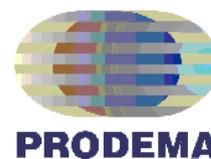




**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente**



**Linha de Pesquisa: Tecnologias para o desenvolvimento sustentável
Sublinha: Aplicação de tecnologias sustentáveis em energia e meio ambiente**

SERGIO COSTA DE MELLO

**TRATAMENTO ANAERÓBICO DE RESÍDUOS
ALIMENTARES PARA PRODUÇÃO DESCENTRALIZADA DE
BIOGÁS: CONTRIBUIÇÕES AO ODS 7 DA ONU**

João Pessoa - Paraíba
2023

SERGIO COSTA DE MELLO

**TRATAMENTO ANAERÓBICO DE RESÍDUOS
ALIMENTARES PARA PRODUÇÃO DESCENTRALIZADA DE
BIOGÁS: CONTRIBUIÇÕES AO ODS 7 DA ONU**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, em cumprimento às exigências legais para obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Professor orientador: Dr. Raimundo Aprígio de Menezes Júnior

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M527t Mello, Sergio Costa de.

Tratamento anaeróbico de resíduos alimentares para produção descentralizada de biogás : contribuições ao ODS 7 da ONU / Sergio Costa de Mello. - João Pessoa, 2023.

130 f. : il.

Orientação: Raimundo Aprígio de Menezes Júnior.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCEN.

1. Biogás - Geração descentralizada. 2. Saneamento ambiental. 3. Energia limpa e acessível - ODS 7. I. Menezes Júnior, Raimundo Aprígio de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 662.767.2(043)

SERGIO COSTA DE MELLO

**TRATAMENTO ANAERÓBICO DE RESÍDUOS
ALIMENTARES PARA PRODUÇÃO DESCENTRALIZADA DE
BIOGÁS: CONTRIBUIÇÕES AO ODS 7 DA ONU**

BANCA EXAMINADORA

(Assinado digitalmente em 02/01/2024 14:11)
RAIMUNDO APRIGIO DE MENEZES JUNIOR
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
1866226
Universidade Federal da Paraíba - UFPB
Orientador(a)

(Assinado digitalmente em 13/01/2024 09:30)
MARIA CRISTINA BASILIO CRISPIM DA SILVA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
Universidade Federal da Paraíba - UFPB
Avaliador(a) interno(a)

Documento assinado digitalmente
 MARIA DO SOCORRO BEZERRA DE ARAUJO
Data: 31/12/2023 14:32:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Maria do Socorro Bezerra de Araújo
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Avaliador(a) interno(a)

Documento assinado digitalmente
 FERNANDO FERREIRA DE MORAIS
Data: 01/01/2024 11:31:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fernando Ferreira de Moraes
Universidade Federal da Paraíba - UFPB
Avaliador(a) externo(a)

Documento assinado digitalmente
 FLAVIA MARTINS FRANCO DE OLIVEIRA
Data: 01/01/2024 17:51:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Flávia Martins Franco de Oliveira
Universidade Federal da Paraíba - UFPB
Avaliador(a) externo(a)

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufpb.br/documentos/> informando seu número: **00000000**, ano: **2023**, documento (espécie): **ATA**, data de emissão: **02/01/2024** e o código de verificação: **247ec2b395**

Dedico esta tese a todos os contribuintes, brasileiros anônimos que custearam minha educação até os dias atuais. Sem elas, eles e todes, não seria possível a existência de uma educação pública, gratuita e de qualidade no Brasil.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade de iniciar, desenvolver e concluir meu doutorado. Sua presença augusta me permitiu superar os obstáculos do caminho com a sabedoria e dedicação necessárias em cada etapa.

Sou profundamente grato a minha mãe, Eulália, e ao meu pai, Sebastião. Eles sempre participaram das alegrias e tristezas de todos os momentos de minha vida. Pai e mãe, muito obrigado por terem me tido (risos!).

Minha amada esposa, Patrícia Francinete, parece que foi ontem que nos conhecemos, mas este ano (2024) completaremos 25 anos de namoro, dos quais 22 são de casados. Sem a sua compreensão, companheirismo e participação direta na execução dos experimentos, eu não teria feito esta pós-graduação. Sou eternamente grato por você ter me convidado a compartilhar sua jornada de vida e por tornar a minha uma caminhada divertidamente romântica a cada dia.

Meu filho, Augusto, sou muito feliz e agradecido por sua existência em minha vida. Sua ajuda na montagem dos experimentos e no tratamento estatístico dos dados foi indispensável. Só o trabalho em equipe possibilitaria esta pesquisa. Te amo, filhão!

Sou muito grato aos meus irmãos, Flávio, Demétrio e Tarsila pela ajuda no trabalho, literalmente, braçal durante o transporte e montagem das “parafernálias”. Gastamos muito “*cuspe, suor e um bocado de fita gomada*”^{*} para construir o biodigestor e seus anexos.

Registro meus agradecimentos à Gestora Ambiental Silvana Santos e ao Diretor José Tavares por permitirem o desenvolvimento da parte experimental de minha pesquisa na Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - EMPASA, em João Pessoa, Paraíba. A autorização de vocês foi decisiva para a conclusão de meu doutorado.

Agradeço de maneira especial ao pessoal dos serviços gerais da Empresa Maranata, funcionários que prestam serviços de limpeza e manutenção para a EMPASA, em João Pessoa, Paraíba. Não esquecerei a maneira humana e calorosa como me receberam e permitiram estar com vocês durante o tempo de minha pesquisa.

Ao Sr. João Amarante e ao Sr. José dos Santos (Retífica do Jean), da oficina mecânica de motores de refrigeradores, expressei meus agradecimentos pelas inúmeras explicações e sugestões quanto ao funcionamento dos motores de geladeira. Esses conhecimentos foram fundamentais para o correto funcionamento dos experimentos.

Ao Sr. Rivaldo Jorge (*in memoriam*), sua esposa Valquíria e seus filhos, Laudimar e Laurimar, proprietários da Casa das Poupas, comerciantes da EMPASA, registro meus agradecimentos pelo tempo que pude fazer uso da energia elétrica do referido estabelecimento.

Agradeço aos membros da banca Profa. Cristina Crispim, Profa. Flávia Martins, Profa. Maria do Socorro e Prof. Fernando Moraes. Suas valiosas contribuições permitiram a construção da tese em tela.

Sou muito grato ao Sr. Arnaldo, família e funcionários (Shopping dos Compressores) pelas inúmeras conversas e trocas de conhecimentos relacionados a montagem dos experimentos desta pesquisa.

Agradeço ao Sr. “Cigano” (*in memoriam*) da COOPERCARNE, Santa Rita, Paraíba.

^{*}Fala extraída do filme Madagascar 2: A Grande Escapada. Paramount Pictures (2008).

Registro meus agradecimentos ao Sr. Francisco e sua família, ao Sr. Manoel e sua família, ambos residentes do Assentamento de Reforma Agrária Ponta de Gramame, em João Pessoa/PB, bem como ao Sr. Antônio Jorge, sua esposa Maria Helena, ao “Marquim” e ao “Vezim”, todos moradores do Assentamento de Reforma Agrária Dona Helena, em Cruz do Espírito Santo/PB. A troca de conhecimento, as boas prosas e o fornecimento de insumos foram muito importantes para a execução dos experimentos deste estudo e, ao mesmo tempo, serão indispensáveis para outras pesquisas que virão.

Ao Prof. Cláudio Costa e ao Prof. Ércules Diniz, sou muito grato pelas contribuições feitas à versão final da tese.

Registro minha gratidão ao pesquisador Romero Lima (MundialTech) por suas sugestões.

Sou muito agradecido à Empresa Indaiá, localizada em Odilândia, Santa Rita/PB, pela doação do reservatório IBC (*Intermediate Bulk Containers*) utilizado na construção de parte do biodigestor desta pesquisa.

Aos funcionários das empresas Refricon e Plásticos Kadoshi, ambas localizadas no centro de João Pessoa/PB, expresso minha gratidão pela paciência em selecionar os melhores equipamentos e materiais, que foram adaptações necessárias para esta pesquisa.

*“Terra, és o mais bonito dos planetas
Tão te maltratando por dinheiro
[...]
Vamos precisar de todo mundo
Um mais um é sempre mais que dois
Para melhor construir a vida nova
É só repartir melhor o pão
Recriar o paraíso agora
Para merecer quem vem depois”*

Trecho da Música: O Sal da Terra
(Alberto De Castro Guedes e Ronaldo Bastos)

Resumo

O desperdício de alimentos compromete recursos significativos, incluindo extensas áreas agrícolas, toneladas de alimentos e água, além de contribuir para emissões de gases do efeito estufa, acarretando sérios impactos socioambientais mundiais. O objetivo desta tese, desenvolvida em três artigos, foi investigar as potencialidades do tratamento anaeróbico dos resíduos alimentares hortifrutícolas gerados pela Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas, localizada em João Pessoa, Paraíba, com foco na promoção do saneamento ambiental e na geração de biogás, em atendimento ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 da Organização das Nações Unidas. No primeiro artigo, foram feitas pesquisas sobre o uso do biogás na geração de eletricidade em dissertações e teses do acervo da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, considerando os períodos históricos do biogás no Brasil. O estudo mostrou que as regiões Sudeste e Sul do Brasil lideraram em número de publicações. No segundo artigo, foram utilizados resíduos alimentares hortifrutícolas, produzidos pela Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas, com vistas ao tratamento ambientalmente correto e a geração de biogás. Este estudo evidenciou que a biodigestão anaeróbica foi capaz de promover o saneamento ambiental, mas que o uso do digestato endógeno não favoreceu a produção de biogás inflamável. No terceiro artigo foi utilizado um biodigestor doméstico de 1 m³ para aclimatar resíduos alimentares hortifrutícolas, implementando ciclos quinzenais de biodigestão com digestato previamente aclimatado e recirculação de biogás. A combinação inédita das técnicas de Recirculação do Biogás e Aclimação prévia do digestato em biodigestor doméstico, com mínima dependência de inóculo, resultou em uma produção diária de 0,23 a 0,44 m³ de biogás inflamável. Esta tese destaca a importância crucial do biogás na produção de energia limpa e acessível (ODS 7 da ONU), na gestão de resíduos, no empoderamento feminino, no combate ao desmatamento e à pobreza energética, evidenciando o papel fundamental das instituições de ensino superior no Brasil na pesquisa e desenvolvimento da tecnologia de biodigestão anaeróbica, visando garantir o desenvolvimento sustentável em níveis local e nacional.

Palavras-chave: Saneamento Ambiental; Biogás; Geração Descentralizada; ODS 7

Abstract

Food waste compromises significant resources, including extensive agricultural areas, tons of food, and water, besides contributing to greenhouse gas emissions, resulting in serious global socio-environmental impacts. The aim of this thesis, developed in three articles, was to investigate the potential of anaerobic treatment of horticultural food waste generated by the Paraíba Supply and Agricultural Services Company, located in João Pessoa, Paraíba, focusing on promoting environmental sanitation and biogas generation, in line with Sustainable Development Goal 7 of the United Nations. In the first article, research was conducted on the use of biogas in electricity generation in dissertations and theses from the Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations, considering the historical periods of biogas in Brazil. The study showed that the Southeast and South regions of Brazil led in the number of publications. In the second article, horticultural food waste produced by the Paraíba Supply and Agricultural Services Company was used for environmentally correct treatment and biogas generation. This study showed that anaerobic digestion was able to promote environmental sanitation, but the use of endogenous digestate did not favor the production of flammable biogas. In the third article, a 1 m³ domestic biodigester was used to acclimatize horticultural food waste, implementing fortnightly digestion cycles with previously acclimatized digestate and biogas recirculation. The unique combination of biogas recirculation and prior acclimatization of digestate in a domestic biodigester, with minimal inoculum dependence, resulted in a daily production of 0.23 to 0.44 m³ of flammable biogas. This thesis highlights the crucial importance of biogas in clean and accessible energy production (UN SDG 7), waste management, female empowerment, combating deforestation, and energy poverty, demonstrating the fundamental role of higher education institutions in Brazil in researching and developing anaerobic digestion technology, aiming to ensure sustainable development at local and national levels.

Keywords: Environmental Sanitation; Biogas; Decentralized Generation; SDG 7

Resumen

El desperdicio de alimentos compromete recursos significativos, incluyendo extensas áreas agrícolas, toneladas de alimentos y agua, además de contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que conlleva graves impactos socioambientales a nivel mundial. El objetivo de esta tesis, desarrollada en tres artículos, fue investigar las potencialidades del tratamiento anaeróbico de los residuos alimentarios hortofrutícolas generados por la Empresa Paraibana de Abastecimiento y Servicios Agrícolas, ubicada en João Pessoa, Paraíba, con enfoque en la promoción del saneamiento ambiental y la generación de biogás, en cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 de las Naciones Unidas. En el primer artículo, se realizaron investigaciones sobre el uso del biogás en la generación de electricidad en disertaciones y tesis del acervo de la Biblioteca Digital Brasileña de Tesis y Disertaciones, considerando los períodos históricos del biogás en Brasil. El estudio mostró que las regiones Sudeste y Sur de Brasil lideraron en número de publicaciones. En el segundo artículo, se utilizaron residuos alimentarios hortofrutícolas, producidos por la Empresa Paraibana de Abastecimiento y Servicios Agrícolas, con miras al tratamiento ambientalmente correcto y la generación de biogás. Este estudio mostró que la digestión anaeróbica fue capaz de promover el saneamiento ambiental, pero que el uso del digestato endógeno no favoreció la producción de biogás inflamable. En el tercer artículo se utilizó un biodigestor doméstico de 1 m³ para aclimatar residuos alimentarios hortofrutícolas, implementando ciclos quincenales de digestión con digestato previamente aclimatado y recirculación de biogás. La combinación única de las técnicas de Recirculación del Biogás y Aclimatación previa del digestato en biodigestor doméstico, con mínima dependencia de inóculo, resultó en una producción diaria de 0,23 a 0,44 m³ de biogás inflamable. Esta tesis destaca la importancia crucial del biogás en la producción de energía limpia y accesible (ODS 7 de la ONU), en la gestión de residuos, en el empoderamiento femenino, en la lucha contra la deforestación y la pobreza energética, evidenciando el papel fundamental de las instituciones de enseñanza superior en Brasil en la investigación y desarrollo de la tecnología de digestión anaeróbica, con el fin de garantizar el desarrollo sostenible a nivel local y nacional.

Palabras clave: Saneamiento Ambiental; Biogás; Generación Descentralizada; ODS 7

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO II

Figura 1	Representação esquemática do Brasil e do Estado da Paraíba. Destaque para o local dos experimentos de estabilização anaeróbica e geração de biogás.....	67
Figura 2	EMPASA/JP. Trajeto realizado durante a coleta de resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs para biodigestão.....	67
Figura 3	Principais destinos dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs gerados pela Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - EMPASA/JP.....	68

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO I

Quadro 1	Ambiente regulatório da geração, uso, tarifação, distribuição e conversão em energia elétrica do biogás/biometano no Brasil.....	58
----------	--	----

CAPÍTULO II

Gráfico 1	Valores de pH (superior e inferior) referentes ao Ciclo 1, ou seja, período experimental entre o dia 1 e o dia 60.....	77
Gráfico 2	Valores de pH (superior e inferior) referentes ao Ciclo 2, ou seja, período experimental entre o dia 61 e o dia 120.....	78
Gráfico 3	Valores de pH (superior e inferior) referentes ao Ciclo 3, ou seja, período experimental entre o dia 121 e o dia 180.....	78
Gráfico 4	Ciclos de Experimentação: Valores de Biogás Recirculado (linha do gráfico em azul), Biogás Drenado (linha do gráfico em vermelho) e Biogás Produzido (linha do gráfico em amarelo) expressos em L/h nos três Ciclos (1, 2 e 3) durante os 180 dias de estabilização dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs e produção de biogás.....	79

CAPÍTULO III

Gráfico 1	Comportamento da Recirculação do Biogás, Drenagem do Biogás e Biogás Produzido, em litros por hora (L/h), durante os 8 Ciclos quinzenais. Toda a experimentação totalizou 120 dias, nos quais foram promovidos o saneamento ambiental através da estabilização dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs para produção de biogás inflamável.....	112
Gráfico 2	Valores médios com desvios-padrão para Recirculação do Biogás, Drenagem do Biogás e Biogás Produzido, em litros por hora (L/h), durante os 8 Ciclos quinzenais.....	113

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1	Dissertações e teses relacionadas ao biogás para geração de energia elétrica durante os períodos históricos do biogás no Brasil.....	54
----------	--	----

CAPÍTULO II

Tabela 1	Conteúdo inserido no biodigestor em cada um dos três Ciclos experimentais, ou seja, quantitativo de resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs, Água e Alcalinizantes inseridos no Biorreator, bem como o volume de Digestato que permaneceu no interior do equipamento entre os Ciclos.....	69
Tabela 2	Estatística Descritiva para Temperatura do Biodigestor.....	72
Tabela 3	Estatística Descritiva para a Recirculação do Biogás.....	72
Tabela 4	Estatística Descritiva para a Drenagem do Biogás.....	73
Tabela 5	Estatística Descritiva para o Biogás Produzido.....	75
Tabela 6	Estatística Descritiva para o pH da parte superior e inferior do conteúdo em digestão.....	76
Tabela 7	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 1.....	80
Tabela 8	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 2.....	81
Tabela 9	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 3.....	81

CAPÍTULO III

Tabela 1	Estatística Descritiva para Temperatura do Biodigestor.....	96
Tabela 2	Estatística descritiva para Recirculação do Biogás e Drenagem do Biogás....	97
Tabela 3	Estatística Descritiva para o Biogás Produzido.....	101
Tabela 4	Estatística descritiva para pH superior e pH inferior.....	105
Tabela 5	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 1.....	107
Tabela 6	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 2.....	108
Tabela 7	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 3.....	108
Tabela 8	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 4.....	109
Tabela 9	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 5.....	109

Tabela 10	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 6.....	110
Tabela 11	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 7.....	110
Tabela 12	Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 8.....	111

LISTA DE SIGLAS

ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano
ABRAS - Associação Brasileira de Supermercados
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BDTD - Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
CEASAs - Centrais de Abastecimento
COVID-19 - *Corona Virus Disease*
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPASA/JP - Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - Seção João Pessoa, Paraíba
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
ETEs - Estações de Tratamento de Esgotos
FLV - Frutas, Legumes e Vegetais
GEEs - Gases de Efeito Estufa
GLP - Gás Liquefeito de Petróleo
GN - Gás Natural
HAPs - Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
IBC - *Intermediate Bulk Containers*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT - Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IES - Instituições de Ensino Superior
MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MDL - Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU - Organização das Nações Unidas
PM_{2,5} - Partículas Finas de 2,5 Micrômetros de Diâmetro
RSUs - Resíduos Sólidos Urbanos
RAHs - Resíduos Alimentares Hortifrutícolas
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN - Sistema Interligado Nacional
STIBB - Sistema Tecnológico de Inovação Brasileiro do Biogás

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	28
2.1 O Biogás no Contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	28
2.2 O Papel Fundamental da Pesquisa Acadêmica na Promoção do Uso do Biogás na Geração de Energia Elétrica no Brasil.....	32
2.3 Desafios Ambientais da Produção de Alimentos e Estratégias Sustentáveis.....	32
2.4 Desperdício de Alimentos e a Gestão de Resíduos Alimentares: Realidades Globais e Diferenças Regionais.....	34
2.5 Tecnologias para o tratamento de resíduos orgânicos: o papel da digestão anaeróbica no saneamento ambiental, geração de biogás e recuperação de nutrientes.....	36
3. REFERÊNCIAS.....	39
Capítulo I - Evolução das pesquisas em dissertações e teses publicadas no Brasil sobre geração de eletricidade a partir do biogás.....	50
1. Introdução.....	50
2. Materiais e métodos.....	52
3. Resultados e discussões.....	53
4. Considerações finais.....	60
5. Referências.....	61
Capítulo II - Estabilização de resíduos alimentares hortifrutícolas em biodigestor anaeróbico: oportunidade de saneamento ambiental e geração de biogás.....	64
1. Introdução.....	64
2. Materiais e Métodos.....	67
3. Resultados e discussões.....	71
3.1 Temperatura do Biodigestor.....	71
3.2 Recirculação do Biogás.....	72
3.3 Drenagem do Biogás.....	73
3.4 Biogás Produzido.....	74
3.5 pH superior e pH inferior.....	76

3.6 Correlações.....	79
4. Conclusão.....	82
5. Referências.....	83
Capítulo III - Produção de biogás a partir da estabilização anaeróbica de resíduos alimentares hortifrutícolas: Um processo sustentável com mínima dependência de inóculo.....	89
1. Introdução.....	89
2. Materiais e Métodos.....	92
3. Resultados e discussões.....	95
3.1 Temperatura do Biodigestor.....	95
3.2 Recirculação do Biogás e Drenagem do Biogás.....	97
3.3 Biogás Produzido.....	100
3.4 pH superior e pH inferior.....	104
3.5 Correlações entre os parâmetros.....	107
4. Conclusão.....	117
5. Referências.....	118
4. DISCUSSÕES GERAIS DA TESE.....	125
5. CONCLUSÃO DA TESE.....	130

Apresentação

A proposta deste doutorado está centrada na pesquisa quantitativa, a qual é apresentada em forma de artigos científicos que compõem os capítulos desta tese. Foram desenvolvidos três artigos, sendo o primeiro capítulo (artigo) intitulado “*Evolução das pesquisas em dissertações e teses publicadas no Brasil sobre geração de eletricidade a partir do biogás*”. Este artigo foi aceito para publicação em 03 de novembro de 2023 na Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (ISSN 2359-1412). Conforme evidencia seu título, a investigação abordou as repercussões da temática do biogás na geração de energia elétrica nos trabalhos de conclusão de pós-graduações *stricto sensu* em instituições de ensino superior brasileiras - IES, seguindo os recortes históricos nacionais sobre o biogás, delineados por De Oliveira e Negro (2019). A Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações emerge como uma extraordinária ferramenta, onde pesquisadores de diversas áreas do conhecimento de mais de 123 IES depositam seus trabalhos acadêmicos.

A escolha desta plataforma para a elaboração do mencionado capítulo baseou-se na proeminência das dissertações e teses nela depositadas, uma vez que é durante a elaboração destes trabalhos que muitas publicações em periódicos científicos nacionais e internacionais são originadas. Assim, graduados e profissionais dos mais variados setores brasileiros, tanto públicos quanto privados, são plenamente representados nas publicações de fácil e gratuito acesso em uma das maiores plataformas *online* de teses e dissertações: a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações - BDTD, acessível por meio do endereço <https://bdtd.ibict.br/vufind/>.

O segundo capítulo (artigo) intitulado “*Estabilização de resíduos alimentares hortifrutícolas em biodigestor anaeróbico: oportunidade de saneamento ambiental e geração de biogás*” tratou do manejo ambientalmente adequado da fração dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs gerados na Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - EMPASA (Seção João Pessoa/PB), os quais ainda são destinados ao aterro sanitário municipal, mas apresentam potencial para produção de biogás. Para os testes de biodigestão e produção de biogás, o artigo levou em consideração os levantamentos feitos pela pesquisadora Santos (2019) referentes aos resíduos gerados na citada empresa.

No terceiro capítulo (artigo) intitulado “*Produção de biogás a partir da estabilização anaeróbica de resíduos alimentares hortifrutícolas: Um processo sustentável com mínima dependência de inóculo*”, semelhante ao segundo capítulo, também discorreu sobre o tratamento anaeróbico de resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs e a homogeneização do

conteúdo em digestão realizada a partir da recirculação do biogás. No entanto, o digestato aclimatado, como fonte de inóculo endógeno, foi elaborado a partir de um incremento mínimo de inóculo exógeno (esterco fresco de bovino). A aclimação prévia serviu como garantia de inóculo constante, excluindo a necessidade ou mesmo a dependência de esterco bovino como inoculante. Esta técnica foi adaptada das investigações das pesquisadoras Klang et al. (2015) e Klang et al. (2019), enquanto a recirculação do biogás, na promoção da homogeneização do conteúdo em digestão, foi adaptada do trabalho de Latha et al. (2019).

As investigações abordadas nos capítulos II e III debruçaram-se sobre o potencial de geração de biogás inflamável durante a promoção do saneamento ambiental, por meio do tratamento anaeróbico dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs, no contexto do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável - ODS 7. Para isso, foi concebido um biodigestor de teste (em escala doméstica), empregando componentes disponíveis entre comerciantes de sucata.

A combinação inédita das técnicas de Aclimação Prévia e Recirculação de Biogás, condicionada ao biogás produzido (via sistema de Drenagem) em biodigestores domésticos, foi detalhada nos capítulos II e III. Essas técnicas podem ser implementadas em biodigestores domésticos existentes, inclusive com mínima dependência de esterco bovino (fonte de inóculo), conforme abordado no capítulo III. A parte experimental desta tese foi conduzida na Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - EMPASA (Seção João Pessoa/PB). Por fim, após os capítulos, encontram-se as Discussões Gerais da Tese e a Conclusão.

Esta tese se destaca, ainda, pela maneira como foi concebida. Todas as suas partes foram desenvolvidas de forma holística, permitindo o diálogo entre diversos campos do conhecimento, como Agroecologia, Biologia, Ecologia, Física, Geografia, História e Química. Logo, uma abordagem interdisciplinar esteve presente em todas as suas etapas de construção, desde a identificação dos objetos de estudo, passando pelas investigações e resultados, até as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1. Introdução

No mundo o desperdício de alimentos é um problema que compromete cerca de 1,4 bilhão de hectares, correspondendo a aproximadamente 30% da produção agrícola anual. Esses alimentos desperdiçados representam 1,3 bilhão de toneladas de resíduos, o que poderia minorar a fome ou subnutrição de quase 1 bilhão de pessoas. Além disso, o desperdício de alimentos é uma das principais fontes de gases indutores do efeito estufa - GEEs. Se fosse um país, seria o terceiro maior emissor de GEEs, ficando atrás dos Estados Unidos e da China. Esses resíduos também levam ao desperdício de 250 trilhões de litros de água e causam impactos socioambientais significativos (FAO, 2013; SABIO et al., 2015; FAO et al., 2019; JESWANI et al., 2021).

A má gestão dos resíduos alimentares tem consequências negativas para a saúde humana, especialmente entre populações socialmente desassistidas. Doenças como gastroenterites e parasitoses estão frequentemente relacionadas com a falta de acesso a tecnologias de tratamento adequado de resíduos orgânicos. A prevenção dessas doenças depende de um gerenciamento eficaz dos resíduos e de saneamento adequado, o que poderia evitar gastos públicos em tratamentos de saúde relacionados com esses problemas. Além disso, a decomposição anaeróbia não controlada desses resíduos resulta em emissões de poluentes ambientais prejudiciais (ZIRABA et al., 2016; ERIKSSON; SPÅNGBERG, 2017; NOLAN et al., 2018; XUE; LIU, 2019; SERUGA et al., 2020; SHURSON, 2020).

As práticas inadequadas na destinação de resíduos alimentares têm impactos negativos em vários aspectos. A degradação ambiental, a perda de biodiversidade e a poluição atmosférica são algumas das consequências dessas medidas. A poluição atmosférica ocorre devido à liberação de GEEs e à supressão da camada de ozônio. Além disso, a contaminação de recursos, como água potável, solo agricultável e alimentos de origem aquática, são graves problemas resultantes da má gestão dos resíduos alimentares. Esses impactos afetam diretamente setores econômicos, a exemplo da pesca, turismo e navegabilidade, resultando em prejuízos econômicos significativos (UN, 2015; GAO et al., 2017; LEINWEBER et al., 2017; CAMPBELL-LENDRUM; PRÜSS-USTÜN, 2018; JESWANI et al., 2021).

A destinação dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs para aterros sanitários ainda é comum em vários municípios brasileiros, o que vai contra as exigências legais de beneficiamento desses resíduos por meio de tecnologias de recuperação, como a compostagem para uso agrícola. No Brasil, mais de 50% dos RSUs são compostos por matéria orgânica. Do total de RSUs coletados no país, em 2022, (76,1 milhões de toneladas),

cerca de 61% foram destinados a aterros sanitários, enquanto 39% acabaram em lixões e aterros controlados. A região Nordeste tem 83% de cobertura de coleta de RSUs, enquanto a média nacional está em 93% (ABRELPE, 2012; PIRES, 2013; MELLO, 2018; NOLAN et al., 2018; WAQAS et al., 2018; GUVEN et al., 2019; ABRELPE, 2022).

Atualmente, a destinação dos RSUs para aterros sanitários não é a forma mais eficaz de lidar com o descarte desses resíduos, mesmo em estabelecimentos modernos que adotam práticas de segregação e reciclagem de materiais e possuem usinas de beneficiamento de biogás. O potencial dos RSUs está longe de ser plenamente explorado, uma vez que muitos recursos valiosos e essenciais, como água, nutrientes e combustíveis, são perdidos quando esses resíduos são depositados em aterros sanitários, principalmente a sua fração orgânica. A necessidade de aproveitamento energético da fração orgânica contida nos RSUs é urgente, visto que práticas mais sustentáveis de base agroecológica, por exemplo, podem ser implementadas em pequena ou grande escala (FAUCON et al., 2015; ABRELPE, 2016; MEKONNEN; HOEKSTRA, 2018; STEPHEN; PERIYASAMY, 2018; SHURSON et al., 2020; VAN DER WIEL et al., 2020; JUPP et al., 2021).

Apesar dos avanços na universalização dos serviços de energia, ainda existem regiões no mundo que enfrentam dificuldades em obter acesso contínuo e de qualidade a fontes modernas e/ou renováveis de energia. Em países em desenvolvimento, há áreas onde as pessoas não têm acesso à rede de fornecimento de energia elétrica, gás natural, gás liquefeito de petróleo ou, simplesmente, a renda familiar é insuficiente para adquirir regularmente essas fontes energéticas. Para além dos desafios conhecidos, crises humanitárias e fenômenos naturais podem comprometer a oferta de energia pelos meios convencionais, especialmente em situações de isolamento social decorrentes de epidemias/pandemias de alta virulência, como a COVID-19 (IEA et al., 2019; PUZZOLO et al., 2019; ROE et al., 2020; WHO, 2021; ZHAO; YOU, 2021).

Estudos recentes têm investigado o impacto da pandemia da COVID-19 na geração de resíduos alimentares, nas tecnologias de tratamento, na recuperação de recursos desses resíduos e no acesso a formas seguras, limpas e constantes de energia. Especialmente em populações vulneráveis de países com baixos índices de desenvolvimento humano, a pandemia exacerbou os desafios existentes, afetando a dinâmica de produção, distribuição e consumo de alimentos, assim como a disponibilidade de energia para aquecimento e cozimento (IEA et al., 2019; ROE et al., 2020; WHO, 2021; ZHAO; YOU, 2021).

A decomposição anaeróbica não controlada da matéria orgânica, proveniente de atividades humanas, apresenta um potencial significativo de impacto ambiental negativo. Esse

processo gera dois subprodutos, um líquido e um gasoso. O líquido, conhecido como chorume, pode conter microrganismos e nutrientes que contaminam o solo e corpos de água, como lençóis freáticos, rios e lagos. Quando corpos hídricos recebem descargas de chorume bruto, podem apresentar níveis perigosos de nitrato, especialmente em águas subterrâneas, e experimentar um aumento excessivo de algas, cianobactérias e macrófitas aquáticas em águas superficiais. Isso leva à redução do oxigênio dissolvido, mortandade de peixes, comprometimento da potabilidade dos reservatórios, restrições à navegabilidade e impactos negativos significativos na biodiversidade (ANGGONO, 2017; JI et al., 2017; PAYNE et al., 2017; MELLO, 2018; VANEECKHAUTE; FAZLI, 2020).

O biogás, resultante da decomposição anaeróbica, é uma mistura de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), vapor de água e vestígios de outros gases, como hidrogênio molecular (H_2). Em ambientes não controlados, há uma tendência destes compostos serem liberados na atmosfera. O CO_2 e o CH_4 funcionam como gases indutores do efeito estufa (GEEs), sendo o CH_4 28 vezes mais potente que o CO_2 . Além disso, H_2S e NH_3 podem ser prejudiciais a organismos terrestres e aquáticos, corrosivos para estruturas metálicas ferrosas (no caso do H_2S) e contribuir para a formação de compostos associados com a chuva ácida e à degradação da camada de ozônio, como óxidos de enxofre e nitrogênio. Quando as concentrações de CH_4 no biogás ultrapassam 50%, ele se torna inflamável, assim, durante a estabilização anaeróbica para fins energéticos, o metano é o componente de maior interesse calorífico deste biocombustível (MASEBINU et al., 2014; ANGGONO, 2017; GUANDALINI et al., 2017; IPCC, 2013; PECORINI; IANNELLI, 2020).

O tratamento anaeróbico de resíduos alimentares por meio de biodigestores é uma tecnologia que pode desempenhar um papel significativo no saneamento ambiental local, especialmente em áreas onde não há sistemas públicos de coleta e tratamento de resíduos orgânicos disponíveis. Além de auxiliar na redução dos impactos ambientais, o tratamento anaeróbico de resíduos alimentares em ambientes controlados gera dois insumos importantes para a autossuficiência energética e produção de alimentos: o biogás, que serve como biocombustível, e o digestato, uma solução líquida e/ou pastosa rica em nutrientes e microrganismos utilizada na agricultura (OFON et al., 2021; WHO, 2021; CHOWDHURY et al., 2022; OBAIDEEN et al., 2022).

Assim, o biogás pode ser utilizado como uma fonte de energia térmica segura, ecológica e contínua para aquecimento e cozimento de alimentos. Atualmente, cerca de 2,6 bilhões de pessoas, em todo o mundo, sofrem com a falta de acesso a fontes de energia adequadas, dependendo de lenha, carvão mineral, carvão vegetal, esterco seco e resíduos

sólidos urbanos como principais fontes de combustível, adquiridos de maneira precária. Essa precariedade na obtenção de fontes de energia resulta em aproximadamente 3,8 milhões de mortes anuais devido a câncer, doenças pulmonares obstrutivas crônicas, acidentes vasculares cerebrais e doenças cardíacas em países de baixa e média renda (IEA et al., 2019; MCDUFFIE et al., 2021; PAUDEL et al., 2021; WHO, 2021).

A queima de biomassa, carvão mineral e querosene libera hidrocarbonetos aromáticos policíclicos - HAPs, partículas finas - $PM_{2,5}$ e outros compostos orgânicos na fumaça, prejudicando especialmente crianças, mulheres e idosos que permanecem por mais tempo em ambientes residenciais e, portanto, são mais expostos a essas substâncias prejudiciais à saúde. A poluição atmosférica doméstica está relacionada a aproximadamente 5% do total de doenças em todo o mundo (MCCORD et al., 2017; RAHMAN et al., 2019; PYE et al., 2020; PAUDEL et al., 2021; WHO, 2021).

A recuperação dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs encontra apoio na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), fundamentada na Lei Federal n.º 12.305/2010. Os RAHs são ricos em nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), e seu manejo adequado pode prevenir a contaminação de corpos hídricos, solo, atmosfera, biodiversidade e saúde humana (BRASIL, 2010; JI et al., 2017; VANECKHAUTE; FAZLI, 2020; VAN DER WIEL et al., 2020).

A gestão adequada dos RAHs por meio da estabilização anaeróbica tem o potencial de impulsionar o desenvolvimento socioeconômico de diversas comunidades, incluindo áreas rurais, periurbanas, indígenas, quilombolas, refugiados, entre outras. Além da produção de biogás, o digestato resultante da biodigestão pode melhorar significativamente a fertilidade do solo, permitindo o cultivo local de alimentos a partir de sementes nativas (sementes da paixão). Isso elimina a dependência de cultivar alimentos geneticamente modificados, que frequentemente exigem o uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes sintéticos. Além disso, a implementação de sistemas descentralizados de produção de energia em pequena escala, por meio do biogás, pode garantir um fornecimento contínuo de energia e promover a autossuficiência energética nessas regiões, atendendo às necessidades básicas das famílias e comunidades locais (FAO 2013; FURLAN, 2016; LATIF et al., 2017; RAHMAN et al., 2019; FAO et al., 2020; CHOWDHURY et al., 2022).

Esse processo também pode gerar produtos e serviços adicionais, atendendo outras demandas e contribuindo para o desenvolvimento sustentável local, ao promover a economia circular, em que resíduos de um processo são aproveitados em outro, preservando recursos ambientais, como madeira, nutrientes minerais, água e combustíveis, ou seja, o manejo

adequado da fração orgânica dos RSUs promove um ciclo produtivo ordenado (SURENDRA et al., 2014; FURLAN, 2016; ZHAO; YOU, 2021).

Outrossim, o biogás gerado no processo de tratamento anaeróbio dos resíduos alimentares pode ser utilizado como uma alternativa à queima direta de biomassas, desencorajando a devastação da vegetação nativa causada pelo uso de lenha e carvão vegetal, que ainda são amplamente empregados. Os excedentes da produção agrícola, possibilitados pelo aproveitamento de biofertilizantes anaeróbicos, bem como os alimentos preparados a partir do biogás, podem ser trocados e/ou comercializados entre os membros da comunidade ou fora dela, representando instrumentos valiosos para o desenvolvimento sustentável local em uma lógica de economia circular (DHINGRA et al., 2011; SURENDRA et al., 2014; DENG et al., 2017; KAPOOR et al., 2020; ELLACURIAGA et al., 2021).

Supermercados, feiras livres, centrais de abastecimento e outros estabelecimentos descartam grandes volumes de alimentos hortifrutícolas que poderiam ser utilizados na alimentação humana, agravando o problema da fome e contribuindo com a poluição e as mudanças climáticas. Diferentes hábitos alimentares da população humana, influenciados por aspectos culturais, religiosos, poder aquisitivo, oferta e demanda, sazonalidade e distância entre produtores e consumidores, afetam a quantidade e a qualidade dos RAHs gerados (ERIKSSON et al., 2015; ONU, 2015; ERIKSSON; SPÅNGBERG, 2017; ABDELRAFI, 2018; CHRISTO et al., 2018; MU'AZU et al., 2019).

O aproveitamento desses resíduos o mais próximo possível de sua fonte de geração contribui para a disseminação da geração de energias limpas, renováveis e de menor custo, a exemplo do biogás. Como discutido, o biogás pode fornecer calor para o cozimento, calefação e eletricidade, bem como impulsionar a produção de novos alimentos de maneira otimizada, descentralizada e alinhada aos aspectos socioambientais locais pela utilização do digestato. Essas abordagens, dentre muitas outras, estão em consonância com vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS, estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, ou seja, os ODS 2, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14 e 15. Portanto, o biogás pode ser estratégico para a Agenda 2030 da ONU (IEA et al., 2019; CÂNDIDO et al., 2021; DHUNGANA et al., 2022; CHOWDHURY et al., 2022; OBAIDEEN et al., 2022).

A Agenda 2030, para o Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas - ONU, elaborou, em 2015, 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS. O ODS 7 (Energia Acessível e Limpa) estabelece, em sua meta 7.1, que, até 2030, sejam assegurados a todas e todos formas energéticas produzidas de maneira sustentável, acessível, moderna e de baixo custo. O ODS 7.b postula que as tecnologias atuais de geração de energia

sejam modernizadas para atender a todas e todos, especialmente em países em desenvolvimento, sem abdicar da sustentabilidade ambiental em seus processos (ONU, 2015; IEA et al., 2019; OBAIDEEN et al., 2022).

Além dos benefícios do tratamento anaeróbio dos RAHs, o biogás gerado nesse processo pode ser um excelente substituto para o gás natural - GN. Isso ocorre porque o metano presente no biogás é quimicamente idêntico ao metano encontrado no GN extraído de jazidas de petróleo. O GN é um combustível fóssil amplamente utilizado há décadas em diversos setores, como indústria, transporte, termelétricas e abastecimento residencial em todo o mundo, logo, a infraestrutura existente em torno do GN pode permitir a rápida adoção do biogás em escala industrial (centralizada) ou doméstica (descentralizada) (FAO, 2013; GUANDALINI et al., 2017; MONTOYA et al., 2018; KANDA et al., 2022).

A produção de biogás desempenha um papel crucial na geração de energia elétrica, tanto em sistemas centralizados quanto descentralizados. Visto que a decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos, como restos culturais, alimentares e esgotos, constituem alguns dos muitos substratos que são capazes de gerar este combustível limpo e renovável para conversão em eletricidade. No contexto centralizado, a produção de biogás é geralmente realizada em instalações maiores, como usinas de biogás ou aterros sanitários. Nesses sistemas, a coleta de grandes volumes de resíduos permite a produção contínua de biogás, que pode ser utilizado para gerar eletricidade em larga escala, contribuindo para a matriz elétrica de uma região ou várias regiões de um país (PIZZUTI et al., 2016; CHRISTO et al., 2018; BUGGE et al., 2019; YAQOUB et al., 2021; DHUNGANA et al., 2022).

