de bancada.	41
Tabela 7: Metodologias de ensaio para análise do digestato	42
Tabela 8: Caracterização de ST e SV	42
Tabela 9: Resultado do ensaio de PBM para os substratos avaliados	44
Tabela 10: Resultado do rendimento da produção de biogás em reator de bancada	50
Tabela 11: Dados físico-químicos do digestato gerado na operação	56
Tabela 12: Macronutrientes do digestato gerado na operação	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Disposição final de RSU no Brasil em 2022.	15
Figura 2: Gravimetria de RSU no Brasil.	16
Figura 3: (A) Distribuição geográfica das plantas de biogás no Brasil; (B) Número de plantas de biogás por setor produtivo.	21
Figura 4: Distribuição dos resíduos por PBM na UD da Itaipu.	23
Figura 5: Etapas da biodigestão	24
Figura 6: Rotas tecnológicas para produção de combustíveis líquidos a partir do biogás.	26
Figura 7: Unidade de Demonstração da Itaipu.	33
Figura 8: (A) Resíduo de restaurante. (B) Azeite de oliva. (C) Macarrão tipo parafuso triturado. (D) Codigestão de entrada.	34
Figura 9: Sistema de análise do ensaio de PBM.	36
Figura 10: Analisador portátil LANDTEC GA 5000	37
Figura 11: Reator de bancada CSTR.	38
Figura 12: Medidor de baixa vazão MBV-15.	40
Figura 13: Cinética da celulose microcristalina	43
Figura 14: Curva cinética dos resíduos avaliados	45
Figura 15: Rampa de COV para operação do reator.	47
Figura 16: Monitoramento da produção diária de biogás e metano	48
Figura 17: Produção de H ₂ S e O ₂ durante a operação	49
Figura 18: Monitoramento de ST e SV na operação do reator de bancada.	51
Figura 19: Remoção de SV	52
Figura 20: Monitoramento da relação FOS/TAC.	53
Figura 21: Monitoramento da temperatura durante a operação	54
Figura 22: Monitoramento do pH durante a operação	55

LISTA DE SIGLAS

ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis
CSTR	Reator de Tanque com Agitação Contínua (do inglês Continuous stirred tank reactor)
COV	Carga Orgânica Volumétrica
CV	Coefficiente de Variação
DA	Digestão Anaeróbia
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FOS/TAC	Relação entre os ácidos orgânicos e carbonato total
FT	Fischer-Tropsch
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
NL	Litros normalizados
N	Nitrogênio Total
Nm ³	Normal metro cúbico
ONUDI	Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
PBB	Potencial Bioquímico de Biogás
PBM	Potencial Bioquímico de Metano
r	Coefficiente de Pearson
R ²	Coefficiente de correlação
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RSO	Resíduos Sólidos Orgânicos
SF	Sólidos Fixos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ST	Sólidos Totais

SV	Sólidos Voláteis
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UASB	Reator de fluxo ascendente (do inglês Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL	14
2.1.1 Aproveitamento energético de resíduos sólidos orgânicos.....	17
2.1.2 Centrais de tratamento de resíduos orgânicos	19
2.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	23
2.2.1 Biogás 25	
2.3 OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DE REATORES ANAERÓBIOS.....	27
2.3.1 Digestato.....	30
3 OBJETIVOS	32
3.1 OBJETIVO GERAL.....	32
3.2 ESPECÍFICOS	32
4 METODOLOGIA	33
4.1 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS	33
4.1.1 Sólidos Totais Fixos e Voláteis	35
4.1.2 Potencial Bioquímico de Biogás e Metano (PBB e PBM) dos RSO e Codigestão	36
4.2 OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DE REATOR EM REGIME SEMICONTÍNUO	37
4.2.1 Produção e caracterização do digestato	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	42
5.2 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS E METANO.....	42
5.3 OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DE REATOR DE BANCADA	45
5.3.1 Monitoramento analítico da operação	51
5.3.2 Caracterização do digestato	56
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A cada ano é possível observar que, de fato, o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico estão aliados ao aumento na produção de resíduos sólidos urbanos (RSU). O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil levantou que, em 2022, foram gerados 77,1 milhões de toneladas de RSU. Em comparação com os anos anteriores (2021 e 2022) houve uma redução de 2% na quantidade de resíduos gerados, entretanto um fator relevante para esse número são as mudanças de hábitos decorrentes da pandemia ocorrida, principalmente, entre os anos de 2020 e 2021. (ABREMA, 2023).

O DECRETO Nº 10.936, DE 12 DE JANEIRO DE 2022, regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e apresenta diretrizes para o gerenciamento de resíduos sólidos. Mas o cenário brasileiro ainda enfrenta muitas barreiras socioeconômicas e tecnológicas para que a PNRS seja instituída em sua integralidade (PNRS, 2010; BRASIL, 2022).

Dentre os resíduos urbanos gerados há uma parcela denominada Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), grande parte destes resíduos é considerada fração orgânica, denominados Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO) que a depender de sua origem podem apresentar um potencial energético interessante. O descarte inadequado ou não aproveitamento destes resíduos impacta significativamente em aspectos legais, ambientais e econômicos.

Neste contexto, a necessidade de tratamento dos resíduos, aliada às questões ambientais e de aproveitamento energético, abre um caminho para alternativas de seus aproveitamentos, dentre elas, a estratégica, Digestão Anaeróbia (DA), que consiste em um processo de decomposição da matéria orgânica com ausência de oxigênio e tem como um dos seus produtos o biogás. Esse biogás gerado na DA tem composição variada de acordo com o tipo de resíduo digerido. Os compostos majoritários do biogás são o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2). O biogás quando aproveitado, se torna um ativo energético versátil com algumas possibilidades de aplicações sendo as mais consolidadas aquelas na forma térmica e elétrica, enquanto necessidade de fontes renováveis alternativas coloca o biogás como opção para o aproveitamento de biometano (biogás refinado) análogo ao gás natural.

Os setores com maior geração de biogás (indústria e saneamento), em geral, são usinas de grande porte e/ou aterros sanitários, do ponto de vista técnico há a necessidade em compreender as melhores condições e tecnologias para cada tipo de resíduo, tendo em vista a alta variabilidade de tipos e/ou origens de resíduos orgânicos. O setor de saneamento ainda enfrenta um desafio que é a correta separação dos resíduos, atrelada a coleta seletiva e triagem. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) mais de 80% da população brasileira ainda não tem acesso à coleta seletiva, este fator compromete não só o tempo de vida dos aterros sanitários como a impossibilidade de aproveitamento dos resíduos orgânicos (CIBiogás 2024; SNIS, 2021).

A diversidade de resíduos aliada aos interesses de descarbonização de grandes empresas exige pesquisas e tecnologias que garantam segurança operacional e o melhor desempenho de reatores para o aproveitamento energético, via digestão anaeróbia. Entre as possibilidades estão conhecer as características dos resíduos disponíveis e realizar simulações em escala laboratorial para otimizar o uso destes resíduos e, desta maneira, mitigar intervenções posteriores nas usinas.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo avaliar o início da operação de um sistema de biodigestão em escala laboratorial, do tipo Reator de Tanque com Agitação Contínua (CSTR), utilizando a codigestão de resíduos sólidos orgânicos provenientes de restaurantes e lanchonetes situados na área da Itaipu Binacional. O monitoramento desse processo contribui para a tomada de decisões e para a superação de desafios enfrentados nas usinas de produção de biogás. Além disso, a análise e o acompanhamento de parâmetros operacionais, com foco na eficiência da produção de biogás em diferentes condições, ressaltam a importância e a viabilidade do aproveitamento desses resíduos por meio da digestão anaeróbia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

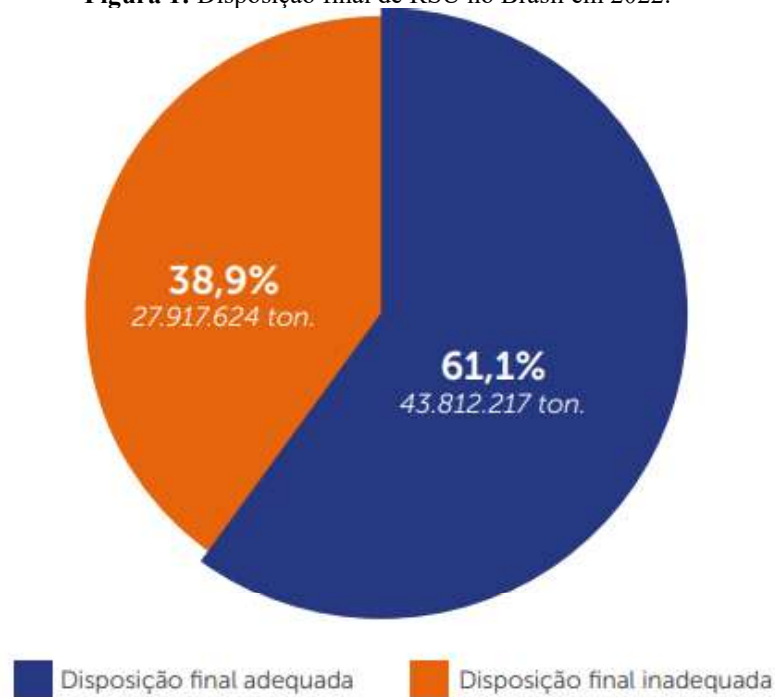
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

Resíduo sólido é todo o material, substância ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, parte destes resíduos pode ser recuperada se coletada e manejada de forma a favorecer o seu aproveitamento, materiais que não são passíveis de recuperação, denominados rejeitos, devem ser dispostos em locais apropriados (BRASIL, 2010; SNIS, 2022).

O aumento na geração de resíduos sólidos desencadeou o desenvolvimento de normas técnicas para classificação destes tipos de resíduos, a ABNT NBR 1004: 2004 foi desenvolvida com objetivo de subsidiar o gerenciamento de resíduos sólidos, ainda de acordo com essa norma os resíduos podem ser classificados em: Resíduos Classe I - Perigosos, Classe II - Não perigosos, sendo IIA - Não Inertes e IIB - Inertes sendo que os resíduos sólidos orgânicos (RSO) se enquadram na classe IIA - Não inertes (ABNT, 2004).

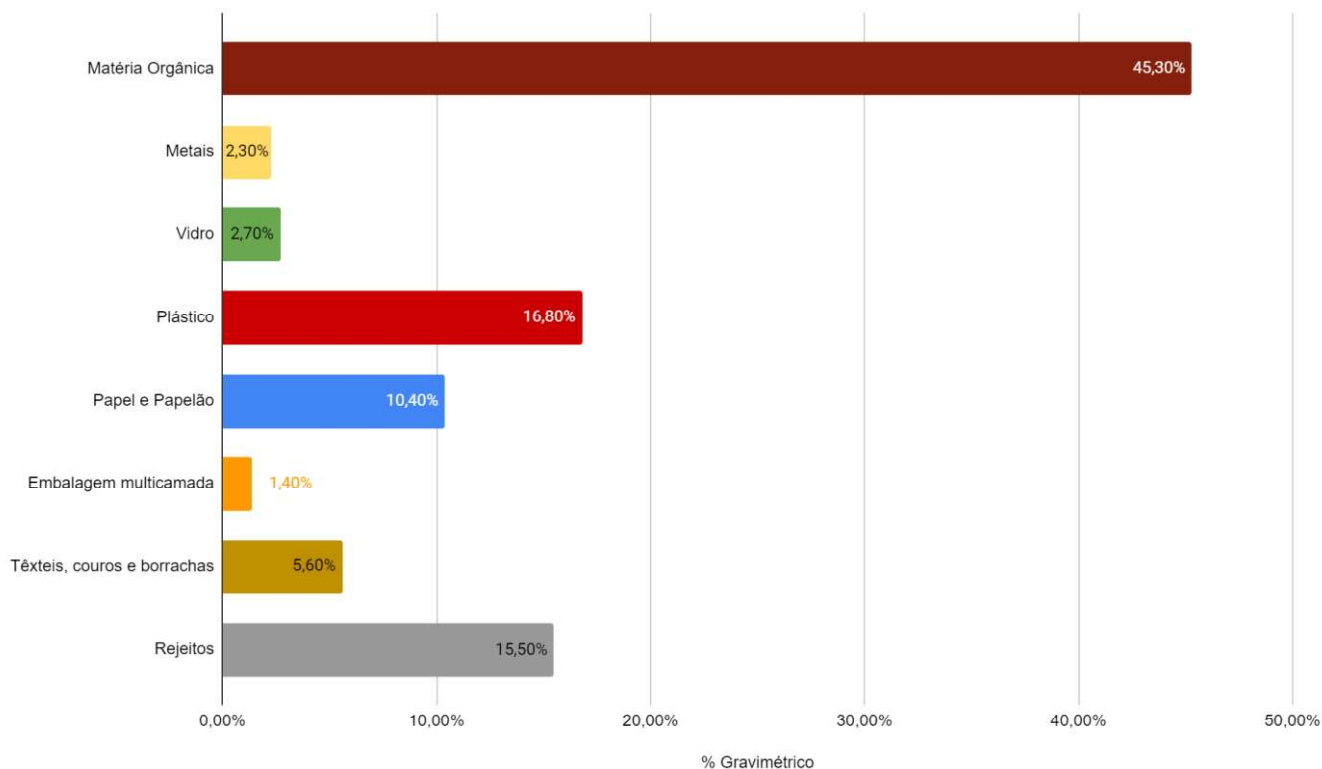
O Panorama de Resíduos Sólidos do Brasil divulgou que em 2022 cada brasileiro gerou cerca de 1,04 kg de RSU por dia, entretanto o Brasil ainda está caminhando quando se trata de destinação adequada de resíduos. Em 2022, embora 93% dos resíduos tenham sido devidamente coletados, mais de 35%, o que equivale a 27.917.624 toneladas foram dispostos de maneira inadequada, conforme Figura 1. Em 2019 esse número era de 40,5%, essa redução é muito pequena se pensarmos que neste período a Política Nacional de Resíduos Sólidos já estava instituída. Os motivos para a dificuldade de avançar nesse aspecto estão relacionados a problemas de desigualdade social, falta de conscientização ambiental, fiscalização inadequada entre tantos outros (ABREMA, 2023).

Figura 1: Disposição final de RSU no Brasil em 2022.



Fonte: ABREMA, 2023.

Segundo dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), cerca de 1,3 bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçadas por ano, no Brasil cada pessoa gera cerca de 170 kg de resíduo orgânico por ano, essa quantidade corresponde (Figura 2) a mais de 45% do total de resíduos sólidos urbanos gerados, esse é um número expressivo ao que tange a disponibilidade de resíduos para aproveitamento energético. Os aterros sanitários têm tempo de vida limitado e o aumento na geração dos resíduos pode acarretar em uma série de problemas como, prejuízos ao meio ambiente oriundos da disposição inadequada, problemas de saneamento para a população, dentre outros (FAO, 2019; ABRELPE,2020).

Figura 2: Gravimetria de RSU no Brasil.

Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2020.

Embora os espaços destinados ao depósito de RSU representem um impacto ambiental negativo, eles também podem ser vistos como reatores biológicos, uma vez que a suspensão da matéria orgânica ocorre naturalmente nesses locais. A formação do biogás é resultado desse processo anaeróbio, no qual a microbiota ativa degrada a matéria orgânica, gerando gases como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2) e Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008). O crescimento populacional, aliado aos hábitos de consumo e ao estilo de vida moderno, tende a intensificar a geração de RSO. Ainda que esse aumento represente um desafio para a destinação adequada dos resíduos, ele também abre oportunidades para seu aproveitamento energético, que podem contribuir para a diversificação da matriz energética nacional e para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

A gestão dos RSU no Brasil ainda apresenta fragilidades e oportunidades de melhorias, em seu estudo, Freitas et al. (2024), realizou um levantamento a partir de dados publicados em textos científicos e através deste levantamento construiu uma matriz *SWOT* (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) para avaliar as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças da gestão de RSU no país. Entre as fraquezas se destacam a incorreta segregação na fonte, depósitos incorretos de resíduos “lixões”, más condições de trabalho, falta de educação ambiental efetiva, dentre outras. É imprescindível que a educação ambiental aliada aos incentivos e boas práticas

de separação sejam estimuladas no âmbito nacional de modo a fomentar o gerenciamento dos RSU aliado a práticas sustentáveis.

2.1.1 Aproveitamento energético de resíduos sólidos orgânicos

Resíduos alimentares e agrícolas contribuem significativamente para o quantitativo de RSU. O descarte inadequado desses resíduos sólidos tem efeitos adversos no meio ambiente, as tecnologias de conversão de resíduos em energia oferecem um caminho promissor para converter RSO em recursos como biogás e biofertilizantes. (KUMAR et al., 2024; SINGH et al., 2025).

