

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**SAMIRA HERCULANO PEREIRA**

**ANÁLISE DO POTENCIAL BIOQUÍMICO DO METANO EM SISTEMAS DE MONO  
E CO-DIGESTÃO A PARTIR DA VINHAÇA E RESÍDUOS DA PECUÁRIA**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2023**

**SAMIRA HERCULANO PEREIRA**

**ANÁLISE DO POTENCIAL BIOQUÍMICO DO METANO EM SISTEMAS DE MONO  
E CO-DIGESTÃO A PARTIR DA VINHAÇA E RESÍDUOS DA PECUÁRIA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Tratamento de Efluentes  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Giselle Patrícia Sancinetti

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2023**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Pereira, Samira Herculano.

Análise do potencial bioquímico do metano em sistemas de mono e codigestão a partir da vinhaça e resíduos da pecuária / Samira Herculano Pereira. - Poços de Caldas, MG, 2023.

61 f. : il. –

Orientador(a): Giselle Patrícia Sancinetti.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Biogás. 2. Co-digestão. 3. Esterco. 4. Metano. 5. Vinhaça. I. Sancinetti, Giselle Patrícia, orient. II. Título.

**SAMIRA HERCULANO PEREIRA**

**ANÁLISE DO POTENCIAL BIOQUÍMICO DO METANO EM SISTEMAS DE MONO E CO-DIGESTÃO A PARTIR DA VINHAÇA E RESÍDUOS DA PECUÁRIA**

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Tratamento de Efluentes

Aprovada em: 20 de novembro de 2023.

Profa. Dra. Giselle Patrícia Sancinetti  
Presidente da Banca Examinadora  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Grazielle Santos Silva Andrade  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Renata Piacentini Rodriguez  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Giselle Patrícia Sancinetti, Professor do Magistério Superior**, em 20/11/2023, às 13:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1140289** e o código CRC **699DBA35**.

Dedico este trabalho à ciência e a toda comunidade científica.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para encerrar esta etapa e por guiar meu caminho até aqui.

Aos meus pais Lucimar e Jorge, por sempre terem feito o possível para me proporcionar tudo de melhor e incentivarem meus estudos, a eles devo o que sou.

À minha avó Elita, por ter tido toda paciência do mundo comigo, por estar presente em todos os meus momentos, vibrando com toda pequena e grande conquista e, principalmente, por me incentivar a conquistar o mundo.

Aos meus irmãos Sadi e Jurraine, pelo apoio, companheirismo e exemplo.

À minha sobrinha Allana, pelas palavras e brincadeiras ao telefone que aquecem meu coração em dias cansativos.

Ao meu companheiro Rafael, pelo apoio, parceria, incentivo e por muitas vezes alterar sua rotina para me levar nas viagens ao laboratório em Poços de Caldas.

Aos colegas do PPGCEA Alexandre, Wendrey, Anna, Raiane, Marcus e Jessica. Todos colaboraram de alguma maneira para o andamento desse trabalho, seja por conversa, medição no laboratório ou ajudando com dúvidas.

Ao Prof. Dr. Rafael Brito de Moura e à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Gazielle Santos Silva Andrade, membros da banca da minha qualificação, por compartilharem dicas e conhecimentos comigo.

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Giselle Patrícia Sancinetti, pela confiança, paciência e por todos ensinamentos para elaboração desse trabalho, e à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Renata Piacentini Rodriguez por todo auxílio e esclarecimento de dúvidas em relação a esse projeto.

Por fim à vida, por me conceder mais essa experiência.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.

(Madre Teresa de Calcutá)

## RESUMO

Encontrar fontes de energia renovável ligadas às práticas mais sustentáveis de tratamento de resíduos pode trazer benefícios para os setores de meio ambiente e energético. A vinhaça, proveniente da produção de etanol e açúcar é um dos principais efluentes do sistema e necessita ser adequadamente tratada. O mesmo ocorre com os resíduos da pecuária, que causam impactos ambientais e devem ser tratados antes da destinação final. Nessa perspectiva, a digestão anaeróbia se apresenta como uma alternativa eficaz ao tratamento desses resíduos, sobretudo pela capacidade de gerar subprodutos que podem ser aproveitados energeticamente, como por exemplo, o biogás. O presente trabalho analisa a integração dos setores sucroenergético e da pecuária por meio da mono e co-digestão de vinhaça e esterco bovino. Foi realizada caracterização por análises físico-químicas de teor de sólidos (SVT), pH e alcalinidade de 8 condições diferentes em relação à variação da proporção de vinhaça e esterco nos ensaios de digestão. Sendo estas condições: controle positivo, controle negativo, 100% vinhaça, 100% esterco, 80% vinhaça com 20% esterco, 90% vinhaça com 10% esterco, 95% vinhaça com 5% esterco e 98% vinhaça com 2% esterco. Os ensaios duraram 165 dias e ao final do experimento, foi realizada avaliação do potencial bioquímico do metano, que atingiu 65% em todos experimentos. O modelo de Gompertz modificado foi identificado como um ajuste adequado para a maioria dos resultados experimentais. A proporção de 90% de vinhaça e 10% de esterco demonstrou o maior valor de PBM (1095,1 ml CH<sub>4</sub>/g SVT), sugerindo potencial para aplicação prática num possível período de entressafra da cana-de-açúcar. No entanto, enfatizou-se a necessidade de considerar as particularidades dos resíduos e as condições locais para otimizar efetivamente o processo de co-digestão em diferentes cenários.

Palavras-chave: Biogás; co-digestão; esterco; metano; vinhaça.