Pequenas instalações de biodigestão em fazendas, indústrias ou até residências permitem a produção localizada de energia elétrica a partir de resíduos orgânicos gerados localmente, diminuindo a carga orgânica residual a ser gerida por órgãos públicos de limpeza urbana. Isso não apenas reduz a dependência de fontes convencionais de energia, também ajuda a enfrentar desafios como o acesso à eletricidade em áreas remotas ou pouco desenvolvidas, logo, as instituições de pesquisa como as universidades têm papel fundamental no desenvolvimento de tecnologias do biogás na geração de energia elétrica (SÄRKILAHTI et al., 2017; DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019; AJAY et al., 2021; KANDA et al., 2022).

A forte presença agrícola no Brasil resulta em grandes volumes de resíduos sem tratamento adequado. Apesar do potencial do setor agrícola na geração de biogás para eletricidade, mais estudos são necessários. As instituições de ensino superior - IES brasileiras, devido à sua competência reconhecida, desempenham um papel estratégico na utilização desses resíduos para a geração de energia elétrica a partir do biogás. Portanto, as IES são

essenciais para a transição energética e o alcance de uma matriz elétrica totalmente descarbonizada, ao mesmo tempo, que se obtém saneamento ambiental (rural e urbano). Conforme a Associação Brasileira de Biogás e Biometano - ABIOGÁS, o potencial inexplorado no país para a geração de energia elétrica a partir do biogás é de 36% da eletricidade consumida atualmente (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019; ABIOGÁS, 2021).

Em 2020, o consumo de energia elétrica no Brasil foi de 475 TWh, destes o Estado da Paraíba correspondeu com 5.598 GWh e gerou outros 1.501 GWh. Por outro lado, a EMPASA/JP produziu, em 2017, uma média de 162 toneladas de RSUs todos os meses. Grande parte destes resíduos, cerca de 65% (ou 105,3 toneladas), era composta de resíduos orgânicos que tinham como destino, majoritariamente, o aterro sanitário municipal (ERIKSSON; SPÅNGBERG, 2017; SANTOS, 2019; SANTOS et al., 2020; EPE, 2021).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, em 2022, os domicílios localizados no município de João Pessoa (capital do Estado da Paraíba) apresentavam diferentes fontes energéticas para o cozimento de alimentos. Assim, o botijão de gás era utilizado por 237 mil residências, energia elétrica em 153 mil moradias e o gás encanado por outras 39 mil. Embora a principal forma de obtenção de energia térmica seja através do botijão de gás, fontes precárias como lenha e carvão ainda são utilizadas em 5 mil habitações pessoenses, colocando a saúde dos moradores em risco por exposição a toxinas da fumaça e fuligem (MCCORD et al., 2017; WHO, 2021; IBGE, 2023).

Mesmo apresentando enorme potencial energético, os resíduos orgânicos continuam sendo ignorados. Se por um lado existe forte demanda por formas de energias limpas e acessíveis (ODS 7), por outro é possível categorizar tal marginalização como desprezo intencional de recursos energéticos. De igual modo, os substratos negligenciados para geração de biogás, podem ser renomeados como recursos energéticos intencionalmente desprezados. A presente tese visa contribuir com a mudança deste paradigma.

Assim, foram elaboradas as seguintes hipóteses: Houve aumento no número de publicações de dissertações e teses que investigaram a aplicação do biogás na geração de energia elétrica ao longo do período histórico do biogás no Brasil. Este aumento se deu de maneira uniforme entre as IES das cinco regiões do país; A estabilização anaeróbica dos RAHs promove o saneamento ambiental da EMPASA/JP e gera energia acessível, limpa e renovável em atendimento ao ODS 7 da ONU, demonstrando que a biodigestão é uma alternativa energética garantidora do desenvolvimento sustentável local.

O objetivo geral da tese foi investigar as potencialidades do tratamento anaeróbico dos RAHs, gerados pela EMPASA/JP, na produção do saneamento ambiental e na geração de biogás em atendimento ao ODS 7 da ONU.

Para alcançar o objetivo geral, foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o engajamento das IES com o tema do biogás para a produção de energia elétrica, evidenciado pelo volume de dissertações e teses publicadas ao longo dos diferentes períodos históricos do desenvolvimento do biogás no Brasil;
- Testar o tratamento anaeróbico dos RAHs na promoção do saneamento ambiental;
- Testar a produção de biogás através da biodigestão anaeróbica dos RAHs para geração de energia acessível, limpa e renovável em atendimento ao ODS 7 da ONU;
- Testar o uso de alcalinizantes como forma de manter o pH em faixa ótima da digestão anaeróbica para produção de biogás inflamável;
- Testar a estabilização por via anaeróbica dos RAHs em digestato previamente aclimatado para produção de biogás em atendimento ao ODS 7 da ONU;
- Testar o uso de alcalinizante biogênico para manter o pH em faixa ótima da digestão anaeróbica durante a produção de biogás inflamável.

2. Referencial Teórico

2.1 O Biogás no Contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

A queima do biogás durante o cozimento de alimentos não libera fuligem ou materiais particulados, graves ameaças a saúde dos moradores que fazem uso da lenha e carvão para o preparo de alimentos (MCCORD et al., 2017; WHO, 2021). Para Rahman et al. (2019) os biodigestores domésticos contribuíram com o empoderamento feminino, redução de poluentes atmosféricos em ambiente doméstico, diminuição de problemas respiratórios e irritação dos olhos, bem como uma maior aproximação dos ODS 3, 4, 5, e 7.

Não é raro que mulheres e crianças sejam as maiores beneficiadas pelo uso do biogás, pois são elas as principais responsáveis pelo provimento de lenha em vários países de baixa renda, além de estarem sujeitas a todo tipo de violência durante as buscas pelo combustível, bem como a exposição a poluição do ar durante sua queima para o cozimento de alimentos (PUZZOLO et al., 2019; PAUDEL et al., 2021; STONER et al., 2021).

Por décadas, os Rohingya (minorias muçulmana em Myanmar) sofrem constantes violações de direitos humanos. A partir de 2017, com a operação de “limpeza étnica”, encampada pelos militares birmaneses, mais de 700 mil Rohingya se refugiaram no país

vizinho, Bangladesh. A busca por combustíveis para aquecimento e cozimento de alimentos colocam em risco mulheres e crianças refugiadas, além de ter contribuído para um rápido desflorestamento no país anfitrião (ALAM, 2019; ANSAR; MD. KHALED, 2021; CHOWDHURY et al., 2022).

O estudo de Chowdhury et al. (2022) evidenciou que o biogás foi estratégico na proteção de mulheres e crianças e no fornecimento de energia térmica e elétrica em campos de refugiados Rohingya. Os pesquisadores apontaram que a substituição da lenha pelo biogás reduziu em 85% as emissões de CO₂, além de ter combatido o desflorestamento e a desertificação nas regiões dos acampamentos. A adoção de biodigestores domésticos entre os refugiados contribuiu para o alcance dos ODS 2, 3, 7, 8, 9, 11, 12 e 13, concluem os autores.

Resultados semelhantes foram relatados na investigação de Rahman et al. (2019), que trabalharam com moradores empobrecidos em áreas rurais de Bangladesh. Para estes autores, os biodigestores proporcionaram uma economia média de tempo diário de 1h e 43min., em cada família. Mulheres e crianças foram as principais beneficiadas, visto que menos tempo foi gasto com o manejo de lenha (coleta, transporte, beneficiamento e armazenamento), limpeza de utensílios da cozinha e preparo e cozimento de alimentos. Mais tempo dedicado a própria educação e de suas crianças também foram relatadas pelas mulheres durante a pesquisa.

No Nepal, Paudel et al. (2021) estimaram que 69% dos nepaleses ainda fazem uso de combustíveis sólidos (biomassas) para o cozimento de alimentos, este número sobe para mais de 80% entre os habitantes das zonas rurais. Para os autores, mulheres e crianças são as principais vítimas de problemas de saúde relacionados a emissão de poluentes atmosféricos no interior das casas. O biogás é uma importante tecnologia para melhorar o bem-estar delas, preservar recursos vegetais e o alcance do ODS 7 no país, finalizaram os pesquisadores.

No entanto, o esterco bovino é o principal substrato utilizado em biodigestores domésticos no Nepal, enquanto outros resíduos não são aplicados na geração de biogás, apesar das culturas do arroz, milho, trigo e cevada serem abundantes no país. Os resíduos alimentares negligenciados para a produção de biogás, além de serem um recurso energético desperdiçado, acarretam problemas de saúde pública e poluição ambiental (JOSHI et al., 2021; LOHANI et al., 2021; OBAIDEEN et al., 2022).

A exemplo do que acontece neste país asiático, muitos operadores de biodigestores privilegiam excremento animal, em detrimento de resíduos alimentares. Tal prática pode gerar dois efeitos colaterais principais: incentivar o aumento de rebanhos de ruminantes, responsáveis por grande parte das emissões de GEEs antropogênicos; e, perda de potencial

energético a partir de resíduos alimentares evitados, enquanto o saneamento ambiental é ignorado.

Vários autores investigaram o uso de esterco na produção de biogás, chegando, em alguns casos, a sugerir a criação de pequenos rebanhos como fonte de substrato para assegurar a produção contínua de biogás e a descontinuação do uso de lenha. No entanto, os resíduos alimentares não tem recebido a mesma atenção de pesquisadores em biodigestores domésticos. Populações, especialmente aquelas em áreas rurais, periurbanas, isoladas e entre refugiados, frequentemente possuem estes resíduos em abundância, mas lhes são negadas o acesso ao saneamento ambiental e à fonte energética acessível e limpa, proporcionados por biodigestores geradores de biogás. Estudos que visem o estreitamento destas lacunas e a promoção do ODS 7 são prementes (SEARCHINGER et al., 2018; UHUNAMURE et al., 2019; JOSHI et al., 2021; LEMMA et al., 2021; NIU et al., 2021).

Outra forma de enfrentamento a problemática relacionada a queima direta de biomassas, durante o cozimento de alimentos, é o uso de fogões alimentados com energia elétrica ou gás liquefeito de petróleo - GLP. Tais estratégias têm sido relatadas por alguns autores para o alcance do ODS 7 (PACHAURI et al., 2018; ADENLE, 2020; MENSAH, 2022; PANDYASWARGO et al. 2022).

No entanto, como apontado por Pye et al. (2020), muitas famílias camaronesas que fazem uso de GLP, por exemplo, também utilizam lenha e/ou carvão para o preparo de alimentos. Para estes autores, tal cenário decorre de fatores como localização da moradia (zona rural), oferta insuficiente de vasilhames de GLP, elevação do preço do GLP (enquanto lenha e carvão são mais facilmente adquiridos e/ou com preços menores) e maior número de pessoas na mesma residência.

Achados semelhantes foram relatados por Pachauri et al. (2018) em países da América Central (Guatemala, Honduras e Nicarágua), Puzzolo et al. (2019) em países de baixa renda na África, Ásia e América Latina e Pandyaswargo et al. (2022) em regiões isoladas da Indonésia. O biogás pode ser um poderoso aliado para a universalização do acesso a fontes de energia limpa e acessível (ODS 7). No entanto, é indispensável investigações que desenvolvam técnicas capazes de otimizar o tratamento anaeróbico, a fim de valorizar outros substratos como os resíduos alimentares.

Nem sempre é fácil disponibilizar eletricidade a todas e todos de modo ininterrupto para ampla adoção de fogões elétricos. O acesso da população à energia elétrica depende geralmente de uma robusta infraestrutura e o cumprimento de diretrizes legais peculiares. Mensah (2022) relatou a problemática e os desafios do acesso sustentável e confiável a

eletricidade, conforme preconizado pelo ODS 7, entre os moradores de assentamentos informais urbanos em Gana. Conforme relatado pelo pesquisador, a empresa responsável pelo fornecimento de energia elétrica, efetua as ligações das residências à rede, desde que os moradores apresentem comprovante de título de propriedade, planta arquitetônica (planta baixa) e alvará de construção.

Por se tratarem de ocupações desordenadas, são poucos os residentes que possuem a documentação exigida. Assim, embora 88,2% dos assentados tenham acesso à energia elétrica, 53,8% são ligações clandestinas. Tal cenário resultou em eletrocussões e mortes por incêndios, além de valores cobrados pela energia elétrica serem maiores para os assentados que para outros moradores, conforme apontado por Yakubu et al. (2018) e Mensah e Birch (2021). Para Mensah (2022) o aproveitamento dos resíduos orgânicos, gerados por uma das comunidades estudadas, estaria a ser utilizada na produção de biogás, visto que carvão e lenha são as principais formas de obtenção de calor para cozimento de alimentos, enquanto fogão elétrico está entre as últimas opções adotadas.

Outra estratégia para contornar o isolamento energético pode advir da combinação de renováveis para geração local de energia elétrica. Vendoti et al. (2021) apontaram que uma região rural indiana, com 408 residências, superaram este isolamento energético através da adoção de um modelo híbrido bastante satisfatório. Assim, a melhor combinação se deu com energia fotovoltaica, energia eólica, geração por queima de biomassa, geração por queima de biogás, célula combustível e baterias. Estes dois últimos são reservatórios de energia para eventuais indisponibilidades das anteriores (sistema *backup*).

No entanto, pessoas sem acesso a tecnologias energéticas limpas, constantes e seguras para cozinhar, permanecerão por mais tempo em situação de pobreza socioeconômica. Para Talevi et al. (2022) o biogás tem potencial para interromper esse ciclo negativo e trazer benefícios significativos ao enfrentamento a pobreza energética. Além disso, como apontado por Vendoti et al. (2021), a versatilidade do biogás permite configurar um modelo híbrido com outras renováveis para gerar eletricidade em regiões isoladas.

Assim, a estabilização anaeróbica não só é capaz de fornecer energia para cozinhar alimentos em regiões que podem ter acesso limitado a fontes convencionais de energia, também contribui para a segurança alimentar, visto que permite uma gestão mais eficaz dos resíduos alimentares, que de outra forma poderiam ser desperdiçados. Deste modo, a biodigestão anaeróbica assume um papel que vai além da concretização do ODS 7 da ONU. Pois, esta tecnologia não só é uma fonte sustentável de energia, também é uma ferramenta integrada que impulsiona a produção agrícola e promove o desenvolvimento sustentável em

todas as regiões do mundo, conforme preconizados por vários ODS da ONU (RAHMAN et al., 2019; PAUDEL et al., 2021; CHOWDHURY et al., 2022; OBAIDEEN et al., 2022).

2.2 O Papel Fundamental da Pesquisa Acadêmica na Promoção do Uso do Biogás na Geração de Energia Elétrica no Brasil

No contexto brasileiro, as instituições de pesquisa acadêmica, em especial os programas de pós-graduação ao nível de mestrado e doutorado, desempenham um papel fundamental na investigação sobre o uso do biogás na geração de energia elétrica. Esses programas têm contribuído para avanços tecnológicos, científicos e sociais, promovendo a compreensão dos processos de produção de biogás, a otimização de sistemas de biodigestão e a análise de viabilidade econômica (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019; NEVZOROVA; KARAKAYA, 2020; KANDA et al., 2022).

Os pesquisadores têm investigado não apenas os aspectos técnicos da geração de biogás, mas também as implicações ambientais, sociais e econômicas dessa tecnologia. Além disso, a pesquisa acadêmica tem contribuído para a disseminação de conhecimento e conscientização sobre o potencial do biogás como fonte de energia limpa e sustentável. Portanto, os cursos de pós-graduação no Brasil têm desempenhado um papel crucial na pesquisa e desenvolvimento do uso do biogás na geração de energia elétrica, tanto em sistemas centralizados quanto descentralizados. Suas contribuições têm o potencial de impulsionar a adoção dessa tecnologia e de promover um futuro mais sustentável e resiliente em termos de energia (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019; NEVZOROVA; KARAKAYA, 2020; KANDA et al., 2022).

A participação das instituições de ensino superior - IES ao longo do período histórico brasileiro, quanto a aplicação do biogás na geração de energia elétrica, será discutida no Capítulo I “*Evolução das pesquisas em dissertações e teses publicadas no Brasil sobre geração de eletricidade a partir do biogás*”.

2.3 Desafios Ambientais da Produção de Alimentos e Estratégias Sustentáveis

Atualmente, cerca de 50% das áreas terrestres mundiais, com cobertura vegetal, são destinadas à agricultura, sendo esta atividade e o uso do solo responsáveis por até 34% das emissões de GEEs (SEARCHINGER et al., 2018; CRIPPA et al., 2021). Para Searchinger et al. (2018), entre 2010 e 2050, a procura global por alimentos aumentará entorno de 50%, enquanto os alimentos derivados de origem animal, como carne e laticínios, terão elevação na demanda de até 70%. Se a eficiência mundial na produção de alimentos se mantiver nos

mesmos padrões atuais, em 2050, alimentar os quase 10 bilhões de humanos causará a extinção de milhares de espécies e terá desmatado a maioria das regiões cobertas por florestas, alertam os autores.

Outros dados alarmantes estão relacionados aos GEEs emitidos pelo sistema alimentar global, termo definido por Crippa et al. (2021) como sendo o conjunto de todas as atividades ligadas ao alimento, desde a produção até seu consumo, que corresponderam a 18 Gt de CO₂ equivalente para o ano de 2015. Enquanto países em desenvolvimento contribuíram com 73% deste total, 27% foram emitidos por países industrializados. Um perfil agroexportador de carnes, soja e óleo de palma, para atender os países industrializados, ou a elevação da demanda interna, em decorrência do aumento da população, são alguns fatores apontados como grandes responsáveis por GEEs emitidos por países em desenvolvimento (SEARCHINGER et al., 2018; CRIPPA et al., 2021; PENDRILL et al., 2022).

Mudanças no uso e ocupação do solo em países de baixa latitude apresentaram altas taxas de desflorestamento para aumentar a área de monoculturas. Pendrill et al. (2022) apontaram que, entre 2011 e 2015, as taxas de 90 a 99% do desmatamento das florestas tropicais se deram pela expansão da agricultura, sobretudo *commodities* como a soja. No entanto, apenas 45 a 65% foram, de fato, destinadas à atividade agrícola, o restante esteve relacionado a especulação imobiliária, manejo inadequado do fogo, urbanização dentre outros.

Para Searchinger et al. (2018) a pecuária de ruminantes (bovinicultura, ovinocultura e caprinocultura) compromete $\frac{2}{3}$ das terras agrícolas mundiais com a participação de cerca de 50% dos GEEs associados a produção agrícola. A demanda por proteína destes animais terá um aumento de 88% entre 2010 e 2050. Os autores apontam ainda que é possível combater a elevação da temperatura do clima global, para que tais valores não superem 1,5°C, sugerindo que: milhões de hectares sejam reflorestados; gerenciamento do esterco e das emissões entéricas de metano sejam praticados; biodigestores para manejo dos resíduos orgânicos e aplicação do biofertilizante na agricultura sejam adotados; madeira e carvão sejam substituídos pelo biogás; além de outras medidas que devem ser implementadas o mais rapidamente possível.

Semelhante aos achados de Searchinger et al. (2018), os estudos de Joshi et al. (2021) sobre as mudanças climáticas relacionadas as atividades agrícolas no Nepal, sugerem que práticas mitigadoras de emissões de GEEs sejam amplamente adotadas no país, tais como: aproveitamento da palha do arroz; utilização de biodigestores e aproveitamento do biogás no preparo de alimentos e iluminação; gestão do esterco; uso de resíduos orgânicos durante o

manejo do solo agrícola, dentre outras medidas para combater as mudanças climáticas como política pública nepalesa.

Apesar da importância incontestável dos trabalhos realizados por Searchinger et al. (2018), Joshi et al. (2021), Uhunamure et al. (2019), Niu et al. (2021), Lemma et al. (2021), dentre outros, ainda há muito o que se investigar sobre o aproveitamento energético dos resíduos alimentares, pois a mesma abundância de tais resíduos responsáveis por sérios problemas socioambientais, são os mesmos que poderiam contribuir para descarbonização atmosférica, visto que o sistema alimentar global está relacionado com cerca de 34% de todo GEE gerado mundialmente (CRIPPA et al., 2021).

2.4 Desperdício de Alimentos e a Gestão de Resíduos Alimentares: Realidades Globais e Diferenças Regionais

Apesar do grande volume de alimentos produzidos em todo o mundo, aproximadamente um terço deles torna-se resíduo, enquanto quase 1 bilhão de pessoas sofrem com a fome ou subnutrição. Este número sobe para valores próximos a 2 bilhões quando são considerados aqueles que apresentam algum grau de insegurança alimentar, situação que se agravou com a pandemia de COVID-19 (FAO, 2013; SEARCHINGER et al., 2018; ARORA; MISHRA, 2022).

Os países apresentam realidades distintas quanto a forma de produzir, armazenar e transportar seus alimentos. O mesmo ocorre quanto a gestão dos resíduos alimentares (CRIPPA et al., 2021). Para Thi et al. (2015) o tratamento de resíduos alimentares, através da compostagem, está entre 1% e 6% em países em desenvolvimento, enquanto 0,6% são encaminhados para a biodigestão anaeróbica e uma parcela mínima é destinada à alimentação animal e à incineração. No entanto, Sinha e Tripathi (2021) apontam que, do total de RSUs gerados na Índia, 10 a 12% referem-se a desperdícios de alimentos, sendo a maioria destes resíduos destinados à compostagem como estratégia de geração de fertilizantes.

Por outro lado, países desenvolvidos apresentam cenários diferentes. Por exemplo, Kim et al. (2011) relataram que na Coreia do Sul 45% dos resíduos alimentares são destinados à alimentação animal, 45% à compostagem e 10% à vermicompostagem e digestão anaeróbica. Zu Ermgassen et al. (2016) apontaram que no Japão, 35,9% dos resíduos alimentares, são utilizados na produção de ração animal, enquanto para Scherhauser et al. (2018), na União Europeia, 40% do desperdício alimentar, destinado ao aterro sanitário, tem origem no consumo.

Zu Ermgassen et al. (2016) estimaram que o aumento do tratamento e/ou aproveitamento de alimentos desperdiçados para ração animal pela União Europeia resultaria em uma redução de 2,6% na taxa de crescimento das áreas cultivadas com soja no Brasil, o que equivaleria à preservação de 268.000 hectares de ecossistemas e sua biodiversidade. Se o beneficiamento de alimentos desperdiçados for adotado globalmente, a redução de GEEs no Brasil será enorme, visto que entre 1990 e 2015 as exportações de proteína animal (bovinos) e soja, aumentaram em 720% e 530%, respectivamente. Logo, avanços tecnológicos de recuperação energética dos resíduos alimentares, como a geração de biogás, podem reduzir as emissões de GEEs relacionadas a tais atividades, podendo, inclusive, evitar perdas na biodiversidade (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019; SEARCHINGER et al., 2018; CRIPPA et al., 2021).

O aproveitamento energético dos resíduos alimentares e a contenção de GEEs em países em desenvolvimento enfrentam vários desafios. Por exemplo, Thi et al. (2015) estudaram o manejo dos alimentos desperdiçados em países em desenvolvimento. Para os autores, as maiores dificuldades em reduzir as taxas de geração de GEEs estão relacionadas a falta de separação eficiente dos resíduos alimentares dos demais RSUs. Eles apontaram ainda que a ausência de manejo adequado e soluções sustentáveis nesses países, levam 90% dos resíduos alimentares a serem depositados em aterros sanitários e lixões.

Os desperdícios de frutas, legumes e vegetais - FLV nos supermercados brasileiros corresponderam a mais de 5% do total de suas receitas no ano de 2020, segundo a Associação Brasileira de Supermercados - ABRAS (KOCH, 2021). Na investigação de Santos et al. (2020), Centrais de Abastecimento (CEASAs), no estado da Bahia, as perdas e desperdícios variaram entre 11,42 e 17,18% do total de frutas e hortaliças comercializadas, sendo que as perdas semanais totalizaram 9,5 toneladas nos quatro estabelecimentos estudados, apontaram as pesquisadoras.

Ainda no caso do Brasil, hábitos culturais de sua população podem contribuir com o aumento da geração de resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs. Sabio et al. (2015) mencionam que muitos estabelecimentos varejistas descartam alimentos com potencial nutricional adequado e seguros para o consumo humano simplesmente devido a critérios subjetivos do consumidor quanto a cor, textura, calibre e formato. Achados semelhantes foram descritos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Ela relatou que, aproximadamente, 30% dos alimentos hortifrutícolas comercializados no país são desperdiçados na fase de comercialização (EMBRAPA, 2014).

Outra importante descoberta, relacionada aos resíduos alimentares, foi feita por Santos (2019). A pesquisadora apontou que a Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - EMPASA (Seção João Pessoa/PB) comercializou quase 135 mil toneladas de alimentos em 2017, sendo 71 mil toneladas de frutas e 54 mil toneladas de hortaliças. Seu estudo estimou que cerca de 162 toneladas de RSUs eram geradas mensalmente, isso equivale a quase duas mil toneladas de resíduos produzidas anualmente. Destes RSUs, 65% eram compostos por resíduos orgânicos.

Embora grande parte dos resíduos alimentares tenha sido tratada de forma sustentável por compostagem na própria EMPASA/JP, ainda houve a geração de expressivo volume de RAHs que não recebeu tratamento ambientalmente adequado, pois foi destinado para o aterro sanitário municipal. Assim, seu potencial para estabilização anaeróbica na promoção de saneamento ambiental e produção de biogás, bem como para geração de energia elétrica ainda permanece desconhecido.

2.5 Tecnologias para o tratamento de resíduos orgânicos: o papel da digestão anaeróbica no saneamento ambiental, geração de biogás e recuperação de nutrientes

No século passado, o mundo enfrentou grandes crises energéticas, conflitos entre nações produtoras e consumidoras de petróleo, forçando estas últimas a explorarem outros combustíveis. Ao mesmo tempo, diversos países encaravam o desafio de lidar com grandes volumes de resíduos orgânicos provenientes de esgotos, excrementos de animais e biomassa agrícola residual, o que resultava em problemas de saúde pública e ambiental, especialmente em regiões com forte presença agrícola (DENG et al., 2017; DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019; PUTRA et al., 2023).

O estudo realizado por Deng et al. (2017) destacou que o biogás foi uma das maneiras encontradas pelo governo chinês para enfrentar as grandes crises do petróleo ocorridas nas décadas de 1950, 1970 e 1990. Nestes períodos, marcados por preços elevados e escassez dos derivados do petróleo, a busca por alternativas energéticas, incentivou vários países a adotar biocombustíveis como o biogás e o etanol (DENG et al., 2017; WISSMANN; SHIKIDA, 2017; VALÉRIO, 2021).

Países como China e Índia investiram na construção de biodigestores em áreas rurais como uma solução para a demanda energética local e para o tratamento dos resíduos orgânicos abundantes. Os reatores anaeróbicos nessas localidades desempenhavam três funções principais: solucionar problemas sanitários ao tratar os resíduos orgânicos e evitar doenças relacionadas ao saneamento precário; gerar biogás para suprir as necessidades

térmicas e mecânicas dos produtores rurais; e, promover a fertilidade do solo ao utilizar os resíduos digeridos como biofertilizantes ou bioestimulantes no cultivo de alimentos (DHINGRA et al., 2011; DENG et al., 2017).

Além da obtenção energética e a recuperação de nutrientes para uso agrícola posterior, a estabilização anaeróbica é capaz de promover saneamento ambiental. O estudo de Garcia-Peña et al. (2011) evidencia este benefício. Ao realizarem experimentos de biodigestão com resíduos de frutas e vegetais, os autores concluíram que, ao longo de 30 dias, houve uma taxa de remoção de matéria orgânica de 65%.

Os resíduos alimentares necessitam de tratamento adequado, pois podem estar associados à transmissão de doenças. De acordo com Shurson (2020), tecnologias como compostagem e digestão anaeróbica são úteis para mitigar os riscos sanitários, ao mesmo tempo em que recuperam recursos energéticos. No estudo conduzido por Seruga et al. (2020) restos alimentares, provenientes de um restaurante, foram submetidos à decomposição anaeróbica. Eles constataram que os organismos patogênicos testados (*Salmonella Senftenberg W₇₇₅*, *Enterococcus spp.* e ovos de *Ascaris suum*) não sobreviveram ao tratamento anaeróbico.

A biodigestão anaeróbica permite que o biogás possa ser gerado em pequena escala para uso residencial, como no cozimento de alimentos, ou em grandes usinas para a produção de calor e energia termelétrica (PIZZUTI et al., 2016). O trabalho de Ferreira et al. (2017) demonstrou que seus biodigestores, abastecidos com resíduos orgânicos provenientes de uma escola, gerou biogás com concentrações de metano em torno de 60% na maior parte dos 355 dias.

Submeter mais de um tipo de resíduo orgânico a biodigestão anaeróbica pode promover ganhos energéticos maiores. Kaur et al. (2019) investigaram duas combinações de digestão de substratos diferentes, ou seja, lodo de ETE combinado a resíduos alimentares e esgoto bruto com resíduos alimentares. Seus achados evidenciaram que esgoto bruto com resíduos alimentares produziu 2,4 vezes mais que a primeira combinação. Como o lodo de ETE é resultante do tratamento convencional do esgoto, tratar simultaneamente o esgoto bruto com resíduos alimentares se mostrou mais vantajoso, pois realiza apenas um tratamento, a partir de dois resíduos diferentes, com maior ganho energético e economia de tempo.

Alguns resíduos orgânicos podem apresentar instabilidades durante a biodigestão anaeróbica. Nestes casos a co-digestão pode ser uma boa alternativa. Durante a biodigestão anaeróbica de resíduos alimentares, Luo et al. (2020) estudaram os efeitos das cascas de ovos de galinha. Suas conclusões foram que as cascas possuíam entre 85 a 95% de carbonato de

cálcio e as etapas do tratamento com este álcali foi superior, aproximadamente, 13 vezes quando comparada a digestão sem as cascas.

Andrade Cruz et al. (2022), submeteram águas residuárias do processamento de mandioca à produção de biogás. Os autores concluíram que a adição de cascas de ovos estabilizou o pH da biodigestão anaeróbica, melhorando a produção de biogás entre 195 a 338%. No entanto, ainda são pouco conhecidos os efeitos dos alcalinizantes biogênicos na biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos, sobretudo, RAHs.

Mecanismos para recuperação de nutrientes, a exemplo do fósforo - P, contidos nos resíduos alimentares, podem ser especialmente úteis em regiões que não possuam reservas minerais desse elemento e que, portanto, apresentam elevada dependência de importações (FAUCON et al., 2015; MNTHAMBALA et al., 2021). Investigando estratégias de resgate do P, Jupp et al. (2021) apontaram que, em condições anaeróbicas, os compostos contendo fósforo tendem a permanecer em meio aquoso como ortofosfato, forma química ideal para as plantas utilizarem.

Levando-se em consideração que o P é indispensável a toda e qualquer forma de vida e que as principais reservas mundiais de rochas fosfáticas têm duração estimada de 50 a 100 anos, é premente a ampla adoção de tecnologias de reciclagem do P (CORDELL; WHITE 2015; JUPP et al., 2021). Conforme apontado por Cordell e White (2015), enquanto Marrocos, China e Estados Unidos possuem as maiores reservas de P mineral, países da União Europeia, África Subsariana e Austrália dependem quase inteiramente da importação desse nutriente.

Se por um lado, a finitude do P e sua concentração em poucos países geram, segundo Cordell et al. (2009), instabilidades geopolíticas que ameaçam a segurança alimentar e nutricional global, especialmente em países de baixa renda. Por outro, o crescente uso de fertilizantes sintéticos a base de fósforo e nitrogênio tem agravado o problema da eutrofização, além de contribuir com as mudanças climáticas pela expansão agropecuária (GLIBERT, 2020).

Santos (2019) relatou que, em 2017, a EMPASA/JP gerou uma média mensal de 162 toneladas de RSUs. A pesquisadora apontou que 65% destes RSUs, ou seja, 105,3 toneladas (ou o equivalente a 52,65 toneladas quinzenais), eram compostos por resíduos orgânicos. Embora, resíduos de papel (21%) e papelão (2%) também sejam passíveis de tratamento anaeróbico, na promoção do saneamento ambiental, não foram contabilizados como resíduos orgânicos na investigação da pesquisadora. Para alguns autores estes resíduos orgânicos são

relevantes para o controle de pH da biodigestão, chegando a contribuir com o aumento do volume de biogás gerado (SANTOS, 2019; SHAHBAZ et al., 2020).

Se os 65% dos RSUs, que foram classificados por Santos (2019) como resíduos orgânicos, fossem formados apenas por RAHs para transformação em energia elétrica, a partir do biogás, seria possível estimar uma geração mensal de 15.963,5 kWh, visto que cada tonelada de RAHs é capaz de fornecer, aproximadamente, 151,6 kWh de energia elétrica (ACHINAS et al., 2017; GONÇALVES NETO et al., 2021).

O consumo médio mensal de energia elétrica nas residências paraibanas, em 2020, foi de 128,6 kWh, logo, 124,1 moradias poderiam ser abastecidas, mensalmente, com a eletricidade gerada da estabilização anaeróbica dos RAHs da EMPASA/JP. No entanto, cada tonelada de RAHs fornece, em média, 74 m³ de biogás, assim, mantendo a mesma estimativa anterior (105,3 toneladas como sendo de RAHs), seria possível obter, todo mês, 7.792,2 m³ (ou 259,7 m³ por dia) de biogás para o cozimento de alimentos (ACHINAS et al., 2017; CZEKAŁA et al., 2018; EPE, 2021).

Embora não exista consenso entre os autores sobre a quantidade necessária de biogás para atender uma família, durante o preparo de alimentos, para Uhunamure et al. (2019) 1 m³ atende uma residência em sua demanda diária. Enquanto Li et al. (2023) apontam que 0,82 m³ é suficiente, mas para Niu et al. (2021) o valor diário ideal é de 0,75 m³. Com base nas estimativas diárias destes autores e, assumindo que a parte orgânica dos RSUs gerados pela EMPASA/JP era totalmente composta de RAHs, o biogás gerado diariamente seria capaz de beneficiar 259,7, 316,7 e 346,3 famílias, respectivamente.

Diante do exposto, e mais amplamente discutidos nos capítulos a seguir, é esperado que os resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs deixem de ser vistos como um problema ambiental e sejam reconhecidos como uma valiosa fonte de recursos energéticos, trazendo benefícios sociais e ambientais ao possibilitar o acesso a formas de energia seguras, confiáveis e saudáveis, desde o abastecimento de biodigestores domésticos (geração descentralizada de biogás), até a escala industrial, com ampla adoção dos RAHs para geração de biogás e estratégia de saneamento ambiental rural e urbano.

3. Referências

ABDELRAADI, Fadi. Food waste behaviour at the household level: A conceptual framework. **Waste Management**, v. 71, p. 485–493, 2018.

ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano** - PNBB. Associação Brasileira de Biogás e Biometano, São Paulo, 2021. Disponível em: <www.abiogas.org.br>. Acesso em: 21 fev. 2021.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas Públicas e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012**. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2012/>. Acesso em: 11 dez. 2019.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas Públicas e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016**. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2016/>. Acesso em: 17 jun. de 2021.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas Públicas e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 13 ago. de 2023.

ACHINAS, Spyridon; ACHINAS, Vasileios; EUVERINK, Gerrit Jan Willem. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. **Engineering**, v. 3, n. 3, p. 299–307, 2017.

ADENLE, Ademola A. Assessment of solar energy technologies in Africa-opportunities and challenges in meeting the 2030 agenda and sustainable development goals. **Energy Policy**, v. 137, p. 111180, 2020.

AJAY, C.M.; MOHAN, Sooraj; DINESHA, P. Decentralized energy from portable biogas digesters using domestic kitchen waste: A review. **Waste Management**, v. 125, p. 10–26, 2021.

ALAM, Jobair. The Current Rohingya Crisis in Myanmar in Historical Perspective. **Journal of Muslim Minority Affairs**, v. 39, n. 1, p. 1–25, 2019.

ANDRADE CRUZ, Ianny; ANDRADE, Larissa Renata Santos; JESUS, Anderson Alles de; *et al.* Potential of eggshell waste derived calcium for sustainable production of biogas from cassava wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 321, p. 116000, 2022.

ANGGONO, Willyanto. Behaviour of biogas containing nitrogen on flammability limits and laminar burning velocities. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 7, n. 1, p. 304-310, 2017.

ANSAR, Anas; MD. KHALED, Abu Faisal. From solidarity to resistance: host communities' evolving response to the Rohingya refugees in Bangladesh. **Journal of International Humanitarian Action**, v. 6, n. 1, 2021.

ARORA, Naveen Kumar; MISHRA, Isha. Current scenario and future directions for sustainable development goal 2: a roadmap to zero hunger. **Environmental Sustainability**, v. 5, n. 2, p. 129–133, 2022.

BRASIL. LEI FEDERAL N.º 12.305/2010 DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei n.º 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Brasília: **DOU - Diário Oficial da União**. Publicada no D.O.U. de 3 de agosto de 2010, 2010.

BUGGE, Markus M.; FEVOLDEN, Arne Martin; KLITKOU, Antje. Governance for system optimization and system change: The case of urban waste. **Research Policy**, v. 48, n. 4, p. 1076–1090, 2019.

CAMPBELL-LENDRUM, Diarmid; PRÜSS-USTÜN, Annette. Climate change, air pollution and noncommunicable diseases. **Bulletin of the World Health Organization**, v. 97, n. 2, p.

160–161, 2018.

CÂNDIDO, Daniela; BOLSAN, Alice Chiapetti; HOLLAS, Camila Ester; *et al.* Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113825, 2022.

CHOWDHURY, Hemal; CHOWDHURY, Tamal; SHARIFI, Ayyoob; *et al.* Role of Biogas in Achieving Sustainable Development Goals in Rohingya Refugee Camps in Bangladesh. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 11842, 2022.

CHRISTO, Giovanna Lunkmoss de; SANQUETTA, Carlos Roberto; PIVA, Luani Rosa de Oliveira; *et al.* POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS DE HORTIFRUTICULTURA EM COLOMBO-PR. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 72, 2018.

CORDELL, Dana; DRANGERT, Jan-Olof; WHITE, Stuart. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 2, p. 292–305, 2009.

CORDELL, Dana; WHITE, Stuart. Tracking phosphorus security: indicators of phosphorus vulnerability in the global food system. **Food Security**, v. 7, n. 2, p. 337–350, 2015.

CRIPPA, M.; SOLAZZO, E.; GUIZZARDI, D.; *et al.* Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. **Nature Food**, v. 2, n. 3, p. 198–209, 2021.

CZEKAŁA, W.; CIEŚLIK, M.; JANCZAK, D.; *et al.* Fruit and vegetable waste from markets as a substrate for agricultural biogas plant. **International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM**, v. 18, n. 4.3, p. 473-478, 2018.

DE OLIVEIRA, Luiz Gustavo Silva; NEGRO, Simona O. Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 462–481, 2019.

DENG, Liangwei; LIU, Yi; ZHENG, Dan; *et al.* Application and development of biogas technology for the treatment of waste in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 845–851, 2017.

DHINGRA, Radhika; CHRISTENSEN, Erick R.; LIU, Yang; *et al.* Greenhouse Gas Emission Reductions from Domestic Anaerobic Digesters Linked with Sustainable Sanitation in Rural China. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 6, p. 2345–2352, 2011.

DHUNGANA, Bipasyana; LOHANI, Sunil Prasad; MARSOLEK, Michael. Anaerobic Co-Digestion of Food Waste with Livestock Manure at Ambient Temperature: A Biogas Based Circular Economy and Sustainable Development Goals. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3307, 2022.

ELLACURIAGA, Marcos; GARCÍA-CASCALLANA, José; GÓMEZ, Xiomar. Biogas Production from Organic Wastes: Integrating Concepts of Circular Economy. **Fuels**, v. 2, n. 2, p. 144–167, 2021.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Pesquisas da Embrapa buscam formas de evitar o desperdício de alimentos**. Publicado em: 15 de ago. 2014. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/noticias/educacao-e-ciencia/2014/08/pesquisas-da-embrapa-buscam->

formas-de-evitar-o-desperdicio-de-hortalicas-e-frutas. Acesso em: 21 jul. 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: 20 abr. 2022.

ERIKSSON, Mattias; SPÅNGBERG, Johanna. Carbon footprint and energy use of food waste management options for fresh fruit and vegetables from supermarkets. **Waste Management**, v. 60, p. 786–799, 2017.

ERIKSSON, Mattias; STRID, Ingrid; HANSSON, Per-Anders. Carbon footprint of food waste management options in the waste hierarchy – a Swedish case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 115–125, 2015.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Food Wastage Footprint: Impacts on Natural Resources**: Summary Report. [s.l.]: Food & Agriculture Organization of the UN. Rome, 2013.

FAO - Food and Agriculture Organization; IFAD - International Fund for Agricultural Development; UNICEF - United Nations International Children's Emergency Fund; *et al.* **The State of Food Security and Nutrition in the World 2019: Safeguarding against economic slowdowns and downturns**. [s.l.]: Food & Agriculture Organization of the UN. Rome, 2019.