Entre as alternativas para aproveitamento dos RSO destaca-se a biodigestão anaeróbia, que possibilita a utilização do gás gerado nesse processo para fins energéticos e ganha espaço no mercado, além de fomentar a economia circular através da redução de resíduos dispostos de maneira inadequada, redução da emissão de gases de efeito estufa e fechamento dos ciclos produtivos. Todavia, ainda existem desafios para a ampliação do uso da biodigestão de RSO como a falta de fornecedores nacionais de alguns equipamentos como tecnologias de pré-tratamento avançadas, digestão em rota seca e também o alto custo para tropicalização de algumas tecnologias. Além disso, ainda existem barreiras como a segregação adequada dos resíduos, tecnologias apropriadas de pré-tratamento, entre outras. Ações para minimizar os impactos da geração e destinação de RSO necessitam vir de políticas públicas para proteção ambiental e aliada a benefícios econômicos. Os principais “gerenciadores de resíduos”, que são as prefeituras, devem adotar modelos de gestão dos RSO mais modernos e com aplicações vantajosas dos produtos obtidos, como por exemplo, a substituição do diesel da frota municipal, suprimento de parte da demanda elétrica do município pelo biogás da biodigestão, como bem relatado na nota técnica apresentada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em julho de 2021, que apresenta a viabilidade e aplicações energéticas para os RSO (EPE, 2021, FREITAS et al., 2024).

Os resíduos sólidos orgânicos, via de regra, são encaminhados aos aterros sanitários pela coleta urbana (ABREMA, 2023), em alguns casos podem ser encaminhados ao processo de compostagem, especialmente resíduos lignocelulósicos oriundos de podas. Os aterros sanitários geram biogás do processo de decomposição de todos os resíduos aterrados, entretanto, a grande maioria dos aterros realiza a queima do biogás para evitar a emissão atmosférica (LIMA e SCHIRMER, 2024). Por outro lado, o aproveitamento energético de RSO é sabidamente uma excelente matéria prima para produção energética além de não ocupar espaços em aterros sanitários quando do seu descarte (Granzotto, 2021; Oliveira, 2024).

O Brasil é um país com uma vasta quantidade de resíduos orgânicos que, quando

dispostos de maneira inadequada, compromete os recursos naturais, uma das fragilidades encontradas no cenário nacional, levantada por Freitas et al. (2024), foi a existência de aterros sanitários com características análogas a lixões, a forma para impulsionar e superar essa fraqueza são campanhas de sensibilização, eventos, engajamento de lideranças e especialmente políticas públicas com fiscalização efetiva. Ademais, a utilização de resíduos para produção e uso energético do biogás no país é, relativamente recente, portanto, é um setor que ainda está em processo de consolidação e de constantes mudanças regulatórias e políticas. A fonte biogás permeia diversos setores para sua estruturação, dentre eles os setores de meio ambiente, energia elétrica, energias renováveis e biocombustíveis (MITO, 2022).

Entre as possibilidades de aproveitamento do RSU, uma alternativa sustentável de destinação é o aproveitamento energético através da geração de biogás, de forma a transformar o gás gerado, que em algumas situações é liberado para a atmosfera, em um ativo energético com aplicações energéticas como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras e fogões, dentre outras (PRETEL e VASCONCELOS, 2021). O aproveitamento energético destes resíduos pode se tornar parte do processo de geração de receita nas atividades industriais, agroindustriais e urbanas. Os incentivos ao aproveitamento destes resíduos podem abrir precedentes para investimentos em tecnologias e pesquisas que visam atender aos critérios de descarbonização (EDWIGES, 2017; LINS, 2023).

Os resíduos gerados e destinados adequadamente podem produzir até 2,45 bilhões de m³ de biogás, sendo o maior potencial identificado no estado de São Paulo, neste sentido, ao levar em consideração as equivalências energéticas, estima-se uma geração de 3.675 GWh/ano de energia elétrica que corresponde ao atendimento de 2.514.694 residências e se destinado ao setor de transporte poderia ser dedicado à substituição de 1.617.393.046 L de Diesel/ ano. Ao se considerar os dados de todo o RSU gerado, inclusive aqueles que não estão corretamente gerenciados, a produção estimada pode chegar a 4,44 bilhões de m³ de biogás ao ano no país. (MITO, 2022)

Os desafios para a expansão da digestão anaeróbia estão atrelados a questões técnica-econômicas, a instalação de usinas requerem um alto investimento contudo a remuneração pela energia gerada, seja térmica, elétrica ou veicular, pode viabilizar a implantação de unidades produtoras de biogás, o maior custo identificado por Pretel e Vasconcelos (2021), está no custo de operação de usinas de digestão anaeróbia, contudo o aproveitamento energético do biogás gerado na biodigestão anaeróbia de RSU pode contribuir na redução de impactos ambientais e, concomitantemente, na disponibilidade e diversidade da matriz energética. O Programa Nacional de Redução de Metano de Resíduos Orgânicos (Metano Zero) e a Lei 14.993 - Lei do combustível do futuro dispõem de ferramentas e metas para promover o desenvolvimento de biocombustíveis na matriz energética nacional (LIMA e SCHIRMER, 2024; BRASIL, 2022; BRASIL, 2024).

2.1.2 Centrais de tratamento de resíduos orgânicos

Os municípios brasileiros enfrentam grande dificuldade em cumprir a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), lançada em 2010 a política traz instrumentos importantes quanto aos problemas ambientais relacionados ao manejo de resíduos urbanos (BRASIL, 2010).

Segundo dados do SNIS as unidades de processamento de RSU podem variar em função do tipo de processamento, em 2020 unidades denominadas “Lixão” totalizaram 1.545 enquanto foram contabilizadas 652 unidades para aterros sanitários (Tabela 1). O diagnóstico realizado não apresenta quais as unidades realizam o aproveitamento e/ou geração de biogás para as unidades, contudo traz informações relevantes acerca da quantidade de resíduos que ainda são destinados a locais inadequados.

Tabela 1: Unidades de processamento de resíduos sólidos nos municípios participantes do SNIS.

Tipo de unidade de processamento de resíduos sólidos	Total de unidades	Relativo (%)
Lixão	1.545	30,8%
Unidade de triagem	1.325	26,4%
Aterro Sanitário	652	13,0%
Aterro Controlado	617	12,3%
Unidade de transbordo	202	4,0%
Aterros de resíduos da construção civil	78	1,6%
Unidade de compostagem	74	1,5%
Área de transbordo e triagem (construção civil e volumosos)	64	1,3%
Unidade de manejo de galhadas e podas	47	0,9%
Área de reciclagem de resíduos da construção civil	44	0,9%
Unidade de tratamento por microondas ou autoclave	21	0,4%
Unidade de tratamento por incineração	16	0,3%
Vala para Resíduos de Serviço de Saúde	16	0,3%
Queima em forno	2	0,0%
Outro	315	6,3%

Tipo de unidade de processamento de resíduos sólidos	Total de unidades	Relativo (%)
Total	5.018	100%

Fonte: SNIS, 2022.

Em relação aos resíduos orgânicos, a decomposição da matéria orgânica ocorre por dois processos, o primeiro é o de decomposição aeróbia e ocorre normalmente no período de deposição do resíduo. Após este período, com a redução do O₂ presente nos meios, dá-se início ao processo de decomposição anaeróbia com produção de gases como CH₄, CO₂, NH₃, H₂ e H₂S (KUNZ et al. 2019).

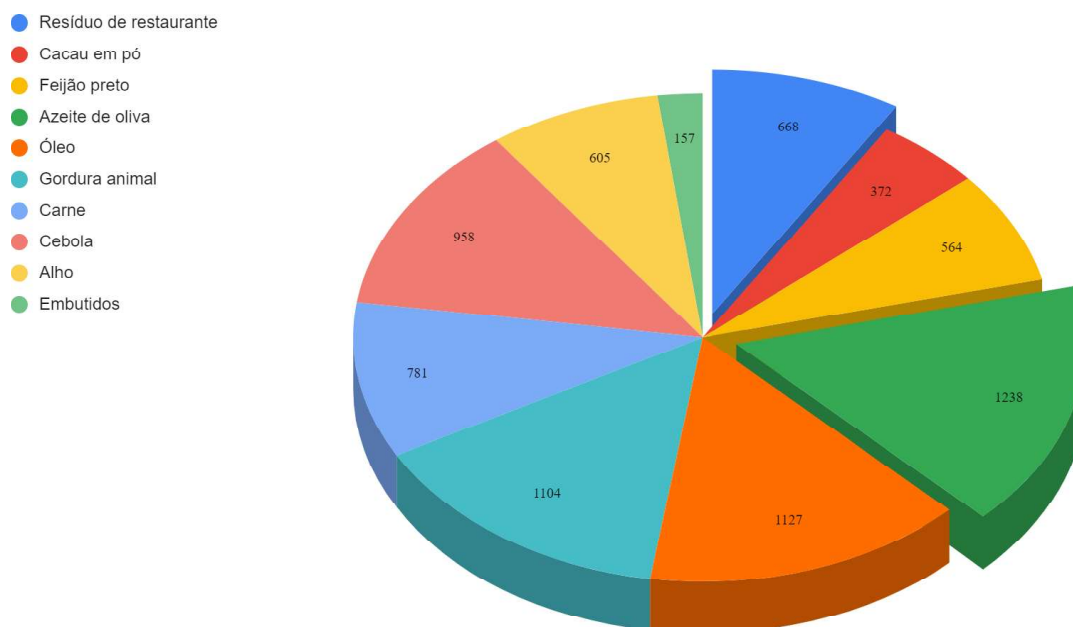
Embora estejamos longe do cenário ideal quanto ao desenvolvimento de tecnologias para biodigestão anaeróbia de RSU, algumas iniciativas recentes apontam essa tecnologia como uma alternativa de responsabilidade ambiental que contribui para a redução da carga orgânica destinada a aterros sanitários, controlados e lixões. Entre 2013 e 2017 houve uma iniciativa positiva em um projeto de parceria entre Brasil e Alemanha com o objetivo de promover do uso de energia do biogás e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, pelo mapeamento das diferentes opções tecnológicas e o consequente aproveitamento do biogás como fonte adicional de energia no Brasil. Este estudo avaliou a relevância das tecnologias, especialmente a de produção de biogás pela digestão anaeróbia com relação à disponibilidade dos substratos no Brasil; a sua maturidade e o quanto já está disseminada no país; e possibilidade de aplicação destas tecnologias (PROBIOGÁS, 2015).

Em 2023, o Brasil contava com 1.365 plantas de produção de biogás. Destas, apenas 9% (126) estavam relacionadas ao setor de saneamento, que inclui os Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO). Apesar de representar uma parcela menor em número de plantas em comparação ao setor agropecuário, que lidera com 1.096 unidades, o setor de saneamento é responsável por 63% do volume total de biogás produzido no país, destacando-se pela disponibilidade de substratos e a presença de usinas de grande porte. Quanto à distribuição geográfica, os estados do Paraná e Minas Gerais são os que possuem o maior número de plantas em operação, conforme Figura 3.

do complexo de Itaipu e resíduos apreendidos pelos órgãos fiscalizadores da fronteira. Esta unidade também tem a premissa de testar novas tecnologias com o objetivo de tropicalizar e contribuir para a viabilidade de empreendimentos desta natureza. Em geral os restos de comida têm um potencial de geração de biogás de mais de 600 LN de biogás por kg de SV, ou cerca de 100 Nm³ de biogás por tonelada de resíduo, enquanto alguns substratos como cacau em pó, azeite de oliva, carne e salsichas têm mais de 60% de metano no gás gerado durante a sua decomposição, o que contribui para o bom potencial energético (SIDNEY et al. 2021).

Entretanto, a digestão anaeróbia (e consequente produção de biogás) consiste em um processo biológico complexo, que depende da ação de vários grupos de microrganismos, com diferentes características, requerimentos nutricionais, cinéticas de crescimento e sensibilidade a condições ambientais (LULLIO et al., 2014). Assim, mais do que disponibilidade de biomassa, a produção de biogás depende também da manutenção de condições adequadas ao processo. A garantia da produção de biogás, em termos de volume, faz com que as usinas trabalhem com resíduos de origens diversas, em codigestão. Em um estudo realizado por SIDNEY et al. (2021), foram mapeados 10 tipos de substratos utilizados na UD da Itaipu, entre eles, alho, carne, óleos, resíduos de restaurante, cacau em pó, entre outros. Dentre os resíduos avaliados o maior potencial para produção de biogás foi identificado nos resíduos com elevados teores de lipídios (Azeite de oliva, óleo, gordura animal e embutidos), o potencial teórico deste tipo dos lipídeos é de 1.390 LN de biogás/ kg de SV, com teor de metano de 70% (VDI 4630, 2016). Contudo, para um equilíbrio na biodigestão faz-se necessário a diversificação, ou seja, utilização de resíduos a base de carboidratos e proteínas que também apresentaram potencial de geração adequados (Figura 4).

Figura 4: Distribuição dos resíduos por PBM na UD da Itaipu.



Fonte: Adaptado de Sidney et al. (2021).

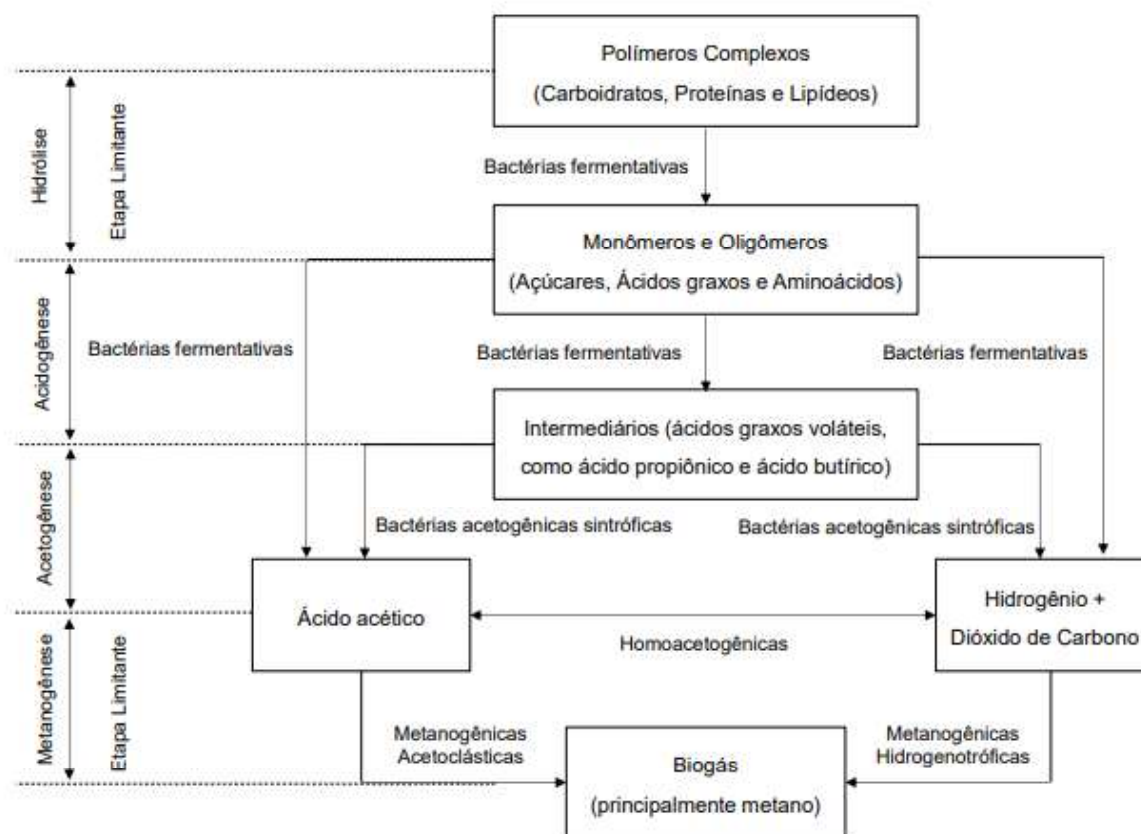
2.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo que tem tido destaque na estratégia de tratamento de resíduos orgânicos distintos, as principais vantagens da DA incluem a possibilidade de instalar o sistema de forma descentralizada em pequenos e médios produtores de biomassa, oferecendo flexibilidade na localização. Os reatores são adaptáveis em termos de custo e operação, tornando-os acessíveis e eficientes (ONUDI, 2021).

A digestão anaeróbia compreende quatro fases sequenciais, conforme Figura 5. Na primeira etapa, na hidrólise enzimática, as moléculas orgânicas complexas são hidrolisadas, via fermentação, e convertidas em moléculas menores como açúcares, ácidos graxos e aminoácidos. Essas macromoléculas são de difícil degradação e, portanto, constituem de etapa limitante da velocidade do processo. Na acidogênese as bactérias fermentativas agem sobre as substâncias resultantes da hidrólise, metabolizando-as e convertendo-as em compostos mais simples, como os ácidos carboxílicos de cadeia curta como acético, propiônico, butírico, além do etanol e hidrogênio. Na acetogênese os produtos gerados na fase anterior são metabolizados por microrganismos acetogênicos, convertendo-os em hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético. Por fim, na metanogênese, as arqueas metanogênicas convertem os produtos das fases anteriores em CH₄ e CO₂.

As arqueas subdividem-se em dois grupos: as acetoclásticas, que utilizam acetatos como substrato e as hidrogenotróficas, cuja produção de metano se origina de sua ação sobre o hidrogênio e dióxido de carbono (MADIGAN, 2010; AMARAL, STEINMETZ, e KUNZ, 2019; EDWIGES, 2018).

Figura 5: Etapas da biodigestão.