## ABSTRACT

Finding renewable energy sources linked to more sustainable waste treatment practices can bring benefits to both the environmental and energy sectors. Vinasse, resulting from ethanol and sugar production, stands as one of the main effluents in the system and requires proper treatment. Similarly, livestock waste causes environmental impacts and should undergo treatment before final disposal. From this perspective, anaerobic digestion emerges as an effective alternative for treating these wastes, especially due to its ability to generate by-products that can be utilized for energy, such as biogas. This study examines the integration of the sugarcane and livestock sectors through mono- and co-digestion of vinasse and bovine manure. Characterization was conducted through physical-chemical analysis of solid content (SVT), pH, and alkalinity of eight different conditions regarding the variation in the proportion of vinasse and manure in the digestion tests. These conditions included positive control, negative control, 100% vinasse, 100% manure, 80% vinasse with 20% manure, 90% vinasse with 10% manure, 95% vinasse with 5% manure, and 98% vinasse with 2% manure. The assays lasted 165 days, and at the end of the experiment, an evaluation of the biochemical methane potential was conducted, reaching 65% in all experiments. The modified Gompertz model was identified as a suitable fit for most experimental results. The proportion of 90% vinasse and 10% manure showed the highest BMP value (1095.1 ml CH<sub>4</sub>/g SVT), suggesting potential for practical application during a possible sugarcane offseason. However, it was emphasized to consider the specific characteristics of the residues and local conditions to effectively optimize the co-digestion process in different scenarios.

Keywords: Biogas; codigestion; manure, monodigestion, methane; vinasse.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do processo de digestão anaeróbia .....	19
Figura 2 – Corte vertical de um biodigestor indiano .....	27
Figura 3 – A produção de metano a partir da DQO removida.....	29
Figura 4 – Fluxograma das etapas principais do desenvolvimento do projeto .....	33
Figura 5 – 24 Frascos na câmara com temperatura controlada .....	36
Figura 6 – Medição do biogás com seringa .....	37
Figura 7 – Ajustes modelo de Gompertz: a) 100%vinhaça; b) 100%esterco; c) 80:20%; d) 90:10%; e) 95:5%; f) 98:2%; g) controle (+) .....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção média de biogás nos 3 frascos contendo controle positivo ....	40
Gráfico 2 – Produção média de biogás nos 3 frascos contendo vinhaça com inóculo .....	40
Gráfico 3 – Produção média de biogás nos 3 frascos contendo controle de endogenia.....	41
Gráfico 4 – Produção média de biogás nos 3 frascos contendo esterco com inóculo .....	42
Gráfico 5 – Produção média de biogás nos 3 frascos contendo 90:10%.....	42
Gráfico 6 – Produção média de biogás nos 3 frascos contendo 80:20%.....	43
Gráfico 7 – Produção média de biogás nos 3 frascos contendo 95:5%.....	43
Gráfico 8 – Produção média de biogás nos 3 frascos contendo 98:2%.....	44
Gráfico 9 – Produção específica de metano ao longo do experimento.....	47

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Impactos adversos relacionados à fertirrigação da vinhaça .....	23
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Receita decorrente da utilização do biogás.....	27
Tabela 2 – Volume para cada condição desenvolvida .....	35
Tabela 3 – Análises Físico-Químicas.....	36
Tabela 4 – Resultados das caracterizações físico-químicas dos tratamentos avaliados .....	38
Tabela 5 – Produções médias de biogás das 8 condições .....	44
Tabela 6 – Conteúdo de metano no biogás para o sistema antes e após 35 dias ...	47
Tabela 7 – Resultados dos parâmetros da equação modificada de Gompertz para as condições aplicadas .....	48

## LISTA DE SIGLAS

ARL	Água residuária de laticínio
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
coDA	Co-digestão anaeróbia
DA	Disgestão anaeróbia
DBO	Demanda biolóca de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
GLP	Gás liquefeito de petróleo
MG	Universidade Federal de Alfenas
PBM	Potencial bioquímico de metano
pro-álcool	Programa nacional do álcool
PVC	Policloreto de vinila
SP	São Paulo
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
SVT	Sólidos voláteis totais
UASB	Upflow anaerobic sludge blanket
Unicamp	Universidade Federal de Alfenas
UNIFAL	Universidade Federal de Alfenas
VDI 4630	Verein Deucher Ingenieure 4630

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Lambda$	Duração da fase lag
$\text{CH}_3\text{COOH}$	Ácido acético
$\text{CH}_4$	Metano
$\text{cm}^3$	Centímetros cúbicos
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
e	Número de euler
g	Gramma
h	Hora
$\text{H}_2$	Gás hidrogênio
$\text{H}_2\text{S}$	Sulfeto de hidrogênio
há	Hectare
kg	Quilograma
L	Litro
$\text{m}^3$	Metro cúbico
min	Minuto
ml	Mililitro
$\text{N}_2$	Gás nitrogênio
$\text{PCH}_{4(t)}$	Produção cumulativa de metano
pH	Potencial hidrogeniônico
$R_{\text{max}}$	Taxa de produção máxima de metano
$P_{\text{max}}$	Potencial de produção de metano
$^{\circ}\text{C}$	Graus Célsius

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1	DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	18
2.1.1	Parâmetros que afetam o processo de digestão anaeróbia.....	20
2.2	VINHAÇA.....	20
2.2.1	Problemas relacionados à vinhaça.....	22
2.2.2	Estudos de Biodigestão da vinhaça.....	24
2.3	RESÍDUOS DA PECUÁRIA.....	25
2.4	CO-DIGESTÃO.....	28
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	33
3.1	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	33
3.2	SUBSTRATOS, CO-SUBSTRATOS E INÓCULO.....	33
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
3.3.1	Montagem do experimento.....	34
3.3.2	Análises físico-químicas.....	36
3.3.3	Tratamentos de dados.....	36
3.4	MEDIÇÃO DO BIOGÁS.....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	38
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS E INÓCULO.....	38
4.2	PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	39
4.3	COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS.....	45
4.4	MODELAGEM CINÉTICA.....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	52
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	53
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	54

## 1 INTRODUÇÃO

Os biocombustíveis fazem parte do cenário energético brasileiro há anos; no entanto, devido ao primeiro choque do petróleo, não foi percebido o aumento na sua produção até a década de 1970. Na época, o Programa Nacional do Álcool (Pro-álcool) regulamentou a mistura do álcool anidro com a gasolina e incentivou a maior produção de etanol, financiando a expansão da estrutura da destilaria. Paralelamente ao crescimento da produção de álcool, houve um aumento proporcional na produção de vinhaça, subproduto da fabricação do etanol (Brasil, 2011).