FAO - Food and Agriculture Organization; IFAD - International Fund for Agricultural Development; UNICEF - United Nations International Children's Emergency Fund; *et al.* **The State of Food Security and Nutrition in the World 2020: Transforming food systems for affordable healthy diets**. [s.l.]: Food & Agriculture Organization of the UN. Rome, 2020.

FAUCON, Michel-Pierre; HOUBEN, David; REYNOIRD, Jean-Paul; *et al.* Advances and Perspectives to Improve the Phosphorus Availability in Cropping Systems for Agroecological Phosphorus Management. In: **Advances in Agronomy**. [s.l.]: Elsevier, 2015, p. 51–79.

FERREIRA, Natalí Acioly de Luna; AIRES, Kellianny Oliveira; ALMEIDA, Márbara Vilar de Araújo; *et al.* Avaliação das concentrações de metano gerado em um biorreator de bancada com base em parâmetros físico-químicos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 473–479, 2017.

FURLAN, Karina. Morgana. **O direito humano à alimentação adequada sob uma perspectiva socioambiental: repercussões do controle hegemônico da vida através das grandes corporações de mercado**. 2016. 136f. Dissertação (Mestrado em Direito Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Direito, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

GAO, Anqi; TIAN, Zhenyu; WANG, Ziyi; *et al.* Comparison between the Technologies for Food Waste Treatment. **Energy Procedia**, v. 105, p. 3915–3921, 2017.

GARCIA-PEÑA, E.I.; PARAMESWARAN, P.; KANG, D.W.; *et al.* Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: Process and microbial ecology. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 20, p. 9447–9455, 2011.

GLIBERT, Patricia M. From hogs to HABs: impacts of industrial farming in the US on nitrogen and phosphorus and greenhouse gas pollution. **Biogeochemistry**, v. 150, n. 2, p. 139–180, 2020.

GONÇALVES NETO, João; VIDAL OZORIO, Leticia; CAMPOS DE ABREU, Thais Cristina; *et al.* Modeling of biogas production from food, fruits and vegetables wastes using artificial neural network (ANN). **Fuel**, v. 285, p. 119081, 2021.

GUANDALINI, Giulio; COLBERTALDO, Paolo; CAMPANARI, Stefano. Dynamic modeling of natural gas quality within transport pipelines in presence of hydrogen injections. **Applied Energy**, v. 185, p. 1712–1723, 2017.

GUVEN, Huseyin; WANG, Zhao; ERIKSSON, Ola. Evaluation of future food waste management alternatives in Istanbul from the life cycle assessment perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 117999, 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua Anual - 1ª Visita**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/17270-pnad%20continua.html?edicao=27258&t=resultados>. Acesso em: 07 out. 2023.

IEA - International Energy Agency; IRENA - International Renewable Energy Agency; UNSD - United Nations Statistics Division; *et al.* **Tracking SDG 7: The Energy Progress Report**, Washington DC, 2019. Disponível em: <https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/2019-Tracking%20SDG7-Full%20Report.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [s.l.]: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em 16 jun. 2021.

JESWANI, Harish K.; FIGUEROA-TORRES, Gonzalo; AZAPAGIC, Adisa. The extent of food waste generation in the UK and its environmental impacts. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 532–547, 2021.

JI, Chao; KONG, Chui-Xue; MEI, Zi-Li; *et al.* A Review of the Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Waste. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 183, n. 3, p. 906–922, 2017.

JOSHI, Niraj Prakash; PIYA, Luni; ARYAL, Deepak. Agriculture and Climate Change in Nepal: GHG Emissions, Mitigation, Indications of Climate Change, Impact on Agriculture, Adaptation, and Co-benefits. *In: Climate Change Management*. Cham: Springer International Publishing, p. 163–185, 2021.

JUPP, Andrew R.; BEIJER, Steven; NARAIN, Ganesha C.; *et al.* Phosphorus recovery and recycling – closing the loop. **Chemical Society Reviews**, v. 50, n. 1, p. 87–101, 2021.

KANDA, Wisdom; ZANATTA, Hanna; MAGNUSSON, Thomas; *et al.* Policy coherence in a fragmented context: the case of biogas systems in Brazil. **Energy Research & Social Science**, v. 87, p. 102454, 2022.

KAPOOR, Rimika; GHOSH, Pooja; KUMAR, Madan; *et al.* Valorization of agricultural waste for biogas based circular economy in India: A research outlook. **Bioresource Technology**, v. 304, p. 123036, 2020.

KAUR, Guneet; LUO, Liwen; CHEN, Guanghao; *et al.* Integrated food waste and sewage treatment – A better approach than conventional food waste-sludge co-digestion for higher energy recovery via anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 289, p. 121698, 2019.

KIM, Mi-Hyung; SONG, Yul-Eum; SONG, Han-Byul; *et al.* Evaluation of food waste disposal options by LCC analysis from the perspective of global warming: Jungnang case, South Korea. **Waste Management**, v. 31, n. 9–10, p. 2112–2120, 2011.

KLANG, Johanna; SZEWZYK, Ulrich; BOCK, Daniel; *et al.* Nexus between the microbial diversity level and the stress tolerance within the biogas process. **Anaerobe**, v. 56, p. 8–16, 2019.

KLANG, Johanna; THEUERL, Susanne; SZEWZYK, Ulrich; *et al.* Dynamic variation of the microbial community structure during the long-time mono-fermentation of maize and sugar beet silage. **Microbial Biotechnology**, v. 8, n. 5, p. 764–775, 2015.

KOCH, Danilo. 21.º Avaliação de Perdas no varejo brasileiro de supermercados. **ABRAS**, 2021. Disponível em: <https://static.abras.com.br/pdf/perdas2021.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2022.

LATHA, K.; VELRAJ, R.; SHANMUGAM, P.; *et al.* Mixing strategies of high solids anaerobic co-digestion using food waste with sewage sludge for enhanced biogas production. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 388–400, 2019.

LATIF, Muhammad A.; MEHTA, Chirag M.; BATSTONE, Damien J. Influence of low pH on continuous anaerobic digestion of waste activated sludge. **Water Research**, v. 113, p. 42–49, 2017.

LEINWEBER, Peter; BATHMANN, Ulrich; BUCZKO, Uwe; *et al.* Handling the phosphorus paradox in agriculture and natural ecosystems: Scarcity, necessity, and burden of P. **Ambio**, v. 47, n. S1, p. 3–19, 2017.

LEMMA, Bekele; ARARSO, Kassahun; EVANGELISTA, Paul H. Attitude towards biogas technology, use and prospects for greenhouse gas emission reduction in southern Ethiopia. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124608, 2021.

LI, Jinping; GAN, Chang; ZHOU, Jianjian; *et al.* Performance analysis of biomass direct combustion heating and centralized biogas supply system for rural districts in China. **Energy Conversion and Management**, v. 278, p. 116730, 2023.

LOHANI, Sunil Prasad; DHUNGANA, Bipasyana; HORN, Harald; *et al.* Small-scale biogas technology and clean cooking fuel: Assessing the potential and links with SDGs in low-income countries – A case study of Nepal. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 46, p. 101301, 2021.

LUO, Jingyang; HUANG, Wenxuan; GUO, Wen; *et al.* Novel strategy to stimulate the food wastes anaerobic fermentation performance by eggshell wastes conditioning and the underlying mechanisms. **Chemical Engineering Journal**, v. 398, p. 125560, 2020.

MASEBINU, S. O.; ABOYADE, A.; MUZENDA, E. Enrichment of biogas for use as vehicular fuel: a review of the upgrading techniques. **International Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engineering**, v. 1, n. 1, p. 89–98, 2014.

- MCCORD, A. I.; STEFANOS, S. A.; TUMWESIGE, V.; *et al.* The impact of biogas and fuelwood use on institutional kitchen air quality in Kampala, Uganda. **Indoor Air**, v. 27, n. 6, p. 1067–1081, 2017.
- MCDUFFIE, Erin E.; MARTIN, Randall V.; SPADARO, Joseph V.; *et al.* Source sector and fuel contributions to ambient PM_{2.5} and attributable mortality across multiple spatial scales. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 2021.
- MEKONNEN, Mesfin M.; HOEKSTRA, Arjen Y. Global Anthropogenic Phosphorus Loads to Freshwater and Associated Grey Water Footprints and Water Pollution Levels: A High-Resolution Global Study. **Water Resources Research**, v. 54, n. 1, p. 345–358, 2018.
- MELLO, Sergio Costa de. **Uso de Macrófitas Aquáticas Fitorremediadoras como Incremento ao Tratamento de Esgoto e o Potencial de sua Biomassa na Produção de Biogás**. 2018. 116f. Dissertação (Mestrado em Desenv. e Meio Ambiente) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- MENSAH, James Kwame; BIRCH, Eugénie L. Powering the slum. Meeting SDG 7 in Accra's informal settlements. **Kleinman Center for Energy Policy**, v. 21, p.1-13, 2021.
- MENSAH, James Kwame. Electricity and informal settlements: Towards achieving SDG 7 in developing countries. **Energy Research & Social Science**, v. 93, p. 102844, 2022.
- MNTHAMBALA, Frank; TILLEY, Elizabeth; TYRREL, Sean; *et al.* Phosphorus flow analysis for Malawi: Identifying potential sources of renewable phosphorus recovery. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 173, p. 105744, 2021.
- MONTOYA, Juan Pablo Gómez; AMELL, Andrés A.; OLSEN, Daniel B. Operation of a Spark Ignition Engine With High Compression Ratio Using Biogas Blended With Natural Gas, Propane, and Hydrogen. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 141, n. 5, 2018.
- MU'AZU, Nuhu Dalhat; BLAISI, Nawaf I.; NAJI, Ammar A.; *et al.* Food waste management current practices and sustainable future approaches: a Saudi Arabian perspectives. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 3, p. 678–690, 2019.
- NEVZOROVA, Tatiana; KARAKAYA, Emrah. Explaining the drivers of technological innovation systems: The case of biogas technologies in mature markets. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120819, 2020.
- NIU, Shuwen; DAI, Runqi; ZHONG, Sheng; *et al.* Multiple benefit assessment and suitable operation mechanism of medium- and large-scale biogas projects for cooking fuel in rural Gansu, China. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 46, p. 101285, 2021.
- NOLAN, Stephen; WATERS, Nicholas R.; BRENNAN, Fiona; *et al.* Toward Assessing Farm-Based Anaerobic Digestate Public Health Risks: Comparative Investigation With Slurry, Effect of Pasteurization Treatments, and Use of Miniature Bioreactors as Proxies for Pathogen Spiking Trials. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, p. 394906, 2018.
- OBAIDEEN, Khaled; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; WILBERFORCE, Tabbi; *et al.* Biogas role in achievement of the sustainable development goals: Evaluation, Challenges, and Guidelines. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 131, p. 104207, 2022.

OFON, Utibe A.; NDUBUISI-NNAJI, Uduak U.; SHAIBU, Solomon E.; *et al.* Recycling anaerobic digestate enhances the co-digestion potential of agro-industrial residues: influence of different digestates as sources of microbial inoculum. **Environmental Technology**, v. 43, n. 28, p. 4472–4483, 2021.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 70ª sessão das Organizações das Nações Unidas. Nova York, 25 a 27 de setembro, 2015, p. 1-49, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 15 dez. de 2019.

PACHAURI, Shonali; RAO, Narasimha D.; CAMERON, Colin. Outlook for modern cooking energy access in Central America. **PLOS ONE**, v. 13, n. 6, p. e0197974, 2018.

PANDYASWARGO, Andante Hadi; WIBOWO, Alan Dwi; ONODA, Hiroshi. Socio-techno-economic assessment to design an appropriate renewable energy system for remote agricultural communities in developing countries. **Sustainable Production and Consumption**, v. 31, p. 492–511, 2022.

PAUDEL, Dipti; JEULAND, Marc; LOHANI, Sunil Prasad. Cooking-energy transition in Nepal: trend review. **Clean Energy**, v. 5, n. 1, p. 1–9, 2021.

PAYNE, Richard J; DISE, Nancy B; FIELD, Christopher D; *et al.* Nitrogen deposition and plant biodiversity: past, present, and future. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 15, n. 8, p. 431–436, 2017.

PECORINI, Isabella; IANNELLI, Renato. Landfill GHG Reduction through Different Microbial Methane Oxidation Biocovers. **Processes**, v. 8, n. 5, p. 591, 2020.

PENDRILL, Florence; GARDNER, Toby A.; MEYFROIDT, Patrick; *et al.* Disentangling the numbers behind agriculture-driven tropical deforestation. **Science**, v. 377, n. 6611, 2022.

PIRES, Caio Souza. **O tratamento dos resíduos orgânicos como cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos: Análise dos planos municipais da bacia do Alto Tietê**. 2013. 101p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PIZZUTI, L.; MARTINS, C.; LACAVA, P. Laminar burning velocity and flammability limits in biogas: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 856–865, 2016.

PUTRA, I Wayan Angga Widiarta; SUKADANA, I Gusti Ketut; TENAYA, I Gusti Ngurah Putu; *et al.* The Effect of Types of Biogas and Methanol Purification and Loading as Fuel for Four-Stroke Generators on Exhaust Emissions. **Natural Sciences Engineering and Technology Journal**, v. 3, n. 2, p. 200-205, 2023.

PUZZOLO, E.; ZERRIFFI, H.; CARTER, E.; *et al.* Supply Considerations for Scaling Up Clean Cooking Fuels for Household Energy in Low- and Middle-Income Countries. **GeoHealth**, v. 3, n. 12, p. 370–390, 2019.

PYE, Alison; RONZI, Sara; MBATCHOU NGAHANE, Bertrand Hugo; *et al.* Drivers of the Adoption and Exclusive Use of Clean Fuel for Cooking in Sub-Saharan Africa: Learnings and Policy Considerations from Cameroon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 16, p. 5874, 2020.

RAHMAN, Khondokar M.; EDWARDS, David J.; MELVILLE, Lynsey; *et al.* Implementation of Bioenergy Systems towards Achieving United Nations' Sustainable Development Goals in Rural Bangladesh. **Sustainability**, v. 11, n. 14, p. 3814, 2019.

ROE, Brian E.; BENDER, Kathryn; QI, Danyi. The Impact of COVID-19 on Consumer Food Waste. **Applied Economic Perspectives and Policy**, v. 43, n. 1, p. 401–411, 2020.

SABIO, Renata Pozelli; GARCIA, Júlia Belloni; DUARTE, Erika Nunes; *et al.* A vez dos feios! A moda europeia de promover frutas e hortaliças “feias” pode pegar no Brasil?. **Hortifruti Brasil**, v. 14, n. 148, p. 10-18, 2015.

SANTOS, Sidione Ferreira dos; CARDOSO, Ryzia de Cassia Vieira; BORGES, Ísis Maria Pereira; *et al.* Post-harvest losses of fruits and vegetables in supply centers in Salvador, Brazil: Analysis of determinants, volumes and reduction strategies. **Waste Management**, v. 101, p. 161–170, 2020.

SANTOS, Silvana Alves dos. **A implantação da gestão de resíduos sólidos na Central de Abastecimento - EMPASA João Pessoa-PB: Avaliação da efetividade do PGIRS.** 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado em Desenv. e Meio Ambiente) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SÄRKILAHTI, Maarit; KINNUNEN, Viljami; KETTUNEN, Riitta; *et al.* Replacing centralised waste and sanitation infrastructure with local treatment and nutrient recycling: Expert opinions in the context of urban planning. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 118, p. 195–204, 2017.

SCHERHAUFER, Silvia; MOATES, Graham; HARTIKAINEN, Hanna; *et al.* Environmental impacts of food waste in Europe. **Waste Management**, v. 77, p. 98–113, 2018.

SEARCHINGER, Tim; WAITE, Richard; HANSON, Craig; *et al.* **Creating a Sustainable Food Future: A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050.** Washington, USA: World Resources Institute, 2018. Disponível em: <https://www.wri.org/research/creating-sustainable-food-future>. Acesso em: 30 ago. 2023.

SERUGA, Przemysław; KRZYWONOS, Małgorzata; PALUSZAK, Zbigniew; *et al.* Pathogen Reduction Potential in Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste. **Molecules**, v. 25, n. 2, p. 275, 2020.

SHAHBAZ, Muhammad; AMMAR, Muhammad; KORAI, Rashid Mustafa; *et al.* Impact of C/N ratios and organic loading rates of paper, cardboard and tissue wastes in batch and CSTR anaerobic digestion with food waste on their biogas production and digester stability. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 8, p.1-13, 2020.

SHURSON, Gerald C. “What a Waste” - Can We Improve Sustainability of Food Animal Production Systems by Recycling Food Waste Streams into Animal Feed in an Era of Health, Climate, and Economic Crises? **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7071, 2020.

SINHA, Sujata; TRIPATHI, Pushplata. Trends and challenges in valorisation of food waste in developing economies: A case study of India. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 4, p. 100162, 2021.

STEPHEN, Jilu Lizy; PERIYASAMY, Balasubramanian. Innovative developments in biofuels production from organic waste materials: A review. **Fuel**, v. 214, p. 623–633, 2018.

- STONER, Oliver; LEWIS, Jessica; MARTÍNEZ, Itzel Lucio; *et al.* Household cooking fuel estimates at global and country level for 1990 to 2030. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 2021.
- SURENDRA, K. C.; TAKARA, Devin; HASHIMOTO, Andrew G.; *et al.* Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 846–859, 2014.
- TALEVI, Marta; PATTANAYAK, Subhrendu K.; DAS, Ipsita; *et al.* Speaking from experience: Preferences for cooking with biogas in rural India. **Energy Economics**, v. 107, p. 105796, 2022.
- THI, Ngoc Bao Dung; KUMAR, Gopalakrishnan; LIN, Chiu-Yue. An overview of food waste management in developing countries: Current status and future perspective. **Journal of Environmental Management**, v. 157, p. 220–229, 2015.
- UHUNAMURE, S. E.; NETHENGWE, N. S.; TINARWO, D. Correlating the factors influencing household decisions on adoption and utilisation of biogas technology in South Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 264–273, 2019.
- VALÉRIO, Valmir José de Oliveira. Agronegócio sucroenergético: a face atualizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Geografia em Atos (Online)**, v. 5, p. 1–21, 2021.
- VAN DER WIEL, Bernou Zoë; WEIJMA, Jan; VAN MIDDELAAR, Corina Everarda; *et al.* Restoring nutrient circularity: A review of nutrient stock and flow analyses of local agro-food-waste systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 160, p. 104901, 2020.
- VANEECKHAUTE, Céline; FAZLI, Ali. Management of ship-generated food waste and sewage on the Baltic Sea: A review. **Waste Management**, v. 102, p. 12–20, 2020.
- VENDOTI, Suresh; MURALIDHAR, M.; KIRANMAYI, R. Techno-economic analysis of off-grid solar/wind/biogas/biomass/fuel cell/battery system for electrification in a cluster of villages by HOMER software. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 1, p. 351–372, 2021.
- WAQAS, M.; NIZAMI, A.S.; ABURIAZAIZA, A.S.; *et al.* Optimizing the process of food waste compost and valorizing its applications: A case study of Saudi Arabia. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 426–438, 2018.
- WISSMANN, Martin Airton; SHIKIDA, Pery Francisco Assis. Impactos econômicos, ambientais e sociais da agroindústria canavieira no Brasil. **DESENVOLVIMENTO, FRONTEIRAS E CIDADANIA**, v. 1, n. 1, p. 134-160, 2017.
- WHO - World Health Organization. **World health statistics 2021**: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals. Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/data/gho/publications/world-health-statistics>. Acesso em: 17 jun. de 2021.
- XUE, Li.; LIU, Gang. Introduction to global food losses and food waste. In: **Saving Food**. [s.l.] Elsevier, p. 1–31, 2019.
- YAKUBU, Osman; BABU C., Narendra; ADJEI, Osei. Electricity theft: Analysis of the underlying contributory factors in Ghana. **Energy Policy**, v. 123, p. 611–618, 2018.

YAQOOB, Haseeb; TEOH, Yew Heng; UD DIN, Zia; *et al.* The potential of sustainable biogas production from biomass waste for power generation in Pakistan. **Journal of Cleaner Production**, v. 307, p. 127250, 2021.

ZHAO, Ning; YOU, Fengqi. Food-energy-water-waste nexus systems optimization for New York State under the COVID-19 pandemic to alleviate health and environmental concerns. **Applied Energy**, v. 282, p. 116181, 2021.

ZIRABA, Abdhalah K.; HAREGU, Tilahun Nigatu; MBERU, Blessing. A review and framework for understanding the potential impact of poor solid waste management on health in developing countries. **Archives of Public Health**, v. 74, n. 1, 2016.

ZU ERMGASSEN, Erasmus K.H.J.; PHALAN, Ben; GREEN, Rhys E.; *et al.* Reducing the land use of EU pork production: where there's swill, there's a way. **Food Policy**, v. 58, p. 35–48, 2016.

Capítulo I - Evolução das pesquisas em dissertações e teses publicadas no Brasil sobre geração de eletricidade a partir do biogás

Resumo: A busca de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e limpas tem sido o objetivo de muitos países. No entanto, trabalhos científicos que evidenciem a participação de instituições de ensino superior, vitais para o desenvolvimento de uma matriz energética descarbonizada, são pouco conhecidos no Brasil. Desta forma, o objetivo deste estudo foi analisar o impacto nas publicações do tema “geração de energia elétrica a partir do biogás” no número de dissertações e teses. Para isso, foi realizada uma pesquisa quantitativa destes trabalhos científicos ao longo dos períodos históricos, e estão depositados em uma das maiores bibliotecas virtuais brasileiras. Como resultado, foi encontrado que as Regiões Sudeste e Sul concentraram os maiores números de publicações de dissertações e teses relacionadas ao uso do biogás para geração de energia elétrica nos períodos históricos do biogás. Pode-se concluir que as instituições de ensino superior brasileiras são competentes e estratégicas para o desenvolvimento do país, mas que necessitam que os setores governamentais financiadores da pesquisa, ensino e extensão estejam atentos a elas nas cinco regiões, especialmente diante das oportunidades que se avizinham, decorrentes de vários desdobramentos nacionais e internacionais.

Palavras-chave: pesquisas de dissertação e tese; biogás; energia elétrica

Abstract: The pursuit of electricity generation from renewable and clean sources has been a priority for many countries. However, scientific studies that demonstrate the involvement of higher education institutions, crucial for the development of a decarbonized energy matrix, are relatively unknown in Brazil. Therefore, the objective of this study was to analyze the impact of publications on the topic of "electricity generation from biogas" on the number of dissertations and theses. Quantitative research of these scientific works was conducted across historical periods, which are archived in one of Brazil's largest virtual libraries. As a result, it was found that the Southeast and South regions had the highest number of dissertation and thesis publications related to using biogas for electricity generation in the historical periods analyzed. It can be concluded that Brazilian higher education institutions are competent and strategic for the country's development. However, they require the attention and support of government sectors responsible for funding research, education, and extension programs in all five regions, particularly in light of the upcoming opportunities arising from various national and international events.

Keywords: dissertation and thesis research; biogas; electricity

1. Introdução

O uso de resíduos orgânicos, como fezes humanas, fezes de animais e restos agrícolas, para a geração de biogás tem sido documentado na China há pelo menos 3.000 anos. No entanto, foi apenas no final do século XIX e início do século XX que o biogás começou a ter outras aplicações além de fornecer calor para o cozimento de alimentos e aquecimento residencial (DENG et al., 2017).

De acordo com Abbasi et al. (2012), existem razões distintas que levaram os países mais urbanizados a adotarem os biodigestores anaeróbicos em comparação com as nações de

tradição agrícola. Segundo os pesquisadores, no século XIX, a Europa precisava lidar com o tratamento eficiente dos resíduos líquidos gerados pela população urbana, resultando na construção de fossas sépticas. Observou-se que os gases produzidos pela decomposição anaeróbica dos efluentes eram inflamáveis. Logo, o biogás (uma mistura de gases de origem biológica, predominantemente composto por metano) foi reconhecido como uma fonte de energia utilizável pelos europeus. No final da década de 1890, no Reino Unido, por exemplo, o biogás passou a ser utilizado na iluminação pública a partir dos resíduos urbanos (BOND; TEMPLETON, 2011; IGLIŃSKI et al., 2012).

Em países com predominância agrícola, o interesse pela biodigestão anaeróbica estava principalmente relacionado à obtenção de energia, e não ao tratamento de resíduos ou efluentes domésticos. Portanto, no final do século XIX, a Índia e a China iniciaram campanhas de promoção dessa tecnologia, começando com equipamentos de pequena capacidade voltados para atender de forma descentralizada as famílias rurais. No século seguinte, as plantas industriais de biogás começaram a ser implementadas (ABBASI; ABBASI, 2010; ABBASI et al., 2012).

O biogás é um combustível altamente versátil, capaz de ser utilizado para fornecer energia térmica em fogões domésticos e industriais, aquecer caldeiras e gerar eletricidade, entre outras aplicações. Dados de 2016 revelaram que cerca de 1,6 bilhão de pessoas no mundo não tinham acesso à energia elétrica, enquanto outras 2,5 bilhões dependiam de esterco seco ou lenha para aquecimento e cozimento de alimentos. Na América Latina, aproximadamente 31 milhões de pessoas careciam de eletricidade e 85 milhões utilizavam fontes rudimentares de biomassa para cozinhar alimentos (GARFÍ et al., 2016).

Devido ao enorme potencial de geração de biogás a partir de diversos substratos orgânicos, como estações de tratamento de esgoto (ETEs), resíduos sólidos urbanos (RSUs) e resíduos agroindustriais, é crucial que pesquisadores, especialmente os vinculados às instituições de ensino superior, dediquem-se a estudar esse tema. Um exemplo notável desse potencial pode ser observado na intensa atividade do setor sucroenergético no Brasil, em que a produção de etanol e açúcar resulta em grandes volumes de biomassa residual e vinhaça (TOLMASQUIM, 2016).

O bagaço de cana-de-açúcar é aproveitado pelas usinas para a geração de energia térmica e elétrica, enquanto a vinhaça pode ser utilizada para a produção de biogás e/ou biometano. Em 2019, a biomassa proveniente da cana-de-açúcar contribuiu com 2,6 Gw médios para o Sistema Interligado Nacional (SIN), representando 3,8% da matriz elétrica do país e um aumento de 4,5% em relação ao ano anterior (CCEE, 2020; EPE, 2020).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a categoria "outras biomassas" contribuiu com 0,55 Gw médios (0,8% da matriz elétrica nacional) para o SIN em 2019. Nessa categoria estão incluídas fontes como lixívia, biodiesel, biogás, entre outras. O biogás representou 19% desse total no mesmo período, o que corresponde a aproximadamente 0,104 Gw médios. É importante ressaltar que o potencial de geração do biogás é atualmente desperdiçado, mesmo sendo capaz de suprir 36% de toda a energia elétrica consumida no país ou 70% do consumo de óleo diesel (EPE, 2020; ABIOGÁS, 2021).

É evidente que as termelétricas movidas a biomassa de cana-de-açúcar contribuíram com 4,7 vezes mais energia elétrica para o SIN do que todas as outras biomassas combinadas em 2019. Isso destaca tanto a importância do setor sucroenergético para a economia do país quanto sua alta capacidade de geração de biomassa residual. No entanto, o mesmo não pode ser dito em relação ao biogás. Apesar do seu considerável potencial para gerar energia elétrica a partir de resíduos orgânicos provenientes da agropecuária, estações de tratamento de esgoto e resíduos sólidos urbanos, fontes abundantes em países agroexportadores e com economias fortemente ligadas a *commodities* agropecuárias, como é o caso do Brasil (SESSA et al., 2017; SÄRKILAHTI et al., 2017; DOS SANTOS et al., 2019; EPE, 2020).

O objetivo deste estudo consistiu em analisar o impacto do interesse pela geração de energia elétrica a partir do biogás no número de publicações de dissertações e teses. Para isso, foi realizada uma análise da quantidade de trabalhos disponíveis em uma das maiores plataformas virtuais brasileiras, que oferece acesso gratuito a uma vasta gama de dissertações e teses por meio da rede mundial de computadores.

2. Materiais e métodos

Neste estudo, foram analisadas as publicações científicas relacionadas à aplicação do biogás na geração de energia elétrica, utilizando como fonte de dados a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), disponível no endereço eletrônico: <https://bdtd.ibict.br/vufind/>. A BDTD, desenvolvida pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), permite o uso de palavras-chave ou combinação de termos e/ou expressões para a realização de buscas em seu acervo, que é atualmente composto por quase 480 mil dissertações e cerca de 177 mil teses de 123 instituições de ensino superior - IES participantes.

A investigação ocorreu por meio da utilização de palavras-chave relacionadas ao biogás e à eletricidade, ou seja, a ocorrência conjunta das palavras “biogás” e “eletricidade”

nos textos acadêmicos do acervo virtual da BDTD foi utilizada como ferramenta metodológica. Tal escrutínio foi realizado considerando os períodos históricos de maior relevância do biogás no Brasil, conforme levantamento feito por De Oliveira e Negro (2019), a saber: 1979-1986, 1987-2002, 2003-2011 e 2012-2016. De semelhante modo, o período entre 2017-2020 também foi investigado, visto que é nele que, pela primeira vez, o biogás é estudado separadamente da biomassa sólida pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (EPE, 2018).

Os resultados foram organizados considerando a região do país onde está localizada a IES responsável pela produção das dissertações e teses, o período histórico do biogás, o tipo de documento (dissertação/tese), a quantidade total de documentos encontrados, o número de IES que depositaram seus trabalhos no acervo da BDTD e as IES que mais contribuíram com dissertações e teses em cada período analisado.

3. Resultados e discussões

Durante o 1º Período (1979-1986), não foram encontradas dissertações e teses relacionadas à aplicação do biogás na geração de energia elétrica no acervo da BDTD. No entanto, De Oliveira e Negro (2019) destacam que foi nesse período que surgiram as primeiras iniciativas do poder público para incentivar a geração de biogás no Brasil. Fatores como as crises do petróleo em 1973 e 1979, a demanda por saneamento rural, o interesse por biofertilizantes, as alternativas para o tratamento do vinhoto e a utilização dos gases provenientes de lixões/aterros sanitários impulsionaram o surgimento do Sistema Tecnológico de Inovação Brasileiro do Biogás (STIBB) e estimularam o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à geração, purificação e aproveitamento do biogás no país (BORGES, 2020).

A falta de publicações de dissertações e teses relacionadas ao uso do biogás na geração de energia elétrica pode estar relacionada à conjuntura do país no período e não ao desinteresse das IES pelo tema. Ribeiro e Da Silva (2010) destacam que, em 1984, a participação da hidreletricidade na matriz elétrica nacional correspondia a 92,9%, ou seja, as contribuições de outras fontes, como as termelétricas, eram bastante insignificantes naquele período. Tal cenário pode justificar o baixo interesse dos órgãos públicos de fomento na destinação de investimentos às IES em pesquisas com biogás para a geração de eletricidade.

Furtado et al. (2011) explicam que, em 1973, o Brasil dependia de 80% das importações de petróleo. O preço desta *commodity* praticamente quadruplicou durante a primeira crise do petróleo (1973), o que pode ter levado o governo a buscar alternativas mais viáveis a curto prazo. Nesse contexto, foram direcionados investimentos significativos para a

indústria canavieira, um setor que já era amplamente conhecido desde o período colonial e que possuía uma infraestrutura industrial relativamente consolidada. O surgimento do PróÁlcool, em 1975, foi um dos resultados deste enfrentamento à crise do petróleo (WISSMANN; SHIKIDA, 2017; VALÉRIO, 2021).

Por outro lado, os reatores geradores de biogás estavam mal distribuídos, sendo instalados principalmente em áreas rurais e geralmente com baixa capacidade produtiva (modelo indiano). Portanto, a infraestrutura do biogás precisaria se desenvolver primeiro para atender à demanda energética urgente, o que demandaria muito tempo (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019; DOS SANTOS E SILVA et al., 2019; BORGES, 2020).

É importante ressaltar que, de acordo com levantamentos realizados por De Oliveira e Negro (2019), algumas instituições com tradição em pesquisas agrícolas receberam incentivos para o desenvolvimento do biogás no período (1979-1986). Entre essas instituições, destaca-se a Universidade Estadual Paulista (UNESP), a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), a Universidade Estadual de Londrina (UEL) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). No entanto, é provável que esses investimentos tenham reflexos nas dissertações e teses apenas nos próximos períodos, especialmente no que diz respeito à aplicação do biogás para geração de energia elétrica, que é o foco desta linha de pesquisa.

No período de 1987 a 2002, o segundo período analisado, foram encontradas apenas três publicações relacionadas ao tema no acervo da BDTD. Duas delas são dissertações e uma é uma tese, como mostrado na **Tabela 1**. Dentre essas publicações, destaca-se a dissertação intitulada "*Avaliação do uso da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica (Estudo de caso)*", de autoria de Reinaldo Alves Almança, da Universidade de São Paulo (USP), publicada em 1994 (ALMANÇA, 1994).

Tabela 1: Dissertações e teses relacionadas ao biogás para geração de energia elétrica durante os períodos históricos do biogás no Brasil, conforme De Oliveira e Negro (2019)

Região do País	Período	Tipo de Documento	Quantidade de Documento	Total de IES Depositantes na BDTD	* IES c/ maior n.º de Depósitos na BDTD
Sudeste	1987-2002	Dissertações	02	02	USP (1), UNICAMP (1)
Sudeste	1987-2002	Teses	01	01	UNESP (1)
Centro-oeste	2003-2011	Dissertações	05	03	UFMS (3)
Centro-oeste	2003-2011	Teses	0	-	-
Nordeste	2003-2011	Dissertações	07	05	UFBA (2), UFC (2)

Nordeste	2003-2011	Teses	01	01	UFPE (1)
Norte	2003-2011	Dissertações	01	01	UFAM (1)
Norte	2003-2011	Teses	0	-	-
Sudeste	2003-2011	Dissertações	29	11	UNESP (5), UNICAMP (5), USP (5)
Sudeste	2003-2011	Teses	09	07	UNESP (3)
Sul	2003-2011	Dissertações	13	05	UNIOESTE (5)
Sul	2003-2011	Teses	0	-	-
Centro-oeste	2012-2016	Dissertações	06	04	UFMS (3)
Centro-oeste	2012-2016	Teses	01	01	UNB (1)
Nordeste	2012-2016	Dissertações	05	04	UFPE (2)
Nordeste	2012-2016	Teses	0	-	-
Norte	2012-2016	Dissertações	01	01	UFT (1)
Norte	2012-2016	Teses	0	-	-
Sudeste	2012-2016	Dissertações	43	16	UNIFEI (8)
Sudeste	2012-2016	Teses	13	06	UNESP (4)
Sul	2012-2016	Dissertações	35	07	UNIOESTE (15)
Sul	2012-2016	Teses	07	04	UFRGS (3)
Centro-oeste	2017-2020	Dissertações	04	01	UNB (4)
Centro-oeste	2017-2020	Tese	0	-	-
Nordeste	2017-2020	Dissertações	05	04	UFC (2)
Nordeste	2017-2020	Teses	01	01	UFPE (1)
Norte	2017-2020	Dissertações	04	01	UFT (4)
Norte	2017-2020	Teses	0	-	-
Sudeste	2017-2020	Dissertações	36	10	UNESP (12)
Sudeste	2017-2020	Teses	17	05	UNESP (5), USP (5)
Sul	2017-2020	Dissertações	23	08	UNIOESTE (10)
Sul	2017-2020	Teses	03	03	UFRGS (1), UFSC (1), UFSM (1)

* N.º de trabalhos realizados por dada IES encontrados no acervo da BDTD. Fonte: Elaborada a partir dos dados da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações - BDTD, (2021).

Nessa dissertação, o pesquisador avaliou o uso da vinhaça, um subproduto da

produção de cana-de-açúcar, para a geração de energia elétrica por meio do biogás. No entanto, ele concluiu que, apesar de ser uma prática promissora, a geração de energia elétrica a partir do biogás da vinhaça não seria economicamente viável. Os custos de produção de um MWh (megawatt-hora) e a instalação de unidades geradoras de biogás eram consideravelmente mais altos em comparação à geração de energia hidrelétrica. Isso era justificado pelo fato de que, em 1994, a energia hidráulica representava 83,2% da matriz elétrica nacional.

Esses resultados sugerem que, nesse período, apesar do interesse no tema do biogás, os estudos ainda não apresentavam viabilidade econômica para a geração de energia elétrica, em comparação com outras fontes mais estabelecidas, como a hidreletricidade.

Durante o segundo período analisado (1987-2002), foram encontradas apenas mais duas publicações sobre a aplicação do biogás na geração de energia elétrica. Uma delas é uma tese da Universidade Estadual Paulista (UNESP), e a outra é uma dissertação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), ambas publicadas no final desse período, em 2002.

A baixa produção intelectual disponível na BDTD para esse período pode ser reflexo dos acontecimentos tanto internos quanto internacionais que afetaram o setor energético brasileiro. De acordo com De Oliveira e Negro (2019), a queda abrupta do preço do petróleo no mercado internacional no final do período anterior (1986) teve um papel importante na interrupção dos investimentos governamentais em projetos relacionados ao biogás. Além disso, a indústria canavieira estava bastante ativa nesse período, produzindo açúcar, etanol e biomassa residual em abundância, que era prontamente utilizada para a geração de eletricidade. Nesse contexto, os estudos envolvendo a aplicação do biogás na geração de energia elétrica não receberam incentivos significativos.

Esses fatores contribuíram para a escassez de pesquisas sobre o tema nesse período, já que o interesse e os investimentos estavam direcionados principalmente para a indústria canavieira e outras fontes de energia mais estabelecidas.

No 3º Período, que abrangeu o período entre 2003 e 2011, houve a participação das instituições de pós-graduação das cinco regiões do país, conforme evidenciado na **Tabela 1**. O acervo da BDTD registra um total de 55 dissertações e 10 teses nesse período. A análise dos dados revela que 52,7% das dissertações e 90% das teses foram publicadas na região Sudeste, enquanto o Norte contribuiu com apenas 1,82% das dissertações, não havendo registros de trabalhos de tese. Além disso, é interessante observar que, apesar de o Sudeste possuir mais da metade das dissertações depositadas, a região Sul apresenta quase o dobro do número de trabalhos em comparação ao Nordeste, que registrou uma quantidade menor.

Esses resultados sugerem uma possível relação com o que foi apontado por De Oliveira e Negro (2019) em relação aos investimentos direcionados às instituições com vocação agrícola, conforme discutido no 1º Período Histórico. É notável que a produção da Universidade Estadual Paulista (UNESP) nesta fase representou 9,09% e 30% de todos os depósitos encontrados na BDTD para dissertações e teses, respectivamente.

Nesta fase, dois fatores podem ter contribuído para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas relacionadas ao uso do biogás para geração de eletricidade: o fortalecimento do ambiente regulatório do setor de energias renováveis e o estímulo aos mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL). De acordo com Gueri et al. (2016), a Lei n.º 10.438/2002 teve um papel importante ao incentivar a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Essa lei estabeleceu a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e estabeleceu outras diretrizes (BRASIL, 2002). No entanto, embora essa lei tenha promovido avanços na promoção das energias renováveis, não abordou especificamente o uso do biogás ou biometano, apesar de regulamentar a utilização de biomassa para a geração de energia elétrica.

De acordo com De Oliveira e Negro (2019) e Borges (2020), os mecanismos de desenvolvimento limpo, a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEEs), a urgência em substituir o modelo econômico baseado em combustíveis fósseis e a possibilidade de criar um mercado global de crédito de carbono, estabelecidos pelo Protocolo de Quioto em 2005, favoreceram o setor do biogás no Brasil. Essa tendência se manifestou tanto em áreas rurais, com o aproveitamento de resíduos agrossilvopastoris, quanto em áreas urbanas, com o aproveitamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) e estações de tratamento de esgoto (ETE).

No 4º Período (2012-2016), foi a região Sul que registrou o maior crescimento (2,69 vezes) em relação às dissertações disponibilizadas na plataforma da BDTD. O número de trabalhos na região passou de 13 no período de 2003-2011 para 35 na fase atual (**Tabela 1**). Dentre as sete Instituições de Ensino Superior (IES) participantes nessa região, a Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, contribuiu com 15 dessas dissertações. A região Norte manteve o mesmo número de publicações, enquanto o Nordeste apresentou uma redução de quase 29% em relação ao número de dissertações entre os dois períodos analisados (3º e 4º Períodos, respectivamente). Em termos absolutos, o Sudeste teve a maior participação tanto em teses quanto em dissertações, enquanto no Centro-Oeste, apenas uma tese foi apresentada nesse período.

O saldo total de 111 publicações disponibilizadas na BDTD foi o maior entre todos os períodos analisados, o que pode ser atribuído à soma dos trabalhos iniciados no período anterior com os atuais, especialmente no caso das teses, cujo tempo para conclusão geralmente é de quatro anos. Isso demonstra que as Instituições de Ensino Superior brasileiras estão atentas aos desdobramentos nacionais e internacionais relacionados às mudanças climáticas, emissões de gases de efeito estufa, aquecimento global e substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas e renováveis. Esses são temas amplamente abordados no Protocolo de Quioto, estabelecido em 2005.