Fonte: EDWIGES, 2017.

Segundo o Manual Básico de Biogás (2014), a composição do substrato é um fator importante na quantificação e qualidade do biogás, que está diretamente relacionado à quantidade de nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, dentre outros) e contaminantes potenciais (metais, patógenos e contaminantes orgânicos contidos na matéria seca), quando tratamos de substratos de origem alimentar há uma gama de nutrientes presente na biomassa, a depender da origem (KARLSSON et al. 2014).

Resíduos orgânicos podem apresentar uma vasta diferença em sua composição, como umidade, biodegradabilidade, comportamento cinético, o objetivo de aumentar os rendimentos de metano e otimizar as áreas e tecnologias dedicadas ao tratamento são premissas fundamentais a diversificação das aplicações da DA para estes resíduos. Alguns tipos de RSO requerem pré-tratamentos como trituração, adição de agentes tamponantes com o objetivo de favorecer a produção de biogás e metano (ONUUDI, 2021; EDWIGES, 2017).

Os pré-tratamentos podem ser físicos (mecânico, irradiação e térmico), químicos (ácido, alcalino e solvente) ou biológico (fungos, consórcio de microrganismos e enzimas). Existe a possibilidade de processos combinados que aliam mais de um pré-tratamento ao mesmo tempo. (ONUUDI, 2021).)

2.2.1 Biogás

O biogás é gerado durante a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, esse processo ocorre através da atividade metabólica de comunidades microbianas complexas, o produto é uma mistura de gases composta majoritariamente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e água, além destes compostos em maiores concentrações também podem apresentar impurezas como sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3) entre outros (BONUGLI-SANTOS, 2022; CHERNICHARO, 2005).

Dentre os fatores de equilíbrio da produção de biogás a composição química dos substratos utilizados para a alimentação dos reatores é essencial. Ao conhecer o substrato é possível não apenas melhor controle do sistema de tratamento, mas também melhor eficiência na bioconversão da matéria orgânica (ONUUDI, 2021).

A perspectiva de produção de energia a partir do biogás começa a justificar o uso de reatores mais sofisticados, a exemplo do que se observa na Europa. O objetivo principal é obter maiores índices de desempenho, principalmente de vazão de biogás, concentração e rendimento de metano sobre a carga orgânica aplicada, estabilidade de operação e capacidade de remoção da matéria orgânica. É neste contexto que se inserem os reatores de mistura completa. Estima-se que 90% dos reatores anaeróbios construídos na Europa sejam de mistura completa (SHAH et al., 2015; AMARAL et al., 2016). Nestes países, é considerada uma tecnologia madura que geralmente fornece bons rendimentos de metano com custos operacionais relativamente baixos (Fu et al., 2010). Nos países em desenvolvimento, no entanto, ainda são poucos os estudos com relação a estas plantas em escala industrial (DONG et al., 2019).

O setor de biogás no Brasil está em ascensão, a taxa de crescimento no número de plantas de biogás nos últimos 5 anos foi de 21% para cada ano (CIBIOGÁS, 2024). Entre os setores com maior potencial para produção de biogás destacam-se o setor sucroenergético com 21,1 bilhões de Nm^3 de biogás/ ano, o setor de saneamento onde enquadram-se os RSU apresentou potencial de 2,2 bilhões de Nm^3 / ano (ABIOGÁS, 2021).

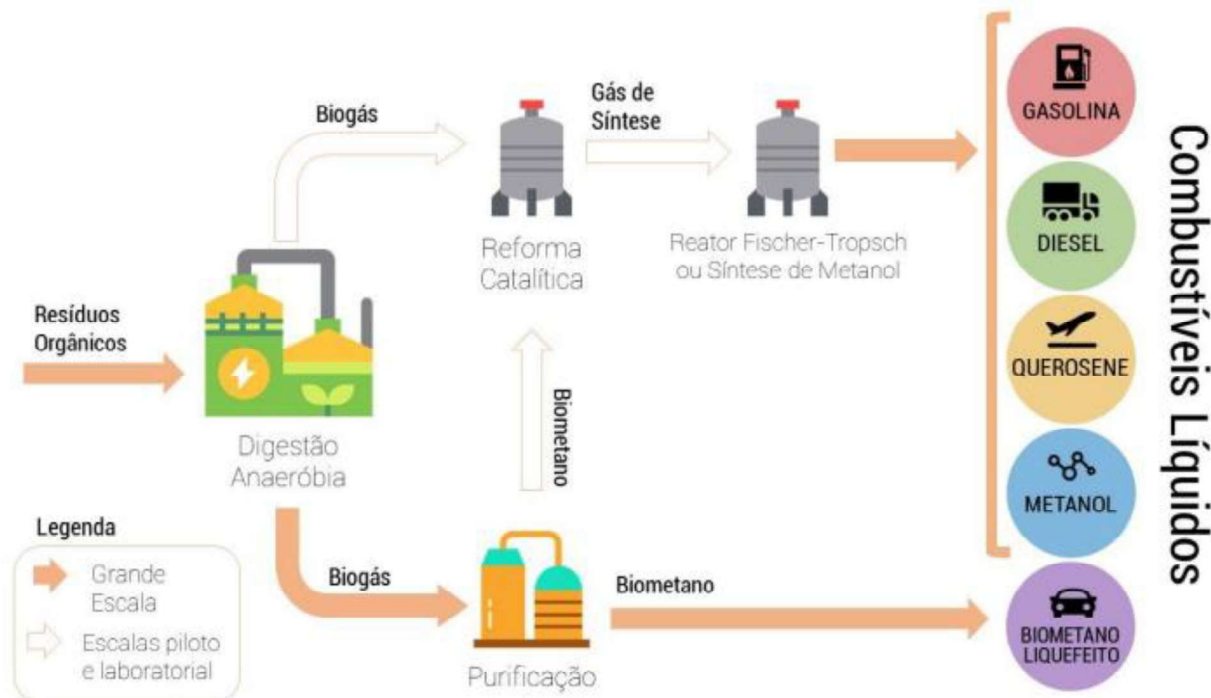
O aproveitamento do biogás está atrelado ao tipo de aplicação energética, essa

aplicação pode variar em função da demanda energética da planta de biogás, viabilidade econômica, de maneira geral as principais aplicações do biogás são: energia térmica, elétrica e biometano. O biometano é o gás resultante do tratamento e purificação do biogás, para que possa ser denominado dessa maneira requer atendimento a padrões da Agência Nacional do Petróleo (ANP) análogos ao gás natural (ONUDI, 2022a).

O biogás desempenha um papel fundamental na transição energética. Além das aplicações convencionais, o desenvolvimento de novas tecnologias viabiliza a produção de combustíveis avançados. Entre estas inovações, destaca-se a reforma catalítica do biogás, seguida do processo Fischer-Tropsch (FT) que a partir do gás de síntese possibilita a produção uma ampla gama de hidrocarbonetos, álcoois, combustíveis de aviação, diesel e gasolina (KABEYI E OLANREWAJU, 2022).

A produção de combustíveis avançados a partir do biogás possibilita a valorização do CH_4 e do CO_2 . A composição variada do biogás viabiliza múltiplas rotas tecnológicas para seu completo aproveitamento conforme exemplificado na Figura 6.

Figura 6: Rotas tecnológicas para produção de combustíveis líquidos a partir do biogás.



Fonte: ONUDI (2022 b).

2.3 OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DE REATORES ANAERÓBIOS

A operação de reatores anaeróbios apresenta inúmeros desafios, dentre eles o tipo de resíduo utilizado, o sistema de biodigestão implantado (modelo de reator), parâmetros operacionais, o monitoramento e o controle dos processos bioquímicos, especificamente para os RSO.

Entre os principais modelos de biodigestores, o biodigestor de lagoa coberta (BLC), também conhecido como modelo canadense, é composto, essencialmente, por um tanque escavado no solo, suas paredes laterais e fundo são impermeabilizados com uma manta de vinil, e a estrutura é coberta por outra manta de vinil, que possui baixa permeabilidade a gases e líquidos, mas é flexível o suficiente para armazenar o biogás sem risco de rompimento (ROOS; MARTIN; MOSER,2004).

A simplicidade construtiva e operacional associada ao baixo custo de instalação tornaram o biodigestor de lagoa coberta o modelo de reator anaeróbio mais utilizado em sistemas agropecuários com geração concentrada de efluentes no Brasil (BRONDANI, 2010), principalmente no tratamento de resíduos com baixa concentração de sólidos totais (ST) de até 3% (ROOS; MARTIN; MOSER,2004). Suas características permitem que este modelo possa ser utilizado tanto em pequenos como em grandes projetos agroindustriais (VIÑAS, MARTINEZZ, et al., 1993).

Biodigestores UASB apresentam característica de operação em fluxo ascendente, estes reatores têm alta capacidade de retenção de biomassa, o que permite trabalhar com baixo tempo de retenção hidráulica (4 a 72 horas). Estes reatores devem trabalhar com efluentes com baixas concentrações de ST (<2%) como esgotos e efluentes com alta quantidade de água (KUNZ et al., 2022).

O reator de mistura completa é um dos processos mais comuns na produção de biogás em escala de laboratório e, nos países desenvolvidos, também em escala industrial (Fu et al., 2010). Reatores de mistura completa representam a tecnologia mais empregada em países desenvolvidos como Suécia, Dinamarca e Estados Unidos (DONG et al., 2019).

O reator CSTR é um modelo de reator que trabalha com carga orgânica de 1 gSV L/ d a 4 gSV L/ d (KUNZ et al., 2022), sendo seu conteúdo interno homogeneizado com sistema de agitação, possibilidade de aquecimento e maior instrumentação para monitoramento. Estudos em escala de bancada demonstram que, com esse tipo de reator, é possível simular diferentes condições operacionais para restos de comida (Tabela 2).

Tabela 2: Estudos utilizando reatores CSTR em escala de laboratório

Referência	Substrato	COV (g _{sv} L/ d)	TRH (d)	Temp (°C)	Agitação (rpm)	Volume reator (L)	Produção de Metano (L/ g _{sv})
Zhang et al. (2005)	RSO	16,00	35	35	100	0,5	0,52
Zamanzadeh et al. (2016)	RSO	18,50	20	37	100	10,0	0,48
	RSO	18,50	20	55	100	10,0	0,45
Li et al. (2014)	RSO	4,39 ^{*a}	12	37	60	2,0	0,36
	RSO	3,23 ^{*a}	31	37	60	2,0	0,64
Xiao et al. (2019)	RSO	-	44	55	-	6,0	0,46
Xiao et al. (2018)	RSO	-	30	55	-	3,0	0,57
Pisutpaisal et al. (2014)	RSO	24,00 ^{*a}	10	35	-	5,0	0,40
Zhang et al. (2011)	RSO	0,50-1,15	20	37	140	0,5	0,40
Edwiges (2018)	RSO	0,5-5,0	40	37	-	4,0	0,15-0,30
Angeli-Bautista et al. (2021)	RSO	1,0-1,3	30-35	37	9 ^{*c}	30,0	0,09-0,35
Ferreira et al. (2023)	RSO						
Nizer et al. (2025)	RSO	0,50-1,50	62	37	-	50	0,60 ^{*b}

RSO: Resíduo Sólido Orgânico; ^{*a} Expresso em gDQO L/ d; TRH: Tempo de retenção hidráulica; ^{*b} refere-se a L de metano/ Lreator; ^{*c} refere-se à agitação em período intermitente (8 horas por dia).

Fonte: próprio autor, (2025).

Em trabalhos de pesquisas, os reatores CSTR são frequentemente utilizados devido à sua simplicidade, além de seus benefícios em testes de escala laboratorial, já que em comparação com outras configurações, este fornece maior uniformidade dos parâmetros do sistema, como temperatura, mistura, concentração química e concentração do substrato. Além disso, um grande benefício destes reatores, é a possibilidade de utilizar substratos mais densos, com teor de Sólidos Totais (ST), de até 15% (USACK et al., 2012; FRIAS, 2016).

O monitoramento do sistema de biodigestão é uma etapa essencial para o controle do processo que pode ser afetado por diversas variáveis, subsidiar informações e controlar o processo evitam que ocorram perdas econômicas para as plantas de produção de biogás. Dentre os principais indicadores para controle destacam-se a temperatura, pH, relação entre ácidos graxos voláteis -

AGVs, como ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico (FOS) e a alcalinidade total (TAC) (FOS/TAC), ST, SF, SV, vazão e qualidade do biogás (AMARAL, STEINMETZ, e KUNZ, 2019; DROSG, 2013). Além disso, a utilização de reatores deve considerar a diminuição da energia de processo e da perda de calor, além do controle de odores e, finalmente, oferecer um sistema de digestão anaeróbia com o menor custo de instalação e de operação (LOVATO et al., 2017).

A eficiência do processo de DA está atrelada ao monitoramento de parâmetros essenciais de operação, o monitoramento permite a observação da estabilidade do reator e indica possíveis intervenções no processo (Quadro 1).

Quadro 1: Parâmetros de monitoramento de biodigestores

Etapa	Parâmetro	Frequência recomendada ¹	Recomendação
Entrada	Massa/ vazão de entrada	diariamente	Se não houve balanças e medidores de vazão, deve-se estimar de maneira alternativa o material de entrada
	Caracterização de novos substratos de alimentação (pH, Nitrogênio, ST, SV)	Quando aplicável	Recomendado para caracterizar novas matérias primas e ajudar a prevenir instabilidade no processo
	PBB e PBM de novos substratos	Quando aplicável	Importante para conhecer as características acerca da degradabilidade de substratos, identificação de possíveis inibidores, e o valor de biogás e metano para que um potencial realista seja aplicado
Parâmetros de processo	Produção de gás	Diário	O biogás é o produto final da biodigestão, se não ocorreu mudança significativa na operação uma diminuição na produção de biogás pode indicar instabilidade
	Qualidade do biogás	Diário (mínimo 2x por semana)	Alterações no teor de metano ou do sulfeto de hidrogênio podem fornecer informações adicionais para investigação de instabilidades no processo
	Temperatura no reator	Diário	A temperatura deve ser mantida estável em um processo de biogás
	Nitrogênio amoniacal	1-2 x por mês	Ajuda a detectar rapidamente concentrações de amônia que podem provocar inibição do processo
	ST e SV	1-2 x por mês	O monitoramento de ST e SV é fundamental para o monitoramento de água no processo, necessidade de

			diluição para bombeamento e agitação e também o desempenho geral da degradação
	pH	Diário (mínimo 2x por semana)	O valor de pH deve ser mantido estável, se ocorrem fortes desvios (por exemplo, queda do pH devido à acidificação), o processo normalmente já é considerado instável
	FOS/TAC	2-4 x por mês	Define a capacidade que o sistema apresenta de suportar os ácidos formados na degradação, indica a condição do sistema no que tange a subcarga ou sobrecarga

Fonte: Adaptado de DROSG, (2013).

Os RSO, em geral, apresentam características que indicam a aplicação da tecnologia de DA em reatores CSTR, a depender da característica do resíduo há a necessidade de diluição para atendimento dos limites tecnológicos. Na Europa a aplicação de digestão em rota seca está mais avançada, esse processo consiste na digestão de forma contínua ou em batelada e suporta uma taxa de ST entre 20% - 40% o que permite ampliar a variedade de resíduos e otimizar o dimensionamento de sistemas (DROSG, 2013; MARJOLAINE, 2022).

2.3.1 Digestato

Entende-se por digestato o material remanescente da carga orgânica consumida em um biodigestor no processo de digestão anaeróbia. Esse material possui características que possibilitam seu uso agrônomo como biofertilizante, como a presença de macronutrientes. As características do digestato podem variar em função da diversidade de resíduos disponíveis para o processo de biodigestão (incluindo a composição desses substratos), da rota tecnológica aplicada, da adição ou não de água no processo, das perdas de nutrientes durante a estocagem dos resíduos, dentre outros fatores que implicam no seu potencial para uso agrônomo (NICOLOSO et al., 2019).

Segundo o Art. 4º da Instrução Normativa (IN) Nº 61/2020 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), os Fertilizantes orgânicos e os biofertilizantes, de acordo com a sua natureza física, sólida ou fluída, terão as especificações de natureza física conforme Quadro 2 .

Quadro 2: Natureza física dos biofertilizantes

Natureza física	Especificação da natureza física
Produtos fluidos	Solução ou suspensão, em que se indique obrigatoriamente a sua densidade e as suas garantias em percentagem mássica (peso de nutrientes por peso de produto) e em massa por volume (gramas por litro), devendo a indicação desta última, ser feita entre parênteses, com a mesma dimensão gráfica após a indicação obrigatória.
Outros	Fertilizantes orgânicos e biofertilizantes que não se encaixem nas especificações granulométricas citadas nesta normativa deverão ter rótulo ou etiqueta com a expressão: “PRODUTO SEM ESPECIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA DEFINIDA”.

Fonte: IN no 61/2020 (MAPA, 2020).

A Instrução Normativa no 61, de 8 de julho de 2020 (IN no 61/2020), estabelecida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) estabelece que o teor mínimo de Carbono Orgânico (CO) em fertilizantes orgânicos fluidos deve ser de no mínimo 3%. Essa exigência visa garantir a presença de matéria orgânica suficiente no produto para que possa ser aproveitada corretamente pelos microrganismos do solo. Além disso, a IN no 61/2020 define os teores mínimos de Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK), que devem ser de no mínimo 1% para cada nutriente.