Este resíduo é obtido a partir da fermentação do melaço da cana de açúcar e, devido ao seu alto valor econômico, pesquisas indicam que o principal componente da vinhaça é a matéria orgânica, a qual é fornecida como adubo nas próprias lavouras, através da diluição com água de irrigação no canavial. São produzidos em média de 10 a 18 litros de vinhaça por litro de álcool (Araújo, 2021).

O uso da vinhaça como fertilizante agrícola é destacado pela presença de matéria orgânica e minerais. Por conter elementos como potássio, nitrogênio e água para o solo, o uso da vinhaça pode economizar até US\$ 75,00 por hectare adubado. No entanto, são esses compostos que, quando infiltrados ou lavados, podem causar alterações nas propriedades físico-químicas do solo, resultando na contaminação de águas subterrâneas. Assim, a utilização da prática de fertirrigação com vinhaça deve respeitar sua capacidade de retenção de íons, sendo as dosagens ajustadas às características individuais de cada solo (Baffa; Freitas; Brasil, 2009).

Outro setor de grande destaque no país, além do sucroalcooleiro, é o da pecuária. O Brasil é um dos principais produtores e exportadores de carne bovina e a geração de resíduos derivados dessa atividade varia de acordo com as características e tratamento que esses animais recebem.

Conseqüentemente, a expansão e intensificação das práticas agrícolas trazem novas exigências para o manuseio seguro de grandes quantidades de resíduos. Uma possível alternativa é utilizar a biomassa animal gerada na pecuária leiteira, onde, por meio de processos biológicos, obtém-se um produto com potencial energético. No novo contexto em que a pecuária moderna é predominante os biodigestores surgem como uma tecnologia viável para a gestão de resíduos da pecuária (Colatto; Langer, 2011).

A co-digestão anaeróbia é um processo de tratamento no qual diferentes tipos de subprodutos fermentados são misturados e tratados em conjunto (Cagdag; Sponza, 2007). Essa técnica pode ser aplicada preferencialmente para melhorar a eficiência da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, pois pode proporcionar um equilíbrio de nutrientes e, aumento da quantidade de matéria orgânica disponível, um maior potencial de biodegradação, além de incorporar biomassa mais adequada para a bioestabilização de resíduos (Lopes; Leite; Prasad, 2004).

No processo de co-digestão dois ou mais materiais orgânicos devem ser manejados adequadamente para aumentar a produção de biogás entre 25 a 400% em comparação com a monodigestão desses substratos (Hagos *et al.*, 2017).

Observa-se, conforme o exposto, que a geração de metano a partir da vinhaça e dejetos bovinos pode ser utilizada como fonte de energia limpa e renovável, reduzindo o impacto ambiental dos resíduos orgânicos. Nessa perspectiva, o trabalho avaliou o potencial de produção de metano em sistemas de mono e co-digestão a partir da vinhaça e do esterco bovino, contribuindo para uma proposta de gestão adequada dos resíduos.

## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos foram categorizados em gerais e específicos, com o intuito de abordar pontos específicos de avaliação durante a condução do projeto.

### 1.1.1 Objetivo geral

Este projeto de pesquisa teve como objetivo geral avaliar o potencial bioquímico do metano (PBM) em sistemas de mono e co-digestão a partir da vinhaça e resíduos da pecuária.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- a) Caracterização físico-química dos substratos e inóculo;

- b) Avaliar experimentalmente a produção de biogás a partir de diferentes proporções de vinhaça e esterco;
- c) Analisar o potencial de produção de metano para todas as condições experimentais analisadas;
- d) Realizar estudo da cinética de produção de metano.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir estão apresentadas informações relevantes delineadas na literatura referentes à digestão anaeróbia, vinhaça, resíduos da pecuária e co-digestão.

### 2.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo de degradação da matéria orgânica por microrganismos em um ambiente onde não há a presença de oxigênio. Este processo acontece de forma natural, quando as condições ambientais o permitem, ou quando a ação humana recria as condições naturais de forma controlada por meio da construção de digestores anaeróbios (Carneiro, 2009).

O processo de digestão anaeróbia combina diferentes populações microbianas, anaeróbias facultativas e/ou anaeróbias obrigatórias, e pode ser dividido em quatro etapas: hidrólise ou quebra de moléculas de lipídios, proteínas ou carboidratos; acidogênese; acetogênese e metanogênese. O produto final gerado neste processo de reações bioquímicas é o biogás (Carneiro, 2009; Dominiak; Tonello; Silva, 2016).