Nesta fase, o país enfrentava diversos desafios no setor elétrico. Segundo De Oliveira e Negro (2019), a alta dependência da energia hidrelétrica resultou em uma grande crise energética. Durante o 4º Período, o Brasil enfrentou uma forte estiagem que comprometeu o abastecimento dos reservatórios. Coincidentemente, foi nesse ciclo que o ambiente regulatório das energias renováveis, em especial o do biogás, ganhou solidez (**Quadro 1**). A Associação Brasileira de Biogás e Biometano - ABIOGÁS (2021) destaca os avanços legais e normativos para a consolidação do marco regulatório brasileiro do biogás:

Quadro 1: Ambiente regulatório da geração, uso, tarifação, distribuição e conversão em energia elétrica do biogás/biometano no Brasil, conforme ABIOGÁS (2021)

- A nota técnica emitida pela EPE nº 13/14 de 2014, na qual a EPE detalha os possíveis usos do biogás e biometano, ressaltando a importância desses biocombustíveis para a geração de energia elétrica;
- As Resoluções 482/12 e 687/15 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de 2012 e 2015, respectivamente, que incentivaram a participação das fontes renováveis na geração distribuída (produção e fornecimento de energia elétrica de forma descentralizada) em mini e microgeração (até 75 kW e até 5 MW, respectivamente);
- Em 2004, a ANEEL promoveu o uso do biogás ao oferecer isenções tarifárias para empreendimentos que gerassem eletricidade com esse biocombustível;
- O lançamento do leilão de energia elétrica (Energia de Reserva) a partir de biogás/biometano. Em 2014, a ANEEL realizou o Leilão A-3 com o preço de oferta de R\$169,00/MW gerado com biogás/biometano;
- Em 2015, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP estabeleceu os parâmetros de utilização do biometano como combustível por meio da Resolução 08/2015.

Fonte: Elaborado a partir de ABIOGÁS (2021).

A ABIOGÁS (2021) destaca que os estados brasileiros com uma forte vocação agrícola ou no setor sucroenergético apresentaram um ambiente regulatório mais favorável para o uso do biogás e biometano. Conforme apontado por De Oliveira e Negro (2019), essas regulamentações propiciaram parcerias com entidades de pesquisa nacionais e estrangeiras. Os estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Rio Grande do Sul, Pernambuco, Minas Gerais, Espírito Santo e Ceará possuem regulações, normas e tarifas estabelecidas para as aplicações do biogás e biometano (ABIOGÁS, 2021). É possível que essa conjuntura tenha

impactado positivamente a produção acadêmica de dissertações e teses relacionadas à geração de energia elétrica a partir do biogás no período histórico em escrutínio.

O 5º período (2017-2020) é o menor entre todas as fases analisadas (**Tabela 1**). No entanto, é importante ressaltar que esta pesquisa não considera o ano de 2020 como o encerramento de um ciclo, mas sim uma delimitação cronológica baseada no momento em que o presente estudo foi realizado. Borges (2020) destaca o início dessa nova fase, mencionando a importância atribuída ao biogás em estudos que o abordam separadamente das biomassas sólidas. O autor baseia-se no trabalho publicado pela EPE em 2018, intitulado “*Plano Decenal de Expansão de Energia 2027*”. De acordo com Borges (2020), o aumento de instalações de grande porte para a geração de biometano, a fabricação de veículos pesados movidos a GNV/biometano e a aproximação dos setores de saneamento e produção agroindustrial em relação aos avanços tecnológicos dos veículos pesados são fortes indícios de uma nova fase promissora para o biogás.

Apesar do cenário favorável para os multiúso do biogás apontado por Borges (2020), algumas regiões tiveram estagnação ou mesmo redução em suas pesquisas sobre geração de energia elétrica a partir do biogás. Por exemplo, o Centro-Oeste teve uma redução de quase 34% no número de dissertações e uma diminuição no número de IES envolvidas, passando de quatro para apenas uma. Enquanto o Nordeste manteve o mesmo número de dissertações e IES envolvidas em comparação com o período histórico anterior (**Tabela 1**).

Mesmo não tendo publicado nenhuma tese em nenhum dos períodos analisados, a região Norte quadruplicou o número de dissertações entre o período anterior e o atual. Apenas duas instituições de ensino superior estiveram constantemente envolvidas nas publicações da região Norte, a Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e a Universidade Federal do Tocantins (UFT).

No caso das regiões Sudeste e Sul, houve uma redução no número de trabalhos, com exceção do aumento significativo no número de teses no Sudeste, que passou de 13 para 17 publicações no acervo da BDTD entre o 4º e o 5º período. No entanto, o total de instituições de ensino superior participantes foi reduzido de 6 para 5. Esses resultados parecem estar de acordo com as observações de De Oliveira e Negro (2019) sobre os incentivos governamentais direcionados às instituições de ensino superior com maior vocação rural, uma vez que a maioria das contribuições do Sudeste em dissertações e teses vem da UNESP.

Diferentemente dos períodos históricos abordados por De Oliveira e Negro (2019), o 5º período (iniciado em 2017) pode ser o mais produtivo para os estudos desenvolvidos pelas IES, em todas as regiões do Brasil, sobre o uso do biogás na geração de eletricidade. Este

momento favorável pode estar associado com os avanços recentes no ambiente regulatório do biogás (**Quadro 1**); a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS); aos setores com grande potencial de produção de biogás/biometano, como o saneamento básico urbano e rural, além da indústria sucroenergética, dentre outros segmentos (ABIOGÁS, 2021).

As recentes mudanças no cenário internacional também podem impulsionar as instituições de ensino superior do Brasil a desenvolver pesquisas sobre o uso do biogás na geração de eletricidade. Por exemplo, o retorno dos Estados Unidos ao Acordo de Paris sobre mudanças climáticas, o desligamento definitivo das centrais term nucleares e de carvão mineral na Alemanha até 2022 e 2038, respectivamente, e a decisão do Japão de substituir a energia nuclear por fontes renováveis até 2040. Esses são grandes estímulos para os pesquisadores brasileiros nas instituições de ensino superior, especialmente aquelas que estão buscando a internacionalização de seus programas de pós-graduação, uma vez que o biogás desperdiçado poderia suprir 36% do consumo de energia elétrica do país (ABIOGÁS, 2021).

4. Considerações finais

O presente estudo constatou um aumento no número de dissertações e teses sobre o uso do biogás para geração de energia elétrica ao longo dos períodos analisados, com maior participação da região Sudeste, com destaque para UNESP, UNICAMP e USP. As regiões Sul, Nordeste, Centro-Oeste e Norte também apresentaram contribuições, embora com menor participação.

Apesar das limitações enfrentadas pelas instituições de ensino superior (IES) brasileiras, os estudos relacionados ao uso do biogás na geração de eletricidade têm apresentado avanços significativos. Através do acompanhamento das fases analisadas neste estudo, observamos um crescimento na produção acadêmica, com um aumento no número de dissertações e teses relacionadas ao biogás, especialmente nos períodos mais recentes. A existência de um ambiente regulatório mais sólido, aliado a fatores como o potencial do biogás em setores como saneamento básico, resíduos sólidos e indústria sucroenergética, tem impulsionado o interesse e a pesquisa nessa área.

No entanto, é importante ressaltar que a falta de investimentos continua sendo um desafio para o avanço científico e tecnológico nas IES. Para que as energias renováveis, como o biogás, possam desempenhar um papel de destaque na matriz elétrica brasileira, é fundamental que os setores responsáveis pelo fomento à pesquisa, ensino e extensão estejam atentos e sensíveis às demandas e desafios enfrentados pelas IES em todo o país. Além disso, é necessário promover um maior investimento em infraestrutura e recursos para a realização

de pesquisas e desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao biogás.

No contexto internacional, as recentes mudanças no cenário energético e ambiental, como o retorno dos Estados Unidos ao Acordo de Paris e a transição para fontes renováveis em países como Alemanha e Japão, oferecem estímulos adicionais para os pesquisadores brasileiros. Essas oportunidades devem ser aproveitadas para impulsionar a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao biogás no Brasil.

Portanto, é essencial que haja uma cooperação efetiva entre as instituições de ensino superior, os setores governamentais e a indústria, visando o fortalecimento da pesquisa e o desenvolvimento de soluções inovadoras para a geração de eletricidade a partir do biogás. Somente através de um investimento contínuo e do estabelecimento de parcerias estratégicas será possível alcançar uma matriz energética mais sustentável e diversificada, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para o enfrentamento dos desafios relacionados às mudanças climáticas.

5. Referências

ABBASI, Tasneem; ABBASI, S.A. Production of clean energy by anaerobic digestion of phytomass—New prospects for a global warming amelioration technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 6, p. 1653–1659, 2010.

ABBASI, Tasneem; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. A Brief History of Anaerobic Digestion and “Biogas.” In: **Biogas Energy**. New York, NY: Springer New York, p. 11–23, 2012.

ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano** - PNBB. Associação Brasileira de Biogás e Biometano, São Paulo, 2021. Disponível em: <www.abiogas.org.br>. Acesso em: 21 fev. 2021.

ALMANÇA, Reinaldo Alves. **Avaliação do uso da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica (Estudo de caso)**. 1994. 144f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Interunidades em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

BDTD - **Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações**. Disponível em: <<https://bdtd.ibict.br/vufind/>>. Acesso em: 13 fev. 2021.

BOND, Tom; TEMPLETON, Michael R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, n. 4, p. 347–354, 2011.

BORGES, Cosme Polese. **Sistema tecnológico de inovação do biogás do Brasil: uma análise funcional e prospectiva**. 2020. 212f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

BRASIL. Lei Federal n.º 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento

Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2002.

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **InfoMercado**: Dados Individuais. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, São Paulo, 2020. Disponível em: <www.ccee.org.br>. Acesso em: 21 fev. 2021.

DENG, Liangwei; LIU, Yi; ZHENG, Dan; *et al.* Application and development of biogas technology for the treatment of waste in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 845–851, 2017.

DE OLIVEIRA, Luiz Gustavo Silva; NEGRO, Simona O. Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 462–481, 2019.

DOS SANTOS E SILVA, Daniella Fartes; BOMTEMPO, José Vitor; ALVES, Flávia Chaves. Innovation opportunities in the Brazilian sugar-energy sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 871–879, 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2019**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em: 13 fev. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em: 20 fev. 2021.

FURTADO, André Tosi; SCANDIFFIO, Mirna Ivonne Gaya; CORTEZ, Luis Augusto Barbosa. The Brazilian sugarcane innovation system. **Energy Policy**, v. 39, n. 1, p. 156–166, 2011.

GARFÍ, Marianna; MARTÍ-HERRERO, Jaime; GARWOOD, Anna; *et al.* Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 599–614, 2016.

GUERI, Matheus Vitor Diniz; BURATTO, William Gouvêa; RIBEIRO, Camilo Bastos; *et al.* Políticas Nacionais de Incentivo ao Uso Energético do Biogás e Biometano. **Acta Iguazu**, v. 5, n. 5, p. 160-171, 2016.

IGLIŃSKI, Bartłomiej; BUCZKOWSKI, Roman; IGLIŃSKA, Anna; *et al.* Agricultural biogas plants in Poland: Investment process, economical and environmental aspects, biogas potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4890–4900, 2012.

RIBEIRO, Flávio de Miranda; DA SILVA, Gil Anderi. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 1, p. 44–54, 2010.

SANTOS, Rafaela Ediene dos; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; BARROS, Regina Mambeli; *et al.* Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 198–206, 2019.

SÄRKILAHITI, Maarit; KINNUNEN, Viljami; KETTUNEN, Riitta; *et al.* Replacing centralised waste and sanitation infrastructure with local treatment and nutrient recycling: Expert opinions in the context of urban planning. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 118, p. 195–204, 2017.

SESSA, Celso Bissoli; SIMONATO, Thiago Cavalcante; DOMINGUES, Edson Paulo. O Ciclo das Commodities e Crescimento Regional Desigual no Brasil: uma aplicação de Equilíbrio Geral Computável (EGC). In: **Blucher Engineering Proceedings**. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. In: Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). **Empresa de Pesquisa Energética - EPE**. Rio de Janeiro, 2016.

VALÉRIO, Valmir José de Oliveira. Agronegócio sucroenergético: a face atualizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Geografia em Atos (Online)**, v. 5, p. 1–21, 2021.

WISSMANN, Martin Airton; SHIKIDA, Pery Francisco Assis. Impactos econômicos, ambientais e sociais da agroindústria canavieira no Brasil. **DESENVOLVIMENTO, FRONTEIRAS E CIDADANIA**, v. 1, n. 1, p. 134-160, 2017.

Capítulo II - Estabilização de resíduos alimentares hortifrutícolas em biodigestor anaeróbico: oportunidade de saneamento ambiental e geração de biogás

Resumo: Estabelecimentos que comercializam frutas e verduras geram grande volume de resíduos que acabam em aterros sanitários. O objetivo do presente estudo foi contribuir com o saneamento ambiental e produção de biogás, utilizando resíduos alimentares hortifrutícolas gerados por uma empresa paraibana de abastecimento. Deste modo, um biodigestor de superfície de 1 m³ foi utilizado para aclimatar tais resíduos, sem adição de inoculação exógena. O digestato previamente aclimatado (inóculo endógeno) serviu para estabilizar os resíduos em intervalos de alimentação a cada 60 dias, sob homogeneização por recirculação do biogás. Como resultado, foi obtido 5,34±6,13 a 5,50±5,43 L/h de biogás produzido, com 6,86±4,44 a 5,90±4,75 L/h de recirculação, em 5,09±0,544 a 6,00±0,174 de pH superior e 4,57±0,611 a 6,10±0,127 de pH inferior. Dessa forma, a estabilização anaeróbica demonstrou eficácia na promoção do saneamento ambiental ao tratar uma parte dos resíduos alimentares gerados por uma empresa de abastecimento, os quais são atualmente encaminhados para o aterro sanitário. Contudo, constatou-se que o digestato endógeno não contribuiu com a produção de biogás inflamável.

Palavras-chave: resíduos alimentares; estabilização anaeróbica; saneamento ambiental.

Abstract: Establishments that market fruits and vegetables generate a significant volume of waste that ends up in landfills. The aim of the present study was to contribute to environmental sanitation and biogas production using horticultural food waste generated by a company engaged in supply in Paraíba. In this way, a 1 m³ surface biodigester was employed to acclimate such waste, without the addition of exogenous inoculation. The previously acclimated digestate (endogenous inoculum) served to stabilize the waste at feeding intervals every 60 days, under homogenization through biogas recirculation. As a result, a range of 5.34±6.13 to 5.50±5.43 L/h of produced biogas was obtained, with recirculation ranging from 6.86±4.44 to 5.90±4.75 L/h, and pH values ranging from 5.09±0.544 to 6.00±0.174 for the upper pH and from 4.57±0.611 to 6.10±0.127 for the lower pH. In this way, anaerobic stabilization has demonstrated effectiveness in promoting environmental sanitation by treating a portion of the food waste generated by a supply company, which is currently sent to the landfill. However, it was found that the endogenous digestate did not contribute to the production of flammable biogas.

Keywords: food waste; anaerobic stabilization; environmental sanitation.

1. Introdução

Frutas e verduras frescas, devido à sua alta concentração de água e carboidratos, são altamente perecíveis e suscetíveis à decomposição. Microrganismos que se beneficiam desses nutrientes, liberam enzimas e subprodutos como CO₂, água e compostos menos complexos. Estratégias como a digestão anaeróbica têm sido exploradas para aproveitar os resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs, contribuindo para a sustentabilidade e gestão adequada desses resíduos orgânicos (NANDA et al., 2016; JI et al., 2017; EDWIGES et al., 2018).

A destinação inadequada de resíduos alimentares para aterros sanitários, apesar da possível recuperação de biogás nesses locais, é a pior escolha (GUVEN et al., 2019). Eriksson

et al. (2015) ao compararem seis opções de tratamento de resíduos alimentares, concluíram que a digestão anaeróbica em biodigestores foi a segunda melhor opção (doação foi a melhor escolha), apresentando resultados favoráveis para o combate às mudanças climáticas. Em contraste, a incineração contribuiu para a acidificação e eutrofização (GAO et al., 2017).

Enviar RAHs para aterro sanitário é uma significativa perda de recursos energéticos. Estudos como realizados por Edwiges et al. (2018) e Masebinu et al. (2018) destacam a alta biodegradabilidade desses resíduos, atingindo taxas de 79% e 78,74%, respectivamente, permitindo rápida hidrólise e eficiente geração de biogás em 4 a 6 dias. Além do benefício energético, Chowdhury et al. (2022) e Cudjoe et al. (2022) ressaltam a contribuição da biodigestão para metas da ONU, como os ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Combate as Mudanças Climáticas).

Os biodigestores, ao recuperar nutrientes de resíduos orgânicos, contribuem para aliviar a pressão ambiental sobre depósitos minerais. Recursos finitos como rochas fosfáticas, que contêm o vital fósforo (P), são explorados para atender à crescente demanda por alimentos. Isso destaca a importância dos biodigestores na gestão sustentável de nutrientes, conforme apontado por Jackson (2016), Mnthambala et al. (2021) e Cândido et al. (2022).

Aproximadamente 2 bilhões de pessoas no mundo estão enfrentando insegurança alimentar, desnutrição ou mesmo fome. Torna-se imperativo o uso de métodos para recuperar os nutrientes presentes nos resíduos orgânicos alimentares e aplicá-los na agricultura. Ao contrário do petróleo, o fósforo não tem substituto e suas fontes minerais podem se esgotar em menos de 50 anos (LATIF et al., 2017; FAO et al., 2020).

Em sociedades patriarcais, mulheres e crianças muitas vezes são encarregadas de fornecer lenha para uso energético, uma imposição social. Essa responsabilidade não recai sobre os homens nesses contextos. O processo envolvido na busca, coleta, transporte e preparação de lenha é demorado e exaustivo, podendo resultar em sérios problemas de saúde, como doenças respiratórias, musculoesqueléticas e câncer. Enquanto isso, atividades emancipatórias, como educação, participação na comunidade e emprego remunerado, são consistentemente negligenciadas, especialmente para as mulheres (SIDH; BASU, 2011; SURENDRA et al., 2014; IEA et al., 2019; RAHMAN et al., 2019).

Presta-Novello et al. (2023) investigaram os efeitos da digestão anaeróbica de resíduos agrícolas do café e da produção de biogás na rotina das mulheres colombianas. As autoras constataram melhorias significativas na qualidade de vida das mulheres cafeicultoras, além de benefícios sociais, econômicos e ambientais para toda a comunidade.

A produção de biogás depende de condições biológicas específicas. Para otimizar o tratamento de resíduos orgânicos e acelerar a produção de biogás, operadores de biodigestores usam várias fontes de microrganismos, prática conhecida como inoculação microbiana. Esterco de animais, efluentes de ETEs, lodo de ETEs e digestato de biodigestores são alguns inoculantes comumente utilizados (HOSSEINI KOUPAIE et al., 2019; OFON et al., 2021).

Dejetos da bovinocultura são usados em co-digestão com outros resíduos para gerar biogás. Contudo, o gerenciamento desses dejetos pode causar impactos negativos, como a emissão de GEEs e poluição ambiental, antes de chegarem aos biodigestores. Portanto, é crucial investigar técnicas que promovam a adaptação dos microrganismos aos resíduos orgânicos com mínima dependência de fontes causadoras de impactos ambientais (SAKADEVAN; NGUYEN, 2017; CONG et al., 2018; HOSSEINI KOUPAIE et al., 2019).

Santos (2019) realizou um estudo sobre o gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos - RSUs na Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - EMPASA, Seção João Pessoa/PB. A pesquisadora estimou que, em 2017, 162 toneladas de RSUs foram geradas por mês. Destes, 65% eram compostos por resíduos orgânicos, dos quais parte era submetida à compostagem e outra parte era destinada ao aterro sanitário municipal.

Diante do exposto, a pergunta norteadora desta investigação é: Como o tratamento anaeróbico dos RAHs, sem inoculação exógena e combinados com o uso de alcalinizantes, pode efetivamente promover o saneamento ambiental e a produção sustentável de biogás, atendendo ao ODS 7 (Energia Acessível e Limpa) da ONU?

Enquanto o objetivo geral deste trabalho é promover o saneamento ambiental e a geração de energia limpa e renovável através da estabilização por via anaeróbica dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs e produção de biogás sem adição de inóculos exógenos.

Os objetivos específicos desta pesquisa são: testar o tratamento anaeróbico dos RAHs por 180 dias com inserções de resíduos a cada 60 dias na promoção do saneamento ambiental; testar a produção de biogás através da biodigestão anaeróbica dos RAHs por 180 dias com inserções de resíduos a cada 60 dias para geração de energia acessível, limpa e renovável em atendimento ao ODS 7 da ONU; e, testar o uso de alcalinizantes (bicarbonato de sódio comercial e cascas de ovos de galinha) como forma de manter o pH em faixa ótima da digestão anaeróbica para produção de biogás inflamável. Essa pesquisa é necessária devido à importância de propor um tratamento adequado para a grande parcela de RAHs gerados pela EMPASA/JP que ainda é destinada ao aterro sanitário municipal sem qualquer tratamento ambientalmente correto (SANTOS, 2019).

2. Materiais e Métodos

A parte experimental da pesquisa, que abarcou a construção do biodigestor doméstico, a coleta dos RAHs, seu processamento, digestão anaeróbica e produção de biogás, ocorreu entre 05/07/2019 a 30/06/2021 nas instalações da Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - EMPASA, Seção João Pessoa, Estado da Paraíba, Brasil. A EMPASA/JP está localizada na Rua Presidente Ranieri Mazilli, 952-1100, bairro Cristo Redentor, João Pessoa - PB, CEP 58071-000, com as coordenadas geográficas 7° 10' 00.4"S e 34° 51' 53.2"W (Setor Administrativo) - **Figura 1**.

Figura 1: Representação esquemática do Brasil (à esquerda) e do Estado da Paraíba (ao centro). Na imagem (à direita) está localizada a EMPASA/JP. O destaque (círculo vermelho) refere-se ao local dos experimentos de estabilização anaeróbica e geração de biogás



Fonte: Adaptado de MapChart (2023), Google Earth (2023) e Google Images (2023).

Os RAHs utilizados na biodigestão foram coletados aleatoriamente no percurso previamente estabelecido (**Figura 2**).

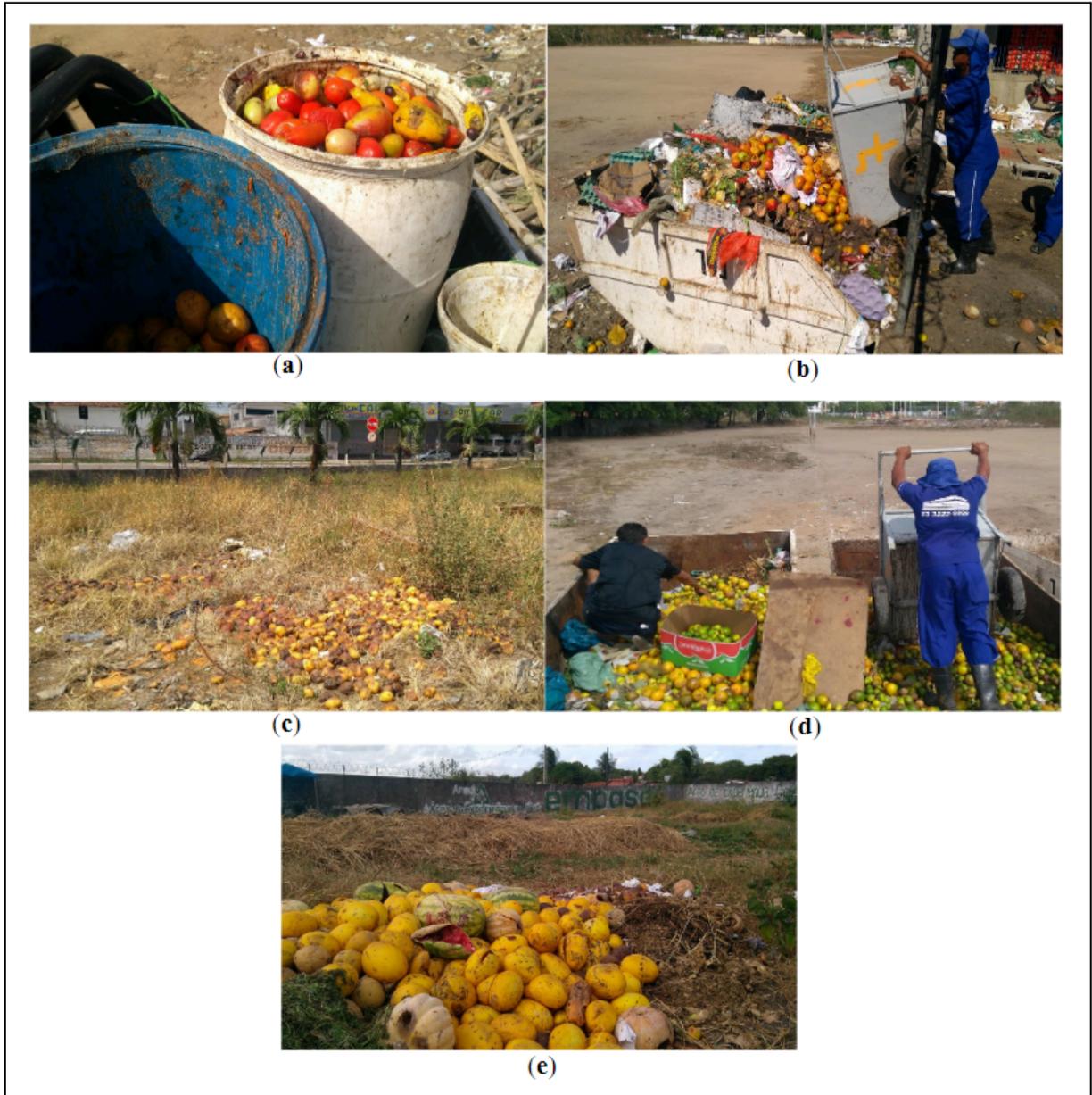
Figura 2: EMPASA/JP. Trajeto realizado durante a coleta de RAHs para biodigestão. As setas vermelhas indicam o sentido do percurso das capturas dos RAHs



Fonte: Adaptado do Google Earth (2023).

Os critérios de elegibilidade dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs estão ilustrados na **Figura 3**.

Figura 3: Principais destinos dos resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs gerados pela EMPASA/JP. Foram considerados elegíveis como substrato orgânico para a pesquisa: os RAHs encontrados nos coletores de resíduos localizados nas vias de acesso aos comerciantes (**Figura 3a**); os RAHs depositados nas caçambas de resíduos sólidos urbanos antes de serem levados ao aterro sanitário municipal (**Figura 3b**); ou ainda, os RAHs abandonados em áreas comuns nas dependências da EMPASA (**Figura 3c**). A exceção se deu quando foi identificado uma ou mais pessoas se beneficiando dos alimentos descartados nos referidos locais durante as coletas (**Figura 3d**) e/ou os resíduos dispostos nas preparações das leiras de compostagem (**Figura 3e**)



Fonte: Elaboração própria (2023).

Para evitar obstruções no interior do biorreator e dificuldades na homogeneização do material em digestão, estabeleceu-se um limite máximo de $\frac{1}{3}$ (em volume) da capacidade do equipamento para a inserção dos RAHs, reservando o restante para a adição de água, alcalinizantes e digestato aclimatado (**Tabela 1**).

Tabela 1: Conteúdo inserido no biodigestor em cada um dos três Ciclos experimentais, ou seja, quantitativo de RAHs, Água e Alcalinizantes inseridos no Biorreator, bem como o volume de Digestato que permaneceu no interior do equipamento entre os Ciclos

Insumos	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
RAHs (L) e (kg)	246,0 e 243,5	250,0 e 228,7	330,0 e 258,3
Água (L)	504,0	500,0	420,0
Alcalinizantes (kg)	14,0*	15,0*	3,0*
Digestato (L)	250,0	250,0	250,0

*Referem-se ao bicarbonato de sódio comercial (50%) e cascas de ovos trituradas (50%). Fonte: Elaboração própria (2023).

O digestato aclimatado inicial foi obtido de um ciclo de 60 dias de biodigestão anaeróbica de RAHs anteriormente realizado, servindo de inóculo endógeno para os ciclos que se seguiram, ou seja, Ciclo 1 (executado entre o Dia 1 até o Dia 60), Ciclo 2 (executado entre o Dia 61 até o Dia 120) e Ciclo 3 (executado entre o Dia 121 até o Dia 180). A alimentação do equipamento se deu de forma única no primeiro dia de cada Ciclo experimental, assim os RAHs foram inseridos no Dia 1, Dia 61 e Dia 121, respectivamente Ciclo 1, Ciclo 2 e Ciclo 3 (**Tabela 1**).

Portanto, não foi administrado inoculação microbiana exógena em nenhum momento durante os 180 dias de experimentação, apenas RAHs, água, alcalinizantes e digestato aclimatado. Deste modo, o biodigestor foi alimentado com RAHs em intervalos de 60 dias, assim, entre o final de um Ciclo e início de outro, 750 L do digestato era removido do biorreator para dar lugar ao conteúdo do novo Ciclo, enquanto 250 L permanecia no equipamento para servir como inóculo microbiano endógeno, conforme os valores descritos na **Tabela 1**.

Para atender aos objetivos da pesquisa foi construído um biodigestor de superfície, em escala doméstica, com capacidade nominal de 1 m³ a partir de materiais alternativos. Foram utilizados materiais e acessórios de segundo uso, ou seja, reservatórios reaproveitados e equipamentos submetidos a adaptações necessárias para o uso combinado das técnicas de Aclimação e Recirculação do Biogás durante o tratamento anaeróbico dos RAHs e geração de biogás. Assim, pneus inservíveis, placas quebradas de vidro, carcaças de refrigeradores e seus compressores, tambores plásticos, reservatório de polietileno, lonas plásticas, placas de poliestireno expandido - EPS, mangueiras de jardim e tubos e conexões em PVC foram utilizados para a construção do equipamento.

Um fracionador elétrico (tipo picador forrageiro, marca Garthen, modelo GP-1500 AB e 1,5cv de potência) foi empregado para processar os RAHs de modo a diminuir o tamanho

dos resíduos e aumentar a interação dos microrganismos decompositores com o substrato. Os RAHs coletados foram triturados e inseridos no biorreator, não sem antes serem pesados (balança digital, marca Balmak e modelo ELC-25) e terem seus volumes registrados com auxílio de um balde previamente graduado. O cuidado com o volume (litros) é maior que com a massa (quilos), visto que muitos resíduos apresentam grandes volumes, mas pouca massa (peso) e o biodigestor construído tem capacidade para apenas 1m³ (1000 L) (MELLO, 2018).

O biogás gerado e armazenado no gasômetro (colchão inflável tipo casal, marca Bel Fix com 1,91x1,37x0,22 m de dimensões) foi recirculado no interior do equipamento de modo a promover agitação do conteúdo em digestão. Os processos de drenagem e recirculação foram executados por compressores oriundos de sucatas de refrigeradores domésticos sem identificação. Com o auxílio de um equipamento portátil (pHmetro digital, fabricante Hanna, modelo Hi98107) os valores de pH do conteúdo em digestão eram registrados diretamente na parte superior do biodigestor (pH superior) e na parte inferior (pH inferior).

Por padrão, o funcionamento da Recirculação do Biogás ocorria de modo intermitente, ou seja, depois que o sistema de Drenagem finalizava sua operação de remoção do Biogás Produzido, presente na parte superior (*headspace*) do biodigestor, sem, no entanto, injetar exagerado volume de biogás capaz de promover novo acionamento da Drenagem. Deste modo, cada evento de Drenagem carregava consigo o valor do Biogás Produzido mais o biogás presente da Recirculação imediatamente anterior. Também por padrão, imediatamente após a Drenagem do Biogás, o acionador (relé temporizador, marca genérica modelo JZ-802) do tempo de operação da Recirculação do Biogás permitia seu funcionamento por até 30 segundos, o que correspondia a valores não superiores a ~4 L de biogás reinsertos por vez na parte inferior do biorreator (conteúdo em digestão).

O tempo de Recirculação do Biogás de 30 segundos por evento de Drenagem do Biogás poderia ser afetado caso este último entrasse em operação em virtude da efetiva produção de biogás, interrompendo, imediatamente, o primeiro. A pressão interna para atuação (pressostato modelo 00136-015U) do sistema de Drenagem do Biogás foi de 10 psi (libra-força por polegada quadrada).

Um vasilhame plástico de 5 L, parcialmente preenchido com água, servia como uma válvula corta-fogo, onde o biogás Drenado do biodigestor era borbuhlado, sendo posteriormente conduzido a um Filtro Seco. Este filtro (vasilhame plástico de 5 L, contendo 2 kg de terra diatomácea e 8 esponjas de lã de aço) tinha como função a remoção do excesso de umidade do biogás Drenado do biodigestor e outras impurezas antes de seu armazenamento no gasômetro.

Dois hidrômetros (marca Hidrometer e modelo Unijato) foram utilizados para contabilizar, diariamente, o biogás Drenado e Recirculado, a diferença entre os valores obtidos correspondia ao Biogás Produzido a cada dia de experimento. Enquanto um isqueiro comum foi utilizado para o teste diário de inflamabilidade.

O Filtro Seco, utilizado para remover o excesso de umidade do biogás durante a etapa de Drenagem, possibilitou seu armazenamento imediato no Gasômetro, disponibilizando o biogás desidratado para o próximo evento de Recirculação. A disposição do Filtro Seco entre o biodigestor e o hidrômetro da Drenagem garantiu que a efetiva contagem do Biogás Produzido fosse realizada sem que este tenha sofrido interferências da umidade.

Foi utilizado o *software* livre JAMOVI para o tratamento estatístico dos dados. Nele foi realizada a Análise Estatística Descritiva, teste de Normalidade de Shapiro-Wilk, teste ANOVA para dados não paramétricos (teste de Friedman), teste de comparações múltiplas (comparações de Durbin-Conover) e Correlação de Spearman. Foi assumido o $p < 0,05$ como valor de significância para os testes de normalidade (Shapiro-Wilk), diferenças estatisticamente significativas (teste de Friedman) e comparações múltiplas (teste de Durbin-Conover). Os valores de significância nas Correlações de Spearman variaram entre $p < 0,001$ e $p < 0,05$ (POHLERT, 2018; THE JAMOVI PROJECT, 2021).

3. Resultados e discussões

Na Análise Estatística Descritiva e no teste de Normalidade de Shapiro-Wilk as variáveis investigadas (Temperatura do Biodigestor, Recirculação do Biogás, Drenagem do Biogás, Produção do Biogás, pH superior do conteúdo em digestão, pH inferior do conteúdo em digestão e inserção de Alcalinizantes) (Seções 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5), apresentaram distribuição não paramétrica, exceto a variável pH inferior - Ciclo 3 (Seção 3.5).

3.1 Temperatura do Biodigestor

Não houve diferença estatisticamente significativa para a variável Temperatura do Biodigestor (teste de Friedman $p > 0,05$), bem como ficou evidente que nas comparações múltiplas (Durbin-Conover) entre os Ciclos (1, 2 e 3) não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$). Isso é desejável quando se espera que o processo de estabilização anaeróbica dos RAHs ocorra sem flutuações de temperatura durante todo o processo, visto que mudanças bruscas e temperaturas extremas afetam o desenvolvimento microbiano, comprometendo a eficiência da digestão e a produção de biogás (KOUGIAS; ANGELIDAKI, 2018; MORALES-POLO et al., 2019; DHUNGANA et al., 2022).

Franqueto et al. (2020) realizaram a co-digestão de resíduos agrícolas e esterco bovino em temperaturas entre 36 a 60°C. Para os pesquisadores bons resultados na constância da produção de biogás foram encontrados na faixa limítrofe entre as fases mesofílica (35-40°C) e termofílica (55-60°C), ou seja, em torno dos 40°C, semelhante aos valores obtidos no estudo em tela (**Tabela 2**). Achados análogos também foram relatados por Cabbai et al. (2013), Liu et al. (2018) e Ameen et al. (2021).

Tabela 2: Estatística Descritiva para Temperatura do Biodigestor

Temperatura	*N	Média	Mediana	Desvio-padrão
T. Biod. (°C) - Ciclo 1	60	40,6	40,7	1,339
T. Biod. (°C) - Ciclo 2	60	40,6	40,6	1,364
T. Biod. (°C) - Ciclo 3	60	40,7	40,8	0,535

*N = Número de Dias de Experimento. Fonte: Dados da pesquisa (2023).

3.2 Recirculação do Biogás

Apesar de terem sido significativamente diferentes no teste de Friedman ($p=0,024$), apenas as Recirculações dos Ciclos 1 e 3 apresentaram, de fato, diferenças estatísticas nas Correlações Múltiplas ($p=0,006$), visto que o comportamento desta variável durante a digestão dos RAHs e a produção de biogás entre o Ciclo 1 e o Ciclo 2 e entre o Ciclo 2 e o Ciclo 3 apresentaram semelhanças estatísticas, baseadas no teste de Durbin-Conover ($p=0,163$, para ambas comparações). Outras informações relevantes estão expressas na **Tabela 3**.

Tabela 3: Estatística Descritiva para a Recirculação do Biogás

Recirculação	*N	Média	Mediana	Desvio-padrão
Recirc. (L/h) - Ciclo 1	60	6,86	7,24	4,44
Recirc. (L/h) - Ciclo 2	60	5,20	2,43	4,73
Recirc. (L/h) - Ciclo 3	60	5,90	7,02	4,75

*N = Número de Dias de Experimento. Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Conforme pormenorizado na seção “Materiais e Métodos”, a Recirculação do Biogás serviu para promover agitação do conteúdo em digestão. Isso é desejável quando se pretende homogeneizar a temperatura, pH, evitar zoneamento por sedimentação, aumentar o acesso dos microrganismos aos resíduos em digestão e disponibilizar o biogás dissolvido no líquido (WANG et al., 2017; ZHAI et al., 2018; SINGH et al., 2020).

Latha et al. (2019) investigando os efeitos da Recirculação do Biogás no conteúdo em digestão, concluíram que uma recirculação intermitente produziu maior volume de biogás, pH em faixa mais favorável, elevada transferência do biogás da fase líquida e maior preservação

da morfologia microbiana. Resultados semelhantes quanto a boa adequação microbiana em sistemas de recirculação de biogás foram encontrados por Mahmoodi-Eshkaftaki e Houshyar (2020). Controle do pH e remoção de compostos como o sulfeto de hidrogênio (H₂S) também foram relatados por estes autores.

O efeito da Recirculação do Biogás no aumento do poder calorífico do biogás, purificação do biogás, boa interação dos microrganismos com o substrato e maior estabilização dos resíduos foram encontrados por Yuan, et al. 2019 e Zhao et al. 2021.

Outros achados relevantes sobre os efeitos da Recirculação do Biogás no conteúdo em digestão de biodigestores domésticos, previamente Aclimatado sem inoculação exógena, não foram encontrados na literatura, visto que a recirculação intermitente do biogás é uma abordagem recente no campo científico que versa sobre decomposição anaeróbica em ambientes controlados, sobretudo em biodigestores domésticos (LATHA et al., 2019; MAHMOODI-ESHKAFTAKI; HOUSHYAR 2020; ZHAO et al., 2020; ASSIS; GONÇALVES, 2022; YUAN et al., 2022).

3.3 Drenagem do Biogás

A Drenagem do Biogás não apresentou diferenças estatísticas significativas no teste de Friedman ($p > 0,05$), assim como no teste de Correlações Múltiplas ($p > 0,05$), apontando que a Drenagem atuou de modo similar durante os três Ciclos de estabilização dos RAHs (**Tabela 4**).

Tabela 4: Estatística Descritiva para a Drenagem do Biogás

Drenagem	*N	Média	Mediana	Desvio-padrão
Dren. (L/h) - Ciclo 1	60	12,21	13,05	7,38
Dren. (L/h) - Ciclo 2	60	9,82	5,46	7,39
Dren. (L/h) - Ciclo 3	60	11,40	12,62	9,46

*N = Número de Dias de Experimento. Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Esse comportamento é desejável, pois evidencia que a Drenagem seguiu a dinâmica do Biogás Produzido nos três Ciclos, atuando também como um mecanismo condicionador da intermitência da Recirculação do Biogás. Essa intermitência permitiu a homogeneização do conteúdo em digestão, enquanto ainda era viável a produção de biogás, deixando de atuar à medida que os RAHs atingiam a estabilização e, conseqüentemente, cessavam a produção de biogás. Isso sugere uma oportunidade de realizar um "ajuste fino" na digestão anaeróbica com menor consumo de energia e necessidade de manutenção.