A EMBRAPA (2023), recomenda um TRH não inferior a 40 dias para armazenamento de digestato proveniente da biodigestão de dejetos, e quando há a utilização de carcaças de animais esse TRH mínimo passa a ser 120 dias.

O tratamento de RSO via digestão anaeróbia além de propiciar a geração de biogás também tem como subproduto o digestato, que por sua vez, se bem manejado, pode retornar como alternativa a fertirrigação reduzindo os custos com insumos químicos, deve-se levar em conta a origem dos resíduos utilizados na DA, bem como o potencial patogênico que os resíduos podem apresentar, para estes casos há a necessidade de avaliações acerca da aplicação, legislação vigente, tratamentos prévios e posteriores necessários para a correta utilização (ARAÚJO et al. 2024; NICOLOSO et al., 2019).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta tese é simular a fase de partida do processo de digestão anaeróbia e monitorar a operação de um reator de bancada do tipo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactors*) a partir de resíduos sólidos orgânicos em codigestão para a produção de biogás. Além disso, busca avaliar os desafios que impactam sua estabilidade operacional e identificar condições para otimizar seu desempenho.

3.2 ESPECÍFICOS

- Caracterizar os resíduos sólidos orgânicos provenientes da UD da Itaipu;
- Realizar o estudo do Potencial Bioquímico de Biogás e Metano (PBB e PBM);
- Analisar os parâmetros operacionais como:
 - Rampa de Carga Orgânica Volumétrica (COV), frequência de alimentação, agitação e temperatura;
- Realizar operação de início do processo *Start up* a partir de inóculo preparado com efluente da suinocultura;
- Monitorar os parâmetros físico-químicos e estudar a estabilidade do reator;
- Analisar a qualidade do biogás proveniente do processo de biodigestão;
- Analisar as características da amostra de digestato final gerado durante o período de operação.

4 METODOLOGIA

4.1 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

A amostragem dos substratos ocorreu nas dependências da Unidade de Demonstração de Itaipu (Figura 7).

Figura 7: Unidade de Demonstração da Itaipu.



Fonte: Banco de imagens CIBiogás.

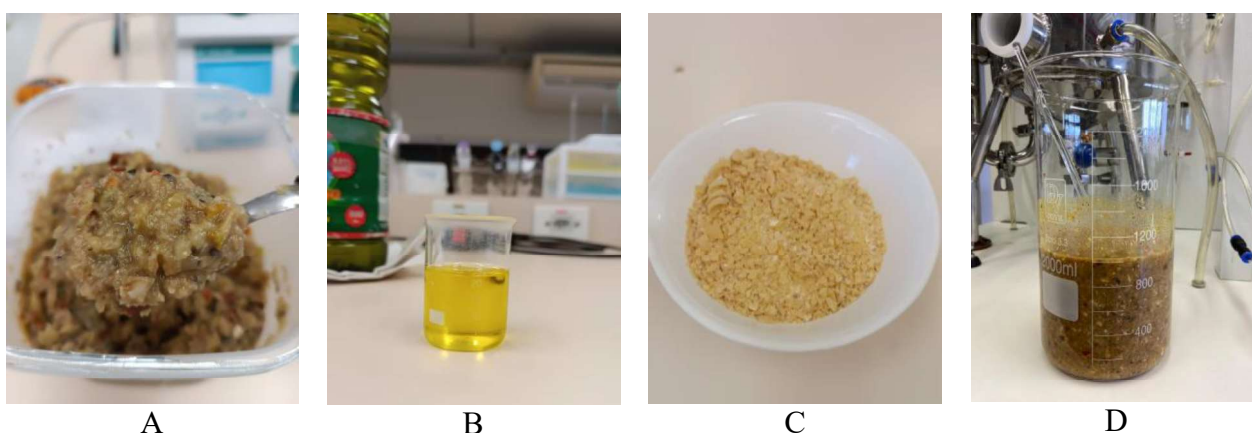
Os resíduos gerados pelos três restaurantes e uma lanchonete localizados no complexo da Itaipu Binacional, provenientes das sobras das refeições, foram coletados uma vez por mês durante a execução dos experimentos. Esses resíduos passaram por um processo de triagem, com separação manual dos materiais orgânicos e inertes, que por ventura podem ser trazidos misturados. Além das sobras de refeições, também foi aproveitada a borra de café proveniente das copas distribuídas no complexo.

Complementar aos resíduos dos restaurantes foram utilizados materiais de apreensão (macarrão tipo parafuso e azeite de oliva) feita por órgãos fiscalizadores como o MAPA, Polícia Federal e Receita Federal.

A amostragem seguiu os procedimentos padrões do laboratório de biogás do

CIBiogás que é acreditado pela ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017. Para realizar a amostragem, os resíduos coletados foram fracionados em laboratório, triturados com auxílio de triturador industrial Cutter com capacidade de 5 L (Figura 8). As amostras foram mantidas sob congelamento ($-15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) até a realização dos ensaios subsequentes. A caracterização físico-química dos resíduos foi realizada através dos parâmetros de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis adaptado do Standard Methods (APHA, 2017), e o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) conforme a metodologia disposta da VDI 4630, (2016).

Figura 8: (A) Resíduo de restaurante. (B) Azeite de oliva. (C) Macarrão tipo parafuso triturado. (D) Codigestão-A, B e C.



Fonte: próprio autor, (2024).

Para os ensaios preliminares de Potencial de Produção de biogás e Metano (PBB e PBM) os resíduos foram misturados para simular a codigestão aplicada na unidade na rotina, adotou-se a codigestão com teor próximo a 12% de ST, recomendado para operação do reator CSTR utilizado no estudo. Os resíduos caracterizados de forma individual foram misturados nas proporções estabelecidas conforme Tabela 3. As proporções seguiram o histórico operacional da UD da Itaipu, a maior quantidade está no resíduo dos restaurantes e os demais materiais servem como complemento para atendimento à alimentação diária necessária, levando em consideração a manutenção da carga orgânica adicionada diariamente.

Tabela 3: Proporções estimadas da mistura para a codigestão.

Resíduo	% de ST ¹	Proporção na codigestão (%)
Resíduo dos restaurantes	13,6	73,13
Macarrão tipo parafuso	83,5	0,18
Azeite de oliva	99,0	1,83
Água (diluyente)	0,1	24,86
Codigestão	11,9	100,00

¹ % de ST esperado.

4.1.1 Sólidos Totais Fixos e Voláteis

Os ensaios de Sólidos Totais (Equação 1), Fixos e Voláteis foram realizados no laboratório do CIBiogás o ensaio foi realizado em duplicata através da técnica gravimétrica com o auxílio de balança analítica, para o ensaio de ST (Equação 1) as amostras foram secas em estufa Marconi com capacidade de 480 L, com circulação de ar em uma temperatura de $104^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ até a massa constante. Os resultados do ensaio de ST foram expressos em %.

Após a determinação dos ST o material foi encaminhado para forno mufla a $550 \pm 15^{\circ}\text{C}$ por duas horas até massa constante, após esse processo o material que volatiliza é a fração de Sólidos Voláteis (SV) que é considerada a fração orgânica do material, ou seja, o material que está disponível para a geração de biogás e metano. A massa que permanece após a queima é considerada a fração inorgânica do material, conhecido como Sólidos Fixos (SF). As formas de expressão do resultado de SV e SF podem ser em base seca (Equação 2 e Equação 3) ou base úmida (Equação 4 e Equação 5, respectivamente).

$$\text{Sólidos Totais (\%ST)} = \left(\frac{(P2g - P1g)}{PAg} \right) * 100 \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{Sólidos Fixos (\%SF) Base seca} = \left(\frac{(P3g - P1g)}{(P2g - P1g)} \right) * 100 \quad \text{Equação 2}$$

$$\text{Sólidos Voláteis (\%SV) Base seca} = \left(\frac{(P2g - P3g)}{(P2g - P1g)} \right) * 100 \quad \text{Equação 3}$$

$$\text{Sólidos Fixos (\%SF) Base úmida} = \left(\frac{(P3g - P1g)}{(PAg)} \right) * 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{Sólidos Voláteis (SV) Base úmida} = \left(\frac{(P2g - P3g)}{(PAg)} \right) * 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

P_1 = massa cápsula ou cadinho vazio;

P_A = massa da amostra;

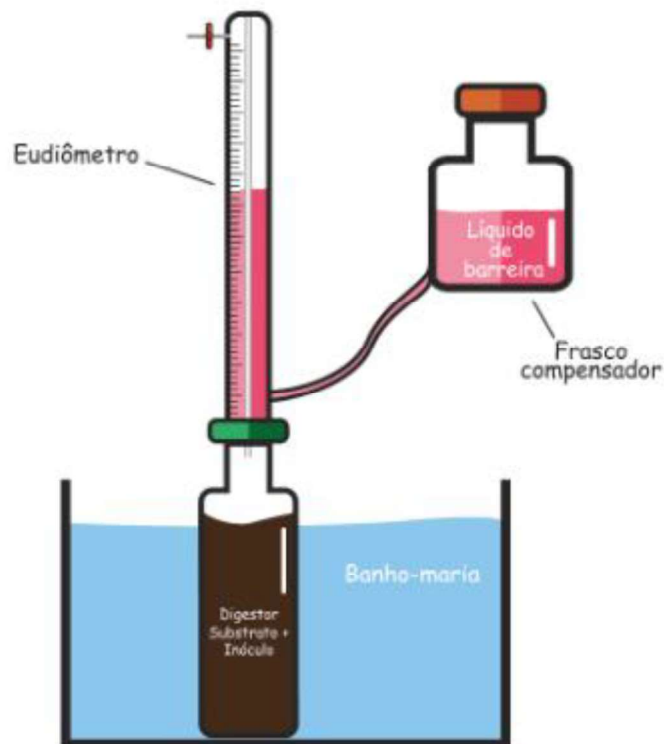
P_2 = massa da cápsula ou cadinho + sólidos totais da amostra;

P_3 = massa da cápsula ou cadinho + sólidos fixos.

4.1.2 Potencial Bioquímico de Biogás e Metano (PBB e PBM) dos RSO e Codigestão

A determinação do PBB e PBM foi realizada para cada resíduo separado, além da codigestão e seguiu critérios estabelecidos na guia VDI 4630:2016, todos os experimentos foram realizados em triplicata, a temperatura trabalhada foi a mesofílica, que variou de $37,0 \pm 2,0$ °C durante todo o experimento. A técnica utilizada consiste na análise em regime de batelada em um sistema semelhante ao da Figura 9.

Figura 9: Sistema de análise do ensaio de PBM.



Fonte: Adaptado de VDI 4630:2016.

Nessa técnica é realizada a pesagem da amostra em digestores de vidro e em seguida são adicionados 200 mL de inóculo. O inóculo é um lodo rico em microrganismos que é mantido em reator dedicado sob agitação constante e temperatura, além do volume de biogás produzido a qualidade do gás foi monitorada com um analisador portátil da marca LANDTEC GA5000, Figura 10, e serão detectados os gases conforme Tabela 4.

Figura 10: Analisador portátil LANDTEC GA 5000



Fonte: próprio autor, (2025).

Tabela 4: Especificações do analisador de gás

PARÂMETRO	FAIXA DE MEDIÇÃO	UNIDADE	MÉTODO UTILIZADO
Metano	0 a 100	% (mol/mol)	Sensor infravermelho de comprimento de onda duplo com canal de referência
Dióxido de carbono	0 a 100	% (mol/mol)	Sensor infravermelho de comprimento de onda duplo com canal de referência
Monóxido de carbono	0 a 2000	ppm ($\mu\text{mol/mol}$)	Sensor eletroquímico
Oxigênio	0 a 25	% (mol/mol)	Sensor eletroquímico
Sulfeto de hidrogênio	0 a 5000	ppm ($\mu\text{mol/mol}$)	Sensor eletroquímico

4.2 OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DE REATOR EM REGIME SEMICONTÍNUO

O reator de bancada utilizado (Figura 11) é um reator do tipo CSTR, construído em inox 360 e conta com agitação, aquecimento e 9,85 L de volume operacional, este equipamento conta com um medidor de vazão da marca EcoEducaional que conta os ciclos do biogás produzido em função do tempo de experimento.

Figura 11: Reator de bancada CSTR.



Fonte: próprio autor, (2024).

A alimentação, em regime semicontínuo, foi realizada a partir da amostra de codigestão, de segunda à sexta-feira nas condições experimentais dispostas na Tabela 5, as amostras foram congeladas para alimentação semanal e descongeladas em geladeira um dia antes da alimentação. O reator foi mantido sob aquecimento em temperatura mesofílica (37,5°C), sob agitação no regime intercalado (10 min de agitação mecânica e 50 min de repouso). Entre os parâmetros variáveis a COV alimentada no reator de bancada expressa em g SV/ L/ d foi calculada em função dos tratamentos (TRH) distintos, conforme Equação 6.

$$COV\left(\frac{gSV}{L_{reator}}\right) = \frac{Vazão\ de\ SV\ alimentados}{TRH} \quad \text{Equação 6}$$

Os dias de operação (Tabela 5) consideram os dias de coleta de dados e monitoramento do reator de bancada, a COV apresentou progressão respeitando o limite de duas semanas de estabilização para avaliação da resposta do reator, as condições foram determinadas considerando o modelo de biodigestor de bancada e as recomendações preconizadas na VDI 4630 (2016).

Tabela 5: Condições operacionais para teste em reator CSTR.

Tratamento	COV (g SV/L/d)	TRH (d)	Vazão (L)	% ST (entrada)	Operação (dias)
Inoculação (50% dejetos suíno + 50% água)	NA	NA	NA	0,47	7 ¹
Incremento (10% do volume com a codigestão)	NA	NA	1,0	12,37	10 ¹
T1	1,32	70	0,14	9,76	14
T2	2,31	50	0,20	11,93	14
T3	2,89	40	0,25	11,93	14
T4	4,49	30	0,33	13,94	14
T5	4,55	25	0,39	11,94	14
T6	5,85	20	0,49	12,37	14
T7	7,88	15	0,66	12,37	10

¹ Período em regime de batelada

Fonte: Próprio autor

A vazão de alimentação foi calculada conforme Equação 7, onde as variáveis consideradas são o volume em L do reator e o tratamento.

$$Vazão\ de\ Alimentação(L) = \frac{Volume\ do\ reator\ (L)}{TRH\ (d)} \quad \text{Equação 7}$$

Durante a operação do reator CSTR foram monitorados parâmetros físico-químicos de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis, pH, FOS/TAC, volume e qualidade do biogás.

O pH foi medido com auxílio de um medidor de pH Metrohm, modelo 827 e temperatura ambiente com termo higro barômetro digital da marca Testo 622.

As medidas dos ácidos graxos voláteis (FOS) e da alcalinidade total (TAC) foram realizadas por titulometria até pH 5,0 e 4,4, respectivamente, em titulador automático Metrohm Titrino Plus 848, com H₂SO₄ 0,1N como titulante.

O volume do biogás gerado foi registrado em ciclos de 15 mL no medidor de baixa vazão MBV-15 Figura 12, da Ecoeducacional.

Figura 12: Medidor de baixa vazão MBV-15.



Fonte: próprio autor, (2024).

As metodologias utilizadas para as determinações estão resumidas na Tabela 6.

Tabela 6: Metodologias dos ensaios aplicados ao monitoramento do reator de bancada.

PARÂMETRO	UNIDADE	MÉTODOS UTILIZADOS
Sólidos Totais, Fixos e Voláteis	%	Gravimétrico Adaptado de SMEWW método 2540
Potencial Bioquímico de Metano	LN de biogás/ kg de SV LN metano/ kg de SV	Fermentativo VDI 4630: 2016 DIN 38414 Part 8
Qualidade do biogás	% (mol/mol) de CO ₂ , CH ₄ , O ₂ ppm (μmol/mol) de H ₂ S e CO	Eletroquímico e Infravermelho VDI 4630: 2016 ABNT NBR 14903:2014
pH	upH	Potenciométrico SMEWW método 4500 - H ⁺
FOS/TAC	mg/L de Ácidos orgânicos mg/L de carbonato total	Titulométrico SMEWW método 2320 B Adaptado de Nordmann 1977

4.2.1 Produção e caracterização do digestato

A produção de digestato ocorreu durante todo o período de operação do reator de bancada, a cada alimentação foi realizada a retirada do digestato em vazão proporcional a entrada para não comprometer o nível operacional do reator. Com a finalidade de simular o processo realizado em campo, o digestato foi armazenado por 50 dias, em temperatura ambiente de modo a proporcionar sua estabilização para posterior avaliação, conforme recomendado pela EMBRAPA (2023).