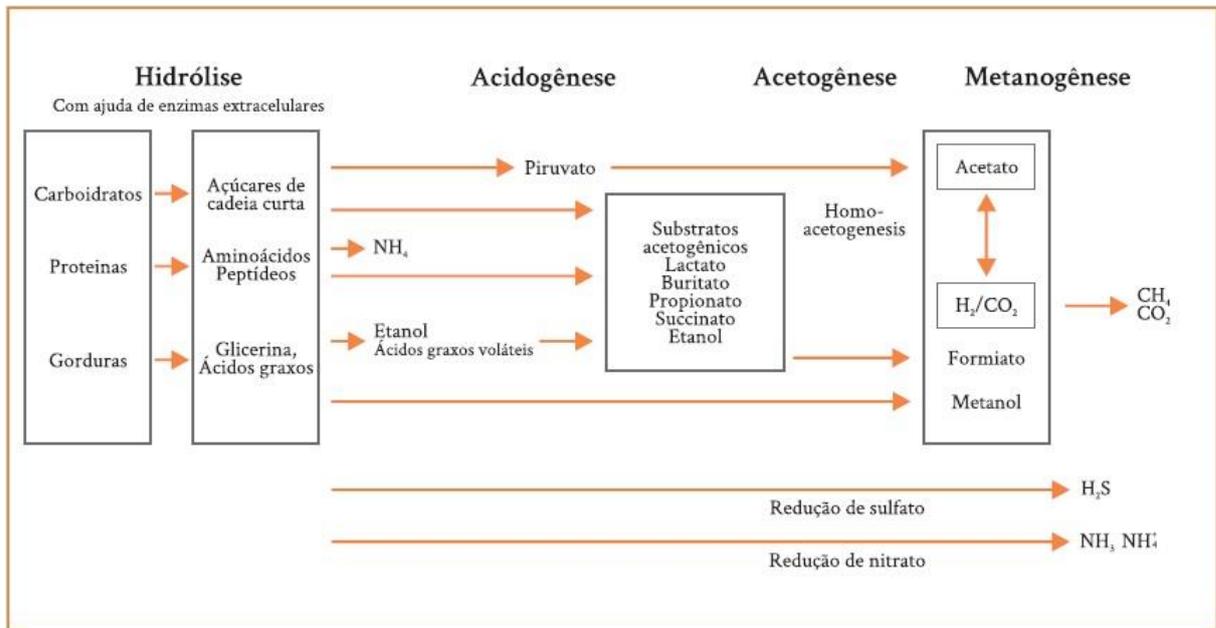
Esse gás é composto principalmente por cerca de 60% de metano, 40% de dióxido de carbono e uma parcela minoritária de menos de 1% compreendendo vapor d'água, sulfeto de hidrogênio e outras substâncias gasosas (Matheri *et al.*, 2018).

O sistema de DA é afetado por diversos fatores, dentre eles pode-se apontar a concentração de sólidos, temperatura, umidade, pH, compostos orgânicos com perfil de toxicidade específico, entre outros (Behera *et al.*, 2010; Jeong *et al.*, 2010).

A digestão anaeróbia pode ser aplicada em diversos materiais como: matéria orgânica putrescível presente em resíduos sólidos urbanos, resíduos agrícolas, resíduos agroindustriais e alguns tipos de resíduos industriais (Chen; Cheng; Reamer, 2008). Além disso, os processos anaeróbios apresentam algumas vantagens sobre os aeróbios devido ao baixo consumo de energia para operação e baixa produção de lodo (Kim *et al.*, 2006), sendo também considerados como uma fonte de energia renovável viável para o tratamento de resíduos orgânicos (Jingura; Matengaifa, 2009).

A Figura 1 apresenta um resumo de cada fase das etapas da digestão anaeróbia.

Figura 1 - Etapas do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Kunz, Steinmetz e Amaral (2019).

O processo de hidrólise envolve a conversão de matéria orgânica em moléculas menores pela ação de bactérias hidrolíticas que convertem proteínas em peptídeos e aminoácidos, polissacarídeos em açúcares simples e gorduras em ácidos graxos (Morais, 2017). Como as bactérias não podem incorporar a matéria orgânica granular, a matéria orgânica complexa é convertida em compostos solúveis mais simples pela ação de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias fermentativas. Ao mesmo tempo, as proteínas são hidrolisadas para formar aminoácidos, a hidrólise dos carboidratos forma os açúcares e os lipídios solúveis são hidrolisados para ácidos graxos (Oliveira Júnior, 2013).

Na acidogênese, os produtos da hidrólise são convertidos por bactérias fermentativas em ácido propiônico, ácido butírico, ácido láctico e álcoois, enquanto as bactérias do ácido fórmico degradam moléculas orgânicas solúveis em hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A formação de produtos nesta etapa também depende da quantidade de hidrogênio dissolvido na mistura. Quando a concentração de gás hidrogênio é muito alta (acima de 5 a 10%), pode afetar negativamente a eficiência da produção de ácido, resultando no acúmulo de

ácidos orgânicos. Desta forma, o pH da mistura diminui e o processo é quase totalmente afetado (Morais, 2017).

Na fase de acetogênese, as substâncias produzidas pela produção na fase de acidogênese são convertidas por bactérias acetogênicas em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Essa etapa é uma das mais delicadas do processo, pois é preciso manter um equilíbrio para que as bactérias possam consumir a quantidade de hidrogênio produzida (Morais, 2017).

Na etapa de metanogênese, as arqueias metanogênicas estritamente anaeróbias consomem o acetato, hidrogênio e dióxido de carbono para produzir biogás, que é formado principalmente a partir de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Carneiro, 2009; Dotto; Wolff, 2012).

### **2.1.1 Parâmetros que afetam o processo de digestão anaeróbia**

Vários fatores podem interferir no desempenho do sistema, dentre eles, é importante mencionar os tipos de substratos utilizados, o tamanho das partículas, a relação carbono/nitrogênio (C/N), a taxa de carregamento orgânico (TCO), a relação substrato/inóculo, o tempo de retenção hidráulica (TRH), a concentração de sólidos totais e a substâncias inibidoras ou que podem ocasionar efeitos tóxicos. As condições de operação como temperatura, pH e a agitação dos reatores anaeróbios estão entre os principais fatores que influenciam a geração de biogás (Laskri; Hamdaoui; Nedjah, 2015).

Assim, a digestão anaeróbia é um processo sensível que depende de uma série de fatores interligados. O controle e a otimização desses elementos são essenciais para garantir um desempenho eficiente e sustentável dos sistemas de digestão anaeróbia.

## **2.2 VINHAÇA**

A vinhaça é um resíduo originado do processo produtivo do etanol na etapa de destilação, sendo que sua geração é em média de 10 a 14 litros para cada litro de álcool produzido (Sfeir, 2013). Este resíduo apresenta uma alta quantidade de matéria orgânica, temperatura elevada, assim como presença de potássio,

nitrogênio, fósforo, sulfato, propriedades ácidas e corrosivas resultantes do processo de preparo da matéria-prima para fermentação (Andrade, 2009; Fuess, 2017).

Na década de 70 foi evidenciado que a vinhaça provocava muitos danos ambientais, pois era despejada diretamente em corpos d'água sem nenhum tratamento, impactando negativamente tanto o bioma aquático quanto os humanos que sofriam com a deterioração da qualidade da água para uso direto e indireto. Este impacto acabava provocando a contaminação das águas e a morte de peixes e outros animais silvestres (Cruz *et al.*, 2013; Fuess, 2017).