Apesar de existirem numerosos trabalhos que tratam das mais diferentes formas de Drenagem do Biogás, visto que é através deste sistema que é extraído o conteúdo gasoso dos biodigestores, não foram encontrados trabalhos que correlacionam as flutuações da produção do biogás e sua correspondente Drenagem como mecanismo condicionador da Recirculação do Biogás em equipamentos de escala doméstica.

Latha et al. (2019) relatam a reintrodução do biogás gerado após a drenagem deste em intervalos de tempo e volume de biogás previamente estabelecidos durante os 90 dias de experimento. Estes contavam com a frequência de reinserção de 15 min./h a 30 min./h com valores de biogás que variavam de 1000 mL/min. a 4000 mL/min. Mahmoodi-Eshkaftaki e Houshyar (2020) em suas experimentações que duraram 50 dias utilizaram o biogás drenado para, após pressurização, reintroduzi-lo no biodigestor em intervalos de 5h com duração de 5 minutos cada Recirculação do Biogás. Zhao et al. (2020) também fizeram uso de intervalos de tempo previamente estabelecido para reintroduzir o biogás drenado. Neste caso, 50 mL/min. foi recirculado no biodigestor, sendo que o sistema operava por 1h e pausava por também 1h durante os mais de 100 dias de experimento.

Embora o foco principal deste estudo tenha sido a estabilização dos RAHs e a produção subsequente de biogás, é plausível que a intermitência na Recirculação do Biogás, gerida pelas variações na Drenagem do Biogás, ao invés de uma cronologia pré-definida como mecanismo atuador, conforme os achados na literatura científica, possa resultar em benefícios econômicos e energéticos consideráveis. A Recirculação do Biogás já foi associada a aumentos no volume de biogás produzido, economia de energia e manutenção, redução dos custos relacionados a sistemas complexos de purificação e aumento do poder calorífico do biogás. No entanto, os efeitos da combinação das técnicas de Aclimação prévia sem inoculação exógena e Recirculação do Biogás em biodigestores domésticos ainda permanecem desconhecidos (LATHA et al., 2019; MAHMOODI-ESHKAFTAKI; EBRAHIMI, 2019; MAHMOODI-ESHKAFTAKI; HOUSHYAR, 2020; YUAN et al., 2022).

3.4 Biogás Produzido

O Biogás Produzido não apresentou diferenças significativas no teste de Friedman ($p>0,05$), assim como no teste de Correlações Múltiplas ($p>0,05$). Portanto, os três Ciclos apresentaram semelhanças de comportamento durante a estabilização dos RAHs e a produção de biogás (**Tabela 5**).

Tabela 5: Estatística Descritiva para o Biogás Produzido

Biogás Produzido	*N	Média	Mediana	Desvio-padrão
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 1	60	5,34	3,91	6,13
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 2	60	4,63	3,47	3,13
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 3	60	5,50	5,14	5,43

*N = Número de Dias de Experimento. Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Yuan et al. (2019) concluíram que recircular o biogás produzido de modo intermitente e adicionar $MgCl_2$ ao material em digestão permitiu obter biogás com elevado poder calorífico (86% de metano - CH_4) e alta taxa de recuperação de nutrientes para uso agrícola posterior. Para Zhao et al. (2021) a recirculação do biogás foi responsável pelo aumento da concentração de CH_4 no Biogás Produzido e estabilização do conteúdo em digestão (lodo de esgoto). Mahmoodi-Eshkaftaki e Ebrahimi (2019) e Mahmoodi-Eshkaftaki e Houshyar (2020) ao recircular o biogás produzido encontraram boa remoção de substâncias indesejáveis (H_2S , por exemplo), elevada atividade microbiana e aumento na concentração de CH_4 .

Vários autores têm evidenciado a relevância da estabilização dos resíduos orgânicos para produção de biogás, conforme preconizado pela Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas - ONU, em atendimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS. Para Obaideen et al. (2022) as maiores participações do biogás estão no ODS 7 (na geração de energia renovável), ODS 13 (mitigando as mudanças climáticas), ODS 3, ODS 14 e ODS 15 (reduzindo e/ou prevenindo formas de poluição), ODS 2 e ODS 15 (na produtividade agrícola e nas mudanças do uso do solo), ODS 11 e ODS 12 (no gerenciamento de resíduos), ODS 9 e ODS 8 (geração de emprego e desenvolvimento econômico) e ODS 6 (tratamento de águas residuárias). Achados semelhantes também foram relatados por Chowdhury et al. (2022), Cudjoe et al. (2022) e Dhungana et al. (2022).

Apesar da importância da estabilização dos RAHs por meio da digestão anaeróbica e produção de biogás em atendimento a Agenda 2030 da ONU, o presente estudo não obteve biogás inflamável nos três Ciclos analisados. É possível que ao longo dos 180 dias de experimento a ausência de inflamabilidade estivesse fortemente relacionada ao pH, uma vez que seus valores permaneceram a maior parte do tempo em $pH < 6,1$ (**Seção 3.5**). Para muitos autores os valores de pH adequados para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas (microrganismos relacionados a geração de CH_4) são superiores aos encontrados neste estudo, ou seja, 6,5-7,8 (FANG et al., 2014), $pH < 6,2$ tem efeito inibitório (STRÜBING et al., 2017), 6,8-7,2 (SINGH et al., 2020), 6,5-7,5 (SINGKHALA et al., 2021) neutro (GRESES et al., 2022) e 6,5-8,5 (JØNSEN et al., 2022).

Embora não seja comum conduzir biodigestores domésticos em meio ácido para a

produção de ácidos orgânicos, ao contrário da produção de biogás rico em CH₄ para fins energéticos, como é o caso desta pesquisa. As técnicas empregadas neste estudo podem ser valiosas para operadores que buscam utilizar a biodigestão anaeróbica em escala doméstica para investigações sobre a obtenção e aplicação de ácidos orgânicos. Isso pode incluir a produção de outros biocombustíveis, como butanol, etanol e biodiesel, ou a fabricação de polímeros biodegradáveis, por exemplo (RAVI et al., 2018; HARIRCHI et al., 2022).

3.5 pH superior e pH inferior

Houve diferenças estatísticas significativas para o pH superior nos três Ciclos no teste de Friedman ($p < 0,05$). No teste de Durbin-Conover (Correlações Múltiplas) o Ciclo 1 e Ciclo 3 e entre o Ciclo 2 e Ciclo 3 apresentaram diferenças estatísticas, ($p < 0,01$, para ambas Correlações), enquanto o Ciclo 1 e o Ciclo 2 ($p = 0,069$) não apresentaram diferenças estatísticas para o mesmo teste. Deste modo, não é possível confirmar um aumento real de pH entre os Ciclos 1 e Ciclo 2, mas que houve entre os Ciclos 1 e 3 e entre os Ciclos 2 e 3 (**Tabela 6**).

Tabela 6: Estatística Descritiva para o pH da parte superior e inferior do conteúdo em digestão

Valores de pH	*N	Média	Mediana	Desvio-padrão
pH sup. - Ciclo 1	60	5,09	5,20	0,544
pH sup. - Ciclo 2	60	5,24	5,29	0,318
pH sup. - Ciclo 3	60	6,00	6,01	0,174
pH inf. Ciclo 1	60	4,57	4,93	0,611
pH inf. Ciclo 2	60	5,42	5,62	0,390
pH inf. Ciclo 3	60	6,10	6,09	0,127

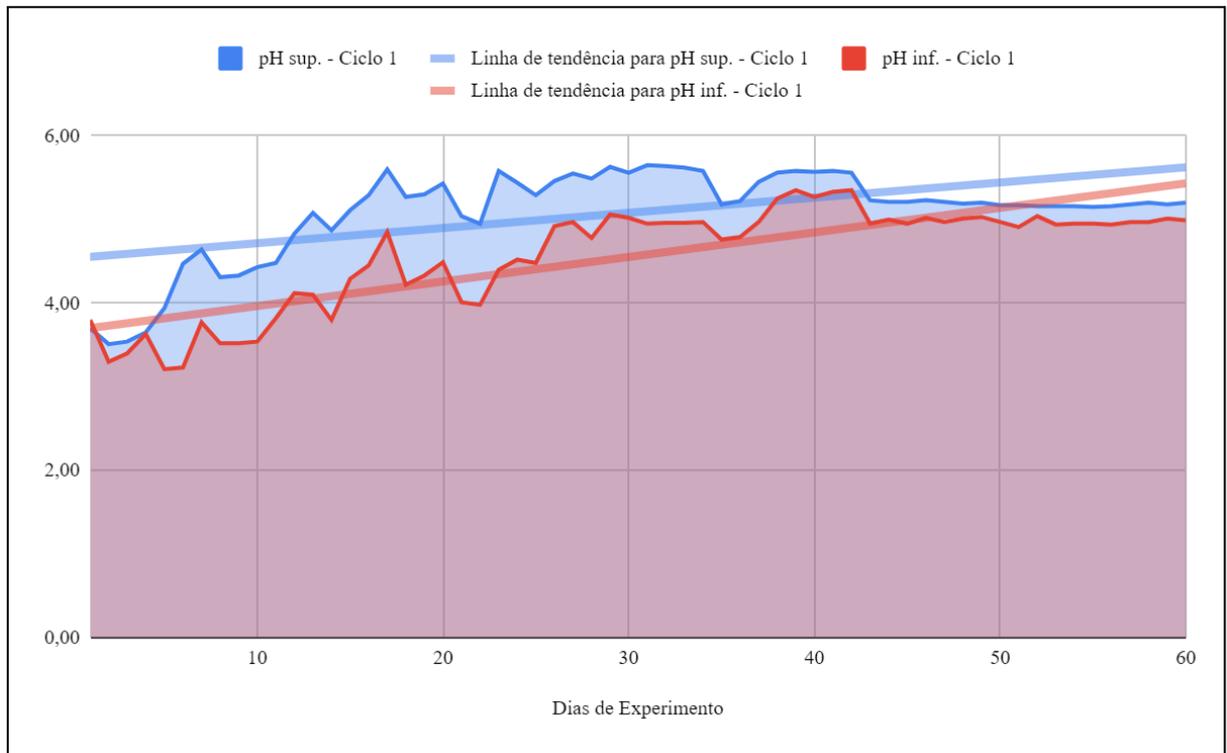
*N = Número de Dias de Experimento. Fonte: Dados da pesquisa (2023).

O pH inferior apresentou diferenças estatísticas significativas, pois, foram verificadas nos três Ciclos $p < 0,05$, no teste de Friedman, assim como nas Correlações Múltiplas ($p < 0,05$, no teste de Durbin-Conover). Deste modo é plausível inferir que houve aumento nos valores de pH inferior entre os Ciclos (**Tabela 6**).

Os RAHs em digestão permaneceram em condições ácidas, apesar disso, é importante destacar que os registros de pH encontrados ao final de cada Ciclo eram maiores que seus valores iniciais (**Gráficos 1, 2 e 3**). Assim, a relação inversa entre o aumento do pH em cada Ciclo, sobretudo para o pH inferior, e a diminuição do Biogás Produzido (também em cada Ciclo ao longo do tempo) (**Gráficos 1, 2, 3 e 4**), aponta para o alcance da estabilização dos RAHs, pois, na digestão anaeróbica, microrganismos consomem ácidos orgânicos, liberando

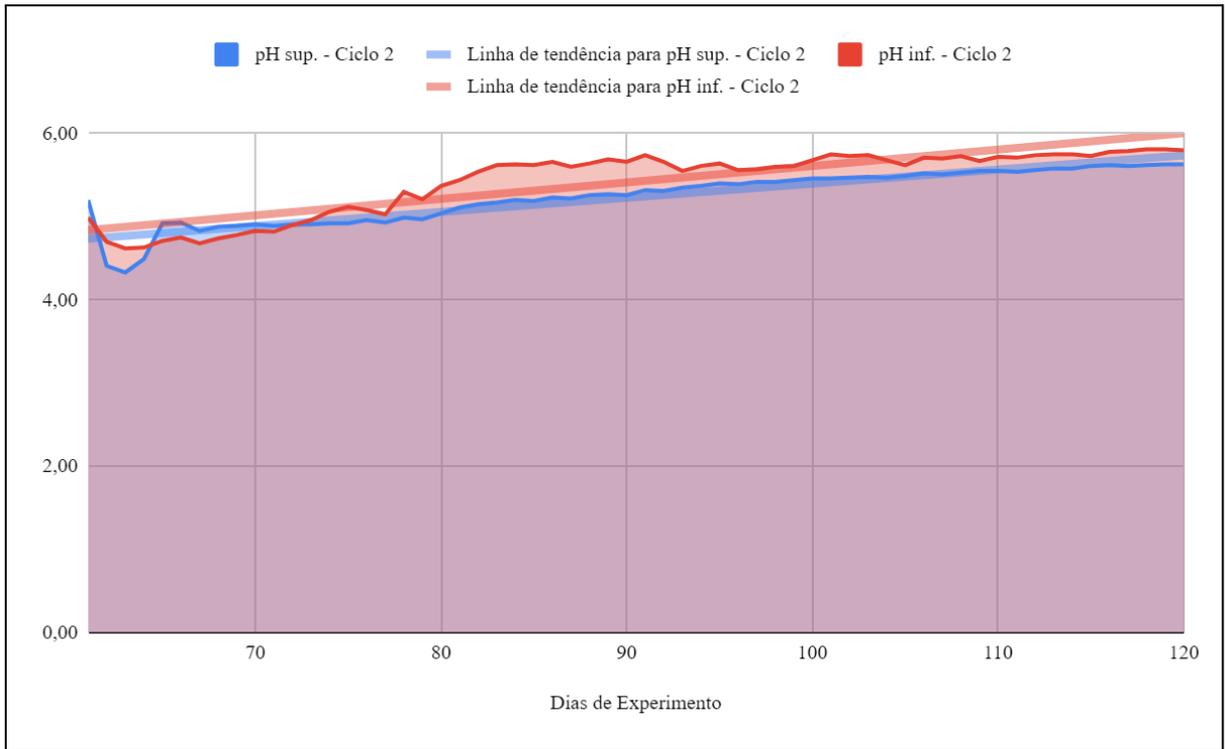
substâncias que podem servir como alcalinizantes, refletindo na elevação do pH (LOVATO et al., 2017; YU et al., 2018; ZHAO et al., 2020; ZHU et al., 2020).

Gráfico 1: Valores de pH (superior e inferior) referentes ao Ciclo 1, ou seja, período experimental entre o dia 1 e o dia 60



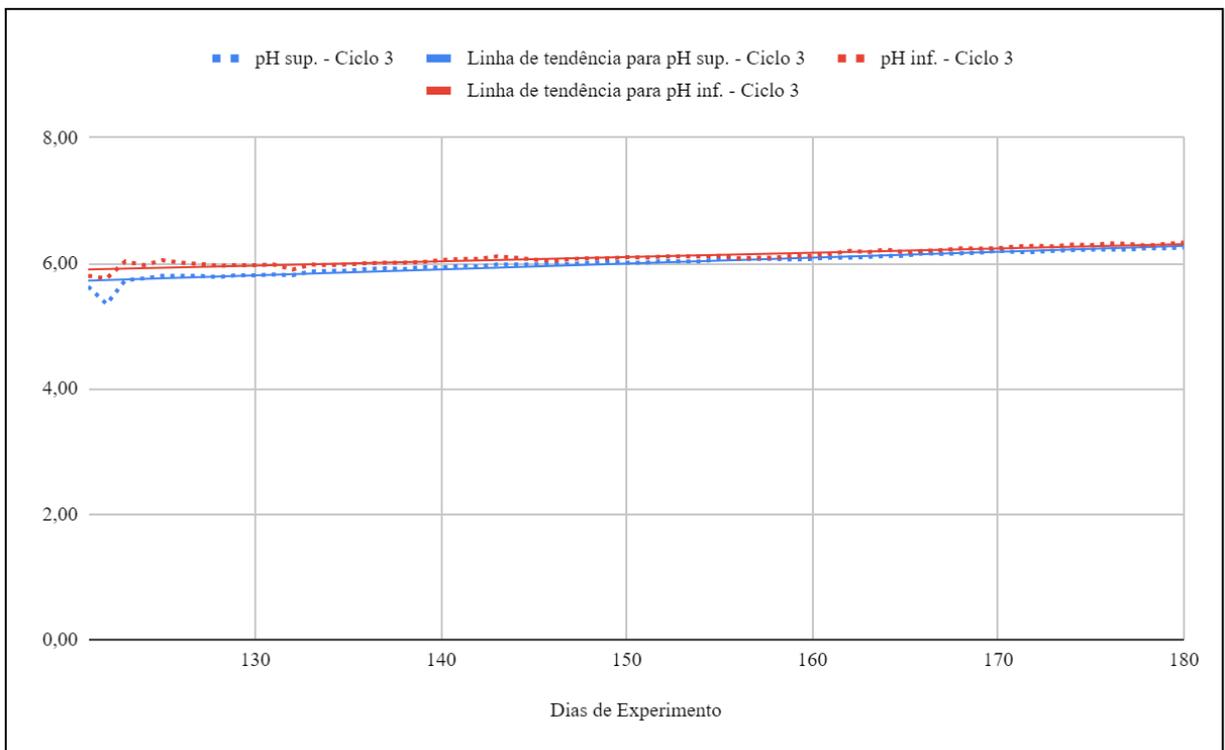
Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Gráfico 2: Valores de pH (superior e inferior) referentes ao Ciclo 2, ou seja, período experimental entre o dia 61 e o dia 120



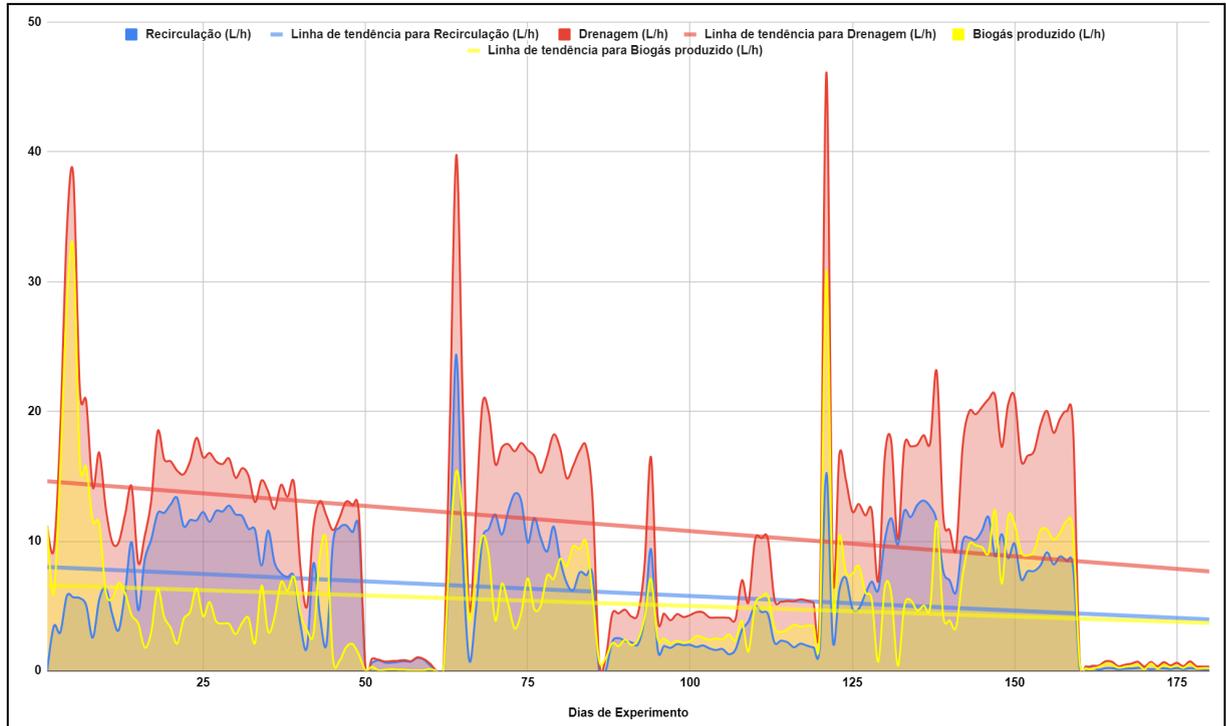
Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Gráfico 3: Valores de pH (superior e inferior) referentes ao Ciclo 3, ou seja, período experimental entre o dia 121 e o dia 180



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Gráfico 4: Ciclos de Experimentação: Valores de Biogás Recirculado (linha do gráfico em azul), Biogás Drenado (linha do gráfico em vermelho) e Biogás Produzido (linha do gráfico em amarelo) expressos em L/h nos três Ciclos (1, 2 e 3) durante os 180 dias de estabilização dos RAHs e produção de biogás



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Para Jankowska et al. (2017) a manutenção do conteúdo em digestão anaeróbica em pH ácido ou alcalino manifestou maior produção de ácidos orgânicos que CH_4 , visto que em $\text{pH} < 6$ ou $\text{pH} > 8$ os organismos metanogênicos apresentaram menor desenvolvimento. Begum et al. (2018) conduziram experimentos em biodigestores operados em pH 5,5 e pH 11. Seus achados foram semelhantes a Jankowska et al. (2017), ou seja, elevada produção de ácidos orgânicos e baixa produção de CH_4 .

Thakur et al. (2022) relacionaram a alta biodegradabilidade dos resíduos alimentares utilizados na biodigestão anaeróbica a queda dos valores de pH, visto que tais resíduos podem produzir abundância de ácidos orgânicos. Semelhantemente, Huang et al. (2016) relataram um processo de acidificação no começo dos experimentos (por alta produção de ácidos orgânicos) no entanto, próximo ao término da biodigestão os valores de pH eram maiores que o inicial, sem produção de biogás e, portanto, o conteúdo em digestão estava com elevada estabilidade, concluíram os autores. Kouzi et al. (2020) também atribuíram a diminuição da produção de biogás e a elevação do pH ao elevado nível de estabilidade dos resíduos orgânicos ao final da biodigestão anaeróbica.

3.6 Correlações

Conforme os dias avançam nos três Ciclos de experimentação o Biogás Produzido tem sua produção diminuída, isso aponta para a estabilização dos RAHs, visto que o fim da digestão anaeróbica coincide com a estagnação da produção de biogás (**Gráfico 4**) (YUAN et al., 2019; ZHAO et al., 2021).

A mesma tendência foi observada com a Recirculação e a Drenagem do Biogás, pois esta dependia do Biogás Produzido para ocorrer e aquela era coordenada pela Drenagem. Assim, as correlações com valores fortemente negativos, sobretudo para o Biogás Produzido no Ciclo 1 (**Tabela 7**) e a Recirculação nos Ciclos 2 e 3 (**Tabelas 8 e 9**), evidenciam a relação inversa entre o transcorrer dos dias (Dias de Experimento) com o Biogás Produzido e, conseqüentemente, o maior alcance da estabilização dos RAHs condizente com o passar dos dias.

Tabela 7: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 1

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	0,288*	—						
Recirc. (L/h)	-0,265*	-0,150	—					
Dren. (L/h)	-0,627***	-0,045	0,673***	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,756***	-0,094	0,110	0,666***	—			
pH sup.	0,359**	-0,043	0,508***	0,109	-0,203	—		
pH inf.	0,799***	0,179	-0,010	-0,408**	-0,523***	0,667***	—	
Alcalin.	-0,084	-0,148	0,097	0,096	0,073	0,085	-0,042	—

Significância: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 8: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 2

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	0,254*	—						
Recirc. (L/h)	-0,475***	-0,111	—					
Dren. (L/h)	-0,432***	-0,089	0,916***	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,358**	-0,020	0,736***	0,907***	—			
pH sup.	0,978***	0,263*	-0,562***	-0,506***	-0,419***	—		
pH inf.	0,929***	0,218	-0,498***	-0,457***	-0,396**	0,927***	—	
Alcalin.	-0,201	-0,073	0,063	0,027	0,031	-0,217	-0,209	—

Significância: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 9: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 3

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	-0,062	—						
Recirc. (L/h)	-0,662***	-0,083	—					
Dren. (L/h)	-0,565***	-0,080	0,883***	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,544***	-0,005	0,707***	0,932***	—			
pH sup.	0,997***	-0,057	-0,658***	-0,563***	-0,542***	—		
pH inf.	0,961***	-0,003	-0,718***	-0,584***	-0,517***	0,962***	—	
Alcalin.	-0,298*	-0,056	0,064	-0,029	-0,042	-0,298*	-0,329*	—

Significância: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. Fonte: Elaboração própria (2023).

Apesar de não existir correlação da Temperatura do Biodigestor com nenhum outro parâmetro (**Tabelas 7, 8 e 9**), isso não qualifica a temperatura como irrelevante no processo de estabilização dos RAHs por via anaeróbica, pelo contrário, valores como os obtidos nesta investigação são muito relevantes, conforme discutido no tópico “Temperatura do Biodigestor”. Uma possível explicação para a falta de correlação pode residir na estabilização da temperatura na maior parte do tempo, ou seja, a variação na temperatura foi muito pequena (conforme valores de média, mediana e desvio padrão dispostos na **Tabela 2**).

Os valores de pH (superior e inferior) negativamente correlacionados com o Biogás Produzido, Recirculação e Drenagem (**Tabelas 7, 8 e 9**) podem estar associados com ácidos orgânicos presentes no biogás. Assim, é possível inferir que o biogás, com tais propriedades

acidificantes, em contato com o conteúdo em digestão, limitou maiores elevações nos valores de pH (MUKHUBA et al., 2019; ZHANG et al., 2019; MAHMOODI-ESHKAFTAKI; HOUSHYAR, 2020; ZHANG et al., 2021; DEMICHELIS et al., 2022; SHYAN et al., 2023).

Diferente dos outros Ciclos, a Recirculação do Biogás no Ciclo 1 apresentou correlação positiva significativa para o pH superior (**Tabela 7**). É possível que este resultado aponte para uma menor produção de ácidos orgânicos enquanto seu consumo era mais intenso na parte superior do biodigestor, porém, na região inferior do equipamento esta atividade microbiana apresentou um equilíbrio maior entre produtores e consumidores de ácidos orgânicos (LINDNER et al., 2016; RAVI et al., 2018; ZHAO et al., 2020; SHI et al., 2022).

A forte correlação positiva do pH superior com o pH inferior em todos os Ciclos (**Tabelas 7, 8 e 9**) sugere que a Recirculação do Biogás foi bastante eficiente na homogeneização dos RAHs durante a biodigestão (LATHA et al., 2019; MAHMOODI-ESHKAFTAKI; EBRAHIMI, 2019; ZHAO et al., 2020).

Por outro lado, os Alcalinizantes não mostraram relevância quanto a elevação dos valores de pH e Biogás Produzido em nenhum dos três Ciclos, conforme a fraca correlação verificada na Matriz de Correlações de Spearman (**Tabelas 7, 8 e 9**). Mesmo não tendo aumentado os valores de pH (superior e inferior) para uma faixa mais favorável a produção de CH₄, os Alcalinizantes podem ter contribuído com a constância do pH, visto que ao longo dos Ciclos de experimentação, os valores de pH se deslocaram lentamente em direção à neutralidade (**Gráficos 1, 2 e 3**) (ANDRADE CRUZ et al., 2022; EMETERE et al., 2022; NOTODARMOJO et al., 2022).

4. Conclusão

A combinação inédita das técnicas aplicadas neste estudo, embora desconhecidas em biodigestores domésticos, evidenciou que a alimentação regular do biodigestor com RAHs a cada 60 dias não apenas contribuiu para o saneamento ambiental, também permitiu a geração de biogás a partir desses resíduos. Contudo, é importante destacar que o biogás produzido não manifestou potencial energético, uma vez que não apresentou inflamabilidade ao longo dos ciclos de experimentação, não atendendo, portanto, aos critérios estabelecidos pelo ODS 7 da ONU.

É possível que a recalcitrância do pH em permanecer em pH<6,1 na maior parte do tempo foi o responsável por dificultar a produção de CH₄, mesmo após inserção de alcalinizantes. Portanto, não é plausível afirmar que os alcalinizantes utilizados tenham contribuído com a manutenção do pH em faixa ideal para obtenção de biogás inflamável,

visto que, segundo a literatura, a zona ótima está próxima do pH 7. Embora tenha sido verificado um aumento lento do pH em direção à neutralidade.

A alta biodegradabilidade dos RAHs pode ser um incentivo para que a Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - EMPASA, Seção João Pessoa/PB, adote a estabilização por via anaeróbica da parcela dos RAHs que são atualmente descartados no aterro sanitário municipal. Mantidas as condições experimentais desta investigação é possível que outros biocombustíveis possam ser obtidos a partir dos RAHs gerados pela EMPASA/JP.

No entanto, é crucial conduzir estudos adicionais para obter uma compreensão mais aprofundada sobre a relevância da recirculação intermitente do biogás, assim como os efeitos das diferentes quantidades e tipos de alcalinizantes na estabilização dos RAHs durante a produção de biogás. A considerável diversidade dos RAHs disponíveis em cada localidade pode demandar investigações que abranjam uma ampla gama de intervalos temporais, desde poucos dias até vários meses. Também é relevante considerar a possibilidade de aclimatar os RAHs, aplicando inoculação microbiana exógena em quantidades reduzidas, como estratégia para garantir o acesso a inóculo produzido localmente, minimizando a dependência de grandes volumes de esterco provenientes de locais distantes das instalações de biodigestores domésticos.

5. Referências

- AMEEN, Fuad; RANJITHA, J.; AHSAN, Nazmul; *et al.* Co-digestion of microbial biomass with animal manure in three-stage anaerobic digestion. **Fuel**, v. 306, p. 121746, 2021.
- ANDRADE CRUZ, Ianny; ANDRADE, Larissa Renata Santos; JESUS, Anderson Alles de; *et al.* Potential of eggshell waste derived calcium for sustainable production of biogas from cassava wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 321, p. 116000, 2022.
- ASSIS, Tatiana Izato; GONÇALVES, Ricardo Franci. Valorization of food waste by anaerobic digestion: A bibliometric and systematic review focusing on optimization. **Journal of Environmental Management**, v. 320, p. 115763, 2022.
- BEGUM, Sameena; ANUPOJU, Gangagni Rao; SRIDHAR, S.; *et al.* Evaluation of single and two stage anaerobic digestion of landfill leachate: Effect of pH and initial organic loading rate on volatile fatty acid (VFA) and biogas production. **Bioresource Technology**, v. 251, p. 364–373, 2018.
- CABBAI, Valentina; BALLICO, Maurizio; ANEGGI, Eleonora; *et al.* BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge. **Waste Management**, v. 33, n. 7, p. 1626–1632, 2013.
- CÂNDIDO, Daniela; BOLSAN, Alice Chiapetti; HOLLAS, Camila Ester; *et al.* Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113825, 2022.

CHOWDHURY, Hemal; CHOWDHURY, Tamal; SHARIFI, Ayyoob; *et al.* Role of Biogas in Achieving Sustainable Development Goals in Rohingya Refugee Camps in Bangladesh. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 11842, 2022.

CONG, Wen-Feng; MOSET, Veronica; FENG, Lu; *et al.* Anaerobic co-digestion of grass and forbs – Influence of cattle manure or grass based inoculum. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 90–96, 2018.

CUDJOE, Dan; ZHU, Bangzhu; WANG, Hong. Towards the realization of sustainable development goals: Benefits of hydrogen from biogas using food waste in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 360, p. 132161, 2022.

DEMICHELIS, F.; TOMMASI, T.; DEORSOLA, F.A.; *et al.* Effect of inoculum origin and substrate-inoculum ratio to enhance the anaerobic digestion of organic fraction municipal solid waste (OFMSW). **Journal of Cleaner Production**, v. 351, p. 131539, 2022.

DHUNGANA, Bipasyana; LOHANI, Sunil Prasad; MARSOLEK, Michael. Anaerobic Co-Digestion of Food Waste with Livestock Manure at Ambient Temperature: A Biogas Based Circular Economy and Sustainable Development Goals. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3307, 2022.

EDWIGES, Thiago; FRARE, Laercio; MAYER, Bruna; *et al.* Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, v. 71, p. 618–625, 2018.

EMETERE, Moses E.; CHIKWENDU, L.; ABODUNRIN, T. J.; *et al.* A sustainable and affordable production design of cleaner biogas from human excreta using eggshell. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 1, p. 387–403, 2022.

ERIKSSON, Mattias; STRID, Ingrid; HANSSON, Per-Anders. Carbon footprint of food waste management options in the waste hierarchy – a Swedish case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 115–125, 2015.

FANG, Wei; ZHANG, Panyue; ZHANG, Guangming; *et al.* Effect of alkaline addition on anaerobic sludge digestion with combined pretreatment of alkaline and high pressure homogenization. **Bioresource Technology**, v. 168, p. 167–172, 2014.

FAO - Food and Agriculture Organization; IFAD - International Fund for Agricultural Development; UNICEF - United Nations International Children's Emergency Fund; *et al.* **The State of Food Security and Nutrition in the World 2020: Transforming food systems for affordable healthy diets.** [s.l.]: Food & Agriculture Organization of the UN. Rome, 2020.

FRANQUETO, Rafaela; DA SILVA, Joel Dias; KONIG, Michel. Effect of Temperature Variation on Codigestion of Animal Waste and Agricultural Residue for Biogas Production. **BioEnergy Research**, v. 13, n. 2, p. 630–642, 2020.

GAO, Anqi; TIAN, Zhenyu; WANG, Ziyi; *et al.* Comparison between the Technologies for Food Waste Treatment. **Energy Procedia**, v. 105, p. 3915–3921, 2017.

GOOGLE EARTH. **The world's most detailed globe.** Google Earth, 2023. Disponível em: <https://www.google.com/intl/en/earth/about/>. Acesso em: 13 out. 2023.

GOOGLE IMAGES. **Yellow arrow.** Disponível em: <https://images.google.com/>. Acesso: 13 out. 2023.

GRESES, Silvia; TOMÁS-PEJÓ, Elia; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, Cristina. Assessing the relevance of acidic pH on primary intermediate compounds when targeting at carboxylate accumulation. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 10, p. 4519–4529, 2022.

GUVEN, Huseyin; WANG, Zhao; ERIKSSON, Ola. Evaluation of future food waste management alternatives in Istanbul from the life cycle assessment perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 117999, 2019.

HARIRCHI, Sharareh; WAINAINA, Steven; SAR, Taner; *et al.* Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. **Bioengineered**, v. 13, n. 3, p. 6521–6557, 2022.

HOSSEINI KOUPAIE, E.; AZIZI, A.; BAZYAR LAKEH, A.A.; *et al.* Comparison of liquid and dewatered digestate as inoculum for anaerobic digestion of organic solid wastes. **Waste Management**, v. 87, p. 228–236, 2019.

HUANG, Xinlei; YUN, Sining; ZHU, Jiang; *et al.* Mesophilic anaerobic co-digestion of aloe peel waste with dairy manure in the batch digester: Focusing on mixing ratios and digestate stability. **Bioresource Technology**, v. 218, p. 62–68, 2016.

IEA - International Energy Agency; IRENA - International Renewable Energy Agency; UNSD - United Nations Statistics Division; *et al.* **Tracking SDG 7: The Energy Progress Report**, Washington DC, 2019. Disponível em: <https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/2019-Tracking%20SDG7-Full%20Report.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2021.

JACKSON, Simon. The phosphate archipelago: Imperial mining and global agriculture in French North Africa. **Jahrbuch für Wirtschaftsgeschichte / Economic History Yearbook**, v. 57, n. 1, p. 187-214, 2016.

JANKOWSKA, Ewelina; CHWIALKOWSKA, Joanna; STODOLNY, Mikolaj; *et al.* Volatile fatty acids production during mixed culture fermentation – The impact of substrate complexity and pH. **Chemical Engineering Journal**, v. 326, p. 901–910, 2017.

JI, Chao; KONG, Chui-Xue; MEI, Zi-Li; *et al.* A Review of the Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Waste. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 183, n. 3, p. 906–922, 2017.

JØNSEN, Brian Dahl; TSAPEKOS, Panagiotis; TAHIR ASHRAF, Muhammed; *et al.* Pilot-scale study of biomethanation in biological trickle bed reactors converting impure CO₂ from a Full-scale biogas plant. **Bioresource Technology**, v. 365, p. 128160, 2022.

KOUGIAS, Panagiotis G.; ANGELIDAKI, Irini. Biogas and its opportunities—A review. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 12, n. 3, 2018.

KOUZI, Afamia I.; PURANEN, Matti; KONTRO, Merja H. Evaluation of the factors limiting biogas production in full-scale processes and increasing the biogas production efficiency. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 22, p. 28155–28168, 2020.

LATHA, K.; VELRAJ, R.; SHANMUGAM, P.; *et al.* Mixing strategies of high solids anaerobic co-digestion using food waste with sewage sludge for enhanced biogas production. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 388–400, 2019.

LATIF, Muhammad A.; MEHTA, Chirag M.; BATSTONE, Damien J. Influence of low pH on continuous anaerobic digestion of waste activated sludge. **Water Research**, v. 113, p. 42–49, 2017.

LINDNER, Jonas; ZIELONKA, Simon; OECHSNER, Hans; *et al.* Is the continuous two-stage anaerobic digestion process well suited for all substrates? **Bioresource Technology**, v. 200, p. 470–476, 2016.

LIU, ChunMei; WACHEMO, Akiber Chufu; TONG, Huan; *et al.* Biogas production and microbial community properties during anaerobic digestion of corn stover at different temperatures. **Bioresource Technology**, v. 261, p. 93–103, 2018.

LOVATO, Giovanna; ALVARADO-MORALES, Merlin; KOVALOVSKI, Adam; *et al.* In-situ biogas upgrading process: Modeling and simulations aspects. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 332–341, 2017.

MAHMOODI-ESHKAFTAKI, Mahmood; EBRAHIMI, Rahim. Assess a new strategy and develop a new mixer to improve anaerobic microbial activities and clean biogas production. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 797–807, 2019.

MAHMOODI-ESHKAFTAKI, Mahmood; HOUSHYAR, Ehsan. Biogas recirculation technology: Effect on biogas purification, slurry characteristics, microbial activity and energy consumption. **Environmental Technology & Innovation**, v. 19, p. 100867, 2020.

MAPCHART. **Create your own custom map**. MapChart, 2023. Disponível em: <https://www.mapchart.net/>. Acesso em: 13 out. 2023.

MASEBINU, S.O.; AKINLABI, E.T.; MUZENDA, E.; *et al.* Experimental and feasibility assessment of biogas production by anaerobic digestion of fruit and vegetable waste from Joburg Market. **Waste Management**, v. 75, p. 236–250, 2018.

MNTHAMBALA, Frank; TILLEY, Elizabeth; TYRREL, Sean; *et al.* Phosphorus flow analysis for Malawi: Identifying potential sources of renewable phosphorus recovery. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 173, p. 105744, 2021.

MORALES-POLO, Carlos; CLEDERA-CASTRO, María del Mar; SORIA, B. Yolanda. Biogas Production from Vegetable and Fruit Markets Waste—Compositional and Batch Characterizations. **Sustainability**, v. 11, n. 23, p. 6790, 2019.

MUKHUBA, Mashudu; ROOPNARAIN, Ashira; MOELETSI, Mokhele Edmond; *et al.* Metagenomic insights into the microbial community and biogas production pattern during anaerobic digestion of cow dung and mixed food waste. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 95, n. 1, p. 151–162, 2019.

NANDA, Sonil; ISEN, Jamie; DALAI, Ajay K.; *et al.* Gasification of fruit wastes and agro-food residues in supercritical water. **Energy Conversion and Management**, v. 110, p. 296–306, 2016.

NOTODARMOJO, Peni Astrini; FUJIWARA, Takeshi; HABUER; *et al.* Effectiveness of oyster shell as alkali additive for two-stage anaerobic co-digestion: Carbon flow analysis. **Energy**, v. 239, p. 122177, 2022.

OBAIDEEN, Khaled; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; WILBERFORCE, Tabbi; *et al.* Biogas role in achievement of the sustainable development goals: Evaluation, Challenges, and

Guidelines. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 131, p. 104207, 2022.

OFON, Utibe A.; NDUBUISI-NNAJI, Uduak U.; SHAIBU, Solomon E.; *et al.* Recycling anaerobic digestate enhances the co-digestion potential of agro-industrial residues: influence of different digestates as sources of microbial inoculum. **Environmental Technology**, v. 43, n. 28, p. 4472–4483, 2021.

PRESTA-NOVELLO, Déborah; SALAZAR-CAMACHO, Natalia Andrea; DELGADILLO-MIRQUEZ, Liliana; *et al.* Sustainable Development in the Colombian Post-Conflict—The Impact of Renewable Energies in Coffee-Growing Women. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1618, 2023.

POHLERT, T. **PMCMR**: Calculate Pairwise Multiple Comparisons of Mean Rank Sums. (R package: PMCMR_4.4.tar). Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=PMCMR>, 2018.

RAHMAN, Khondokar M.; EDWARDS, David J.; MELVILLE, Lynsey; *et al.* Implementation of Bioenergy Systems towards Achieving United Nations' Sustainable Development Goals in Rural Bangladesh. **Sustainability**, v. 11, n. 14, p. 3814, 2019.