A caracterização físico-química do digestato foi realizada no laboratório do CIBiogás através dos ensaios de: alcalinidade total, pH, DQO, ST, SF, SV, nitrogênio total, fósforo total e potássio total. Os parâmetros de ST, SF, SV e pH foram determinados conforme descrito no item 4.2, as técnicas e métodos aplicadas aos demais parâmetros estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Metodologias de ensaio para análise do digestato

PARÂMETRO	UNIDADE	MÉTODOS UTILIZADOS
Alcalinidade total	mg de CaCO ₃ / L	Titulométrico SMEWW método 2320 B
DQO	mg O ₂ / L	Espectrofotométrico SMEWW 5220 D
Nitrogênio total	mg de N/L	Espectrofotométrico EN ISO 11905-1, DIN 38405-9
Fósforo total	mg de P/L	Espectrofotométrico EPA 365.2+3, APHA 4500-P E e DIN EN ISO 6878
Potássio total	mg de K/L	Espectrofotométrico Spectroquant Merck®

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A caracterização das amostras é realizada na etapa que antecede a análise do PBM, os dados de ST e SV obtidos estão detalhados na Tabela 8.

Tabela 8: Caracterização de ST e SV

Amostra	% ST	% SV ¹
Resíduo de restaurante	19,9 ± 8,6	95,0 ± 0,6
Azeite de Oliva	99,9 ± 0,0	100,0 ± 0,1
Macarrão tipo parafuso	89,53 ± 0,2	99,3 ± 0,0
Codigestão	12,0 ± 1,5	95,6 ± 0,6

¹ Resultado expresso em base seca.

Os ST são um dos principais parâmetros limitantes em relação a tecnologia utilizada (LINS, 2022), nos resíduos analisados a taxa de ST ficou acima dos 12% pretendido para reatores CSTR (MENEZES et al., 2024), para que o requisito tecnológico pudesse ser aplicado realizou-se a diluição do material de entrada (amostra codigestão), com água, até atingir 12% através de uma composição, em média, descrita no item 4.1, composta majoritariamente por restos de comida. O mesmo parâmetro de ST foi aplicado na operação de reator de bancada por Edwiges (2017), que estudou a biodigestão de resíduos de frutas e hortaliças.

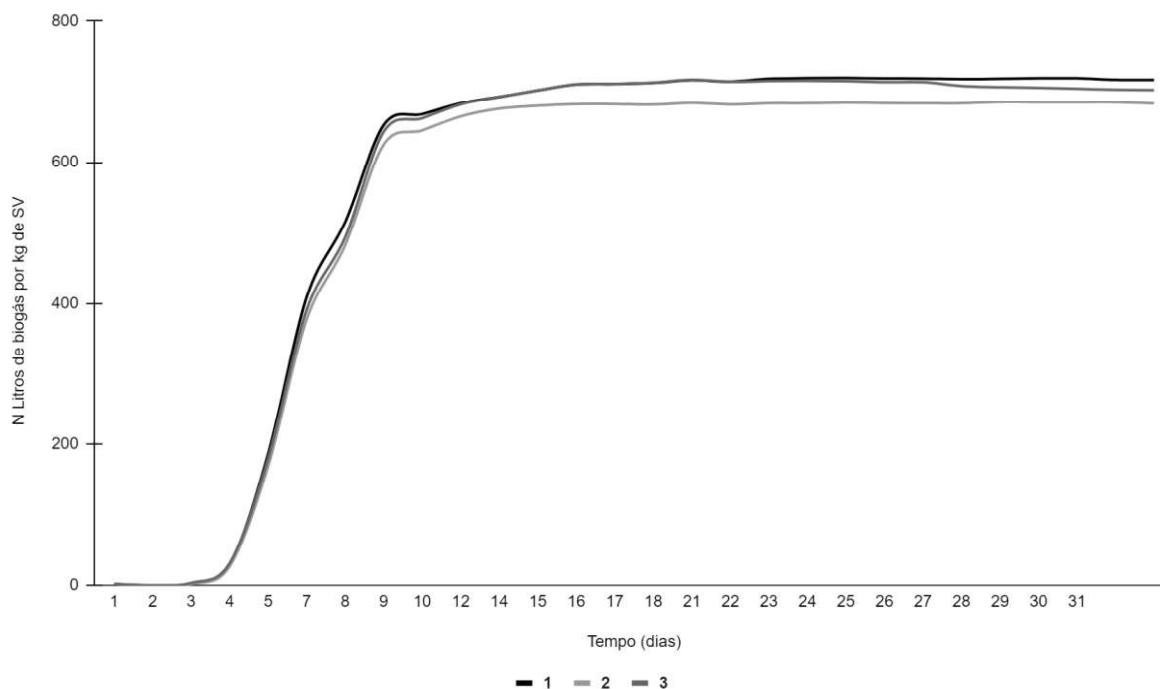
Os SV são a medida relacionada ao material orgânico presente nos resíduos, todas as amostras analisadas apresentaram teores de SV superiores a 90%, resultado também evidenciado por Edwiges (2017) e no estudo apresentado por Sidney et al. (2021), este resultado é um bom indicador para utilização deste tipo de resíduo na produção de biogás e metano.

5.2 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS E METANO

Em relação ao PBB e PBM para garantir a validade de um teste, a norma VDI recomenda a incubação de um inóculo puro (controle negativo), celulose (padrão positivo para avaliação da recuperação) e os resíduos com inóculo. A celulose é um padrão com alto teor de SV (>95%) e apresenta uma característica de rápida degradação quando submetida a digestão anaeróbia,

em triplicata, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13: Cinética da celulose microcristalina.



Fonte: próprio autor, (2024).

A celulose tem um valor teórico para biogás de 745 NL de biogás/ kg de SV, o teste realizado apresentou resultado de 706 ± 19 NL de biogás/ kg de SV e corresponde a uma recuperação próxima a 95% do valor de referência. Para esse ensaio a recuperação mínima deve ser de 80%, ou seja, o resultado obtido nesse padrão confirma a qualidade e validade do inóculo utilizado na batelada. Em estudos de determinação do PBM, outros autores observaram este comportamento cinético na celulose e evidenciaram recuperações superiores a 80% para biogás e metano, este é um critério imprescindível para validação da qualidade do inóculo utilizado (VDI 4630:2016; EDWIGES et al. 2018; LINS, 2022; LUIZ et al. 2023).

A qualidade do inóculo para obtenção de dados válidos no ensaio do PBM é relevante, Luiz et al. 2023 observaram o comportamento na recuperação de celulose microcristalina através do ensaio de PBM com inóculo produzido em laboratório e inóculo obtido em uma unidade de demonstração que realiza a biodigestão de RSO, ambos os inóculos apresentaram recuperação adequada aos valores teóricos de celulose, entretanto o melhor rendimento se deu no inóculo produzido em laboratório, este é um dado importante pois para que o material possa ser convertido em seu máximo potencial o meio ao qual é submetido não deve estar com excesso de matéria orgânica,

processo esperado em inóculos ou lodos de plantas em operação.

Para os resíduos avaliados, os resultados estão dispostos na Tabela 9, os resultados de biogás e metano estão expressos em volume normalizado por quilograma de sólidos voláteis.

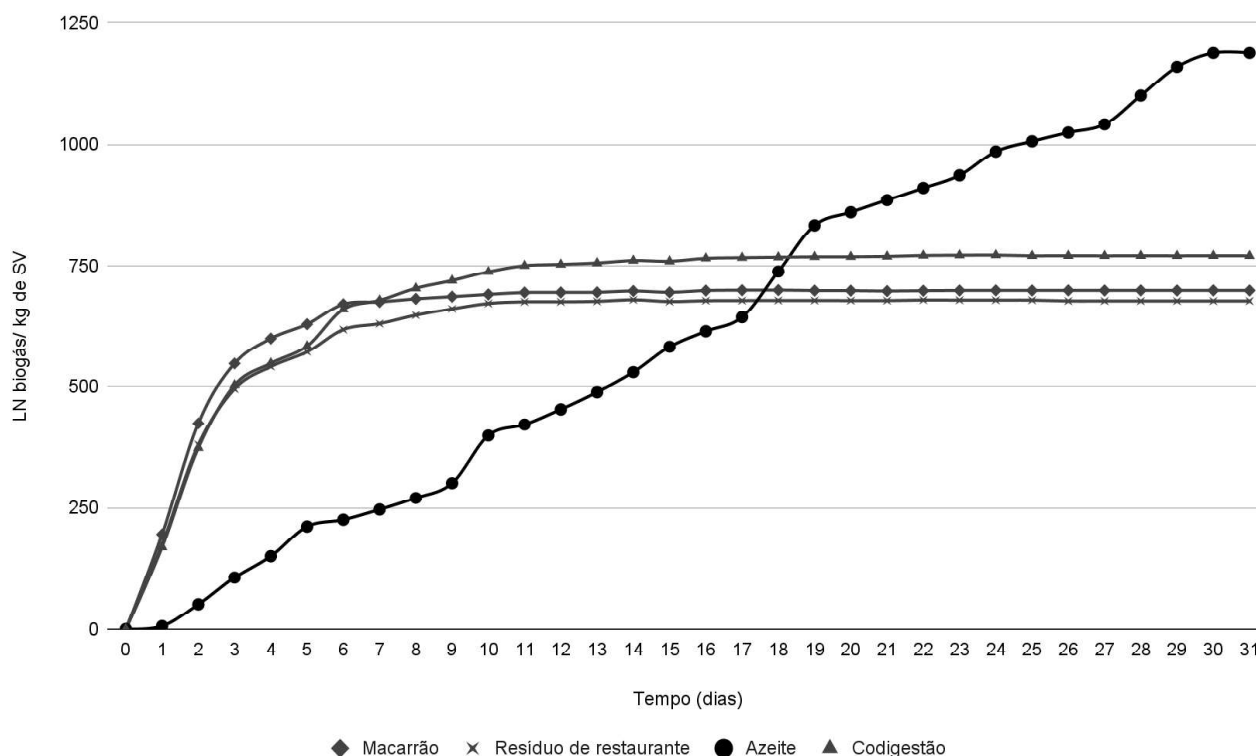
Tabela 9: Resultado do ensaio de PBB e PBM para os substratos avaliados

Amostra	Biogás (LN/kg sv)	Metano CH₄ (LN/ kg sv)	Biogás (Nm³/ tonelada de resíduo)	Metano (Nm³ /tonelada de resíduo)	Teor de metano (%)
Resíduo de restaurante	669 ± 29	371 ± 15	86	48	56
Azeite de Oliva	1190 ± 45	845 ± 28	1189	844	71
Macarrão tipo parafuso	701 ± 14	352 ± 6	623	313	50
Codigestão	772 ± 7	456 ± 8	88	52	59

Os resultados de BMP dos substratos avaliados estão apresentados na Tabela 9 e Figura 14. É possível observar um comportamento semelhante nas amostras de resíduo de restaurante, macarrão e na codigestão. Para o azeite de oliva há um comportamento cinético distinto, atribuído à sua composição e na complexidade de degradação de materiais gordurosos conforme descrito por Ferreira et al., (2023), onde lipídios não tratados ou utilizados em altas concentrações podem causar instabilidade no processo anaeróbio, reduzindo a eficiência da degradação dos SV, os dados teóricos descritos na VDI 4630 (2016), descrevem que cada tipo de material tem um potencial, entre eles os lipídios que podem produzir até 1390 LN de biogás por kg de SV, com teor de metano na ordem de 70%, esses valores corroboram os dados obtidos no azeite de oliva avaliado e também com os resultados obtidos por Sidney et al. (2021).

Foi possível observar ao analisar os resíduos separadamente que os volumes de biogás e metano obtidos na codigestão estão dentro dos valores determinados, assim como observado na pesquisa de Angeli-Bautista et al., (2021) que demonstrou o impacto positivo da codigestão com resíduos orgânicos, atingindo valores de 321 mL CH₄/gVS com a integração de resíduos alimentares, verdes e lodos primários.

Figura 14: Curva cinética dos resíduos avaliados



Fonte: próprio autor, (2024).

A curva cinética é importante para ajustes dos parâmetros operacionais do sistema, como COV e principalmente o tempo de retenção do material para biodigestão; ela representa o tempo necessário para que o resíduo em uma condição ideal, produza o seu potencial máximo de biogás e metano (ONUUDI, 2021). O comportamento cinético da codigestão não foi afetado pelo comportamento da gordura, esse fator pode estar relacionado com a baixa quantidade de azeite na mistura, cerca de 0,23% da mistura. Tendo em vista o comportamento cinético dos substratos analisados, o período de operação de 14 dias para cada tratamento da codigestão no reator respeitou o comportamento indicado pelas curvas aqui apresentadas.

5.3 OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DE REATOR DE BANCADA

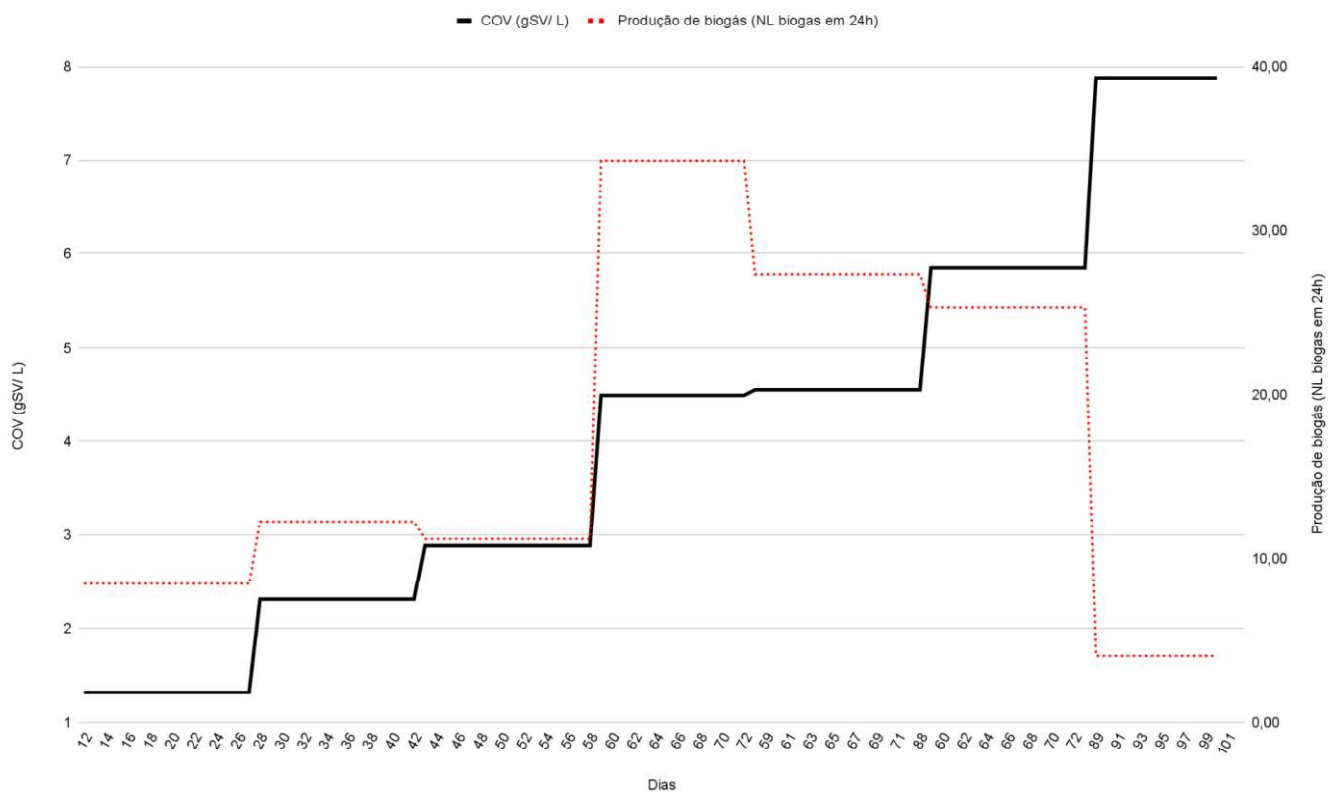
As características do efluente de partida do reator (inóculo) foram obtidas a partir da análise de Sólidos Totais (ST) onde o teor de ST obtido foi de $0,47\% \pm 0,01$; o inóculo manteve-se em temperatura mesofílica, após o incremento permanecer em batelada por 10 dias a recuperação do biogás estimado foi superior a 70% a taxa de ST passou para $0,74\% \pm 0,02$.

A proporção de mistura dos substratos resíduos do restaurante, macarrão tipo parafuso, azeite de oliva e da água na codigestão, conforme indicado na Tabela 3, atendeu a parâmetros pré-estabelecidos na UD Itaipu. Essa proporção é utilizada pois o substrato majoritário é o resíduo de restaurante que pode sofrer variações nas suas quantidades produzidas durante o ano, como por exemplo, em períodos de férias há uma redução nos seus valores diários. Para que o sistema não sofra com oscilações na operação resíduos orgânicos, oriundos de apreensões, que podem ser estocados, como é o caso do macarrão parafuso e do azeite, servem como resíduos adicionais para atendimento a COV e a taxa de ST adequada para operação do sistema.

A progressão de carga orgânica volumétrica e produção de biogás foram monitorados e os resultados estão apresentados na Figura 15, a COV determina a quantidade máxima de matéria orgânica adicionada no reator. Valores adequados de COV são essenciais para garantir que os microrganismos presentes tenham condições ótimas de crescimento e atividade biológica. Além disso, valores de COV muito elevadas podem levar ao acúmulo de ácidos orgânicos voláteis e a falhas do processo, enquanto uma COV baixa pode favorecer a alcalose que eleva os valores de pH e diminui a parcela de ácidos orgânicos, prejudicando a hidrólise (VoB, et al, 2009).