Devido à preocupação em relação aos impactos da disposição da vinhaça no meio ambiente, em 1967, foi constituído o Decreto Lei nº 303, proibindo o descarte deste resíduo em corpos hídricos. Depois, a Portaria Minter nº 323, de 29 de novembro de 1978 que versa sobre Tratamento de Resíduos Água e Álcool, Energia Combustível: “Proíbe o lançamento, direto ou indireto do vinhoto em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool do país” (Cruz *et al.*, 2013, p. 112).

Por causa da proibição, outras destinações tiveram que ser encontradas para o descarte da vinhaça. Com isso, foram primeiramente usadas áreas de sacrifício chamadas de área de inundação que formavam grandes alagados para permitir a infiltração no terreno, sem nenhum controle. Entretanto, esse novo método também era ineficiente e não respeitava o meio ambiente, pois inutiliza o solo para usos futuros, além de poluir os lençóis freáticos. Assim, devido à suspensão de descarga em cursos d'água, à diminuição do número de áreas de sacrifício e ao aumento da produção de vinhaça, outra maneira de descarte passou a ser utilizada em 1970, a fertirrigação (Andrade, 2009; Cruz *et al.*, 2013).

A vinhaça é utilizada como fertilizante para a cultura da cana-de-açúcar, auxiliando no aumento da produtividade econômica na agricultura. Este fertilizante é de grande importância econômica das usinas, pois com uma aplicação de 150 m<sup>3</sup> de vinhaça por hectare é proporcional a uma adubação de 61 kg/ha de nitrogênio, 40 kg/ha de fósforo, 343 kg/ha de potássio, 108 kg/ha de cálcio e 80 kg/ha de enxofre (Sfeir, 2013).

Na fertirrigação, a vinhaça é lançada diretamente no solo sem nenhum tipo de pré-tratamento. As vantagens da fertirrigação são diretas por meio da redução dos custos de fertilização, e indiretas, pois aumentam a fertilidade natural do solo em que esse resíduo é aplicado (Cruz *et al.*, 2013).

De acordo com Rossetto *et al.* (2008), a vinhaça é um material de origem orgânica que não contém em sua composição metais e ou outros contaminantes que inviabilizam seu uso agrícola, sendo plenamente aceito na agricultura orgânica por não ter restrições para sua utilização como fornecedor de nutrientes por empresas certificadas.

Porém, é válido ressaltar que, se as taxas de aplicação da vinhaça não forem controladas, a sua utilização contínua como fertilizante pode impactar negativamente o meio ambiente em que é utilizado (Carneiro; Lima 2010; Cruz *et al.*, 2013).

Portanto, além da fertirrigação existem outras metodologias que já são usadas por grandes empresas do ramo sucroenergético, tanto trocando tecnologias anteriormente expostas quanto complementando-as. A biodigestão e a concentração são as duas principais alternativas à fertirrigação já empregadas no setor em escala industrial (Andrade, 2009).

### **2.2.1 Problemas relacionados à vinhaça**

Nas indústrias de açúcar e etanol do Brasil, quase toda a vinhaça produzida nas destilarias é usada para fertirrigação em campos que buscam a reciclagem de água e nutrientes. Apesar de esta prática ser compensatória em curto prazo, a aplicação contínua de vinhaça nas lavouras tem grande potencial de ocasionar efeitos adversos no solo, nos recursos hídricos e na produtividade da cultura (Fuess, 2017).

A vinhaça possui grande potencial poluidor devido excessiva quantidade de matéria orgânica existente em sua composição, algumas substâncias tóxicas e químicas como o enxofre e certos metais pesados, que se utilizados em amplas quantidades, podem causar sérios danos à fauna, flora e saúde pública (Seixas; Gimenes; Fernandes-Machado, 2016; Tosello *et al.*, 2021). No Quadro 1 são apresentados alguns efeitos adversos que podem ocorrer com a utilização da vinhaça como fertilizante.

Segundo Carneiro e Lima (2010) a frequência e a intensidade da disposição da vinhaça no solo afetam o potencial de acúmulo de sais (potássio, nitrato, etc.), surgindo dois efeitos: a salinização, e a contaminação dos lençóis freáticos. A carga orgânica da vinhaça provoca o crescimento microbiano, esgota o oxigênio dissolvido na água, danifica a flora e a fauna aquáticas e dificulta o uso de água de nascente

contaminada como abastecimento de água potável. Além disso, o descarte da vinhaça em cursos d'água produz odores desagradáveis, contribui para o agravamento de doenças endêmicas como malária, amebíase e esquistossomose.

Quadro 1 - Impactos adversos relacionados à fertirrigação da vinhaça

Efeito adverso	Implicações
Salinização do solo (risco elevado)	Redução do potencial osmótico do solo Toxicidade de íons específicos ( $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ ) Redução na absorção de água e nutrientes pelas plantas Destruição da estrutura do solo Lixiviação de sais para águas subterrâneas
Sodificação do solo (risco baixo)	Destruição da estrutura do solo Redução severa na taxa de infiltração de água Queimaduras e necrose do tecido foliar
Sobrearga orgânica (risco elevado)	Depleção dos níveis de oxigênio dissolvido Geração de condições anaeróbias – redução da atividade microbiana Aumento da instabilidade estrutural do solo
Superfertilização do solo – Excesso de N e P (risco elevado)	Aumento da suculência nas plantas Depleção nos níveis de oxigênio dissolvido por bactérias nitrificantes Liberação de óxidos de nitrogênio Toxicidade por nitrogênio amoniacal Lixiviação de nitratos Eutrofização de corpos d'água
Acidificação permanente – solo e água (risco elevado)	Alteração do poder tampão do solo Solubilização de metais tóxicos às plantas Redução na produtividade de lavouras Redução na atividade microbiana

Fonte: Fuess (2017).