RAVI, Padma Priya; LINDNER, Jonas; OECHSNER, Hans; *et al.* Effects of target pH-value on organic acids and methane production in two-stage anaerobic digestion of vegetable waste. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 96–102, 2018.

SAKADEVAN, K.; NGUYEN, M.-L. Livestock Production and Its Impact on Nutrient Pollution and Greenhouse Gas Emissions. *In: Advances in Agronomy*. [s.l.]: Elsevier, p. 147–184, 2017.

SANTOS, Silvana Alves dos. **A implantação da gestão de resíduos sólidos na Central de Abastecimento - EMPASA João Pessoa-PB: Avaliação da efetividade do PGIRS**. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado em Desenv. e Meio Ambiente) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SHI, Chuan; MA, Jinyuan; WU, Houkai; *et al.* Evaluation of pH regulation in carbohydrate-type municipal waste anaerobic co-fermentation: Roles of pH at acidic, neutral and alkaline conditions. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158327, 2022.

SHYAN, Lai Lih; MAT NANYAN, Noreen Suliani; ISMAIL, Norli; *et al.* Effort to Mitigate Volatile Fatty Acid Inhibition by Using Mixed Inoculum and Compost for the Degradation of Food Waste and the Production of Biogas. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1185, 2023.

SIDH, Shiv Narayan; BASU, Sharmistha. Women's Contribution to Household Food and Economic Security: A Study in the Garhwal Himalayas, India. **Mountain Research and Development**, v. 31, n. 2, p. 102–111, 2011.

SINGH, Buta; SZAMOSI, Zoltán; SIMÉNFAI, Zoltán. Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 40, n. 4, p. 508–521, 2020.

SINGKHALA, Apinya; MAMIMIN, Chonticha; REUNGSANG, Alistara; *et al.* Enhancement of Thermophilic Biogas Production from Palm Oil Mill Effluent by pH Adjustment and Effluent Recycling. **Processes**, v. 9, n. 5, p. 878, 2021.

STRÜBING, Dietmar; HUBER, Bettina; LEBUHN, Michael; *et al.* High performance biological methanation in a thermophilic anaerobic trickle bed reactor. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 1176–1183, 2017.

SURENDRA, K. C.; TAKARA, Devin; HASHIMOTO, Andrew G.; *et al.* Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 846–859, 2014.

THAKUR, Hemant; DHAR, Atul; POWAR, Satvasheel. Biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in continuously stirred tank reactor. **Results in Engineering**, v. 16, p. 100617, 2022.

THE JAMOVI PROJECT. **Jamovi**. (Version 2.0) [for Windows 10]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>, 2021.

WANG, Fengping; ZHANG, Cunsheng; HUO, Shuhao. Influence of fluid dynamics on anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Environmental Technology**, v. 38, n. 9, p. 1160–1168, 2017.

YU, Dawei; MENG, Xiaoshan; LIU, Jibao; *et al.* Formation and characteristics of a ternary pH buffer system for in-situ biogas upgrading in two-phase anaerobic membrane bioreactor treating starch wastewater. **Bioresource Technology**, v. 269, p. 57–66, 2018.

YUAN, Tian; CHENG, Yanfei; WANG, Xuezhi; *et al.* A novel anaerobic digestion system coupling biogas recirculation with MgCl₂ addition for multipurpose sewage sludge treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 499–507, 2019.

YUAN, Tian; ZHANG, Zhenya; LEI, Zhongfang; *et al.* A review on biogas upgrading in anaerobic digestion systems treating organic solids and wastewaters via biogas recirculation. **Bioresource Technology**, v. 344, p. 126412, 2022.

ZHAI, Xiaodong; KARIYAMA, Ibrahim Denka; WU, Binxin. Investigation of the effect of intermittent minimal mixing intensity on methane production during anaerobic digestion of dairy manure. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 121–129, 2018.

ZHANG, Jiaying; LUO, Wenhai; WANG, Yaya; *et al.* Anaerobic cultivation of waste activated sludge to inoculate solid state anaerobic co-digestion of agricultural wastes: Effects of different cultivated periods. **Bioresource Technology**, v. 294, p. 122078, 2019.

ZHANG, Shuang; REN, Yuanyuan; MA, Xinxin; *et al.* Effect of zero-valent iron addition on the biogas fermentation of food waste after anaerobic preservation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 106013, 2021.

ZHAO, Jiamin; HOU, Tingting; LEI, Zhongfang; *et al.* Effect of biogas recirculation strategy on biogas upgrading and process stability of anaerobic digestion of sewage sludge under slightly alkaline condition. **Bioresource Technology**, v. 308, p. 123293, 2020.

ZHAO, Jiamin; HOU, Tingting; WANG, Qian; *et al.* Application of biogas recirculation in anaerobic granular sludge system for multifunctional sewage sludge management with high efficacy energy recovery. **Applied Energy**, v. 298, p. 117212, 2021.

ZHU, Qiheng; LI, Xiaoguang; LI, Guowen; *et al.* Enhanced bioenergy production in rural areas: Synthetic urine as a pre-treatment for dry anaerobic fermentation of wheat straw. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121164, 2020.

Capítulo III - Produção de biogás a partir da estabilização anaeróbica de resíduos alimentares hortifrutícolas: Um processo sustentável com mínima dependência de inóculo

Resumo: Resíduos orgânicos em abundância carecem de tratamento adequado, levando a perdas de valiosos recursos energéticos. A estabilização anaeróbica de resíduos alimentares hortifrutícolas para gerar biogás inflamável pode universalizar o ODS 7 da ONU. No entanto, em biodigestores domésticos alimentados com esses resíduos, desafios persistem, como descontrole da biodigestão e interrupção na produção de biogás. Este estudo realizou ciclos quinzenais de biodigestão com digestato aclimatado e recirculação de biogás. Um biodigestor doméstico (1 m³) foi desenvolvido a partir de reservatórios reciclados. Resultou em 0,23 a 0,44 m³ de biogás diário a partir de inserções quinzenais de resíduos (25 L) em pH superior 6,26±0,0470 a 6,85±0,0454 e pH inferior 6,32±0,0385 a 6,88±0,0216 e recirculação de 9,27±1,143 a 14,23±1,701 L/h. A combinação inédita de técnicas (aclimação prévia, recirculação do biogás e administração de mínima quantidade de inoculante) ampliaram a valorização de resíduos alimentares para produção de biogás inflamável, além do esterco bovino usual em biodigestores domésticos.

Palavras-chave: biodigestão; resíduos alimentares; recirculação do biogás; aclimação

Abstract: Abundant organic waste lacks proper treatment, leading to losses of valuable energy resources. Anaerobic stabilization of horticultural and fruit waste to generate flammable biogas can universalize UN SDG 7. However, challenges persist in domestic biodigesters fed with these wastes, such as digestion control and interruption in biogas production. This study conducted fortnightly digestion cycles with acclimatized digestate and biogas recirculation. A domestic biodigester (1 m³) was developed from recycled reservoirs. It resulted in 0.23 to 0.44 m³ of biogas daily from fortnightly waste insertions (25 L) at pH above 6.26±0.0470 to 6.85±0.0454 and pH below 6.32±0.0385 to 6.88±0.0216 and recirculation of 9.27±1.143 to 14.23±1.701 L/h. The unprecedented combination of techniques (pre-acclimatization, biogas recirculation, and minimal inoculant administration) expanded the valorization of food waste for flammable biogas production, beyond the usual bovine manure in domestic biodigesters.

Keywords: biodigestion; food waste; biogas recirculation; acclimatization.

1. Introdução

A digestão anaeróbica, também conhecida como estabilização anaeróbica, é uma tecnologia capaz de gerar biogás. Ele é produzido em quatro etapas sequenciais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada etapa envolve microrganismos específicos que transformam o substrato de entrada em bioprodutos de estrutura menor para a próxima fase. Ácidos orgânicos gerados são consumidos por arqueas metanogênicas, resultando na produção de CH₄ (ARELLI et al., 2021; HARIRCHI et al., 2022; YADAV et al., 2022).

O CH₄ biogênico é um gás inflamável, portanto, um biocombustível limpo e renovável que, se liberado na atmosfera, atuará como gás indutor do efeito estufa - GEEs. Além do CH₄, outros gases e vapor de água são disponibilizados durante a estabilização anaeróbica dos

resíduos orgânicos. Este conjunto de substâncias voláteis recebe a denominação de biogás (SINGH et al., 2020; HARIRCHI et al., 2022; OBAIDEEN et al., 2022).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS, Agenda 2030 da ONU, destacam o biogás como uma poderosa fonte de energia acessível e limpa (ODS 7). Dentre várias possibilidades, o biogás pode ser utilizado por pessoas em zonas rurais ou periurbanas na geração da própria fonte de calor para cozimento de alimentos (RAHMAN et al., 2019; CHOWDHURY et al., 2022; OBAIDEEN et al., 2022).

Os resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs, oriundos de mercados, feiras, restaurantes e residências, representam grandes desafios ambientais, econômicos e de saúde pública. Seu descarte inadequado em lixões, aterros sanitários, ou por queima direta resulta em emissões de GEEs, poluição do solo, eutrofização de ambientes aquáticos e contaminação do ar (RAVI et al., 2018; XUE; LIU, 2019; JESWANI et al., 2021).

A digestão anaeróbica controlada, ou seja, a partir de biodigestores, emerge como uma promissora tecnologia para o tratamento sustentável de RAHs. Contudo, essa abordagem enfrenta desafios singulares. A elevada produção de ácidos orgânicos durante a biodigestão pode desequilibrar o pH, comprometendo a eficiência da degradação microbiana. Além disso, a variabilidade na composição dos RAHs pode resultar em processos mais lentos e inconstantes (DEMICHELI et al., 2022; THAKUR et al., 2022; SHYAN et al., 2023).

É importante que a oferta de biogás seja regular, do contrário, a unidade familiar terá que encontrar alternativas para suprir suas demandas energéticas. Essa procura levará a adoção de combustíveis fósseis convencionais ou outros métodos mais prejudiciais ao meio ambiente (lenha, carvão, etc.), expondo os membros da família a graves problemas de saúde, o que vai contra o princípio de utilizar uma fonte de energia acessível e limpa (ODS 7) (AUNAN et al., 2019; RAHMAN et al., 2019; SHEN et al., 2019; MCDUFFIE et al., 2021).

Para superar os desafios relacionados à estabilização e geração de biogás a partir dos RAHs, diversas estratégias podem ser adotadas. A implementação de biodigestores com múltiplas etapas, tratamento térmico, homogeneizadores, aplicação de leveduras, tratamento ultrassônico e o uso de resíduos alcalinizantes, como cascas de ovos ou conchas de ostras, são algumas dessas medidas. Esses procedimentos visam aprimorar a eficiência da biodigestão, criando condições favoráveis para o desenvolvimento microbiano e otimizando a relação microrganismo/substrato (ANDRADE et al., 2020; SINGH et al., 2020; VIJIN PRABHU et al., 2021; ANDRADE CRUZ et al., 2022; AGRAWAL et al., 2023).

Outra solução para melhorar a digestão anaeróbica dos RAHs é a co-digestão com outros substratos, como esterco animal, lodos de estação de tratamento de esgotos ou resíduos

agroindustriais. A adição desses co-substratos ajudam a equilibrar a biodigestão, fornecendo substâncias complementares ao metabolismo microbiano, controlando o pH em faixas ideais durante a estabilização dos RAHs e melhorando a produção de biogás (HOSSEINI KOUPAIE et al., 2019; MUKHUBA et al., 2019; OFON et al., 2021; RAWOOF et al., 2021).

Apesar dos benefícios da co-digestão, é crucial considerar as implicações ambientais e sociais envolvidas. O esterco bovino, reconhecido por sua rica biodiversidade microbiana decompositora, é frequentemente usado como inóculo microbiano. Contudo, essa prática apresenta um dilema ambiental, uma vez que o gado, responsável pela produção desse esterco, é também uma poderosa fonte de GEEs, especialmente o CH₄, gerado pelo mesmo processo microbiano presente no trato gastrointestinal dos animais (LI et al., 2021; OFON et al., 2021; REISINGER et al., 2021; UNGERFELD, 2022; AGRAWAL et al., 2023).

A bovinocultura, intensiva em recursos naturais, como água e solo, além de vastas áreas para pastagem e cultivo de grãos, tem gerado crescentes conflitos sociais e ambientais. A elevação da demanda por proteína animal acarreta tensões em áreas de preservação, comprometendo a biodiversidade. Assim, a expansão desta atividade pode contribuir com a exposição humana a agentes infecciosos, suscitando preocupações com potenciais epidemias ou pandemias, como a desencadeada pela COVID-19 (MERTENS et al., 2019; GLIBERT, 2020; RICHARDSON, 2020; HASHIMOTO et al., 2021; MORENO et al., 2022).

Além disso, o esterco da criação de gado pode contribuir para a contaminação de águas superficiais e subterrâneas e eutrofização de corpos de água. Este resíduo pode resultar na disseminação de doenças, propagação indesejada de plantas invasoras e aumento das emissões de GEEs durante seu transporte. Estima-se que 44% do esterco de gado e de aves estão sendo aproveitados na China, enquanto na Europa são 70% (SCARLAT et al., 2018; SEFEEDPARI et al., 2019; XUE et al., 2020; CHANG et al., 2021; SCHNORF et al., 2021; YU et al., 2021; WILSON et al., 2022).

A prática de incentivar pequenos agricultores a manter algumas cabeças de gado para facilitar a obtenção de esterco bovino, utilizado na produção de biogás, levanta preocupações além das mencionadas. Pois, valiosas fontes de substratos, como resíduos da produção alimentar, acabem por ser negligenciadas. Assim, a promoção de estratégias alternativas é vital para garantir autonomia energética aos agricultores, sem que para isso dependam de rebanhos específicos (WAQAS et al., 2018; GUVEN et al., 2019; YASMIN; GRUNDMANN, 2019; HUANG et al., 2022; MARCHETTI et al., 2022).

Esses problemas ambientais e sociais relacionados a bovinocultura e o gerenciamento do esterco bovino ressaltam a importância de buscar alternativas que reduzam a dependência

desse substrato na digestão anaeróbica, especialmente em locais com disponibilidade de outros resíduos orgânicos, mas com acesso limitado ao estrume bovino.

Diante do exposto, a pergunta norteadora desta investigação é: Como realizar a estabilização anaeróbica dos RAHs na promoção do saneamento ambiental e da geração de biogás inflamável, adotando quantidades reduzidas de esterco bovino como uma alternativa viável e sustentável à dependência desse substrato animal na produção de biogás?

O presente estudo teve por objetivo estabilizar anaerobicamente os RAHs com incremento de alcalinizante biogênico, visando assegurar o saneamento ambiental e promover a geração de biogás inflamável, em conformidade ao ODS 7 da ONU.

2. Materiais e Métodos

A fase experimental desta pesquisa, envolvendo a elaboração do biodigestor doméstico, a coleta, processamento, digestão anaeróbica e geração de biogás a partir dos RAHs, transcorreu no período de 05/07/2019 a 30/06/2021 nas dependências da Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas - EMPASA, Seção João Pessoa/PB. A EMPASA/JP está situada na Rua Presidente Ranieri Mazilli, 952-1100, bairro Cristo Redentor, João Pessoa - PB, CEP 58071-000, sob as coordenadas geográficas 7° 10' 00.4"S e 34° 51' 53.2"W (Setor Administrativo).

Os resíduos alimentares hortifrutícolas - RAHs, selecionados para uso na biodigestão anaeróbica, foram recolhidos de maneira aleatória ao longo das vias de acesso aos comerciantes. Foram considerados elegíveis para o estudo como substrato orgânico os RAHs abandonados em áreas comuns da empresa ou dispostos nos receptáculos de resíduos sólidos urbanos - RSUs, localizados em tais vias, antes que fossem transportados para disposição final no aterro sanitário municipal. A exceção se deu quando foi observado que uma ou mais pessoas estavam aproveitando os alimentos descartados nos locais mencionados no momento da coleta e/ou quando os resíduos seriam destinados à compostagem.

Para obter o digestato aclimatado, a ser utilizado nos oito Ciclos de estabilização anaeróbica e produção de biogás, foram inseridos no biodigestor de superfície 250 L de RAHs (substrato), 25 L de esterco fresco de gado (inóculo) (oriundos de 3 bovinos machos de ~18 meses, criados a pasto no Assentamento de Reforma Agrária Ponta de Gramame, em João Pessoa/PB), 11 kg de cascas de ovos de galinha (Alcalinizante) e 725 L de água.

A estabilização anaeróbica com fins de aclimação foi conduzida em batelada por 60 dias com Temperatura do Biodigestor em $40,6 \pm 1,157^\circ\text{C}$, taxa de Recirculação do Biogás de $8,18 \pm 2,842$ L/h, pH superior de $5,99 \pm 0,434$ e pH inferior de $5,89 \pm 0,439$.

Transcorridos os 60 dias iniciais foram retirados 100 L de digestato do biodigestor e, em seu lugar, foram inseridos 25 L de RAHs, 75 L de água e 1 kg de cascas de ovos de galinha. Este procedimento foi repetido quinzenalmente em todos os oito Ciclos, correspondendo um total de 120 dias de experimento. Nenhuma fonte de inóculo exógena foi adicionada nesta etapa, apenas o inóculo previamente aclimatado por 60 dias foi utilizado. Nos Ciclos 6 e 7 não foram inseridos cascas de ovos, pois este resíduo não estava disponível.

Para cada Ciclo quinzenal de estabilização anaeróbica foram coletados RAHs, conforme o roteiro descrito anteriormente e, após trituração, com auxílio de um picador forrageiro (marca Garthen, modelo GP-1500 AB e 1,5cv de potência), os resíduos eram inseridos no biorreator imediatamente após a coleta, trituração e pesagem. Uma balança (marca Balmak e modelo ELC-25) e um balde com graduação volumétrica foram utilizados para registro de massa (peso) e volume, em kg e L, respectivamente. Estes equipamentos foram, gentilmente, disponibilizados pelo Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal da Paraíba - LABEA/UFPB.

Um sistema para aquecimento de água, visando fornecer calor ao biodigestor, foi composto por dois coletores solares, medindo 0,60 x 1,20 m (feitos com tubos e conexões em PVC, placas de vidro e folhas de zinco); um reservatório em polietileno de 200 L para armazenamento da água aquecida, confinado em uma carcaça de refrigerador doméstico (isolante térmico); e, duas serpentinas em cobre (8 m cada, com 8 espiras cada e diâmetro das espiras ~0,35 m), dispostas no interior do biodigestor. A água aquecida foi impelida por uma bomba de água (marca Shurflo, 12v com vazão de 10,6 L/mim.) em um circuito reservatório-biodigestor-reservatório, mediante acionamento de um termostato (marca genérica, modelo W1209) acoplado ao biorreator. Sua atuação estava condicionada a $41 \pm 1^\circ\text{C}$.

O sistema de Recirculação do Biogás movia ~4 L por até 30 segundos o biogás armazenado em um gasômetro (colchão casal inflável, marca Bel Fix com 1,91x1,37x0,22 m de dimensões) em direção ao biodigestor. A Recirculação do Biogás atendia ao propósito de homogeneizar, de modo intermitente, o conteúdo em digestão e, assim, conduzir a geração de biogás para valores constantes e suficientes à geração de energia térmica utilizável durante o preparo de alimentos. De modo a evitar a parada da produção de biogás ou estimular a geração de grandes volumes em um curto período, a Recirculação do Biogás apresentou valores de operação entre $9,27 \pm 1,143$ L/h a $14,23 \pm 1,701$ L/h, garantindo que o Biogás Produzido diariamente estivesse em patamares semelhantes aos obtidos por Deng et al. (2020), ou seja, 0,15 a 0,30 m³.

Um motor de refrigerador doméstico (marca/modelo sem identificação) reintroduzia o biogás pela parte inferior do biorreator, através de quatro tubos em PVC (0,95x0,02 m) multi-perfurados (diâmetro dos furos 0,0013 m) que atuavam como difusores do biogás na promoção de agitação (de baixo para cima) e homogeneização do conteúdo em digestão. O controlador de tempo (relé temporizador, marca genérica e modelo JZ-802) foi programado para, quando acionado ao término da Drenagem, Recircular o biogás. Utilizando um equipamento portátil (pHmetro digital, fabricado pela Hanna, modelo Hi98107), os valores de pH do conteúdo em digestão eram registrados tanto na parte superior quanto na parte inferior do biodigestor, respectivamente denominados pH superior e pH inferior.

A Drenagem do Biogás dispunha de sistema semelhante (motor de refrigerador doméstico, sem identificação) e seu acionamento dependia da elevação da pressão interna no *headspace* (parte superior do biodigestor, onde ficava, temporariamente, o Biogás liberado do conteúdo em digestão) (10 psi, por pressostato modelo 00316-015U) provocada pelo Biogás Produzido e/ou a soma deste com o volume de biogás Recirculado em ciclo imediatamente anterior. Sua atuação implicaria imediata interrupção da Recirculação do Biogás, caso esta estivesse em operação. Após a Drenagem do Biogás este era armazenado no gasômetro para o próximo evento de Recirculação.

Para a contagem diária do volume de biogás Recirculado foi inserido um hidrômetro (marca Hidrometer e modelo Unijato), mesmo procedimento para a Drenagem do Biogás. A diferença entre eles resultou nos valores diários de Biogás Produzido. Uma válvula corta-fogo artesanal foi construída a partir de um reservatório plástico de 5 L e parcialmente preenchido com água. Nela era borbulhado o conteúdo do *headspace* que, ao ser Drenado do biodigestor e passar pelo Filtro Seco (reservatório de 5 L, contendo 2 kg de terra diatomácea e oito esponjas de aço) era armazenado no gasômetro. No filtro seco eram retidas impurezas contidas no Biogás Produzido, como sulfeto de hidrogênio (H₂S) e umidade oriunda da válvula corta-fogo, todas as vezes em que a Drenagem do Biogás entrasse em operação.

O biodigestor de superfície empregou um reservatório IBC (*Intermediate Bulk Containers*, em polietileno com capacidade nominal para 1 m³, ou seja, 1.000 L), revestido externamente com folhas de EPS (espuma de poliestireno expandido, popularmente conhecido como isopor) para isolamento térmico. Pedacos de mangueira, totalizando ~12 m de mangueiras em PVC (tipo jardim, marca genérica com reforço trançado em náilon e diâmetro de 0,02 m), foram utilizadas na circulação da água quente e do biogás.

Os motores de refrigerador doméstico, hidrômetros, borbulhador, filtro seco, bomba de água, controladores (W1209 e JZ-802), pressostato e fonte elétrica (marca genérica 12v e

20A) foram confinados em uma segunda carcaça de refrigerador doméstico (marca sem identificação), servindo como gabinete. O gasômetro ficou sob lona plástica (tipo silagem dupla face de 150 micras de espessura e dimensões ~2x2,5 m). Para o teste de inflamabilidade foi utilizado um isqueiro comum, acionado diariamente na saída da válvula corta-fogo.

Todos os materiais, instrumentais e equipamentos empregados na construção do biodigestor de superfície e seus acessórios foram adquiridos com recursos próprios a partir de pequenos comerciantes de materiais recicláveis (localmente conhecidos como sucateiros). As exceções referem-se ao gasômetro, a mangueira em PVC e ao reservatório IBC, sendo os dois primeiros adquiridos com recursos próprios e o último doação da Empresa Indaiá Brasil Águas Minerais Ltda., localizada na Fazenda Caldeirão - s/n, Zona Rural - Santa Rita, PB - CEP: 58300-970.

O tratamento estatístico foi realizado através do *software* livre e gratuito JAMOVI. Foram utilizados como tratamentos estatísticos a Estatística Descritiva (média, mediana e desvio padrão), Teste de Normalidade (teste Shapiro-Wilk, com significância de $p < 0,05$), Teste de Friedman (para as variáveis com distribuição não paramétricas ou combinações dessas com variáveis paramétricas), Comparações Múltiplas (teste de Durbin-Conover) e Matriz de Correlações (Correlações de Spearman). A significância adotada para as diferenças estatísticas significativas (testes de Friedman e Durbin-Conover) foi $p < 0,05$, enquanto para as Correlações de Spearman foram $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$ (POHLERT, 2018; THE JAMOVI PROJECT, 2021).

3. Resultados e Discussões

3.1 Temperatura do Biodigestor

No teste de Normalidade (teste de Shapiro-Wilk) para os dados de Temperatura do Biodigestor (**Tabela 1**) os Ciclos 1, 3 e 7 apresentaram distribuição não paramétrica ($p < 0,05$). Não foi verificada diferenças estatísticas significativas no teste de Friedman ($p > 0,05$) entre os oito Ciclos, bem como nas Comparações Múltiplas ($p > 0,05$), exceto entre os Ciclos 3 e 4 ($p = 0,041$, teste de Durbin-Conover).

Tabela 1: Estatística descritiva para Temperatura do Biodigestor

Temperatura	*N	Média	Mediana	Desvio-padrão
T. Biodig. (°C) - Ciclo 1	15	40,8	40,8	0,217
T. Biodig. (°C) - Ciclo 2	15	40,8	40,8	0,260
T. Biodig. (°C) - Ciclo 3	15	40,7	40,6	0,251
T. Biodig. (°C) - Ciclo 4	15	40,9	40,8	0,261
T. Biodig. (°C) - Ciclo 5	15	40,8	40,7	0,226
T. Biodig. (°C) - Ciclo 6	15	40,8	40,8	0,302
T. Biodig. (°C) - Ciclo 7	15	40,7	40,6	0,320
T. Biodig. (°C) - Ciclo 8	15	40,7	40,7	0,225

*N = Número de Dias de Experimento. Fonte: Dados da pesquisa (2023).

A Temperatura do Biodigestor praticada no presente estudo, bem como a constância da temperatura ao longo dos Ciclos (**Tabela 1**), pode ter influenciado positivamente a atividade microbiana durante a estabilização dos RAHs e, conseqüentemente, os resultados obtidos de Biogás Produzido. Wang et al. (2019) estudando os efeitos da temperatura da biodigestão anaeróbica, concluíram que temperaturas abaixo de 20°C comprometeram negativamente o desenvolvimento de microrganismos acidogênicos e metanogênicos. Para os pesquisadores, temperaturas acima de 25°C promoveram uma maior oferta de biogás.

Arelli et al. (2021) trabalhando com temperaturas mesófilas (~35°C) e termófilas (~55°C), concluíram que houve diferenças nas comunidades bacterianas entre as temperaturas testadas, mas que os mesmos gêneros de metanogênicas predominaram em ambas, bem como com boa produção de biogás nas duas faixas analisadas.

Também realizando biodigestão em faixas mesófilas e termófilas, Ao et al. (2021) encontraram maior diversidade microbiana em temperaturas mesófilas que em faixas termófilas. Achados semelhantes foram relatados por Gaby et al. (2017), Kim et al. (2017), Tian et al. (2018) e Zhang et al. (2023). No entanto, diferente de Arelli et al. (2021), as arqueas metanogênicas encontradas por Ao et al. (2021) e Jiang et al. (2020a) foram distintas entre as temperaturas estudadas.

Como não houve diferenças nas temperaturas na maioria dos Ciclos de experimentação do presente trabalho, é razoável concluir que a Temperatura do Biodigestor permaneceu estável ao longo do tempo. A manutenção da temperatura em condições ótimas é crucial para promover uma atividade microbiana eficiente, garantindo uma estabilização adequada dos resíduos orgânicos e melhorando a geração de biogás. O controle adequado da temperatura no biodigestor é fundamental para otimizar o processo e torná-lo mais sustentável, resultando em benefícios ambientais e energéticos através da estabilização dos RAHs e produção de biogás (WESTERHOLM; SCHNÜRER, 2019; PASALARI et al., 2021).

3.2 Recirculação do Biogás e Drenagem do Biogás

No teste de Normalidade (teste de Shapiro-Wilk) para os dados de Recirculação do Biogás (**Tabela 2**) os Ciclos 5, 7 e 8 apresentaram distribuição não paramétrica ($p < 0,05$). Foi verificado diferenças estatísticas significativas no teste de Friedman ($p < 0,05$) entre os oito Ciclos. No entanto, das 28 combinações possíveis nas Comparações Múltiplas (teste de Durbin-Conover), apenas os Ciclos 2 e 6 ($p = 0,080$), Ciclos 3 e 6 ($p = 0,706$), Ciclos 3 e 7 ($p = 0,379$), Ciclos 4 e 5 ($p = 0,315$), Ciclos 6 e 7 ($p = 0,210$) e Ciclos 7 e 8 ($p = 0,104$) não apresentaram diferenças significativas, sugerindo semelhanças no funcionamento da Recirculação do Biogás na maioria dos Ciclos analisados.

Tabela 2: Estatística descritiva para Recirculação do Biogás e Drenagem do Biogás

Recirculação/Drenagem	*N	Média	Mediana	Desvio-padrão
Recirc. (L/h) - Ciclo 1	15	9,27	9,41	1,143
Recirc. (L/h) - Ciclo 2	15	10,35	10,35	1,357
Recirc. (L/h) - Ciclo 3	15	11,29	11,24	2,003
Recirc. (L/h) - Ciclo 4	15	14,23	13,82	1,701
Recirc. (L/h) - Ciclo 5	15	13,41	13,62	0,834
Recirc. (L/h) - Ciclo 6	15	11,11	11,82	1,557
Recirc. (L/h) - Ciclo 7	15	11,81	12,51	1,561
Recirc. (L/h) - Ciclo 8	15	12,21	12,79	1,825
Dren. (L/h) - Ciclo 1	15	27,66	26,94	5,556
Dren. (L/h) - Ciclo 2	15	24,81	24,80	4,124
Dren. (L/h) - Ciclo 3	15	24,93	26,17	3,624
Dren. (L/h) - Ciclo 4	15	25,09	25,49	3,134
Dren. (L/h) - Ciclo 5	15	22,95	23,83	2,656
Dren. (L/h) - Ciclo 6	15	22,13	22,58	2,540
Dren. (L/h) - Ciclo 7	15	24,66	25,74	3,079
Dren. (L/h) - Ciclo 8	15	25,54	26,56	3,641

*N = Número de Dias de Experimento. Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Para os dados de Drenagem do Biogás, apenas o Ciclo 5 apresentou distribuição paramétrica ($p > 0,05$) no teste de Normalidade (teste de Shapiro-Wilk) (**Tabela 2**). Enquanto no teste de Friedman, entre os oito Ciclos, foi verificado diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$). No entanto, nas Comparações Múltiplas os Ciclos 1 e 8 ($p = 0,051$), Ciclos 2 e 3 ($p = 0,114$), Ciclos 2 e 4 ($p = 0,454$), Ciclos 2 e 7 ($p = 0,708$), Ciclos 2 e 8 ($p = 0,094$), Ciclos 3 e 4 ($p = 0,400$), Ciclos 3 e 7 ($p = 0,225$), Ciclos 3 e 8 ($p = 0,925$), Ciclos 4 e 7 ($p = 0,708$), Ciclos 4 e 8 ($p = 0,350$), Ciclos 5 e 6 ($p = 0,192$) e Ciclos 7 e 8 ($p = 0,192$) não apresentaram diferenças

estatísticas significativas, sugerindo que a Drenagem se comportou de modo semelhante nestes Ciclos.

A mistura adequada durante a estabilização anaeróbica dos resíduos orgânicos é essencial para garantir um processo eficiente, estável e de alto desempenho. Misturar os resíduos, distribuir os microrganismos e homogeneizar a temperatura, são contribuições para maximizar a produção de biogás e promover uma degradação mais otimizada dos resíduos orgânicos (KARIYAMA et al., 2018; LATHA et al., 2019; SINGH et al., 2020).

Latha et al. (2019) estudaram a biodigestão anaeróbica de diversos resíduos alimentares (cozidos e crus) e encontraram que a recirculação ideal do biogás foi de 2.000 mL/min., com uma frequência de 15 min./h. Essa condição resultou em um melhor equilíbrio do processo, aumentando o rendimento do biogás com alta concentração de metano e melhor remoção de ácidos orgânicos, além de um controle mais efetivo do pH. Para os autores, a recirculação intermitente do biogás foi vantajosa em termos de eficiência energética e econômica, além de favorecer a formação de uma morfologia microbiana adequada para a estabilização anaeróbica.

Mahmoodi-Eshkaftaki e Houshyar (2020) realizando co-digestão de esterco de vaca, parte orgânica dos RSUs e resíduo de frutas, concluíram que estes substratos foram adequados para uma alta produção de biogás. A recirculação intermitente com uma taxa de 0,018 kg/s com duração de 5min. em intervalos de 5 horas foi útil para purificação do biogás, redução de compostos nocivos, como o H_2S , e aumento da concentração de CH_4 . Os autores encontraram correlações significativas entre as comunidades microbianas anaeróbicas e a produção de biogás, indicando que a recirculação intermitente não prejudicou a vida microbiana no digestor e possibilitou uma produção purificada de biogás com baixo consumo de energia.

Zhao et al. (2020) estudaram lodos de ETE sob pH 7 e pH 10, com recirculação intermitente de biogás a uma taxa de 50 mL/min. com duração de uma hora e pausa de uma hora. Eles observaram que o biogás produzido com esta estratégia apresentou elevação na concentração de metano. Além disso, os produtos da biodigestão contribuíram para evitar aumentos contínuos do pH durante a recirculação do biogás. A combinação da recirculação com um ambiente alcalino resultou em uma hidrólise aprimorada. Para os autores, a recirculação intermitente do biogás mostrou ser uma estratégia de mistura eficiente e de baixo custo.

No entanto, os estudos conduzidos por Latha et al. (2019) e Zhao et al. (2020), diferem do presente, pois os biodigestores empregados por eles eram de escala laboratorial, operados com base em tempos e volumes pré-definidos, ou seja, as experimentações

conduzidas por Latha et al. (2019) eram em reatores de 4.500 ml de capacidade, taxas de recirculação de biogás que variavam entre 1.000 mL/min. a 4.000 mL/min. e intervalos de 15min./h a 30min./h, enquanto Zhao et al., (2020) utilizaram biodigestores de 0,6 L, 50 mL/min. de biogás recirculado em intervalos de 1h ligado por 1h desligado.

É possível que os valores de biogás recirculados nestes dois estudos tenham promovido enorme agitação em biodigestores tão pequenos e que isso seja difícil ser extrapolado para equipamentos em escala real sem aumento significativo na infraestrutura e maior consumo de energia elétrica, visto que, com base nos dados fornecidos no primeiro estudo, os valores recirculados variaram de 28,57% (1.000 mL/min.) a 114,29% (4.000 mL/min.) do total do conteúdo em digestão (3.500 mL). Para o estudo conduzido por Zhao et al. (2020), o valor de biogás recirculado foi menor, 8,33% (50 mL/min.) em relação ao volume em digestão (0,6 L), também calculado a partir dos valores apresentados pelos autores.

A investigação em tela, diferentemente dos outros trabalhos, realizou testes de Recirculação do Biogás durante oito Ciclos quinzenais de alimentação do biodigestor de 1.000 L, sem tempo pré-estabelecido ou volume de biogás recirculado pré-determinado. Visto que, para que a Recirculação do Biogás ocorresse, a Drenagem do Biogás teria que acontecer primeiro, fruto do Biogás Produzido. No entanto, caso o biogás não fosse produzido, a Drenagem não seria acionada e, conseqüentemente, a Recirculação não seria executada.

Assim, a Recirculação estava programada para acontecer com duração máxima de 30 segundos e volume máximo de 4 L de biogás, no entanto, na ocorrência do acionamento da Drenagem, durante a operação da Recirculação, esta seria interrompida, independente do tempo transcorrido ou o volume de biogás reintroduzido. A estratégia permitia que um pequeno volume de biogás fosse Recirculado no interior do biodigestor, sempre após a Drenagem, ou seja, até 0,4% (~4 L) do total do conteúdo em digestão (1.000 L). Os valores da Recirculação e Drenagem do Biogás em cada um dos oito Ciclos de experimentação estão disponíveis na **Tabela 2**.

Através da Recirculação intermitente do Biogás, viabilizada por meio da Drenagem, buscou-se alcançar um ajuste preciso para estabelecer um circuito de retroalimentação (*feedback* positivo). Ou seja, o Biogás Produzido estimularia a Recirculação (possibilitada pela Drenagem), que, por sua vez, impulsionaria a produção de biogás com maior eficiência.

Substratos de difícil degradação, metais potencialmente tóxicos, falta de adaptação da comunidade microbiana, homogeneização inadequada, forte acidificação e o término da estabilização dos resíduos orgânicos com alta biodegradabilidade (RAHs, por exemplo) são

alguns dos fatores responsáveis pela interrupção da produção de biogás. Portanto, manter agitação mecânica e/ou recirculação ininterrupta de biogás nessas condições não assegura a retomada da produção, podendo resultar em custos adicionais, como os relacionados à energia elétrica (EDWIGES et al., 2018; MASEBINU et al., 2018; KOUZI et al., 2020; SINGH et al., 2020; NIKIEMA et al., 2022; THAKUR et al., 2022).

O estudo conduzido por Mahmoodi-Eshkaftaki e Houshyar (2020) se diferencia dos demais, inclusive do presente, por apresentar estratégias de agitação diferentes, mesmo que a recirculação de biogás estivesse envolvida. Os autores se utilizaram de equipamentos de pressurização de biogás que, quando de sua reintrodução sob alta pressão, foi capaz de girar hélices no interior do biodigestor, como se por um motor fosse impelido, promovendo uma agitação mecânica (giro das hélices) e uma homogeneização pela recirculação do biogás.

A Recirculação do Biogás, como estratégia de homogeneização, é uma área pouco explorada e seus impactos (positivos e negativos) ainda necessitam de maiores investigações. Semelhantemente desconhecidos são as consequências no processo de estabilização de resíduos alimentares, sobretudo RAHs, e a produção de biogás em um circuito de *feedback* positivo, envolvendo a Recirculação Intermitente do Biogás condicionada a eventos de Drenagem do Biogás.

3.3 Biogás Produzido

No teste de Normalidade (teste de Shapiro-Wilk) para os dados de Biogás Produzido (**Tabela 3**) os Ciclos 2 e 8 apresentaram distribuição não paramétrica ($p < 0,05$). Foi verificado diferenças estatísticas significativas no teste de Friedman ($p < 0,05$) entre os oito Ciclos. No entanto, nas Comparações Múltiplas (teste de Durbin-Conover) os Ciclos 2 e 3 ($p = 0,595$), Ciclos 2 e 7 ($p = 0,091$), Ciclos 2 e 8 ($p = 0,139$), Ciclos 3 e 7 ($p = 0,244$), Ciclos 3 e 8 ($p = 0,340$), Ciclos 4 e 5 ($p = 0,204$), Ciclos 4 e 6 ($p = 0,671$), Ciclos 5 e 6 ($p = 0,091$) e Ciclos 7 e 8 ($p = 0,832$) não apresentaram diferenças significativas, assim, é possível inferir que o comportamento de produção de biogás foi semelhante nos Ciclos comparados.

Tabela 3: Estatística descritiva para o Biogás Produzido

Biogás Produzido	*N	Média	Mediana	Desvio-padrão
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 1	15	18,38	17,48	5,668
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 2	15	14,47	14,07	3,965
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 3	15	13,64	14,78	4,586
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 4	15	10,86	10,37	3,059
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 5	15	9,55	10,09	2,430
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 6	15	11,02	11,69	2,774
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 7	15	12,84	12,79	2,210
Biogás Prod. (L/h) - Ciclo 8	15	13,33	13,56	2,519

*N = Número de Dias de Experimento. Fonte: Dados da pesquisa (2023).

O correto funcionamento do biodigestor doméstico, bem como a disponibilidade adequada de substratos para abastecer o equipamento, devem ser capazes de atender às necessidades energéticas da moradia, assegurando uma produção constante de biogás inflamável para o cozimento dos alimentos de maneira regular. Caso contrário, variações na produção de biogás podem ocorrer, levando a interrupções no fornecimento de energia e comprometendo a segurança energética e alimentar de todos os membros da residência.

Deng et al. (2020) relataram que os biodigestores domésticos comumente empregados nas áreas rurais chinesas possuem capacidade entre 4 a 10 m³ e, a depender dos substratos utilizados, o rendimento diário de biogás varia entre 0,15 a 0,30 m³ a cada 1 m³ de resíduos em digestão.

O biodigestor doméstico utilizado nesta pesquisa, empregou a Recirculação do Biogás com taxas entre 9,27±1,143 L/h a 14,23±1,701 L/h durante a homogeneização do conteúdo em digestão, buscando ofertar volumes diários de biogás próximos aos relatados por Deng et al. (2020), ou seja, 0,15 a 0,30 m³. Os valores obtidos ficaram entre 9,55±2,430 L/h a 18,38±5,668 L/h, correspondendo a 0,23 a 0,44 m³ de geração diária de biogás. O equipamento ajustava a Recirculação do Biogás na tentativa de obter essa produção constante, assim, em períodos de baixa disponibilidade de biogás, a Recirculação do Biogás promovia maior agitação, retornando a níveis inferiores, logo que a estabilidade da geração fosse alcançada.