O aumento progressivo de carga foi realizado com intervalo mínimo de 14 dias as condições estabelecidas, exceto na condição T7 onde o sistema apresentou sobrecarga e a alimentação foi interrompida, em um estudo de progressão de carga realizado por LÓPEZ-GUTIÉRREZ et al. (2021), a produção de metano apresentou queda ao passo que a COV aumentou para cerca de 11g de DQO/ L. Para este estudo o melhor desempenho se deu com a COV de 4,49 g SV/L/d, essa condição foi aplicada no dia 58 da operação, no estudo realizado por Enokida et al. (2025) a melhor condição para a COV de um reator CSTR foi de 3,67 g SV/L/d, na Figura 15 é possível observar, na linha tracejada vermelha a média da produção de biogás em 24 h, em paralelo conforme ocorre a progressão ca COV a média da produção de biogás decresce até a condição extrema que foi o tratamento T7.

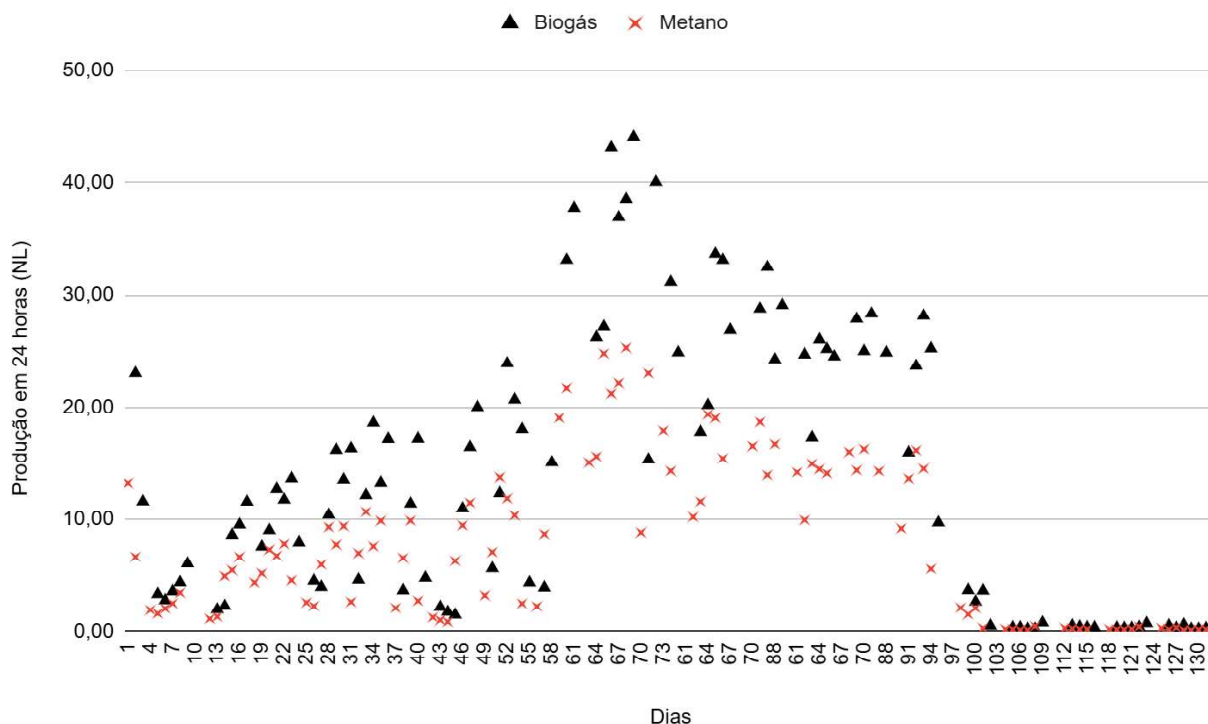
Figura 15: Rampa de COV para operação do reator.



Fonte: próprio autor, (2024).

O mesmo comportamento foi evidenciado na produção de metano, conforme Figura 16 próximo ao dia 100 da operação do reator o volume de metano caiu consideravelmente. O sistema foi mantido o período de 30 dias em fase estacionária, contudo não foi possível evidenciar recuperação na produção de metano, o que, conforme mencionado, sugere o colapso do sistema ocasionado pela sobrecarga orgânica.

Figura 16: Monitoramento da produção diária de biogás e metano.

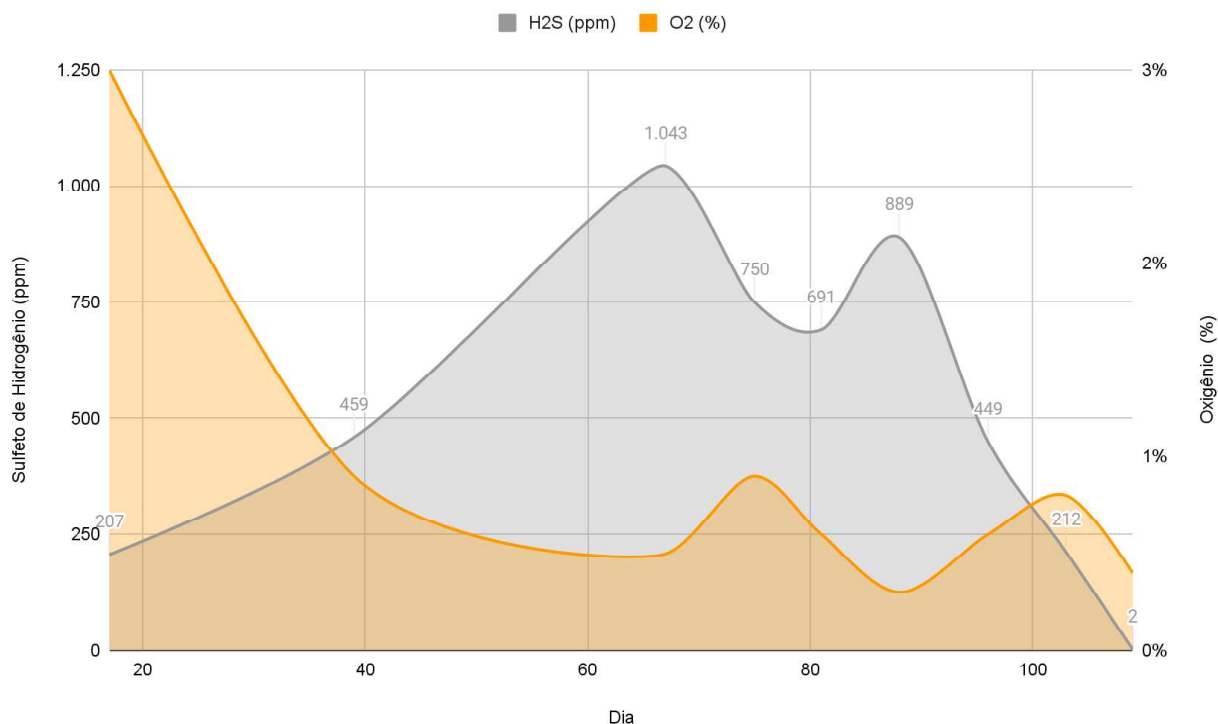


Fonte: próprio autor, (2024).

Duan et al., (2019), observou em seu estudo que o aumento da COV não foi proporcional ao ganho de eficiência na produção de metano, obtendo valores ótimos de COV de 1,89 kgSV/ m³/d para dejetos suínos, com tempo de retenção hidráulica (TRH) de 22 dias. Valores semelhantes foram encontrados por Liu et al., (2018), que utilizou resíduos alimentares, obtendo valor ótimo de 2,25 kgSV/m³/d com TRH fixo de 30 dias. A partir de 2,75 kgSV/ m³/d foi observado que o reator foi perdendo gradualmente a sua estabilidade.

Em relação ao H₂S, o maior pico de produção foi próximo ao 67º dia de operação conforme Figura 17, com uma queda brusca após o 88º dia. Em relação ao oxigênio o maior teor encontrado foi no início da operação com cerca de 3% mol/mol de O₂, contudo esse teor pode estar relacionado com o momento da leitura, onde pode ter ocorrido a entrada de ar ambiente, essa hipótese é reforçada pois o balanço dos gases analisados foi de cerca de 97%, ou seja, os 3% restantes podem ser nitrogênio presente no ar ambiente durante a medição com analisador de gás portátil.

Figura 17: Produção de Sulfeto de Hidrogênio e Oxigênio durante a operação



Fonte: próprio autor, (2025).

Os dados de rendimento calculados levam em consideração os ensaios do PBB e PBM. O rendimento é calculado a partir da recuperação do potencial estimado (PBB e PBM) e biogás registrado na operação do reator, na Tabela 10 para as condições avaliadas os rendimentos foram superiores a 90%. A partir (do tratamento) T6, com uma COV de 5,85 gSV/L/ do rendimento apresenta queda e na condição do T7 a reação parece sofrer impacto direto da sobrecarga no rendimento da produção de biogás. A sobrecarga acontece por conta da quantidade de SV adicionados, quanto maior a COV maior a vazão de SV. Todos os valores de rendimento, de produção de biogás, ficaram entre 80 e 105%, exceto o tratamento T7 que apresentou, apenas, 22%. Ao estudar a DA de resíduos de frutas e verduras e fazendo uso de um CSTR Edwiges et al., (2018), observaram que com uma COV acima de 3,5 gSV/L/d o rendimento na produção já apresenta decaimento.

O Coeficiente de variação obtido em relação às produções previstas e registradas (Tabela 10) evidencia baixas e médias variações para os tratamentos T1 a T6, contudo o T7 apresentou um Coeficiente Variação (%) de 91% que sugere uma variação muito alta (MUCELIN, 2006).

Tabela 10: Resultado do rendimento da produção de biogás em reator de bancada.

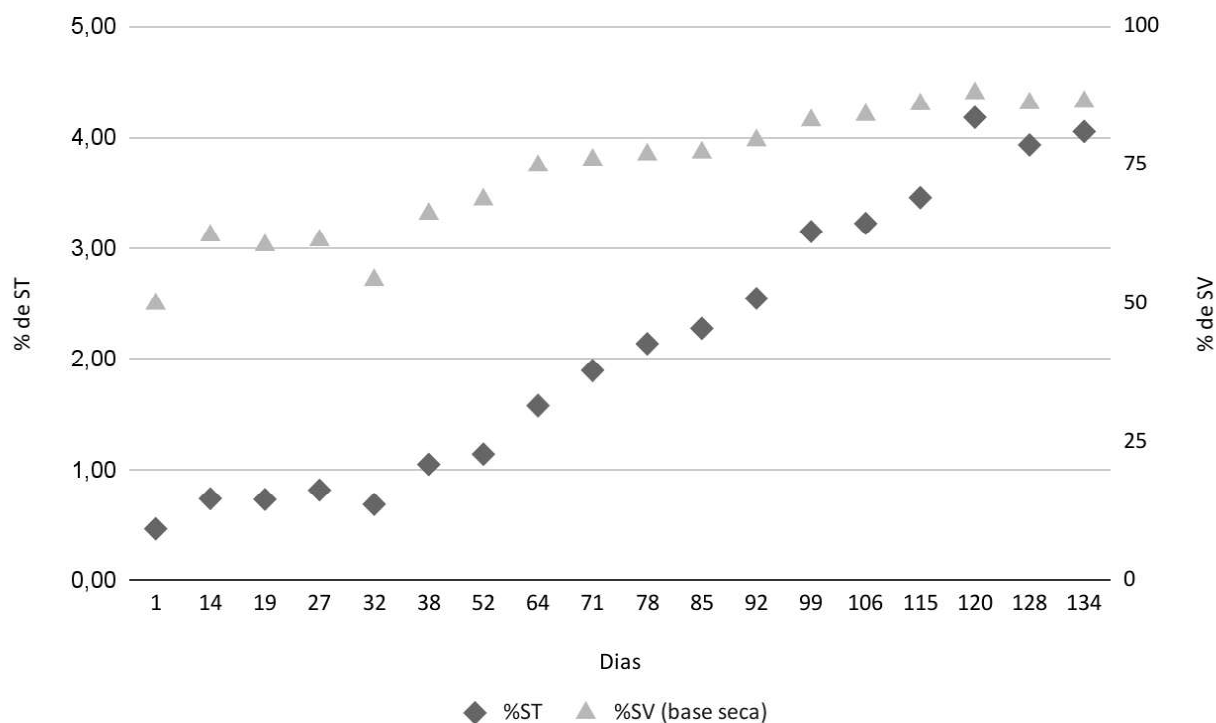
Condição	Vazão de SV total (L)	Produção de biogás prevista (LN)	Produção de biogás registrada (LN)	CV (%)	%Rendimento
T1	0,155	120	117	2	97
T2	0,273	211	181	11	94
T3	0,256	198	182	6	92
T4	0,440	340	390	10	105
T5	0,498	384	366	3	94
T6	0,576	445	356	16	80
T7	0,854	659	142	91	22

Durante todo o período de operação o teor de metano se manteve em $62,6 \pm 6,2\%$. Já em condições instáveis ocasionadas pela operação do tratamento T7 o teor de metano caiu para $50 \pm 1,6\%$, devido ao acúmulo de ácidos. Estudos como o de Ferreira et al., (2023) sugerem que a suplementação com agentes tamponantes poderia evitar essas flutuações.

5.3.1 Monitoramento analítico da operação

Em relação ao acompanhamento do teor de sólidos, o percentual de ST foi crescente durante o período operacional (Figura 19), comportamento esperado tendo em vista a característica do material de entrada (12%) e as vazões adicionadas. O maior ST obtido no período foi de 4,18%, ainda assim representa uma redução próxima a 65% no material digerido.

Figura 18: Monitoramento de ST e SV na operação do reator de bancada.

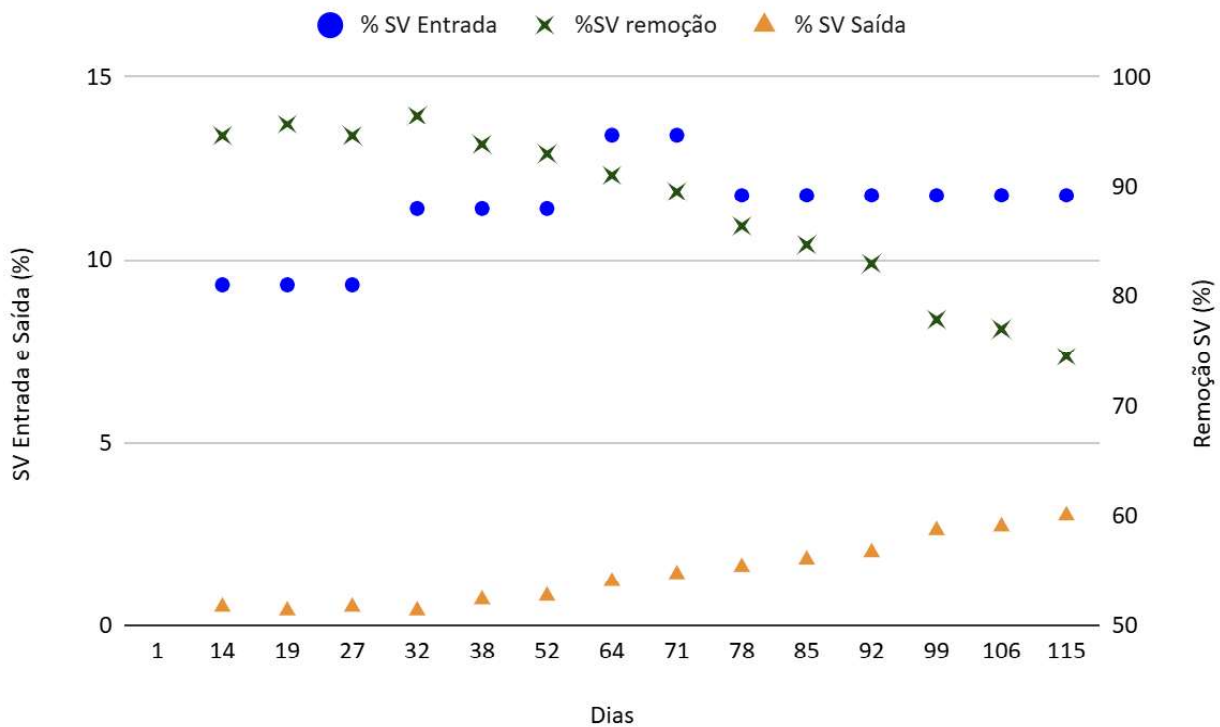


Fonte: próprio autor, (2024).

Durante o processo de DA em todos os tratamentos foram realizadas análises do % de SV de entrada e do material de saída. Durante o processo é esperado que ocorra a degradação dos SV e conseqüente produção de biogás. Ferreira et al., (2023) apontaram uma degradação média de 65% em sistemas com altas cargas lipídicas, corroborando os resultados observados na Figura 19 na digestão de azeite de oliva isolado, neste estudo, devido ao fato do sistema ter iniciado com uma baixa taxa de sólidos até o tratamento T3 sua remoção foi superior a 90% que corrobora com a remoção de SV encontrada no estudo de Angeli-Bautista (2021), a partir dos próximos tratamentos, neste estudo, houve uma pequena redução e a menor taxa de remoção de SV foi no T7 com 74%.