O uso da vinhaça como adubo tem atraído à atenção por causa do seu elevado impacto quando distribuído no meio ambiente devido às suas propriedades de baixo pH e alta DQO. A DQO elevada tem o potencial de diminuir os níveis de oxigênio, comprometendo a sobrevivência dos organismos presentes no solo (Damiano, 2005). Barros, Duda e Oliveira (2016) abordaram que a carga DQO da

vinhaça é aproximadamente 27 g/L e que a descarga da vinhaça em cursos d'água ameaçam a flora e a fauna devido à redução do oxigênio dissolvido na água.

### **2.2.2 Estudos de Biodigestão da vinhaça**

A utilização da digestão anaeróbia no tratamento da vinhaça, bem como de outros efluentes com cargas orgânicas elevadas, está fortemente ligada ao aprimoramento desse processo nos últimos tempos, considerando o desenvolvimento de procedimentos que possibilitem aumentar o tempo de retenção de sólidos (biomassa) no reator (Van Lier *et al.*, 2015).

Durante a digestão anaeróbia da vinhaça, há produção do biogás, acompanhada da geração de um efluente tratado contendo alto teor de nutrientes como: nitrogênio, fósforo e potássio, além da remoção parcial da carga orgânica. Como a taxa de incorporação de matéria orgânica no solo não é facilmente determinada, supõe-se que o uso para geração de biogás justificaria a utilização da matéria orgânica restante (Cruz *et al.*, 2013).

A digestão anaeróbia da vinhaça possui muitas vantagens como: a baixa produção de lodo biológico, baixa necessidade de nutrientes e produção de hidrogênio e/ou metano que pode ser usado como energia. Esse processo está alinhado com o conceito de biorrefinaria e integrado a produção de etanol, recuperação de energia e utilização de efluente tratado para fertirrigação de canaviais (Volpini *et al.*, 2018).

De acordo com Satyawali e Balakrishnan (2007) os sistemas de reatores bateladas são vantajosos para o tratamento da vinhaça, especialmente em pequenas plantas, consistindo de um tanque receptor, um tanque intermediário de retenção, dois tanques de armazenamento e um tanque de tratamento aeróbio.

No estudo de Tunes (2017) a tecnologia de digestão anaeróbia foi utilizada para analisar a capacidade de um reator UASB em gerar biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar. Após ter sido inicialmente inoculado com lodo derivado de um reator anaeróbio de indústria de grande porte, apresentou, para um tempo de operação de 15 dias, eficiência de remoção de DQO de 71% e produção de 1160 litros de biogás com concentração de metano em torno de 48 a 57%. Assim, a operação de reatores UASB com a alimentação de vinhaça mostrou-se uma

alternativa para o tratamento desse resíduo, pois proporcionou a redução das cargas orgânicas e gerou energia por meio do biogás.

Oliveira (2019) realizou oito testes de biodigestão da vinhaça em bancada usando reatores de 250 mL, alterando a quantidade do inóculo, a temperatura e a diluição da vinhaça. A vinhaça *in natura* foi caracterizada segundo a umidade, matéria seca, cinzas voláteis e totais de sólidos suspensos, pH, DQO, proteína, lipídio e nitrogênio total. Os efluentes da biodigestão foram caracterizados de acordo com o DQO e pH. A composição do biogás produzido foi definida pela quantificação de dióxido de carbono, metano, amônia e sulfeto de hidrogênio.

De acordo com esse autor, o processo de biodigestão da vinhaça para produção de biogás foi bastante eficaz no tratamento desse subproduto. No teste de bancada, a quantidade de biogás produzida e acumulada variou entre 2,08 mL e 347,90 mL durante o período de 25 dias. Quanto à remoção de cargas orgânicas, os testes mostraram ser uma boa alternativa para o tratamento da vinhaça, pois a diminuição efetiva da DQO na vinhaça biodigerida foi de cerca de 74%, fato que indica a conversão da matéria orgânica em biogás.

A biodigestão anaeróbia da vinhaça é uma alternativa interessante, já que é uma fonte geradora de energia elétrica e térmica, além de não perder seu valor nutritivo como fertilizante orgânico, podendo ser usado depois da biodigestão como biofertilizante normalmente na irrigação, pois houve a redução de carga orgânica que é prejudicial para o solo (Carneiro; Lima, 2010).

### 2.3 RESÍDUOS DA PECUÁRIA

Os resíduos orgânicos das atividades pecuárias provocam diversos impactos no meio ambiente. O alto índice de gases poluentes emitidos pela decomposição dos resíduos animais agrava o efeito estufa devido à geração de metano por meio desses dejetos, e contribui para as mudanças climáticas. Além de provocar eutrofização dos rios por causa da diminuição do oxigênio dissolvido, ocasionando a morte dos animais aquáticos e propagação de vetores (Barbosa; Langer, 2011; Carvalho; Pisano, 2017).

Uma das alternativas de tratamento dos esterco provenientes da atividade de pecuária é a utilização de biodigestores para geração de metano. Por meio da geração do metano nos biodigestores, uma das possibilidades de sua aplicação

seria na geração de energia, diminuindo os custos de produção e geração de receita, inclusive a possibilidade de comercialização dos créditos de carbono (Watanabe, 2022).

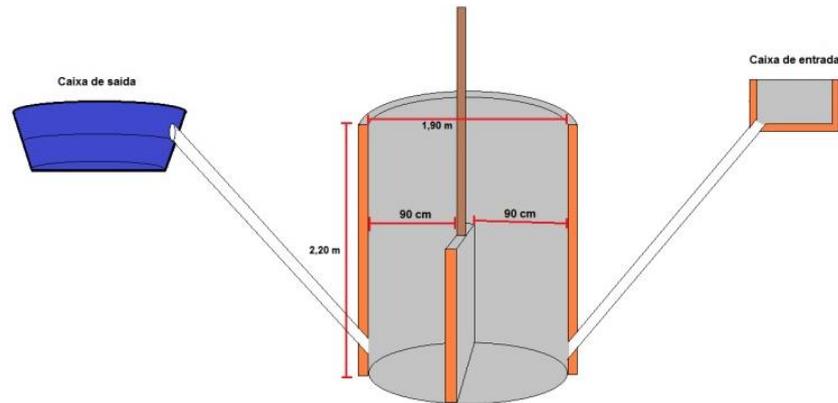
Morais (2017) projetou e analisou um protótipo de biodigestor para a produção de biogás e biofertilizante para tratar os resíduos de origem animal em pequenas propriedades rurais. O protótipo do biodigestor foi construído utilizando materiais de baixo custo em reservatórios de polietileno, alimentados com esterco de vaca dissolvido em água na proporção 1:1, com adição de açúcar e fermento, possibilitando a produção de microorganismos. O experimento foi realizado por digestão anaeróbia durante 45 dias e a temperatura foi monitorada em todos os períodos do dia.