Essa regularidade na produção de biogás, conforme preconizado pelo ODS 7 da ONU, assegura uma fonte contínua de energia térmica limpa e acessível. Isso não apenas contribui para combater as mudanças climáticas, evitando emissões de CH₄ no biogás excedente, mas também reduz a dependência de fontes energéticas suplementares, como biomassas associadas ao desmatamento, poluição do ar interno e exposição de mulheres e crianças a diversas formas

de violência. Nos períodos em que a produção de biogás não atender plenamente às demandas energéticas diárias para o cozimento de alimentos, usuários de biodigestores domésticos tenderão a buscar lenha, esterco seco, carvão, etc. para seu suprimento energético (RAHMAN et al., 2019; CHOWDHURY et al., 2022; OBAIDEEN et al., 2022).

Para Niu et al. (2021) o valor de biogás utilizado para cozinhar, em cada domicílio em Gansu (China), foi de 0,75 m³ diário, onde os biodigestores tinham volumes entre 8 e 10 m³ e eram alimentados com esterco de gado, porco e galinha. A partir de resíduos agrícolas e esterco, Li et al. (2023) estimaram valores também próximos de consumo, ou seja, 0,82 m³ de biogás utilizados para cozinhar diariamente em cada unidade familiar (distritos rurais chineses).

Lemma et al. (2021) apontaram que diariamente, no sul da Etiópia, cada unidade familiar esteve envolvida entre 3,5 a 4,5h com o consumo de biogás a uma taxa de 350 a 400 L/h (cozimento de alimentos) e 150 a 175 L/h (lâmpada a gás), correspondendo a um consumo diário de 1,7 a 1,9 m³. Seus biodigestores tinham entre 6 e 8 m³ e eram abastecidos, quase que exclusivamente, com esterco bovino e água. Para Uhumamure et al. (2019) famílias sul-africanas que possuem quatro cabeças de gado ou mais tem substratos suficientes para abastecer biodigestores de 4 m³ diariamente com 20 kg de esterco e obter 1 m³ de biogás para o cozimento diário de alimentos.

O biodigestor utilizado no estudo em tela possui capacidade para apenas 1.000 L (1 m³) de conteúdo em digestão, dos quais foram retirados quinzenalmente 100 L de digestato para dar lugar a uma mistura de RAHs (25 L) e água (75 L). Assim, conforme os dados apresentados na **Tabela 3**, é possível estimar valores diários que variam de 0,23 m³ (média do Ciclo 5 multiplicado por 24h) a 0,44 m³ (média do Ciclo 1 multiplicado por 24h). Estes achados são próximos dos apontados por Deng et al. (2020) que relatam 0,2 a 0,3 m³ como valores de biogás necessários para atender uma pessoa diariamente.

Com base nos valores apresentados por Niu et al. (2021), Li et al. (2023), Lemma et al. (2021), Uhumamure et al. (2019), o biodigestor de teste utilizado no presente estudo não é capaz de atender a demanda energética para o preparo de alimentos de uma unidade familiar. No entanto, se as técnicas de Recirculação do Biogás e de Aclimação prévia, com mínima introdução de inóculo exógeno, forem adotadas em um biodigestor convencional de 3 m³, por exemplo, é possível que sejam alcançados entre 0,69 m³ e 1,32 m³, valores que se aproximam dos referidos autores, sem que esterco bovino seja empregado diariamente e com emissões entéricas de metano evitadas.

Quanto a aplicação de inóculo, o estudo atual fez uso de apenas 25 L de esterco bovino uma única vez, isso representa 2,5% do conteúdo total em digestão. Durante 60 dias, RAHs, água e esterco ficaram no biodigestor de 1.000 L, no dia 43 desta operação de aclimatação foi verificado biogás inflamável, condição que permaneceu durante os oito Ciclos quinzenais que se seguiram (**Tabela 3**). A utilização de pequenas quantidades de inóculo, como foi realizado no presente trabalho, em vez de depender exclusivamente de esterco para geração de biogás, traz diversos benefícios, como apontado por outros autores.

No estudo de Marchetti et al. (2022), foram utilizados tanques de 1.000 L para armazenar esterco de porcos. Após dois meses de aclimatação em temperatura ambiente, o conteúdo sedimentado foi centrifugado, descartando o sobrenadante, e usado como inóculo nos experimentos subsequentes em biodigestores de 500 mL a 35°C. Além do inóculo, resíduos agrícolas foram adicionados aos equipamentos. As pesquisadoras constataram que o inóculo aclimatado apresentou um rendimento específico de metano 39% superior aos inóculos não aclimatados (digestato industrial e lodo de ETE), além de requerer 15% menos tempo para atingir o mesmo resultado. Outra descoberta importante foi a viabilidade do esterco aclimatado, que permaneceu estável em temperatura ambiente por um ano.

Lendormi et al. (2022) fizeram aclimatação a partir de cinco diferentes inóculos (4 a base de esterco suínos com diferentes tempos de digestão anaeróbica prévia e 1 com esterco bovino). Visando obter boa produção de biogás em baixa temperatura (13°C), durante 222 dias os biodigestores de 2,2 L em aclimatação receberam, semanalmente, pequenas alíquotas de substrato (esterco suíno). Semelhante aos achados de Marchetti et al. (2022), o inóculo aclimatado com melhor desempenho na produção de biogás foi o esterco suíno armazenado por cerca de dois meses.

A bioaumentação é uma estratégia semelhante à aclimatação utilizada para otimizar a produção de biogás ao estabilizar resíduos por via anaeróbica. Em um estudo conduzido por Jiang et al. (2020b), biodigestores de 1,8 L foram empregados, utilizando o digestato de um biorreator de laboratório como fonte de microrganismos. Adicionaram-se a eles pequenas quantidades de resíduos alimentares durante apenas três dias e, após uma quinzena, alíquotas desse substrato foram transferidas para outros biorreatores idênticos, abastecidos com resíduos alimentares. Esse processo de bioaumentação resultou em uma significativa elevação na produção de biogás, cerca de 8 a 12 vezes mais do que a biodigestão sem esse tratamento, demonstrando o potencial dessa abordagem para melhorar a eficiência dos biodigestores que utilizam exclusivamente resíduos alimentares.

Ao aplicar pequenas quantidades de inóculo ou adotar técnicas simples de aclimatação, ou até mesmo combinando essas abordagens, a biodigestão em pequena escala torna-se mais acessível e econômica para famílias rurais e periurbanas. Isso resulta na redução dos custos associados à produção de biogás, evitando a necessidade de criar animais apenas para obter substrato. Dessa forma, a aclimatação pode reduzir o impacto ambiental, uma vez que evita as emissões de metano entérico.

A partir dessa estratégia, os pequenos agricultores podem diversificar suas fontes de substratos, incorporando resíduos agrícolas, o que torna a biodigestão mais viável e reduz a dependência de combustíveis fósseis e biomassa para queima direta, como lenha, carvão vegetal e esterco seco. Isso também minimiza a exposição a substâncias tóxicas presentes na fumaça e fuligem. Essas técnicas contribuem para um sistema energético mais limpo, duradouro e sustentável, trazendo benefícios para a saúde pública, o meio ambiente e a economia das comunidades rurais, alinhado com o ODS 7 da ONU.

3.4 pH superior e pH inferior

No teste de Normalidade (teste de Shapiro-Wilk) para os dados de pH superior e pH inferior (**Tabela 4**) os Ciclos 1, 4 e 7 (pH superior) e Ciclos 1 e 7 (pH inferior) apresentaram distribuição paramétrica ($p > 0,05$). Foi verificada diferenças estatísticas significativas no teste de Friedman ($p < 0,05$) entre os oito Ciclos do pH superior, bem como para os oito Ciclos do pH inferior. No entanto, nas Comparações Múltiplas apenas os Ciclos 6 e 7 do pH superior ($p = 0,211$) e Ciclos 6 e 7 do pH inferior ($p = 0,875$) não apresentaram diferenças significativas, sugerindo aumento nos valores de pH (superior e inferior) na maioria dos Ciclos (**Tabela 4**).

Tabela 4: Estatística descritiva para pH superior e pH inferior

Valores de pH	*N	Média	Mediana	Desvio-padrão
pH sup. - Ciclo 1	15	6,26	6,27	0,0470
pH sup. - Ciclo 2	15	6,37	6,36	0,0229
pH sup. - Ciclo 3	15	6,47	6,51	0,0898
pH sup. - Ciclo 4	15	6,52	6,55	0,1073
pH sup. - Ciclo 5	15	6,72	6,73	0,0185
pH sup. - Ciclo 6	15	6,72	6,76	0,0820
pH sup. - Ciclo 7	15	6,75	6,75	0,0299
pH sup. - Ciclo 8	15	6,85	6,87	0,0454
pH inf. - Ciclo 1	15	6,32	6,32	0,0385
pH inf. - Ciclo 2	15	6,35	6,36	0,0431
pH inf. - Ciclo 3	15	6,51	6,55	0,1022
pH inf. - Ciclo 4	15	6,56	6,57	0,1146
pH inf. - Ciclo 5	15	6,74	6,75	0,0176
pH inf. - Ciclo 6	15	6,73	6,78	0,0972
pH inf. - Ciclo 7	15	6,77	6,76	0,0214
pH inf. - Ciclo 8	15	6,88	6,88	0,0216

*N = Número de Dias de Experimento. Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Ao longo dos Ciclos de experimentação do presente trabalho, um aumento lento e gradual nos valores de pH (superior e inferior), foi observado. A exceção se deu apenas entre os Ciclos 6 e 7 (pH superior e inferior) que seguiram de maneira estável (**Tabela 4**). Embora seja desejável valores de pH constantes e próximos da neutralidade durante a estabilização de resíduos orgânicos, visando boas taxas de produção de biogás, nem sempre este objetivo é facilmente alcançado. Toda sorte de fatores pode estar relacionados a tipologia dos RAHs disponíveis para digestão anaeróbica, hábitos alimentares da população, sazonalidades na oferta de frutas e vegetais, etc. são apenas alguns exemplos que revelam quão desafiadora pode ser a operação ininterrupta de biodigestores alimentados com RAHs.

Deste modo, a diversidade dos constituintes químicos dos RAHs disponíveis pode promover grandes oscilações nos valores de pH e na comunidade microbiana no interior de biodigestores. Consequentemente, variações na produção de biogás podem ocorrer durante o processo de estabilização dos RAHs. Embora vários trabalhos apontem para a relevância de inoculantes para otimizar a biodigestão, a escolha de um bom inóculo não garante que o pH e a comunidade microbiana seja mantida durante todo o processo de estabilização dos resíduos orgânicos, nem que a produção de biogás será satisfatória e constante (WESTERHOLM; SCHNÜRER, 2019; OFON et al., 2021; SHYAN et al., 2023).

Han et al. (2016) trabalhando com diferentes inóculos (digestato de vinhaça, lodo de ETE industrial, digestato de esterco de gado, esterco de gado e lodo de ETE de águas

residuais), perceberam que ocorreu variação no pH, na diversidade microbiológica e na produção de biogás, mesmo entre os biodigestores que receberam exatamente o mesmo inóculo e substrato (resíduos de celulose) e mantidos em condições experimentais idênticas.

Cai et al. (2021) estudando a decomposição anaeróbica em temperatura entre 25 e 39°C, apontaram que o pH pode ser afetado pelo aumento da temperatura, a depender da fase da biodigestão. Isso pode ocorrer a partir da liberação elevada de substâncias pelo aumento da atividade microbiana, ou seja, a depender do substrato utilizado, ácidos ou álcalis podem ser disponibilizados em maiores quantidades mais rapidamente com a elevação da temperatura. Enquanto Kurade et al. (2019) relataram que o pH tornou-se levemente ácido após 14 dias de experimentos, mas que com o decorrer do tempo substâncias liberadas pela decomposição retornaram o pH para valores próximos da neutralidade.

O presente trabalho obteve bons resultados de produção de biogás energético em faixas de pH (**Tabela 4**) compatíveis com outros autores, ou seja, $\text{pH} \geq 6,5$ e $\text{pH} \leq 8,5$. As exceções foram os Ciclos 1 e 2 que apresentaram $\text{pH} < 6,4$ e $\text{pH} > 6,2$, embora também com bons resultados de biogás inflamável (**Tabela 3**) (FANG et al., 2014; KAINTHOLA et al., 2019; MUKHUBA et al., 2019; SINGKHALA et al., 2021; DEENA et al., 2022; JØNSEN et al., 2022).

Mesmo que a utilização de inóculos seja uma prática bastante comum em sistemas de biodigestão doméstica e industrial e, amplamente explorada em pesquisas, poucos estudos têm se debruçado em investigações sobre seus efeitos na biodigestão anaeróbica após períodos de incubação, ou seja, aclimação prévia antes da execução de ciclos de estabilização anaeróbica para produção de biogás (ZHANG et al., 2019; DEMICHELIS et al., 2022; LENDORMI et al., 2022).

Li et al. (2018) utilizaram lodo de ETE para digerir resíduos agrícolas. Os autores concluíram que o lodo de ETE previamente aclimatado (incubado) por 56 dias foi muito eficiente em produzir metano, com relação de 1 parte de substrato e 2 partes de inóculo aclimatado. A experimentação se deu com a utilização de biodigestores de 1 L.

Em experimentação semelhante, Zhang et al. (2019) aclimataram lodo de ETE por 50 dias antes de introduzir resíduos agrícolas. Os pesquisadores concluíram que o tratamento prévio do lodo de ETE melhorou o conteúdo de metano no biogás e controlou os valores do pH, especialmente nas relações 1 parte de substrato e 2 partes de inóculo aclimatado. Foram utilizados biodigestores de 1 L.

Demichelis et al. (2022) aclimataram por 10 dias digestato oriundo de biodigestor operado com esterco de vaca. Após este período foi introduzido 1 parte de matéria orgânica

contida nos RSUs de uma indústria de alimentos para 2 partes de digestato aclimatado. Semelhante aos experimentos anteriores, foram utilizados biodigestores de 1 L.

Embora os autores Li et al. (2018), Zhang et al. (2019) e Demichelis et al. (2022) tenham relatado bons resultados de controle de pH e biogás produzido decorrentes dos períodos de aclimação praticados, o presente estudo obteve resultados promissores (**Tabelas 3 e 4**) mesmo com um período de aclimação diferente, ou seja, 60 dias, conforme pormenorizado na **Seção 2** (Materiais e Métodos). A combinação inovadora de aclimação e recirculação do biogás se mostrou bastante útil para o equilíbrio do pH (**Tabela 4**), bem como para a significativa produção de biogás inflamável discutido na **Seção 3.3** (Biogás Produzido).

3.5 Correlações entre os parâmetros

A baixa significância das correlações do Alcalinizante com os demais parâmetros, em todos os oito Ciclos, sugere que as cascas de ovos não tiveram influência direta na biodigestão e na produção de biogás (**Tabelas 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12**), embora tenha sido observado um aumento lento e gradual nos valores de pH, passando de ~pH 6,3 (Ciclo 1) para ~pH 6,8 (Ciclo 8) (**Seção 3.4**). Enquanto os Dias de Experimento não apresentaram correlação significativa com a Recirculação do Biogás e com a Drenagem do Biogás, apontando que ambas fluíram sem grandes variações ao longo do Ciclo 1 (**Tabela 5**). Este comportamento da Recirculação do Biogás esteve relacionado com o maior volume de Biogás Produzido (**Seção 3.3**), ou seja, como a oferta de biogás foi muito elevada, a Recirculação do Biogás manteve a homogeneização em intensidade menor (**Seção 3.2**).

Tabela 5: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 1

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	0,121	—						
Recirc. (L/h)	0,446	-0,358	—					
Dren. (L/h)	-0,442	0,302	-0,229	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,503	0,352	-0,421	0,961***	—			
pH sup.	0,971***	0,039	0,473	-0,192	-0,219	—		
pH inf.	0,884***	0,148	0,340	-0,043	-0,063	0,901***	—	
Alcalin.	-0,447	-0,452	0,371	-0,371	-0,433	-0,376	-0,436	—

Significância: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 6: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 2

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	-0,015	—						
Recirc. (L/h)	0,843***	0,112	—					
Dren. (L/h)	0,204	0,209	0,357	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,168	0,152	-0,150	0,686**	—			
pH sup.	-0,225	-0,329	-0,411	-0,182	0,006	—		
pH inf.	-0,031	-0,705**	-0,188	-0,598*	-0,603*	0,356	—	
Alcalin.	-0,371	0,412	0,062	0,371	0,371	-0,101	-0,379	—

Significância: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 7: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 3

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	-0,287	—						
Recirc. (L/h)	0,657**	-0,213	—					
Dren. (L/h)	-0,264	0,165	-0,604*	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,457	0,102	-0,761**	0,936***	—			
pH sup.	0,931***	-0,171	0,593*	-0,222	-0,403	—		
pH inf.	0,946***	-0,240	0,590*	-0,249	-0,430	0,979***	—	
Alcalin.	-0,371	0,441	0,247	-0,124	-0,124	-0,372	-0,435	—

Significância: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 8: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 4

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	0,529*	—						
Recirc. (L/h)	0,825***	0,391	—					
Dren. (L/h)	-0,164	-0,421	-0,171	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,489	-0,394	-0,536*	0,786***	—			
pH sup.	0,859***	0,405	0,703**	-0,395	-0,759**	—		
pH inf.	0,859***	0,426	0,719**	-0,329	-0,699**	0,933***	—	
Alcalin.	-0,371	-0,094	0,000	-0,309	0,062	-0,404	-0,373	—

Significância: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 9: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 5

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	-0,444	—						
Recirc. (L/h)	0,389	-0,112	—					
Dren. (L/h)	-0,529*	0,329	0,011	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,561*	0,338	-0,146	0,964***	—			
pH sup.	0,821***	-0,150	0,434	-0,261	-0,313	—		
pH inf.	0,240	0,386	0,157	0,269	0,231	0,316	—	
Alcalin.	-0,371	0,253	0,371	0,309	0,186	-0,262	0,066	—

Significância: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 10: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 6

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	-0,103	—						
Recirc. (L/h)	0,125	0,294	—					
Dren. (L/h)	0,679**	0,242	0,293	—				
Biogás Prod. (L/h)	0,339	-0,014	-0,486	0,496	—			
pH sup.	0,853***	-0,324	-0,163	0,506	0,307	—		
pH inf.	0,936***	-0,205	0,022	0,597*	0,273	0,928***	—	
Alcalin.	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	—

Significância: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. N/I: Não Inserido (Alcalinizante indisponível). Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 11: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 7

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	0,280	—						
Recirc. (L/h)	0,757**	0,275	—					
Dren. (L/h)	0,150	0,180	0,254	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,118	0,045	-0,107	0,882***	—			
pH sup.	0,686**	0,555*	0,559*	0,005	-0,281	—		
pH inf.	0,930***	0,256	0,658**	0,147	-0,134	0,697**	—	
Alcalin.	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	—

Significância: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. N/I: Não Inserido (Alcalinizante indisponível). Fonte: Elaboração própria (2023).

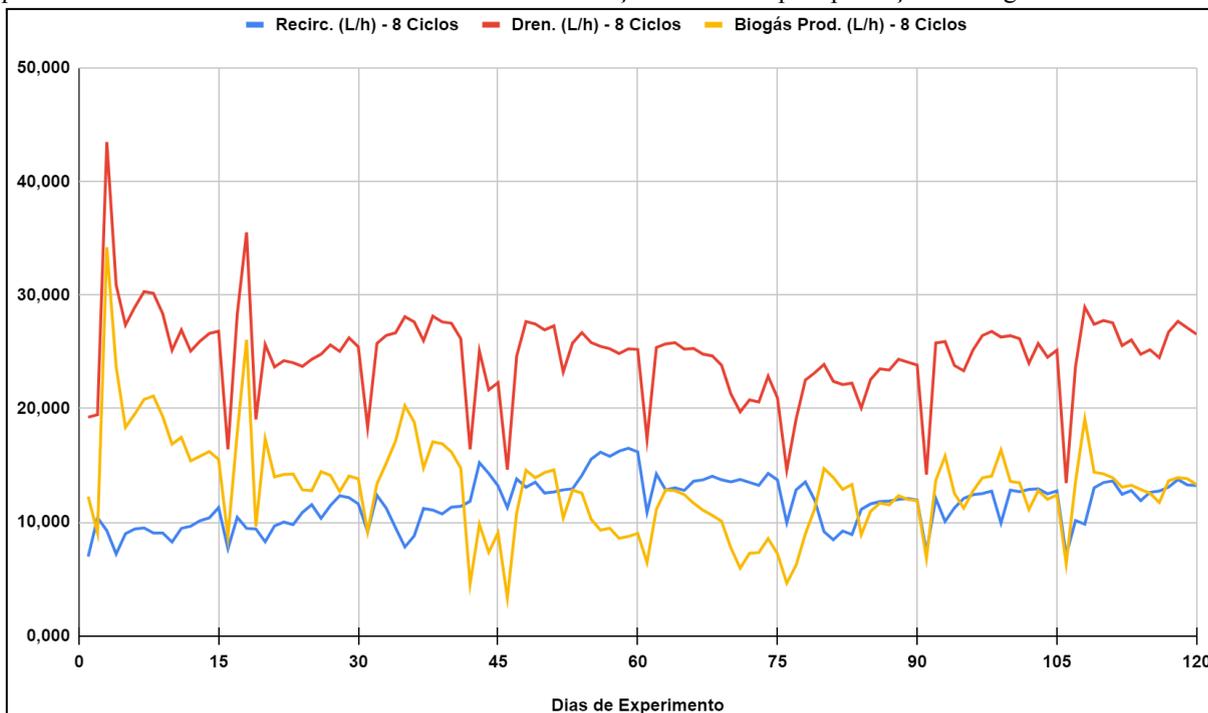
Tabela 12: Matriz de Correlações de Spearman - Ciclo 8

	Dias de Exp.	T. Biod. (°C)	Recirc. (L/h)	Dren. (L/h)	Biogás Prod. (L/h)	pH sup.	pH inf.	Alcalin.
Dias de Exp.	—							
T. Biod. (°C)	0,343	—						
Recirc. (L/h)	0,564*	-0,105	—					
Dren. (L/h)	0,107	-0,164	0,614*	—				
Biogás Prod. (L/h)	-0,123	-0,422	0,470	0,899***	—			
pH sup.	0,807***	0,669**	0,385	-0,007	-0,272	—		
pH inf.	0,425	-0,034	0,313	-0,149	-0,092	0,361	—	
Alcalin.	-0,371	-0,378	-0,309	-0,371	0,000	-0,443	0,255	—

Significância: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Fonte: Elaboração própria (2023).

Nos demais Ciclos, foram observadas correlações moderadamente positivas (Ciclos 3 e 8) (**Tabelas 7 e 12**) e fortemente positivas (Ciclos 2, 4 e 7) (**Tabelas 6, 8 e 11**) entre Dias de Experimento e Recirculação de Biogás. Essas correlações podem sugerir que a diminuição do Biogás Produzido ao longo de cada um dos referidos experimentos tenha dado espaço para a atuação da Recirculação do Biogás. A elevada biodegradabilidade dos RAHs pode ter contribuído com a maior produção de biogás nos primeiros dias e diminuição gradual com o transcorrer do tempo em cada Ciclo (**Tabela 3 e Gráfico 1**) (EDWIGES et al., 2018; MASEBINU et al., 2018; THAKUR et al., 2022).

Gráfico 1: Comportamento da Recirculação do Biogás, Drenagem do Biogás e Biogás Produzido, em litros por hora (L/h), durante os 8 Ciclos quinzenais. Toda a experimentação totalizou 120 dias, nos quais foram promovidos o saneamento ambiental através da estabilização dos RAHs para produção de biogás inflamável

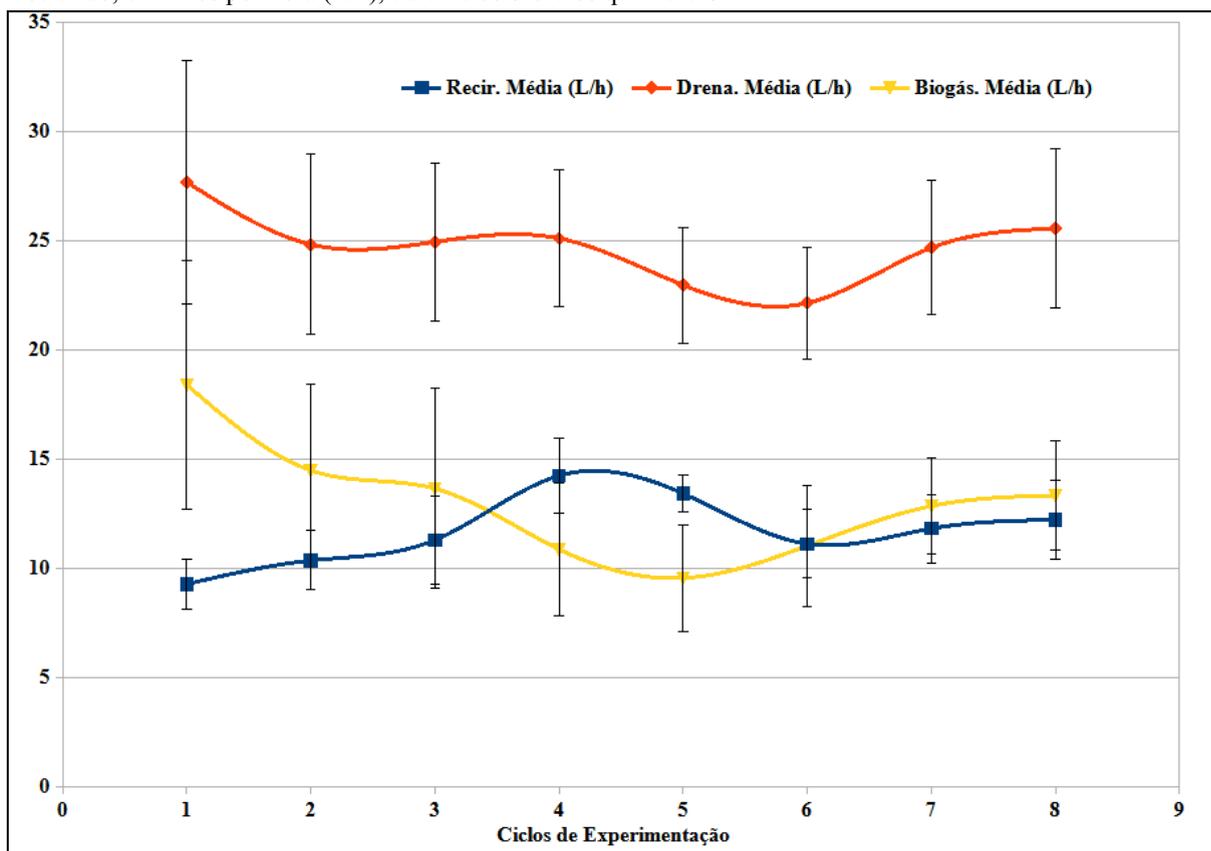


Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Nas ocasiões de baixa produção, a Recirculação do Biogás atuou para estimular o retorno da geração diária de biogás a valores próximos aos encontrados por Deng et al. (2020), ou seja, 0,15 a 0,30 m³. A participação da Recirculação do Biogás se dava apenas para manter esta faixa de rendimento sem estimular demasiadamente a produção de biogás, assim, a homogeneização promovida pela Recirculação do Biogás ocorreu para gerar biogás de modo mais estável possível (**Seção 3.3 e Gráfico 1**).

No entanto, os menores desvios da média que apontam para a constância do Biogás Produzido (desvios-padrão inferiores a 2,8 L/h - **Tabela 3**) só ocorrem a partir do pH_≥6,7 (Ciclo 5 em diante - **Tabela 4**) onde também se observa a falta de correlação entre o Biogás Produzido e os valores de pH (superior e inferior) (**Tabelas 9, 10, 11 e 12**), sugerindo um ambiente sem muita perturbação por acúmulo de ácidos orgânicos, portanto, mais adequado para ofertar biogás com maior estabilidade (**Gráfico 2**) (LATHA et al., 2019; MUKHUBA et al., 2019).

Gráfico 2: Valores médios com desvios-padrão para Recirculação do Biogás, Drenagem do Biogás e Biogás Produzido, em litros por hora (L/h), durante os 8 Ciclos quinzenais



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

É importante compreender as correlações no contexto de homogeneização direcionada à produção estável de biogás. Assim, a ausência de correlação significativa entre Dias de Experimento e Biogás Produzido, em todos os Ciclos (**Tabelas 5, 6, 7, 8, 10, 11 e 12**) (exceto o Ciclo 5 que apresentou correlação significativa e moderadamente negativa - **Tabela 9**), pode sugerir que o Biogás Produzido ($9,55 \pm 2,430$ L/h a $18,38 \pm 5,668$ L/h) não apresentou quedas bruscas ou paradas em virtude do bom funcionamento da Recirculação do Biogás ($9,27 \pm 1,143$ L/h a $14,23 \pm 1,701$ L/h). O adequado condicionamento do conteúdo em digestão projetou a oferta de biogás a patamares próximos aos relatados por Deng et al. (2020), enquanto promovia o saneamento ambiental pela estabilização dos RAHs.

A intensidade das correlações positivas entre o pH superior e o pH inferior ao longo dos Ciclos 1, 3, 4, 6 e 7 (**Tabelas 5, 7, 8, 10 e 11**), assim como a inexistência de significância das correlações entre: Recirculação do Biogás e Temperatura do Biodigestor (**Tabelas 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12**); e entre Dias de Experimento e Temperatura do Biodigestor (exceto para o Ciclo 4) (**Tabela 8**), sugerem uma boa homogeneização do conteúdo em digestão promovido pela Recirculação do Biogás. Visto que, no caso dos valores de pH, suas amostragens foram tomadas pela parte superior e inferior do biorreator. Assim, ambientes mais homogêneos

promovem o desenvolvimento equilibrado dos microrganismos, melhorando a biodigestão e a geração de biogás em padrões energéticos satisfatórios (ZHAI et al., 2018; LATHA et al., 2019; MUKHUBA et al., 2019; SINGH et al., 2020).

Além disso, a Temperatura do Biodigestor apresentou correlações não significativas com a Recirculação do Biogás e com a Drenagem do Biogás (**Tabelas 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12**), indicando que estas manobras, sobretudo a Recirculação do Biogás, não influenciaram na queda da temperatura do conteúdo em digestão. Isto é importante, visto que, quedas na temperatura, podem reduzir a atividade microbiana e, conseqüentemente, diminuir a produção de biogás e demandar mais tempo para o alcance da estabilização dos RAHs (WESTERHOLM; SCHNÜRER, 2019; PASALARI et al., 2021).

As correlações moderada e fortemente positivas da Recirculação do Biogás com os valores de pH (superior e inferior), nos Ciclos 3, 4 e 7 (**Tabelas 7, 8, e 11**), sugerem a ressurgência de substâncias capazes de elevar o pH do conteúdo em digestão. As cascas de ovos, por serem ricas em carbonato de cálcio, podem ser bons alcalinizantes em biodigestores. No entanto, resíduos com essas propriedades tendem a sedimentar-se no fundo do equipamento, sendo comum que os alcalinizantes presentes entre eles sejam ressuspensos ao acionar os mecanismos de mistura (KURADE et al., 2019; LATHA et al., 2019; ZHAO et al., 2020; ANDRADE CRUZ et al., 2022; SHI et al., 2022).

Como discutido anteriormente (**Seção 3.3**), estratégias promotoras de homogeneização, em biodigestores domésticos, devem ser capazes de estimular a oferta constante de biogás, de modo a garantir energia térmica em quantidade e qualidade suficientes para atender as demandas diárias durante o cozimento dos alimentos, sem abdicar da sustentabilidade ambiental (RAHMAN et al., 2019; CHOWDHURY et al., 2022; OBAIDEEN et al., 2022).

Nesta investigação, o Biogás Produzido agiu como condicionador da Recirculação do Biogás (via eventos de Drenagem) na promoção de uma homogeneização intermitente do conteúdo em digestão. Esta mistura trouxe melhorias nas condições ambientais (controle do pH, temperatura, interação substrato/microrganismos, etc.) para a geração de biogás, conforme achados de outros autores (LATHA et al., 2019; WANG et al., 2019; SINGH et al., 2020).

Deste modo, nos dias em que a geração de biogás foi baixa, a reintrodução de biogás foi mais alta, assim como nos dias de maior oferta, a recirculação apresentou valores menores (**Gráficos 1 e 2**). A correlação negativa entre Recirculação do Biogás e Biogás Produzido nos Ciclos 3 e 4 (**Tabelas 7 e 8**) evidencia que a geração de biogás condicionou (via Drenagem) o

volume de biogás reinserido, a fim de promover melhor homogeneização e o consequente favorecimento na oferta equilibrada de biogás.

Nos demais Ciclos (**Tabelas 5, 6, 9, 10, 11 e 12**), onde as correlações não foram significativas entre Recirculação de Biogás e Biogás Produzido, é possível que as elevadas produções de biogás mantiveram baixas as taxas de biogás reintroduzido com mínima, mas constante, homogeneização (Ciclos 1 e 2 - **Tabelas 2 e 3**); elevada recirculação do biogás para estimular o retorno da produção de biogás a patamares mais satisfatórios (Ciclo 5 - **Tabelas 2 e 3**); e valores equilibrados de biogás recirculado e gerado (Ciclos 6, 7 e 8 - **Tabelas 2 e 3**). Biodigestores que não dispõem de mecanismos de agitação estão mais sujeitos a instabilidade, sedimentação e parada de produção de biogás, assim, estes resultados reforçam a importância da homogeneização em equipamentos domésticos para o bom equilíbrio do meio e oferta constante de biogás (ZHAI et al., 2018; LATHA et al., 2019; WANG et al., 2019; SINGH et al., 2020).

Assim, as correlações positivas entre Recirculação do Biogás e pH (superior e inferior) para os Ciclos 3, 4 e 7 (**Tabelas 7, 8 e 11**), apontam para a melhora no controle dos valores de pH, possivelmente pela ressuspensão de alcalinizantes, enquanto a ausência de correlações significativas nos demais Ciclos (**Tabelas 5, 6, 9, 10 e 12**), sugerem a manutenção da homogeneização para equilíbrio entre a geração de ácidos orgânicos e seu consumo, evitando a acidificação do meio por acúmulo de ácidos orgânicos e a parada da produção de biogás (LATHA et al., 2019; WANG et al., 2019; SINGH et al., 2020).

As correlações do Biogás Produzido com o pH superior e o pH inferior estão negativas (Ciclos 1, 2, 3, 5, 7 e 8) (**Tabelas 5, 6, 7, 9, 11 e 12**) e fortemente negativa (Ciclo 4) (**Tabela 8**). Isso pode sugerir que a elevada biodegradabilidade dos RAHs forneceu expressiva quantidade de ácidos orgânicos. Pois, durante a estabilização anaeróbica de RAHs muitos ácidos orgânicos são gerados, podendo acidificar o meio ao ponto de comprometer a atividade de alguns microrganismos consumidores de ácidos orgânicos, metanogênicos, por exemplo. Quanto mais próximo de pH 7 (neutro) a biodigestão estiver, menores serão os riscos de instabilidades ou paradas na produção de biogás inflamável. Na presente investigação os valores de pH estiveram levemente ácidos (**Seção 3.4**), no entanto, não ocorreram falhas e a inflamabilidade do biogás se manteve durante os 8 Ciclos, sugerindo um ambiente adequado ao fornecimento deste biocombustível (EDWIGES et al., 2018; MASEBINU et al., 2018; MUKHUBA et al., 2019; SINGKHALA et al., 2021; DEENA et al., 2022; JØNSEN et al., 2022).

É crucial manter uma oferta constante de biogás, seguindo uma lógica de previsibilidade. Assim, dois cenários precisam ser evitados. Primeiramente, a produção excessiva de biogás, uma vez que o CH₄, presente no biogás, é um GEE que contribui para as mudanças climáticas. Além disso, a baixa produção também deve ser prevenida, pois, ofertas abaixo da demanda diária comprometerão a segurança energética dos usuários de biodigestores domésticos. Deng et al. (2020) indicaram que a demanda *per capita* diária de biogás está entre 0,2 a 0,3 m³, enquanto o rendimento médio diário observado em seus biodigestores variou de 0,15 a 0,30 m³ de biogás.

Nesse contexto, os biodigestores domésticos que adotarem as técnicas desenvolvidas neste trabalho devem evitar os valores obtidos no Ciclo 1 (**Gráficos 1 e 2**). Nesse Ciclo, foram gerados 18,38±5,668 L/h (~0,44 m³ diário), valores consideravelmente superiores aos recomendados por Deng et al. (2020). Dependendo do equipamento, esses valores elevados podem comprometer a estrutura do biodigestor ou resultar na liberação excessiva não intencional de biogás na atmosfera. Controles na Recirculação do Biogás, mantendo-a em níveis inferiores aos praticados no referido Ciclo (**Tabela 2 e Gráfico 1**) e adicionando uma maior quantidade de cascas de ovos, podem contribuir para melhorias durante a biodigestão dos RAHs. Dessa forma, é possível produzir biogás inflamável de maneira mais constante e dentro da faixa ideal diária recomendada por Deng et al. (2020) para biodigestores domésticos.

Se as técnicas de Recirculação do Biogás e de Aclimação prévia, com mínima introdução de inóculo exógeno, forem aplicadas em biodigestores convencionais superiores a 3 m³, o biogás gerado poderá atender aos valores sugeridos na literatura científica quanto à disponibilidade de combustível para suprir a necessidade térmica diária de uma família durante o cozimento de alimentos. Isso traz o benefício adicional de mitigar os efeitos das mudanças climáticas, através da redução das emissões de CH₄ entérico ao desobrigar a criação de rebanhos de ruminantes como forma de garantir a obtenção de esterco para geração de biogás.

Portanto, a lógica de *feedback* adotada nesta investigação permitiu que a Recirculação do Biogás atuasse de modo intermitente, tão somente o necessário para fornecer biogás de maneira equilibrada e constante. Assim, em momentos de alta geração de biogás (Ciclo 1, por exemplo) a recirculação agiu para tentar garantir a mínima homogeneização, apenas o suficiente para conter instabilidades no meio (sedimentação, zoneamento da temperatura, etc.), contudo, sem estimular demasiadamente a geração de biogás. Nos dias de menores taxas de produção, a recirculação promoveu a máxima interação substrato/microrganismos,

ressuspensão de alcalinizantes, etc. para reestabelecer a continuidade da oferta de biogás (Ciclo 5, por exemplo).

É possível que a condução de biodigestão de RAHs com valores iniciais de $\text{pH} \geq 6,7$, sob Recirculação de Biogás como estratégia de homogeneização, a geração de biogás inflamável continuará satisfatória, no entanto, apresentando valores mais estáveis, ou seja, com desvio padrão $< 2,8$ L/h como foi verificado nos Ciclos 5, 6, 7 e 8 (**Seção 3.3 e Gráfico 2**). Estes resultados diferem de outros autores que, ao agitar seus biodigestores com outros mecanismos, recomendaram pH inicial a partir de $\text{pH} \geq 6,5$ (MUKHUBA et al., 2019; SINGKHALA et al., 2021; DEENA et al., 2022; JØNSEN et al., 2022).

4. Conclusão

A implementação da Recirculação do Biogás como estratégia de homogeneização, aliada à Aclimação prévia com introdução mínima de inóculo exógeno (2,5% do volume em digestão), como medida para garantir a produção de inóculo local, obteve biogás inflamável entre $9,55 \pm 2,430$ L/h e $18,38 \pm 5,668$ L/h, isso equivale à produção diária de 0,23 a 0,44 m^3 , respectivamente. Segundo a literatura, tais valores de biogás são suficientes para atender a demanda energética de uma pessoa.

Assim, a inédita combinação de técnicas desta pesquisa permitiu promover o saneamento ambiental e a geração de biogás inflamável a partir da estabilização anaeróbica dos RAHs durante os 8 Ciclos quinzenais de experimentação. Portanto, é possível garantir o alcance do ODS 7 da ONU pela biodigestão dos resíduos gerados pela EMPASA/JP.

Os RAHs apresentaram elevada biodegradabilidade com boa geração de biogás inflamável, confirmando os achados da literatura. No entanto, diferente de outros autores, os ácidos orgânicos liberados durante a estabilização dos RAHs não foram capazes de acidificar fortemente o conteúdo em digestão ao ponto de promover a parada da produção de biogás inflamável.

Portanto, a combinação das técnicas utilizadas formaram um ambiente favorável as arqueas metanogênicas, enquanto promoviam o saneamento ambiental, embora não foi possível estabelecer o nível de relevância do incremento do alcalinizante biogênico (cascas de ovos de galinha) para a manutenção do pH em faixa ótima da metanogênese. Apesar disso, a faixa de pH observada neste trabalho permaneceu favorável para a geração de CH_4 , uma vez que o biogás se manteve inflamável em todos os Ciclos, mesmo entre aqueles que apresentaram valores de pH abaixo do recomendado pela literatura.