Ao operar um reator CSTR com RSO Nizer et al., (2025) observaram uma remoção de 68% a 88% de SV, contudo a maior COV aplicada foi de 1,5 g/kg de SV, condição semelhante à executada no T1 deste estudo.

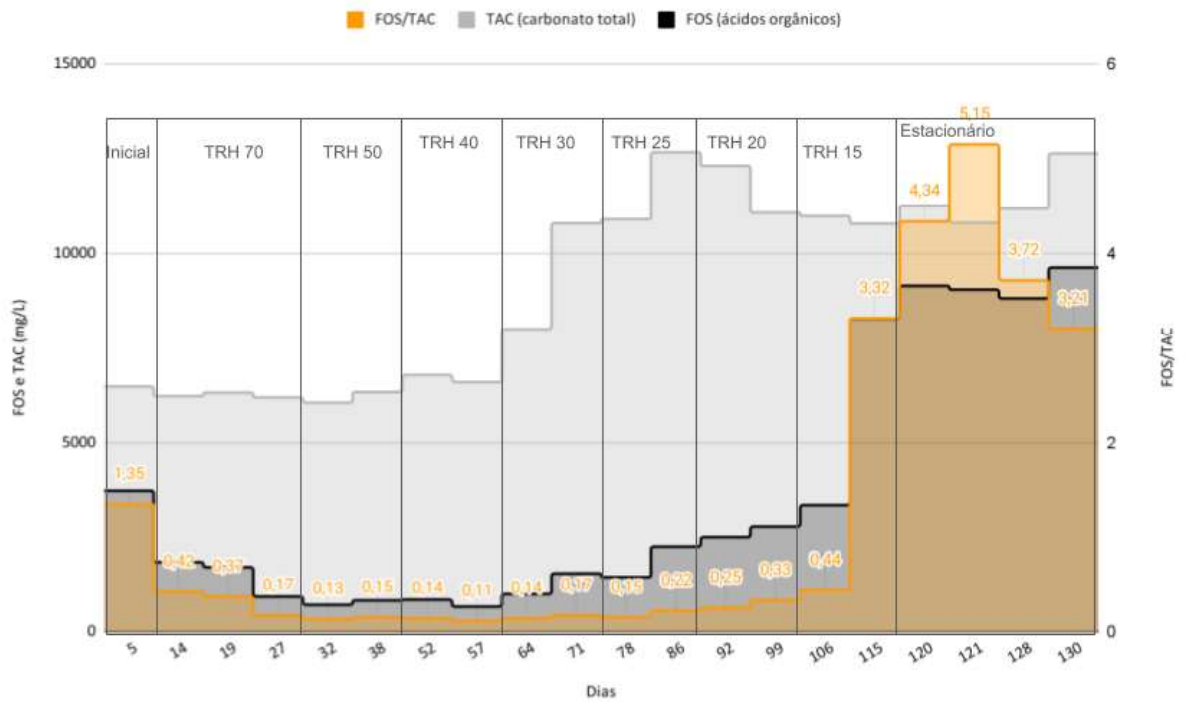
Figura 19: Remoção de SV.



Fonte: próprio autor, (2024).

No que se refere a relação do FOS/TAC os dados obtidos apresentados na Figura 20, demonstra um crescimento no FOS, ou seja, o início do acúmulo gradual de ácidos orgânicos no reator até o dia 130. Esse período considera os dias em que o sistema foi mantido em fase estacionária para justificar o colapso na produção de biogás e metano. Essas maiores concentrações de FOS e conseqüentemente maiores valores na relação de FOS/TAC ocorreram nos tratamentos T6 e T7. Esse comportamento já era esperado devido ao aumento da COV adicionada no reator. No período estacionário, que ocorreu após os 10 primeiros dias do tratamento T7 no qual não foi realizada a alimentação do sistema, entretanto mesmo com ausência de alimentação carga o sistema do reator não teve capacidade de recuperar seu rendimento em relação à produção de biogás, permanecendo com FOS/TAC elevado. Estes resultados corroboram os estudos realizados por López-Gutiérrez et al. (2021), Edwiges et al., (2018) e Alvarado-Vallejo et al., (2024) onde as medidas de FOS/TAC se mantiveram abaixo de 0,3 e o reator permaneceu estável, mas sofreram uma alteração brusca quando de uma sobrecarga de matéria orgânica.

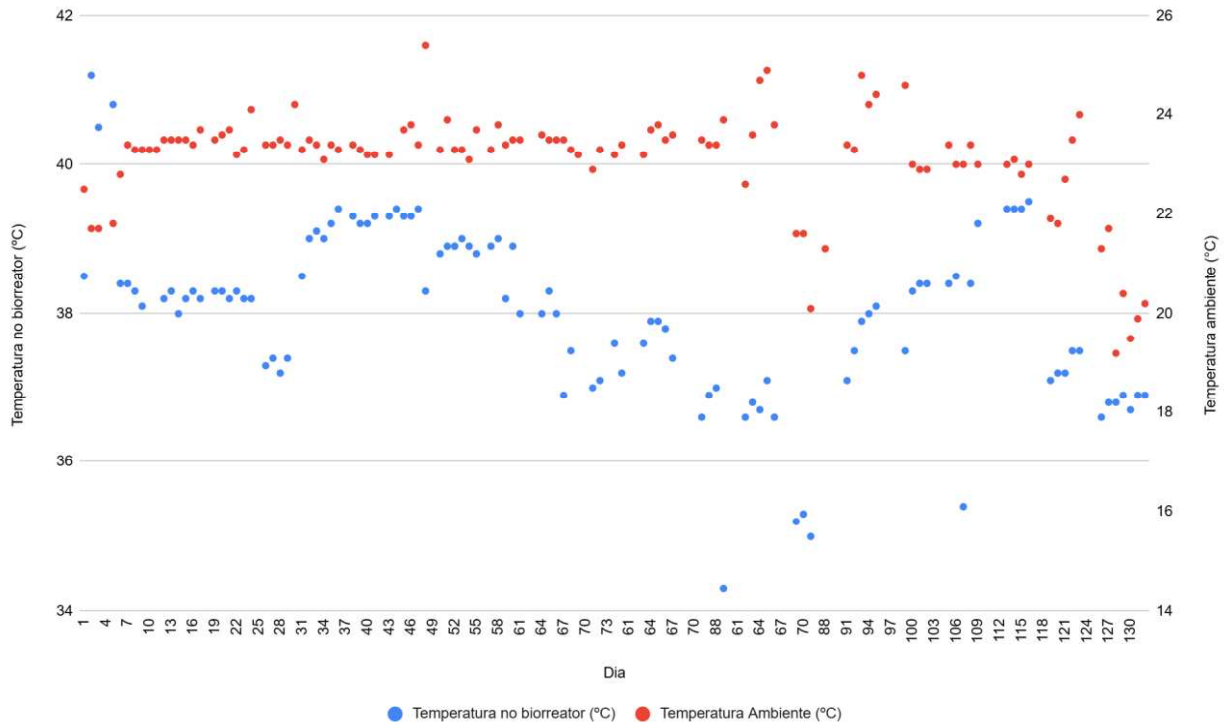
Figura 20: Monitoramento da relação FOS/TAC.



Fonte: próprio autor, (2024).

Em relação à temperatura ambiente e do reator durante o período de operação (Figura 21) os valores estiveram sob controle, com alguns ajustes ao longo da operação devido a necessidade de troca dos sensores ou ajustes no ar condicionado, a manutenção da temperatura na faixa mesofílica foi determinada para fins de estabelecimento dos mesmos critérios utilizados na determinação do PBB e PBM, preconizados pela VDI 4630 (2016) e referências para os cálculos de rendimento deste estudo.

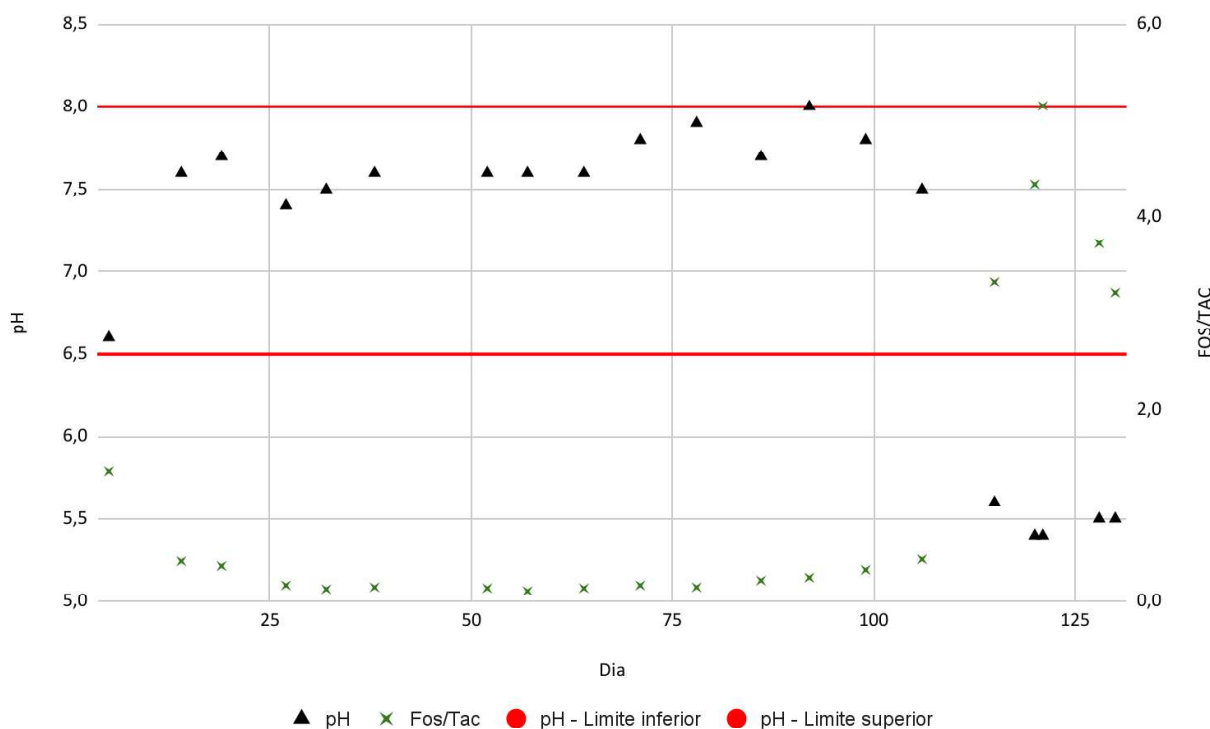
Figura 21: Monitoramento da temperatura durante a operação.



Fonte: próprio autor, (2025).

Para o melhor desempenho dos microrganismos envolvidos na DA o pH é um parâmetro que não deve apresentar bruscas variações. É esperado que após o processo de consumo da matéria orgânica o inóculo mantenha uma alcalinidade suficiente para evitar o desequilíbrio de pH. Neste estudo, conforme os dados apresentados na Figura 22, a redução do pH está vinculada ao aumento expressivo da relação FOS/TAC que indica a sobrecarga e consequente acidificação do sistema com valores de pH abaixo de 5,5 (KUNZ et al., 2022).

Figura 22: Monitoramento do pH durante a operação.



Fonte: próprio autor, (2025).

5.3.2 Caracterização do digestato

O digestato proveniente da operação do reator de bancada foi mantido sob armazenamento, em temperatura ambiente ($24,0^{\circ}\text{C} \pm 5,0^{\circ}\text{C}$) por 50 dias, respeitando os critérios pré-estabelecidos pela EMBRAPA (2023), embora os critérios tratem do tempo de retenção de lagoas de digestato de dejetos agropecuários a partida deste estudo contou com inóculo formado a partir de efluente da suinocultura.

Em relação a caracterização do digestato os parâmetros monitorados apresentaram valores conforme Tabela 11. Ao estudar o digestato proveniente da DA de RSO em codigestão com outros resíduos orgânicos, Araújo et al. (2024) observaram pH na faixa da neutralidade com valor de 7,68, DQO de 30.534,35 mg O_2/L e alcalinidade de 8.991,45 mg CaCO_3/L que evidencia o tamponamento do sistema ocasionado pela degradação da matéria orgânica durante o processo de operação do sistema, estes valores corroboram com os dados obtidos neste estudo.

Tabela 11: Dados físico-químicos do digestato gerado na operação

Parâmetro ¹	Resultado	unidade de medida
Sólidos Totais	2,06	%
Sólidos Voláteis (base úmida)	1,52	%
Sólidos Fixos (base úmida)	0,54	%
DQO	32.370	mg de O ₂ / L
pH	7,6	upH ¹
Alcalinidade	8.651	mg de CaCO ₃ / L

¹Os ensaios foram realizados em duplicata e os desvios não foram significativos.

A taxa de ST obtida no digestato foi de 2,06%, ao considerar o valor médio de entrada de 12% pode-se evidenciar uma remoção superior a 80% deste parâmetro, conforme indicado por DROSG (2013), o ST e SV são parâmetros que demonstram o desempenho geral da degradação.

Em relação aos macronutrientes (Tabela 12) de interesse agrônômico o Nitrogênio foi o nutriente com maior concentração no digestato, seguido do potássio. Estes resultados divergem dos resultados observados por Araújo et al., (2024) que observaram uma presença mais expressiva do potássio. Essa variação pode ocorrer em função da sazonalidade, tipo de resíduo utilizado e os nutrientes presentes no inóculo do reator.

Tabela 12: Macronutrientes do digestato gerado na operação

Parâmetro ¹	Resultado	unidade de medida
Nitrogênio Total	4.050	mg de N/ L
Fósforo Total	182	mg de P/ L
Potássio Total	1.820	mg K/ L

As especificidades do digestato devem ser avaliadas em função ao atendimento às questões legais, para isso, em algumas situações há a necessidade de análises complementares da presença de microrganismos patogênicos e um pós tratamento pode ser requerido para correta disposição (DALL'ORSOLETTA et al., 2024).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partida de reatores anaeróbios é um processo desafiador que necessita de controles adequados para a correta operação e manejo dos resíduos, o reator apresentou respostas satisfatórias na fase inicial com rendimentos na produção de biogás acima de 80% do PBM estimado. Os resultados obtidos no monitoramento da operação do reator de bancada indicaram a influência da COV na produção de biogás e metano e o impacto no rendimento do potencial energético da codigestão avaliada. A condição 4, com COV de 4,49 gSV/L, apresentou os melhores dados de rendimento para produção de biogás.

Os resíduos orgânicos foram caracterizados e apresentaram valores adequados de ST e SV para o aproveitamento em sistemas de biodigestão, em relação ao PBM todos os resíduos avaliados e a codigestão apresentaram valores dentro do esperado, na amostra de azeite foi identificado comportamento cinético distinto das demais, este fator pode estar relacionado com a complexidade da estrutura molecular deste tipo de material, entretanto, na mistura não foi evidenciado influência atrelada a este comportamento.

A rampa de carga empregada na operação do reator de bancada apresentou estabilidade até o T6, após isso foi observada a queda brusca no rendimento e impacto nos parâmetros físico-químicos do efluente do reator evidente através da análise da regressão linear dos dados medidos, a queda no rendimento pode estar atrelada a uma série de fatores sendo o principal destes, a sobrecarga orgânica acumulada no sistema.

A temperatura monitorada durante a operação do atendeu aos critérios de estabilidade preconizados para a faixa mesofílica, os parâmetros de ST e SV indicaram um desempenho satisfatório para a remoção da matéria orgânica do material de entrada, o pH e FOS/TAC apresentaram instabilidade no tratamento T7 que sugere a sobrecarga e consequente acidificação do sistema comprovada pela queda expressiva na produção de biogás e metano.

O digestato gerado apresentou maior concentração do macronutriente Nitrogênio (4.050 mg de N/L), a variação na característica do digestato pode estar atrelada aos substratos de alimentação e ao inóculo de partida do reator, contudo, o digestato ainda apresentou uma carga orgânica elevada (DQO 32.370) e a depender da aplicação este é um ponto a ser considerado em conjunto com as regulamentações aplicáveis.

Diante disto, os resultados apresentados neste trabalho, subsidiam parâmetros para novos estudos envolvendo RSO, desta maneira novas pesquisas podem contribuir com uma diversidade de resíduos e setores com potencial para aproveitamento energético dos resíduos além de contribuir com as metas de descarbonização e processos sustentáveis.

Como oportunidade de novos estudos a avaliação da diversidade microbiana pode apoiar em medidas para o melhor aproveitamento da matéria orgânica disposta no biodigestor, além disso, a análise quantitativa dos Ácidos Graxos Voláteis (AVGs) podem complementar os resultados obtidos na análise de FOS/TAC para manutenção da estabilidade do reator. Para o digestato há a oportunidade de análises complementares para identificação de microrganismos patogênicos, a biodisponibilidade de nutrientes e avaliações foliares como suporte a aplicação deste material como biofertilizante.