Após o experimento, foi gerado 60,37 kg de biofertilizante com odor caracterizado por húmus (processo de fermentação), solução aquosa e macronutrientes, 71,78% de matéria orgânica, 41,63% de carbono e pH 5,9, podendo ser usado na agricultura por apresentar boas concentrações de nutrientes e matéria orgânica. A produção de biogás foi analisada de acordo com a geração de gás metano utilizando temperatura e pressão normais. A densidade em condições normais de temperatura e pressão (CNTP) de  $0,657\text{kg/m}^3$ , considerando que 70% do biogás foi encontrado um valor de  $0,055\text{m}^3$  de  $\text{CH}_4$ , apresentando o cheiro característico do processo de fermentação.

Assim, de acordo com autor o protótipo desenvolvido proporciona a possibilidade de obter a produção de biogás e biofertilizante a partir de materiais simples, no entanto a conclusão do experimento indica que são necessários estudos mais avançados para projetos futuros, nomeadamente, análise do esterco utilizado, a composição do biogás e projetar o armazenamento do gás fora do reservatório, usar manômetros mais precisos e analisar micronutrientes em biofertilizantes e projetar hortas para monitorar o desempenho do solo e das plantas.

Dias *et al.* (2013) desenvolveram uma pesquisa em uma granja de suíno de pequeno porte com cerca de 100 animais a fim de estudar a viabilidade econômica de produção de biogás para a cogeração de energia e a substituição do gás liquefeito de petróleo (GLP). O biodigestor utilizado foi o modelo indiano apresentado na Figura 2, com capacidade de carga de 145,28 kg de esterco suíno diluído em 290,4 litros de água, produzindo em média  $38,33\text{ m}^3\text{dia}^{-1}$  de biogás e aproximadamente 435,6 L/dia de biofertilizante.

Figura 2 – Corte vertical de um biodigestor indiano



Fonte: Moura *et al.* (2013).

Como resultado, os autores identificaram que o uso do biogás por meio da cogeração de energia elétrica e da substituição do GLP, adicionam R\$ 10.534,81 por ano de acordo com os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Receita decorrente da utilização do biogás

Cenário	Receita	Quantidade (dia <sup>-1</sup> )	Valor unitário (R\$)	Valor anual (R\$)
<b>TOTAL</b>	-	-	-	10.534,81
Cogeração	Energia Elétrica (kWh)	25	0,4149	3.785,96
GLP	GLP (botijão)	0,43	43,00	6.748,85

Fonte: Dias *et al.* (2013).

Os autores concluíram para um panorama de 10 anos que os resultados dos indicadores econômicos Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 57.598,95, Taxa Interna de Retorno (TIR) de 48,38%, Período de Recuperação do Capital (*Payback*) simples de 2,06 anos e *payback* descontado de 2,3 anos, mostram cenários favoráveis para a implantação do biodigestor do modelo indiano, com potencial de gerar economia, benefícios sociais e ambientais.

No estudo de Soares *et al.* (2019) o metano foi produzido a partir de esterco fresco bovino (EBF) no Sul do estado de Roraima, com diluição de 1:1, utilizando um biodigestor em superfície e enterrado. As medições de gás foram realizadas usando uma bureta invertida, com o deslocamento da coluna de água (ml) representando o volume de gás produzido. Foram utilizados galões de 20 litros para a montagem dos biodigestores, um enterrado no solo e outro em superfície.

No primeiro mês de fermentação o EBF demonstrou melhores resultados de produção de biogás. O processo de avaliação da produção de biogás durou três meses de fermentação. Na primeira semana, o biodigestor de superfície mostrou melhor desempenho na produção de biogás em relação ao biodigestor enterrado, pois a temperatura ambiente foi em média de 40°C, o que aumentou o processo de fermentação. No entanto, no décimo dia, o biodigestor enterrado foi eficaz, pois as bactérias fermentadoras se estabilizaram após 7 dias a uma temperatura moderada de 37,5°C. Um dos fatores que afetaram o rendimento do biodigestor de superfície foi à variação de temperatura, que oscilou em média 18°C, o que leva a um processo de fermentação mais baixo e, ao mesmo tempo, as bactérias metanogênicas em alta temperatura aceleram a fermentação processo.

De acordo com os autores os dois métodos se apresentaram eficientes na produção de biogás, pois foram utilizados de acordo com a disponibilidade de matéria orgânica e tempo de fermentação. Outro fator importante é o local onde o biodigestor será instalado, como o clima da região. No sul de Roraima, o biodigestor enterrado teve melhor desempenho, produzindo cerca de 60.000 cm<sup>3</sup> de biogás em três meses, enquanto o biodigestor de superfície produziu cerca de 41.000 cm<sup>3</sup>. Comprovando a eficiência da produção de biogás com uma alternativa sustentável de geração de energia utilizando EBF.

## 2.4 CO-DIGESTÃO

A co-digestão anaeróbia (coDA) é um processo de tratamento de resíduos no qual diferentes tipos de resíduos fermentáveis são misturados de forma conjunta (Ağdağ; Sponza, 2007). A co-digestão anaeróbia pode ser utilizada para aumentar o rendimento do processo de digestão anaeróbia de resíduos, pois pode proporcionar equilíbrio de nutrientes e aumentar a quantidade de material orgânico com maior potencial de biodegradação, além de adicionar biomassa mais adequada para bioestabilização de resíduos (Lopes; Leite; Prasad, 2004).