Os Ciclos 6 e 7, podem exemplificar a relevância do emprego destas técnicas. Nestes Ciclos não foram adicionadas cascas de ovos, mesmo assim o pH se manteve estável e não se acidificou, ou seja, permaneceu em $\text{pH} \geq 6,7$. Esses valores próximos da neutralidade, possivelmente, favoreceram o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, acarretando o consumo de ácidos orgânicos e, assim, compensando a ausência do alcalinizante biogênico.

Biodigestores domésticos que adotarem as técnicas aqui empregadas têm o potencial de se tornar estratégias poderosas na promoção da segurança energética e na mitigação das mudanças climáticas. Além disso, esses equipamentos adaptados podem contribuir significativamente para combater diversas formas de violência contra mulheres e crianças, que frequentemente sofrem as consequências do uso diário de biomassas como lenha, carvão e esterco seco. Isso representa uma contribuição importante para o empoderamento tecnológico de comunidades rurais, periurbanas, refugiadas ou isoladas, que enfrentam problemas relacionados à abundância de RAHs, capacitando-as na produção de biogás e, assim, avançando mais rapidamente em direção ao cumprimento do ODS 7 da ONU.

Uma possibilidade a ser investigada é a aplicação da Recirculação de Biogás em ambiente com pH controlado, preferencialmente em $\text{pH} \geq 6,7$ com adição de maiores volumes de Alcalinizantes (cascas de ovos de galinha ou de outras aves) ou, ainda, outros materiais biogênicos com potencial alcalinizante, como conchas de ostras, mexilhões, caramujos e caracóis.

É possível que a digestão anaeróbica de resíduos alimentares, utilizando técnicas de Mínima Introdução de Inoculantes Exógenos, Aclimatação, Recirculação do Biogás e Alcalinizantes Biogênicos, se torne um campo promissor para estudos futuros. Diferentes combinações dessas técnicas podem resultar em variações na concentração de CH_4 à medida que os valores de pH se aproximam ou se afastam da faixa ideal.

5. Referências

AGRAWAL, Akanksha; CHAUDHARI, Parmesh Kumar; GHOSH, Prabir. Anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: a critical review of associated challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 10, p. 24987–25012, 2023.

ANDRADE CRUZ, Ianny; ANDRADE, Larissa Renata Santos; JESUS, Anderson Alles de; *et al.* Potential of eggshell waste derived calcium for sustainable production of biogas from cassava wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 321, p. 116000, 2022.

ANDRADE, Larissa Renata Santos; CRUZ, Ianny Andrade; DE MELO, Luciano; *et al.* Oyster shell-based alkalization and photocatalytic removal of cyanide as low-cost stabilization approaches for enhanced biogas production from cassava starch wastewater. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 47–59, 2020.

AO, Tianjie; XIE, Zhijie; ZHOU, Pan; *et al.* Comparison of microbial community structures between mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of vegetable waste. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 44, n. 6, p. 1201–1214, 2021.

ARELLI, Vijayalakshmi; MAMINDLAPELLI, Naveen Kumar; BEGUM, Sameena; *et al.* Solid state anaerobic digestion of food waste and sewage sludge: Impact of mixing ratios and temperature on microbial diversity, reactor stability and methane yield. **Science of The Total Environment**, v. 793, p. 148586, 2021.

AUNAN, Kristin; HANSEN, Mette Halskov; LIU, Zhaohui; *et al.* The Hidden Hazard of Household Air Pollution in Rural China. **Environmental Science & Policy**, v. 93, p. 27–33, 2019.

CAI, Yafan; GALLEGOS, Daniela; ZHENG, Zehui; *et al.* Exploring the combined effect of total ammonia nitrogen, pH and temperature on anaerobic digestion of chicken manure using response surface methodology and two kinetic models. **Bioresource Technology**, v. 337, p. 125328, 2021.

CHANG, Jinfeng; PENG, Shushi; YIN, Yi; *et al.* The Key Role of Production Efficiency Changes in Livestock Methane Emission Mitigation. **AGU Advances**, v. 2, n. 2, 2021.

CHOWDHURY, Hemal; CHOWDHURY, Tamal; SHARIFI, Ayyoob; *et al.* Role of Biogas in Achieving Sustainable Development Goals in Rohingya Refugee Camps in Bangladesh. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 11842, 2022.

DEENA, Santhana Raj; VICKRAM, A.S.; MANIKANDAN, S.; *et al.* Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques – A review. **Bioresource Technology**, v. 355, p. 127234, 2022.

DEMICHELIS, F.; TOMMASI, T.; DEORSOLA, F.A.; *et al.* Effect of inoculum origin and substrate-inoculum ratio to enhance the anaerobic digestion of organic fraction municipal solid waste (OFMSW). **Journal of Cleaner Production**, v. 351, p. 131539, 2022.

DENG, Liangwei; LIU, Yi; WANG, Wenguo. Rural Household Digesters. *In: Biogas Technology*. Singapore: Springer Singapore, p. 31–67, 2020.

EDWIGES, Thiago; FRARE, Laercio; MAYER, Bruna; *et al.* Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, v. 71, p. 618–625, 2018.

FANG, Wei; ZHANG, Panyue; ZHANG, Guangming; *et al.* Effect of alkaline addition on anaerobic sludge digestion with combined pretreatment of alkaline and high pressure homogenization. **Bioresource Technology**, v. 168, p. 167–172, 2014.

GABY, John Christian; ZAMANZADEH, Mirzaman; HORN, Svein Jarle. The effect of temperature and retention time on methane production and microbial community composition in staged anaerobic digesters fed with food waste. **Biotechnology for Biofuels**, v. 10, n. 1, 2017.

GLIBERT, Patricia M. From hogs to HABs: impacts of industrial farming in the US on nitrogen and phosphorus and greenhouse gas pollution. **Biogeochemistry**, v. 150, n. 2, p. 139–180, 2020.

GUVEN, Huseyin; WANG, Zhao; ERIKSSON, Ola. Evaluation of future food waste management alternatives in Istanbul from the life cycle assessment perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 117999, 2019.

HAN, Sheng; LIU, Yafeng; ZHANG, Shicheng; *et al.* Reactor performances and microbial communities of biogas reactors: effects of inoculum sources. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 2, p. 987–995, 2016.

HARIRCHI, Sharareh; WAINAINA, Steven; SAR, Taner; *et al.* Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. **Bioengineered**, v. 13, n. 3, p. 6521–6557, 2022.

HASHIMOTO, Shu; HIKICHI, Mari; MARUOKA, Shuichiro; *et al.* Our future: Experiencing the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak and pandemic. **Respiratory Investigation**, v. 59, n. 2, p. 169–179, 2021.

HOSSEINI KOUPAIE, E.; AZIZI, A.; BAZYAR LAKEH, A.A.; *et al.* Comparison of liquid and dewatered digestate as inoculum for anaerobic digestion of organic solid wastes. **Waste Management**, v. 87, p. 228–236, 2019.

HUANG, Xianlei; WANG, Shu; SHI, Zuliang; *et al.* Challenges and strategies for biogas production in the circular agricultural waste utilization model: A case study in rural China. **Energy**, v. 241, p. 122889, 2022.

JESWANI, Harish K.; FIGUEROA-TORRES, Gonzalo; AZAPAGIC, Adisa. The extent of food waste generation in the UK and its environmental impacts. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 532–547, 2021.

JIANG, Junfeng; WU, Peiwen; SUN, Yongming; *et al.* Comparison of microbial communities during anaerobic digestion of kitchen waste: Effect of substrate sources and temperatures. **Bioresource Technology**, v. 317, p. 124016, 2020a.

JIANG, Junfeng; LI, Lianhua; LI, Ying; *et al.* Bioaugmentation to enhance anaerobic digestion of food waste: Dosage, frequency and economic analysis. **Bioresource Technology**, v. 307, p. 123256, 2020b.

JØNSEN, Brian Dahl; TSAPEKOS, Panagiotis; TAHIR ASHRAF, Muhammed; *et al.* Pilot-scale study of biomethanation in biological trickle bed reactors converting impure CO₂ from a Full-scale biogas plant. **Bioresource Technology**, v. 365, p. 128160, 2022.

KAINTHOLA, Jyoti; KALAMDHAD, Ajay S.; GOUD, Vaibhav V.; *et al.* Fungal pretreatment and associated kinetics of rice straw hydrolysis to accelerate methane yield from anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 286, p. 121368, 2019.

KARIYAMA, Ibrahim Denka; ZHAI, Xiaodong; WU, Binxin. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review. **Water Research**, v. 143, p. 503–517, 2018.

KIM, Mi-Sun; KIM, Dong-Hoon; YUN, Yeo-Myeong. Effect of operation temperature on anaerobic digestion of food waste: Performance and microbial analysis. **Fuel**, v. 209, p. 598–605, 2017.

- KOUZI, Afamia I.; PURANEN, Matti; KONTRO, Merja H. Evaluation of the factors limiting biogas production in full-scale processes and increasing the biogas production efficiency. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 22, p. 28155–28168, 2020.
- KURADE, Mayur B.; SAHA, Shouvik; SALAMA, El-Sayed; *et al.* Acetoclastic methanogenesis led by *Methanosarcina* in anaerobic co-digestion of fats, oil and grease for enhanced production of methane. **Bioresource Technology**, v. 272, p. 351–359, 2019.
- LATHA, K.; VELRAJ, R.; SHANMUGAM, P.; *et al.* Mixing strategies of high solids anaerobic co-digestion using food waste with sewage sludge for enhanced biogas production. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 388–400, 2019.
- LEMMA, Bekele; ARARSO, Kassahun; EVANGELISTA, Paul H. Attitude towards biogas technology, use and prospects for greenhouse gas emission reduction in southern Ethiopia. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124608, 2021.
- LENDORMI, Thomas; JAZIRI, Kaïs; BÉLINE, Fabrice; *et al.* Methane production and microbial community acclimation of five manure inocula during psychrophilic anaerobic digestion of swine manure. **Journal of Cleaner Production**, v. 340, p. 130772, 2022.
- LI, Jinping; GAN, Chang; ZHOU, Jianjian; *et al.* Performance analysis of biomass direct combustion heating and centralized biogas supply system for rural districts in China. **Energy Conversion and Management**, v. 278, p. 116730, 2023.
- LI, Yangyang; WANG, Yanqin; YU, Zihan; *et al.* Effect of inoculum and substrate/inoculum ratio on the performance and methanogenic archaeal community structure in solid state anaerobic co-digestion of tomato residues with dairy manure and corn stover. **Waste Management**, v. 81, p. 117–127, 2018.
- LI, Yu; ZHAO, Jing; KROONEMAN, Janneke; *et al.* Strategies to boost anaerobic digestion performance of cow manure: Laboratory achievements and their full-scale application potential. **Science of The Total Environment**, v. 755, p. 142940, 2021.
- MAHMOODI-ESHKAFTAKI, Mahmood; HOUSHYAR, Ehsan. Biogas recirculation technology: Effect on biogas purification, slurry characteristics, microbial activity and energy consumption. **Environmental Technology & Innovation**, v. 19, p. 100867, 2020.
- MARCHETTI, Rosa; VASMARA, Ciro; ORSI, Anna. Inoculum production from pig slurry for potential use in agricultural biogas plants. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 102310, 2022.
- MASEBINU, S.O.; AKINLABI, E.T.; MUZENDA, E.; *et al.* Experimental and feasibility assessment of biogas production by anaerobic digestion of fruit and vegetable waste from Joburg Market. **Waste Management**, v. 75, p. 236–250, 2018.
- MCDUFFIE, Erin E.; MARTIN, Randall V.; SPADARO, Joseph V.; *et al.* Source sector and fuel contributions to ambient PM_{2.5} and attributable mortality across multiple spatial scales. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 2021.
- MERTENS, Elly; KUIJSTEN, Anneleen; VAN ZANTEN, Hannah HE.; *et al.* Dietary choices and environmental impact in four European countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117827, 2019.

MORENO, Luis A; MEYER, Rosan; DONOVAN, Sharon M; *et al.* Perspective: Striking a Balance between Planetary and Human Health—Is There a Path Forward? **Advances in Nutrition**, v. 13, n. 2, p. 355–375, 2022.

MUKHUBA, Mashudu; ROOPNARAIN, Ashira; MOELETSE, Mokhele Edmond; *et al.* Metagenomic insights into the microbial community and biogas production pattern during anaerobic digestion of cow dung and mixed food waste. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 95, n. 1, p. 151–162, 2019.

NIKIEMA, Mahamadi; BARSAN, Narcis; MAIGA, Ynoussa; *et al.* Optimization of Biogas Production from Sewage Sludge: Impact of Combination with Bovine Dung and Leachate from Municipal Organic Waste. **Sustainability**, v. 14, n. 8, p. 4380, 2022.

NIU, Shuwen; DAI, Runqi; ZHONG, Sheng; *et al.* Multiple benefit assessment and suitable operation mechanism of medium- and large-scale biogas projects for cooking fuel in rural Gansu, China. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 46, p. 101285, 2021.

OBAIDEEN, Khaled; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; WILBERFORCE, Tabbi; *et al.* Biogas role in achievement of the sustainable development goals: Evaluation, Challenges, and Guidelines. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 131, p. 104207, 2022.

OFON, Utibe A.; NDUBUISI-NNAJI, Uduak U.; SHAIBU, Solomon E.; *et al.* Recycling anaerobic digestate enhances the co-digestion potential of agro-industrial residues: influence of different digestates as sources of microbial inoculum. **Environmental Technology**, v. 43, n. 28, p. 4472–4483, 2021.

PASALARI, Hasan; GHOLAMI, Mitra; REZAEI, Abbas; *et al.* Perspectives on microbial community in anaerobic digestion with emphasis on environmental parameters: A systematic review. **Chemosphere**, v. 270, p. 128618, 2021.

POHLERT, T. **PMCMR**: Calculate Pairwise Multiple Comparisons of Mean Rank Sums. (R package: PMCMR_4.4.tar). Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=PMCMR>, 2018.

RAHMAN, Khondokar M.; EDWARDS, David J.; MELVILLE, Lynsey; *et al.* Implementation of Bioenergy Systems towards Achieving United Nations' Sustainable Development Goals in Rural Bangladesh. **Sustainability**, v. 11, n. 14, p. 3814, 2019.

RAVI, Padma Priya; LINDNER, Jonas; OECHSNER, Hans; *et al.* Effects of target pH-value on organic acids and methane production in two-stage anaerobic digestion of vegetable waste. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 96–102, 2018.

RAWOOF, Salma Aathika Abdur; KUMAR, P. Senthil; VO, Dai-Viet N.; *et al.* Sequential production of hydrogen and methane by anaerobic digestion of organic wastes: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 2, p. 1043–1063, 2021.

REISINGER, Andy; CLARK, Harry; COWIE, Annette L.; *et al.* How necessary and feasible are reductions of methane emissions from livestock to support stringent temperature goals? **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 379, n. 2210, p. 20200452, 2021.

RICHARDSON, Ruth. Bending the arc of COVID-19 through a principled food systems approach. **Agriculture and Human Values**, v. 37, n. 3, p. 653–654, 2020.

SCARLAT, Nicolae; FAHL, Fernando; DALLEMAND, Jean-François; *et al.* A spatial analysis of biogas potential from manure in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 915–930, 2018.

SCHNORF, Vivienne; TRUTNEVYTE, Evelina; BOWMAN, Gillianne; *et al.* Biomass transport for energy: Cost, energy and CO₂ performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 125971, 2021.

SEFEEDPARI, Paria; VELLINGA, Theun; RAFIEE, Shahin; *et al.* Technical, environmental and cost-benefit assessment of manure management chain: A case study of large scale dairy farming. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 857–868, 2019.

SHEN, Guofeng; RU, Muye; DU, Wei; *et al.* Impacts of air pollutants from rural Chinese households under the rapid residential energy transition. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, 2019.

SHI, Chuan; MA, Jinyuan; WU, Houkai; *et al.* Evaluation of pH regulation in carbohydrate-type municipal waste anaerobic co-fermentation: Roles of pH at acidic, neutral and alkaline conditions. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158327, 2022.

SHYAN, Lai Lih; MAT NANYAN, Noreen Suliani; ISMAIL, Norli; *et al.* Effort to Mitigate Volatile Fatty Acid Inhibition by Using Mixed Inoculum and Compost for the Degradation of Food Waste and the Production of Biogas. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1185, 2023.

SINGH, Buta; SZAMOSI, Zoltán; SIMÉNFAI, Zoltán. Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 40, n. 4, p. 508–521, 2020.

SINGKHALA, Apinya; MAMIMIN, Chonticha; REUNGSANG, Alissara; *et al.* Enhancement of Thermophilic Biogas Production from Palm Oil Mill Effluent by pH Adjustment and Effluent Recycling. **Processes**, v. 9, n. 5, p. 878, 2021.

THAKUR, Hemant; DHAR, Atul; POWAR, Satvasheel. Biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in continuously stirred tank reactor. **Results in Engineering**, v. 16, p. 100617, 2022.

THE JAMOVI PROJECT. **Jamovi**. (Version 2.0) [for Windows 10]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>, 2021.

TIAN, Guangliang; YANG, Bin; DONG, Minghua; *et al.* The effect of temperature on the microbial communities of peak biogas production in batch biogas reactors. **Renewable Energy**, v. 123, p. 15–25, 2018.

UHUNAMURE, S.E.; NETHENGWE, N.S.; TINARWO, D. Correlating the factors influencing household decisions on adoption and utilisation of biogas technology in South Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 264–273, 2019.

UNGERFELD, Emilio M. Opportunities and Hurdles to the Adoption and Enhanced Efficacy of Feed Additives towards Pronounced Mitigation of Enteric Methane Emissions from Ruminant Livestock. **Methane**, v. 1, n. 4, p. 262–285, 2022.

VIJIN PRABHU, A.; SIVARAM, A.R.; PRABHU, N.; *et al.* A study of enhancing the biogas production in anaerobic digestion. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 7994–7999, 2021.

WANG, Shiwei; MA, Fang; MA, Weiwei; *et al.* Influence of Temperature on Biogas Production Efficiency and Microbial Community in a Two-Phase Anaerobic Digestion System. **Water**, v. 11, n. 1, p. 133, 2019.

WAQAS, M.; NIZAMI, A.S.; ABURIAZAIZA, A.S.; *et al.* Optimizing the process of food waste compost and valorizing its applications: A case study of Saudi Arabia. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 426–438, 2018.

WESTERHOLM, Maria; SCHNÜRER, Anna. Microbial responses to different operating practices for biogas production systems. **Anaerobic digestion**, p. 1-36, 2019.

WILSON, Melissa L.; BRUSA, Anthony; CHRISTENSEN, Hatley; *et al.* Comparison of methods to recover amaranth weed seeds from manure. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 7, n. 1, 2022.

XUE, Li.; LIU, Gang. Introduction to global food losses and food waste. In: **Saving Food**. [s.l.] Elsevier, p. 1–31, 2019.

XUE, Shengrong; SONG, Jinghui; WANG, Xiaojiao; *et al.* A systematic comparison of biogas development and related policies between China and Europe and corresponding insights. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109474, 2020.

YADAV, Monika; JOSHI, Chandrakant; PARITOSH, Kunwar; *et al.* Reprint of Organic waste conversion through anaerobic digestion: A critical insight into the metabolic pathways and microbial interactions. **Metabolic Engineering**, v. 71, p. 62–76, 2022.

YASMIN, Nazia; GRUNDMANN, Philipp. Adoption and diffusion of renewable energy – The case of biogas as alternative fuel for cooking in Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 255–264, 2019.

YU, Eric; BLAIR, Shane; HARDEL, Mari; *et al.* Timeline of Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) invasion and eradication in Minnesota. **Weed Technology**, v. 35, n. 5, p. 802–810, 2021.

ZHAI, Xiaodong; KARIYAMA, Ibrahim Denka; WU, Binxin. Investigation of the effect of intermittent minimal mixing intensity on methane production during anaerobic digestion of dairy manure. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 121–129, 2018.

ZHANG, Jiaying; LUO, Wenhai; WANG, Yaya; *et al.* Anaerobic cultivation of waste activated sludge to inoculate solid state anaerobic co-digestion of agricultural wastes: Effects of different cultivated periods. **Bioresource Technology**, v. 294, p. 122078, 2019.

ZHANG, Shuang; MA, Xinxin; SUN, Haishu; *et al.* Response of semi-continuous anaerobic digestion of food waste to progressively increasing temperature: Methanogen community, correlation analysis, and energy balance. **Industrial Crops and Products**, v. 192, p. 116066, 2023.

ZHAO, Jiamin; HOU, Tingting; LEI, Zhongfang; *et al.* Effect of biogas recirculation strategy on biogas upgrading and process stability of anaerobic digestion of sewage sludge under slightly alkaline condition. **Bioresource Technology**, v. 308, p. 123293, 2020.

4. Discussões Gerais da Tese

A sociedade contemporânea enfrenta uma pressão crescente para se afastar dos combustíveis fósseis e adotar fontes de energia limpa e renovável. Os biocombustíveis, como o biogás, oferecem uma solução atraente. Os três capítulos desta tese abordaram diferentes facetas da geração de biogás e sua relevância para questões socioambientais urgentes. Ao conectar esses tópicos, um panorama completo das oportunidades e desafios associados à produção de energia limpa, a partir de resíduos orgânicos, pôde ser visto. Suas abordagens têm o potencial de contribuir significativamente para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS da ONU, em particular o ODS 7 (Energia Acessível e Limpa).

Nos três artigos capitulados na tese em tela, distintos aspectos relacionados à geração de biogás a partir de resíduos orgânicos, foram examinados, com ênfase na contribuição das instituições de ensino superior brasileiras - IES e na otimização de processos anaeróbicos de estabilização. Embora cada artigo abordou um tema específico, há conexões importantes entre eles que podem ser exploradas para uma discussão mais ampla e holística.

O primeiro capítulo destacou a evolução das pesquisas em dissertações e teses sobre a geração de energia elétrica a partir do biogás no Brasil. As IES desempenham um papel crucial nesse avanço, com ênfase em regiões como o Sudeste, que concentra um grande número de publicações. Isso reflete a importância das IES como catalisadoras do desenvolvimento de tecnologias limpas e renováveis, chamando a atenção das autoridades governamentais e instituições de fomento para investimentos em pesquisas com a tecnologia de biodigestão anaeróbica nas IES em outras regiões, como Norte e Nordeste, por exemplo.

No entanto, essas instituições enfrentam desafios, como falta de financiamento adequado, que podem limitar seu potencial. A cooperação entre as IES, o governo e demais agências de fomento é fundamental para superar essas limitações, caminho premente para o alcance rápido e consolidado de uma matriz energética descarbonizada e mais sustentável.

Como visto no capítulo I, a participação da hidroeletricidade na matriz elétrica brasileira, ao longo das últimas décadas, vem dando espaço para outras renováveis, como a eólica e a fotovoltaica, no entanto, o enorme potencial do biogás ainda pouco contribui para esta matriz. Os achados dos capítulos II e III, sobretudo este último, podem apontar para um novo campo de investigação por parte das IES brasileiras na promoção do saneamento ambiental e aplicação de biogás na geração de eletricidade.

A partir dos resultados da presente tese é possível estimar a geração quinzenal de eletricidade. Cada um dos 8 Ciclos de estabilização anaeróbica recebeu, quinzenalmente, 25 L de RAHs. O Ciclo de menor rendimento apresentou uma produção diária de 0,23 m³ de biogás, equivalente a 3,45 m³ em 15 dias, enquanto o maior rendimento foi de 0,44 m³ de biogás, correspondendo a 6,6 m³ para o mesmo intervalo experimental.

Conforme apontado na Seção 2.5 da tese “*Tecnologias para o tratamento de resíduos orgânicos: o papel da digestão anaeróbica no saneamento ambiental, geração de biogás e recuperação de nutrientes*”, a literatura traz que, para cada tonelada de RAHs, 74 m³ de biogás ou 151,6 kWh de energia elétrica podem ser gerados. Os achados do capítulo III permitem estimar valores quinzenais bem superiores a este, ou seja, para cada tonelada de RAHs tratada na EMPASA/JP, seriam obtidos entre 138 a 264 m³ de biogás ou 282,7 a 540,8 kWh de energia elétrica, no menor e maior rendimento de biogás, respectivamente, para cada 15 dias de tratamento, conforme estimativas a partir dos dados obtidos no referido capítulo.

Assim, concebendo que os 65% das 162 toneladas de resíduos orgânicos da EMPASA/JP eram compostos apenas de RAHs, ou seja, 105,3 toneladas mensais (ou 52,65 toneladas quinzenais), seria possível obter 7.265,7 m³ de biogás ou 14.884,1 kWh, em 15 dias (cenário de menor rendimento de biogás). Enquanto os mesmos RAHs seriam suficientes em gerar, quinzenalmente, 13.899,6 m³ de biogás ou 28.473,1 kWh, considerando o melhor cenário de estabilização anaeróbica dos resíduos da EMPASA/JP, estimados a partir dos achados do capítulo III.

Na lógica do capítulo I (uso do biogás para gerar eletricidade) é possível outras estimativas sobre geração de biogás a partir dos dados do capítulo III. Como mostrado na Seção 2.5 da tese “*Tecnologias para o tratamento de resíduos orgânicos: o papel da digestão anaeróbica no saneamento ambiental, geração de biogás e recuperação de nutrientes*” o consumo médio mensal de eletricidade nas residências paraibanas foi de 128,6 kWh. Isso corresponde a uma demanda quinzenal de 64,3 kWh.

Assim, caso as 52,65 toneladas (quinzenais) de RAHs geradas na EMPASA/JP fossem tratados pelas técnicas convencionais de digestão anaeróbica, seria possível obter, a cada 15 dias, 3.896,1 m³ de biogás ou 7.981,7 kWh de energia elétrica. Ou seja, 124,1 moradias paraibanas seriam beneficiadas, quinzenalmente, a partir da eletricidade gerada deste tratamento.

No entanto, simulando a adoção das técnicas inovadoras do capítulo III para a estabilização anaeróbica destas 52,65 toneladas de resíduos, seria possível estimar que o biogás obtido na EMPASA/JP, pelo tratamento quinzenal, poderia abastecer, por um período

de 15 dias, entre 231,5 a 442,8 residências paraibanas com a energia elétrica gerada nos Ciclos de menor e maior rendimento de biogás, respectivamente.

Como uma das propostas do capítulo III foi obter biogás da estabilização dos RAHs gerados pela EMPASA/JP para o cozimento de alimentos a partir de biodigestores domésticos, é possível estimar quantas residências seriam beneficiadas se as técnicas abordadas no capítulo forem aplicadas aos RAHs da EMPASA/JP. No entanto, conforme discutido no artigo de referência, não existe consenso na comunidade científica quanto aos valores diários ideais de biogás para atender ao preparo de alimentos em cada habitação.

Assim, se for adotado 1 m^3 como suficiente para o cozimento diário, é possível que 484,4 famílias sejam beneficiadas durante 15 dias. Para $0,82 \text{ m}^3$ de biogás, o número de famílias diariamente atendidas passa para 590,7, no mesmo período, no entanto, se o ideal diário for $0,75 \text{ m}^3$ as moradias contempladas sobem para 645,8, quinzenalmente.

É importante destacar que estes valores diários se referem ao cenário de menor rendimento de biogás, ou seja, $7.265,7 \text{ m}^3$ de biogás, para 15 dias de biodigestão anaeróbica dos RAHs da EMPASA/JP. Para o maior rendimento de biogás ($13.899,6 \text{ m}^3$ por quinzena), as residências atendidas pelo biogás, para o cozimento diário de alimentos, seriam 926,6, 1.130 e 1.235,5 para 1 m^3 , $0,82 \text{ m}^3$ e $0,75 \text{ m}^3$, respectivamente, também por um período de 15 dias.

Para efeito de comparação, caso os RAHs da EMPASA/JP, gerados em 15 dias, fossem tratados pelos métodos convencionais de biodigestão anaeróbica, o número de famílias diariamente atendidas pelo biogás obtido ($3.896,1 \text{ m}^3$ em 15 dias) seriam 259,7, 316,8 e 346,3 para 1 m^3 , $0,82 \text{ m}^3$ e $0,75 \text{ m}^3$, respectivamente, durante 15 dias de biodigestão anaeróbica.

Embora o capítulo II apresente achados bastante significativos quanto ao saneamento ambiental pelo tratamento dos RAHs da EMPASA/JP, não foram feitas estimativas de geração de energia elétrica a partir do biogás, conforme a relevância dada ao assunto no capítulo I. Isso difere das análises realizadas a partir dos dados do capítulo III, uma vez que o biogás produzido no artigo II não apresentou potenciais energéticos.

Os achados desta tese, assim como as estimativas do aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, podem contribuir com o 5º Período Histórico do Biogás no Brasil que se encontra em pleno desenvolvimento, conforme discutido no capítulo I. Isso reafirma a relevância das instituições de ensino superior - IES brasileiras frente as necessidades de saneamento ambiental, bem como a ampliação do fornecimento de energia acessível e limpa (ODS 7) (capítulos II e III) a partir do biogás. Embora a matriz elétrica brasileira seja uma das mais limpas do mundo, graças a grande participação da hidreletricidade e, mais recentemente, da eólica e fotovoltaica (capítulo I), existe um enorme potencial inexplorado a partir do

biogás, seja pela geração em biodigestores domésticos ou grandes usinas de biodigestão (capítulo III).

No entanto, equipamentos de pequena escala, maiores produções de biogás podem exceder a necessidade diária de consumo ou a capacidade de armazenamento em biodigestores domésticos, causando fugas para atmosfera e/ou danos aos equipamentos. Deste modo, o biorreator de teste utilizado nesta pesquisa foi operado para tentar fornecer biogás de maneira constante, em atendimento a demanda diária durante o cozimento de alimentos, sem gerar excedentes e em um contexto de energia limpa e acessível, proposta no ODS 7 da ONU.

Neste método inovador, a recirculação intermitente ocorreu com volumes menores de biogás, permitindo uma condução adequada da biodigestão e garantindo ofertas constantes de biogás. Isso foi possível porque, ao contrário de outros estudos, a Recirculação do Biogás nesta investigação depende dos eventos de Drenagem do Biogás para ocorrer, podendo haver interrupções durante a Recirculação se grandes volumes de biogás forem gerados em curtos intervalos, o que exige, portanto, uma maior atuação da Drenagem.

É possível que o Biogás Produzido em condições de $\text{pH} \geq 6,7$ contenha menos acúmulo de ácidos orgânicos, visto que valores próximos da neutralidade favorecem muito as atividades dos organismos consumidores de ácidos orgânicos, como as arqueas metanogênicas. Como abordado nos capítulos II e III, tal consumo pode refletir na estabilidade da biodigestão, pois uma microbiota mais equilibrada, tende a ser mais constante na produção de biogás inflamável. Assim, diferente do capítulo II, é possível que os ácidos orgânicos, presentes no biogás Recirculado no capítulo III, tenham sido prontamente transformados em CH_4 pelas arqueas durante os eventos de Recirculação, sobretudo a partir do Ciclo 5 (capítulo III). É provável que tal condição proporcionou maior concentração de CH_4 , correspondendo em maior poder calorífico do biogás.

A mínima introdução de inóculo exógeno (capítulo III), combinado as práticas utilizados no capítulo II, foi indispensável à obtenção de biogás com importância energética e, assim, ser capaz de atender ao ODS 7 da ONU. Dessa forma, biodigestores domésticos convencionais que incorporarem as técnicas utilizadas neste estudo têm o potencial de se tornarem estratégias eficazes na promoção da segurança energética a residentes de zonas rurais, periurbanas, comunidades isoladas, bem como refugiados, além de mitigar as mudanças climáticas, preservar as florestas (grandes sumidouros de carbono) e combater diversas formas de violência contra mulheres e crianças, muitas vezes expostas às consequências do uso diário de biomassas como lenha, carvão e esterco seco.

Possivelmente, os valores de pH abaixo da neutralidade indicam que a quantidade de álcali fornecida foi insuficiente para promover elevações mais rápidas do pH durante os experimentos descritos nos capítulos II e III. No entanto, a inflamabilidade do biogás observada no capítulo III pode ser atribuída à administração das cascas de ovos, juntamente com a atividade dos microrganismos consumidores de ácidos orgânicos presentes no inóculo exógeno (após aclimação), como os metanogênicos, que demonstraram uma eficiência sinérgica com o álcali, resultando em um aumento gradual, embora lento, do pH.

A gestão de resíduos em um mundo onde bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçadas é premente. A estabilização anaeróbica dos RAHs viabiliza o saneamento ambiental, mesmo que, eventualmente, biogás inflamável não seja obtido, visto que o tratamento anaeróbico é capaz de promover saúde a população ao evitar a propagação de doenças relacionadas ao descarte inadequado de resíduos orgânicos, conforme verificado no capítulo II. Assim, mesmo que biodigestores domésticos, ocasionalmente, não atendam ao ODS 7, sua ampla disseminação em ambientes rurais, periurbanos e comunidades isoladas ainda se justifica, pois, estes equipamentos atendem outras necessidades igualmente relevantes para a sociedade como o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 6 (Água Limpa e Saneamento) e ODS 15 (Proteção da Vida Terrestre), por exemplo.

O capítulo III ressaltou a produção de biogás inflamável a partir da estabilização anaeróbica de RAHs, priorizando uma abordagem que reduz a dependência de inóculos exógenos. Isso libera os usuários de biodigestores domésticos da exigência de criar rebanhos para obter esterco inoculante. Os resultados indicam que a Recirculação de Biogás e a Aclimação prévia dos resíduos podem ser estratégias promissoras para otimizar a produção de biogás, oferecendo relativa facilidade de instalação. Essas técnicas dispensam sistemas complexos de homogeneização que demandam paradas nos biodigestores para manutenção interna, bem como o transporte contínuo de grandes volumes de esterco para garantir a constância na produção de biogás.

Em um mundo que enfrenta enormes desafios ambientais e energéticos, a pesquisa interdisciplinar e a inovação são cruciais. Em virtude das mudanças climáticas e suas devastadoras consequências, é urgente a disseminação de tecnologias que sejam capazes de transformar resíduos orgânicos em recursos valiosos (recuperação dos nutrientes através do digestato), energia limpa (pelo uso do biogás ao invés de lenha, esterco seco ou carvão) e comunidades mais resilientes (fomento de economias locais). Portanto, é indispensável investir em pesquisa, promover parcerias estratégicas e buscar soluções inovadoras para,

quanto antes, alcançar a geração de energia limpa, com resíduos orgânicos amplamente utilizados e o desenvolvimento seja verdadeiramente sustentável.

Enquanto bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçados globalmente, o capítulo III demonstrou que esses resíduos podem ser transformados em uma fonte valiosa de energia, além de contribuir para a redução da pressão sobre aterros sanitários e lixões. De certa maneira, não apenas a problemática dos resíduos foram abordados aqui, indiretamente, implicações significativas para o saneamento ambiental e a promoção do ODS 6 (Água Limpa e Saneamento) foram contemplados pela investigação.

Além disso, o capítulo III evidencia que as técnicas utilizadas podem ser aplicadas em biodigestores domésticos e/ou pequenas comunidades para fornecer energia limpa para o cozimento de alimentos. Isso não apenas aborda questões de resíduos orgânicos, também contribui para alcançar os ODS 7 e ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis).

5. Conclusão da Tese

As contribuições do presente trabalho proporcionam uma visão abrangente e multifacetada sobre o papel crítico que o biogás desempenha no contexto da energia limpa, constante e segura (conforme o ODS 7); da gestão de resíduos; empoderamento feminino; autossuficiência energética; combate ao desflorestamento; saneamento ambiental; e, desenvolvimento sustentável local. Esses estudos interdisciplinares oferecem não apenas um vislumbre do passado e do presente, mas também um roteiro para um futuro mais sustentável e resiliente para todas e todos.

As instituições de ensino superior - IES no Brasil têm um papel crucial no avanço da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias ligadas ao biogás. A utilização estratégica dos resíduos orgânicos gerados no país pode impulsionar a transição para uma matriz energética limpa, seja em grande escala, como em centrais, ou em pequena escala, como nos biodigestores domésticos, alinhando-se aos ODS da ONU. A cooperação entre essas instituições de ensino e os governos é essencial para uma transição eficiente rumo a uma matriz energética sustentável e para enfrentar desafios relacionados à segurança energética. Este trabalho é um exemplo dessa relevância, desenvolvido por um acadêmico e servidor público a partir de pesquisas em uma IES (UFPB) que colabora em rede com outras seis IES nordestinas (UFPI, UFC, UFRN, UFPE, UFS, UESC).

A Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações - BDTD destaca-se como uma ferramenta extraordinária, reunindo trabalhos acadêmicos de mais de 123 IES em diversas áreas do conhecimento. A escolha desta plataforma para a elaboração do capítulo I

fundamenta-se na proeminência das dissertações e teses nela depositadas. Durante a elaboração desses trabalhos, muitas publicações em periódicos científicos, tanto nacionais quanto internacionais, têm origem. Dessa forma, graduados e profissionais de diversos setores, públicos e privados, estão representados em suas publicações de fácil e gratuito acesso. Dito isto, a primeira hipótese desta tese foi parcialmente confirmada, pois, foi observado que, ao longo do período histórico do biogás no Brasil, houve aumento no número de publicações de dissertações e teses que se debruçaram na investigação da aplicação do biogás na geração de energia elétrica. No entanto, este aumento não se deu de maneira uniforme entre as IES presentes nas cinco regiões do país, visto que as regiões Sudeste e Sul se destacaram com os maiores números de publicações.

Com os resultados deste trabalho de tese é possível fornecer estimativas quinzenais de biogás gerado para atender a demanda de energia térmica, durante o cozimento de alimentos em unidades residenciais. Também é possível projeções de geração de eletricidade a partir da estabilização anaeróbica dos RAHs da EMPASA/JP, portanto a partir de uma tonelada de RAHs gerados pela EMPASA/JP podem ser obtidos entre 138 a 264 m³ de biogás inflamável ou 282,7 a 540,8 kWh de energia elétrica, considerando os menores e maiores rendimentos de biogás produzidos a partir das técnicas inovadoras desenvolvidas nesta pesquisa.

Embora seja relevante aproveitar os RAHs da EMPASA/JP para gerar eletricidade, é urgente fornecer uma fonte térmica para os 5 mil domicílios em João Pessoa que ainda dependem de lenha e carvão para cozinhar. Assim, se as técnicas inovadoras desenvolvidas neste trabalho forem aplicadas em biodigestores domésticos alimentados com os resíduos gerados pela EMPASA/JP, entre 484,4 a 1.235,5 famílias poderiam usufruir de uma forma extraordinária de energia limpa e acessível (ODS 7). Isso representa de 10% a 24% das residências na capital paraibana que ainda recorrem à lenha e carvão para o preparo de alimentos.

Além disso, esta investigação evidenciou a importância da estabilização anaeróbica, mesmo quando o biogás não apresenta valor energético, ainda é possível promover o saneamento ambiental, além de ser relevantes para estudos com outros biocombustíveis (butanol, etanol, biodiesel) ou produção de polímeros biodegradáveis a partir da obtenção de ácidos orgânicos.

Desse modo, a segunda hipótese deste estudo foi confirmada, ainda que parcialmente, pois a estabilização anaeróbica dos RAHs, provenientes da EMPASA/JP, foi eficiente na promoção do saneamento ambiental da instituição. No entanto, a geração de energia acessível, limpa e renovável (ODS 7 da ONU), através do biogás, só foi viabilizada com a introdução

mínima de inóculo exógeno e aclimação prévia, ou seja, a biodigestão dos RAHs surge como uma alternativa energética para o desenvolvimento sustentável local, desde que uma pequena porção de esterco bovino (2,5%), também submetida a aclimação, seja utilizada.

Porém, a inédita combinação de técnicas utilizadas permitiu que o biogás inflamável fosse gerado de maneira estável e contínua na maior parte do tempo, proporcionando a redução da dependência de inóculos exógenos, eximindo usuários de biodigestores domésticos de criar rebanhos específicos para obter esterco inoculante. Assim, a Recirculação de Biogás e a Aclimação prévia dos RAHs com mínima adição de esterco bovino inoculante, emergem como estratégias promissoras, oferecendo um sistema de homogeneização alternativo, dispensando mecanismos complexos de mistura em biodigestores domésticos.

Outros estudos são necessários para explorar o potencial do papel e papelão durante a estabilização anaeróbica dos resíduos orgânicos, pois, dos resíduos totais gerados na EMPASA/JP, 21% consistiam em resíduos de papel, enquanto o papelão representava 2%. Há pesquisas que destacam a relevância desses resíduos na quantidade de biogás gerado e no controle de parâmetros, como o pH, durante a digestão. Assim, é possível que a produção de biogás obtida durante a estabilização anaeróbica de todos os resíduos orgânicos da EMPASA/JP seja ainda maior do que a encontrada neste estudo.