REFERÊNCIAS

ABREMA. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2023. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2023

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004: Resíduos Sólidos -classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABIOGÁS). O Potencial Brasileiro do Biogás. São Paulo, SP: ABIOGÁS, 2020. Disponível em: https://cdn.prod.website-files.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390e394c734a95f3032a2da_NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf. Acesso em: 15 out. 2024.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2019-2020. 52 p. Disponível em: <www.abrelpe.org.br>. Acesso em 15/07/2021.

AMARAL, A. C.; KUNZ, A.; TÁPPARO, D. C.; GASPARETO, T. C.; STEINMETZ, R. L. R. Influência da carga orgânica volumétrica na recuperação de metano em um reator CSTR tratando dejetos suínos. **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2016.

AMARAL, A. C. do., STEINMETZ, R. L. R., KUNZ, A. O processo de biodigestão. In: KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., AMARAL, A. C. do. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 1a ed. Concórdia: Sbera: Embrapa, 2019a, 13-26.

APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23st ed. Washington: American Water Works Association, 2017.

ARAÚJO, N. C. de; ZAMBIAZI, A. A. de F.; SANTOS, F. S. dos; SANTO, F. da S. do E.; QUEIROZ, A. J. P.; MENESES, R. C. de A. Tratamento anaeróbio de sobras de alimentos de restaurante visando a produção de biogás e biofertilizante. In: **OPEN SCIENCE RESEARCH XV**. [S.l.]: [s.n.], 2024. Cap. 26, p. 376-392. DOI: 10.37885/240516579.

ALVARADO-VALLEJO, A.; MARÍN, O.; ROSAS-MENDOZA, E.; MÉNDEZ-CONTRERAS, J.; ALVARADO-LASSMAN, A. The valorization of fruit and vegetable wastes using an anaerobic fixed biofilm reactor: A case of discarded tomatoes from a traditional market. **Processes**, v. 12, 2024, 1923. DOI: 10.3390/pr12091923.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n.9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília DF.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. Dispõe sobre as regras para produtos orgânicos e biofertilizantes. **Diário Oficial da União**, 15 jul. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa Nacional Metano Zero. Brasília, DF, 2022. 10p. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/MinutaProgramaMetanoZero.pdf>. Acesso em: 14 out. 2024.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 08 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14993.htm. Acesso em: 14 out. 2024.

BRONDANI, J. C. Biodigestores e biogás: Balanço energético, possibilidades de utilização e mitigação do efeito estufa. UFSM. Santa Maria, p. 119. 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/8140>. Acesso em: 24 out. de 2024.

BONUGLI-SANTOS, Rafaella Costa; MARTERES, Tiago Joelzer; LUIZ, Franciele Natividade; SOMER, Juliana Gaio; MARI, Ângelo Gabriel; PASSARINI, Michel Rodrigo Zambrano. Prolonged acetogenic phase and biological succession during anaerobic digestion using swine manure. **Folia Microbiológica**, [S.L.], v. 67, n. 5, p. 733-745, 23 abr. 2022. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12223-021-00937-2>. Acesso em: 10 jan 2024.

CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – BIOGÁS. Nota técnica nº 02/2020 – Panorama do biogás no Brasil em 2019. Foz do Iguaçu, 2020.

CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – BIOGÁS. Panorama do Biogás no Brasil 2021. CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº001/2022 – Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2022.

CIBIOGÁS CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – BIOGÁS. Nota técnica nº 02/2020 – Panorama do biogás no Brasil em 2023. Relatório Técnico nº 001/2024 – 22 p Foz do Iguaçu, 2024.

DALL'ORSOLETTA, D. J.; BRUNETTO, G.; GATIBONI, L. C.; SCHIMITT, D. E.; MORAIS, G. PORTELA. Limites ambientais para reciclagem dos dejetos como fertilizantes. In: NICOLOSO, R. da S.; LOURENZI, C. R.; BRUNETTO, G. (eds.). Gestão dos resíduos da produção animal: reciclagem como fertilizante e impacto ambiental. Brasília, DF: Embrapa; Concórdia: Sbera, 2024. p. [243].

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 450 p.

DONG, L.; CAO, G.; GUO, X.; et al. Efficient biogas production from cattle manure in a plug flow reactor: A large scale long term study. **Bioresource Technology**, 2019.

DROSG, Bernhard. Process monitoring in biogas plants. **IEA Bioenergy**, [S. l.], p. 6 - 38, 2013.

DUAN, N., ZHANG, D., LIN, C., ZHANG, Y., ZHAO, L., LIU, H., LIU, Z. Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: Methane production, mass flow, reactor scale and heating scenarios, *Journal of Environmental Management*, v. 231, 2019, pp. 646-652, ISSN 0301-4797. DOI: doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.062.

EMBRAPA. DOCUMENTOS 239: Critérios técnicos mínimos para o licenciamento ambiental de granjas de suínos. 1 ed. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2023. 59 p.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN 2021 – Relatório Síntese – Ano base 2020.**

Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em 24 out. 2021.

EDWIGES, Thiago. Biodigestão anaeróbia de resíduos vegetais provenientes de central de abastecimento. Cascavel, 2017. 81 f. Disponível em: <<https://tede.unioeste.br/handle/tede/3029#:~:text=A%20biodigest%C3%A3o%20anaer%C3%B3bia%20tem%20sido,os%20impactos%20da%20crise%20energ%C3%A9tica>>. Acesso em: 10 jul. 2024.

EDWIGES, T. et al., Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, 71, 618-625, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.030>>. Acesso em: 05 ago. 2024.

ENOKIDA, C. H.; TAPPARO, D. C.; ANTES, F. G.; STEINMETZ, R. L. R.; MAGRINI, F. E.; SOPHIATTI, I. V. M.; PAESI, S.; KUNZ, A. Anaerobic codigestion of livestock manure and agro-industrial waste in a CSTR reactor: Operational aspects, digestate characteristics, and microbial community dynamics. *Renewable Energy*, v. 238, 2025, 121865. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121865.

FAO (2019) The State of food and agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome.

FREITAS, M.F., PIRES, M.M., BENINCÁ, D. (2024). Fragilidades e potencialidades na gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.16, e20230271. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.016.e20230271>. Acesso em: 12/02/2025.

FRIAS, J. F. **Proposta de um biodigestor para geração de energia a partir dos resíduos orgânicos do restaurante universitário - Campus A.C. Simões**, 2016. Universidade Federal de Alagoas.

FU, X.; ACHU, N. I.; KREUGER, E.; BJÖRNSSON, L. Comparison of Reactor Configurations for Biogas Production from Energy Crops. **Power and energy engineering conference**, p. 1–4, 2010.

GRANZOTTO, F., AITA, C., SILVEIRA, D.D., MAYER, F.D., PUJOL, S.B., PIÑAS, J.A.V., HOFFMANN, R. Use of anaerobic biodigestor in the treatment of organic waste from a university

restaurant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, V. 9, Issue 5, 2021, 105795, ISSN 2213-3437. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105795. Acesso em: 01/02/2025.

KABEYI, M.J.B.; E OLANREWAJU, O.A. Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. **Journal of Energy**, V.22. 43 p. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2022/8750221>>. Acesso em: 15 out. 2024.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; et al. **Manual Básico de Biogás**. 1º ed. Lajeado: Univates, 2014.

KUMAR, D. J. P.; MISHRA, R. K.; CHINNAM, S.; BINNAL, P.; DWIVEDI, N. A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends. **Biotechnology Notes**, v. 5, 2024, p. 33-49. ISSN 2665-9069. DOI: 10.1016/j.biotno.2024.02.001.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Embrapa CNPSA, p. 209, 2019.

KUNZ, A. et al. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2022.211 p.

LI, J.; JIN, Y.; REN, J.; ZHU, W. Impact of organic load shock on the dynamic transition of microbial communities during the anaerobic start-up process. **Energy Procedia**, v. 61, p. 2737–2740, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.292>>.

LIU X., KHALID H., AMIN F.R., et al. Effects of hydraulic retention time on anaerobic digestion performance of food waste to produce methane as a biofuel. *EnvironTechnol Innov.* 2018;11:348–357.

LINS, LEONARDO PEREIRA. Produção e potencial do biogás gerado do bagaço de malte e efluentes da indústria cervejeiras - Foz do Iguaçu, 2022. 64 fls. Disponível em: <<https://dspace.unila.edu.br/items/19ec81e5-3a55-4997-b084-fda338922339>>. Acesso em: 25 mar. 2024.

LINS, L. P., MARTINEZ, D. G., FURTADO, A. C., PADILHA, J. C. Biomethane generation and CO₂ recovery through biogas production using brewers' spent Grains, **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, V. 48, 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102579.

LOPEZ-GUTIÉRREZ, I., et al. Evaluation of the continuous methane production from an enzymatic agave bagasse hydrolysate in suspended (CSTR) and granular biomass systems (UASB). **Fuel**. 304, 2021. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236121012850>>. Acesso em: 25 out. 2024.

LOVATO, G.; ALBANEZ, R.; STRACIERI, L.; ZAIAT, M.; RATUSZNEI, S. M.; RODRIGUES, J. A. D. Design study of an AnSBBR for hydrogen production by co-digestion of whey with glycerin: interactive effects of organic load, cycle length and feed strategy. **International Journal of Hydrogen Energy**, 43, p. 9567 – 9576, 2017.

LUIZ, F. N. et al. Metataxonomic characterization of the microbial community involved in the production of biogas with microcrystalline cellulose in pilot and laboratory scale. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**. (2023) 39:184 Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11274-023-03573-9>>. Acesso em: 16 out. 2024.

LULLIO, T. G.; SOUZA, L. P.; RATUSZNEI, S. M.; RODRIGUES, J. A. D.; ZAIAT, M. Biomethane Production in an AnSBBR Treating Wastewater from Biohydrogen Process. *Applied Biochemical Biotechnology*, v. 174, p.1873–1896, 2014.

MADIGAN, M. T. et al. *Microbiologia de Brock*. 12 ed, Porto Alegre: Artmed, 2010.

MARJOLAINE. Dry and wet anaerobic digestion systems. *BiogasWorld*, [26/01/2018]. Disponível em: <https://biogasworld.com/news/dry-wet-anaerobic-digestion-systems/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

MENEZES, C. A. de; DOS SANTOS, D. R.; CAVALCANTE, W. A.; ALMEIDA, P. S.; SILVA, T. P.; DA SILVA JÚNIOR, F. D. C. G.; GEHRING, T. A.; ZAIAT, M.; DOS SANTOS, A. B.; LEITÃO, R. C. Innovative system to maximize methane production from fruit and vegetable waste. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 31, n. 54, p. 62825-62839, Nov. 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-35328.

MITO, Jessica Yuki de Lima. Análise de aspectos políticos e regulatórios do biogás no Brasil e seu crescimento com o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos. 2022. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade, Foz do Iguaçu, 2022.

MUCELIN, C. A. Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias. 2. ed. Medianeira, PR: Carlos Alberto Mucelin, 2006.

NIZER, T. J. V., C. da CUNHA, G. S., de ASSIS, T. M., CAMILOTI, P. R., VUITIK, G. A., EDWIGES, T., & BARANA, A. C. (2025). Anaerobic digestion of organic fraction from municipal solid waste with methano production as objective: acidification phase control with no chemicals. **Environmental Technology**, 1–10. <https://doi.org/10.1080/09593330.2025.2456131>

ONU DI. **Operação e monitoramento de reatores anaeróbios: guia de boas práticas** / Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Comitê diretor do projeto Centro Internacional de Energias Renováveis. – Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021. 62 p.: il. – (GEF Biogás Brasil).

ONU DI. **Operação e monitoramento de reatores anaeróbios: guia de boas práticas** / Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Comitê diretor do projeto Centro Internacional de Energias Renováveis. – Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021. 62 p.: il. – (GEF Biogás Brasil).

ONU DI. Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial; Centro Internacional de Energias Renováveis. **Guia prático para projetos de biogás**. Brasília: MCTI, 2022a. E-book. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil).

ONU DI. **Produção de combustíveis líquidos a partir de biogás e biometano: nota técnica** / Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial; Centro Internacional de Energias Renováveis. – Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022b. 33 p.:il. – (GEF Biogás Brasil).

OLIVEIRA DEP, MIRANDA AC, JUNIOR MV, SANTANA JCC, TAMBOURGI EB, FACCHINI F, IAVAGNILIO R, PINTO LFR. Economic and Environmental Feasibility of Cogeneration from Food Waste: A Case Study in São Paulo City. *Sustainability*. 2024; 16(7):2979. <https://doi.org/10.3390/su16072979>

PISUTPAISAL, N.; NATHAO, C.; SIRISUKPOKA, U. Biological hydrogen and methane production in from food waste in two-stage CSTR. *Energy Procedia*, v. 50, p. 719–722, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.088>>.

PRETEL, A.F., VASCONCELOS, P.E.A. O aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbano: uma forma de descarte adequado e sustentável. *Revista UNIFESO - Humanas e Sociais*. Teresópolis - RJ, v.7 n.7, 2021.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: Substratos, digestores e uso de biogás**. 1º ed. Brasília: PROBIOGÁS - Projeto Brasil–Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil, 2015.

ROOS, K. F.; MARTIN JR, J. B.; MOSER, M. A. A. **Manual for developing biogas systems at commercial farms in the United States**. United States: Environmental Protection Agency, 2004.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. Planejamento e otimização de processos. 3. ed. Campinas, SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2014.

SHAH, F. A.; MAHMOOD, Q.; RASHID, N.; et al. Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 627–642, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.053>>. Acesso em 05 Out. 20.

SHIRMER, N. W.; LIMA G.M. Aproveitamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos para produção de biogás e biometano no Brasil: uma abordagem teórica sobre a geração de energia através de biodigestores anaeróbicos em plantas de aterros sanitários. *Revista GEAMA –Ciências Ambientais e Biotecnologia* *Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology*. 10(2): 04-22, agosto 2024, online version. Disponível em:

<<https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/5936/482485353>>. Acesso em: 10 out. 2024.

SIDNEY, E. B.; MARTINEZ, D. G.; SMANIOTTO, B. ESTEVAM, F. N. L.; BRANDT. L. S.; FRANÇA T. J. L. de.; PINHEIRO, B. C. Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products, *Advances in Science, Technology & Innovation*, p.95. (2021) **Springer**. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_6>.

SINGH, A.; PRASAD, S.; SINGH, R.; YOUNIS, K.; YOUSUF, O. Revolutionizing the supply chain: Cutting-edge strategies and technologies for food waste reduction. *Bioresource Technology Reports*, v. 29, 2025, 102047. ISSN 2589-014X. DOI: 10.1016/j.biteb.2025.102047.

SNIS. Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021 / Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional. – Brasília/ DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/PANORAMA_DO_SANEAMENTO_BASICO_NO_BRASIL_SNIS_2021compactado.pdf >. Acesso em: 13 Out. 24.

SNIS. Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos: SNIS, 2022/ Ministério do Desenvolvimento Regional. – Brasília/ DF, 2022. Disponível em: <http://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/residuos-solidos->. Acesso em: 15 de dezembro 2024.

USACK, J. G.; SPIRITO, C. M.; ANGENENT, L. T. Continuously-stirred Anaerobic Digester to Convert Organic Wastes into Biogas: System Setup and Basic Operation. *J. Vis. Exp*, n. 65, p. 3978, 2012. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3476410/pdf/jove-65-3978.pdf>>. Acesso em 08 Out.20.

VDI 4630. Fermentation of Organic Materials. Characterisation of the Substrates, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests. *VDI-Handbuch Energietechnik*. p. 92, 2016.

VIÑAS, M. et al. Advantages of an anaerobic reactor for TMP wastewater with separate acidogenic and methanogenic stages. *Environmental Techonolgy*, v. 14, p. 995-1000, 1993.

VoB E., Weichgrebe D., Rosenwinkel, K. H., 2009. FOS/TAC-Deduction, Methods, Application and Significance, Internationale Wissenschaftskonferenz Biogas Science 2009 - science meets practice", LfL- Bayern, 2-4. 12.09, Erding.

XIAO, B.; QIN, Y.; WU, J.; et al. Comparison of single-stage and two-stage thermophilic anaerobic digestion of food waste: Performance, energy balance and reaction process. **Energy Conversion and Management**, v. 156, n. October 2017, p. 215–223, 2018. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.092>>.

XIAO, B.; ZHANG, W.; YI, H.; et al. Biogas production by two-stage thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and paper waste: Effect of paper waste ratio. **Renewable Energy**, 2019.

ZAMANZADEH, M.; HAGEN, L. H.; SVENSSON, K.; LINJORDET, R.; HORN, S. J. Anaerobic digestion of food waste - Effect of recirculation and temperature on performance and microbiology. **Water Research**, v. 96, p. 246–254, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.058>>.

ZHANG, B.; ZHANG, L.-L.; ZHANG, S.-C.; SHI, H.-Z.; CAI, W. The Influence of pH on Hydrolysis and Acidogenesis of Kitchen Wastes in Two-phase Anaerobic Digestion. **Environmental Technology**, v. 26, n. 3, p. 329–340, 2005.

ZHANG, L.; LEE, Y. W.; JAHNG, D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. **Bioresour Technol**, v. 102, n. 8, p. 5048–5059, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.082>>.