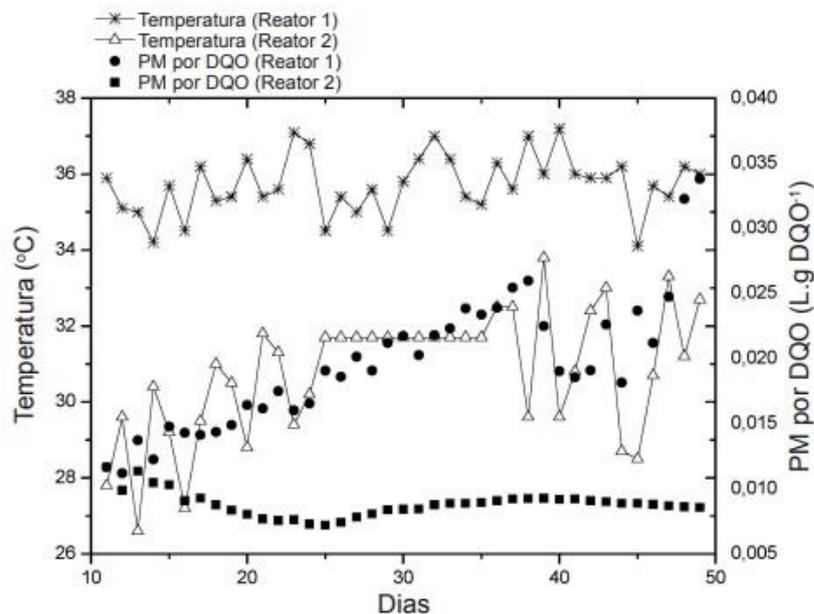
A coDA é uma modificação da digestão anaeróbia convencional, com aplicações iniciais focadas em melhorar o rendimento do processo. O melhoramento consiste na utilização de uma combinação de resíduos de diferentes origens, também chamados de cosubstratos, que na maioria dos casos aumenta o rendimento da produção de biogás por causa da sinergia positiva constituída por

meio da digestão. Outra finalidade que colabora para a eficiência é a reposição da falta de nutrientes por um único cosubstrato. O processo coDA também é considerado nos casos em que o próprio substrato não possui potencial suficiente para a digestão anaeróbia (Ponsá; Gea; Sánchez, 2011).

Cremones *et al.* (2015) efetuaram o processo de co-digestão anaeróbia da vinhaça originada da produção de etanol hidratado e resíduos de suinocultura. A eficiência de remoção de sólidos, demanda química de oxigênio (DQO) e produção de biogás foram avaliadas usando biodigestor tubular com variadas condições de temperatura. Para isso, foram utilizados dois reatores, sendo um deles termicamente controlado e o outro mantido à temperatura ambiente. Foram determinados três tempos de detenção hidráulica de 13 dias cada, totalizando 39 dias e o efluente do reator foi analisado diariamente.

A Figura 3 apresenta os resultados encontrados pelos autores referentes à produção de metano por meio da remoção de DQO, usando a temperatura como parâmetro.

Figura 3 - A produção de metano a partir da DQO removida



Fonte: Cremones *et al.* (2015).

Em ambos os reatores houve uma média de eficiência de remoção de DQO de 68%. A produção de metano no reator 2 foi menor do que o reator 1 devido a temperatura que influenciou no processo de biodigestão em ambos os reatores, principalmente a produção de metano.

Jingura e Matergaifa (2009) afirmaram que o desempenho do processo é melhor quando mais de um tipo de resíduo é tratado simultaneamente, levando a um aumento significativo na taxa de produção de biogás e melhor qualidade dos bio sólidos produzidos.

Caraça, Duda e Oliveira (2020) analisaram a co-digestão anaeróbia de vinhaça de cana-de-açúcar com águas residuárias da bovinocultura leiteira (ARBL). Para realizar o estudo foram usados dois reatores UASB em série e recirculação de efluente. Os inóculos utilizados foram águas residuárias da bovinocultura leiteira oriunda e um reator UASB com concentrações de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) de 31, 16 e 24, 43 gL<sup>-1</sup>. A operação dos reatores durou 142 dias e a composição do biogás foi avaliada por semana em cromatografia gasosa, conforme descrito por APHA (2005).

Os resultados encontrados por esses autores foi que a DQO teve uma eficiência de remoção de 76,7% e a produção de metano foi de 0,15 LCH<sub>4</sub> (gDQOremovido)<sup>-1</sup>. Assim, eles concluíram que o uso de efluente de laticínios como complemento a vinhaça foi satisfatória, pois os resultados obtidos confirmaram o conceito proposto em termos de estabilidade do processo.

Silva (2020) analisou a produção de biogás por meio da co-digestão anaeróbica do caldo de capim-elefante e vinhaça em reatores. Para a realização do experimento usou-se biodigestor em batelada e como inóculo o lodo de reator UASB tratando efluentes domésticos. A co-digestão do biogás na proporção de 50% de vinhaça e 50% de capim elefante apresentou um rendimento de produção de metano de 7,63 – 370,94 mL CH<sub>4</sub>/gSV. Os resultados sugeriram que a combinação adequada desses materiais pode otimizar a produção de biogás, tornando-a uma opção valiosa para a geração de energia renovável.

O estudo realizado por Comino, Riggio e Rosso (2012) investigou a co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos mistos, incluindo esterco bovino e resíduos de alimentos, visando avaliar seu potencial na produção de biogás.

Os pesquisadores conduziram experimentos em um reator anaeróbio de laboratório, variando a razão C/N (Carbono/Nitrogênio) do substrato, o tempo de retenção hidráulica foi de 42 dias e a produção estável de biogás foi de 621 L/kg de sólidos voláteis (SV). A proporção de metano no biogás foi de aproximadamente 55%. As eficiências máximas de remoção para DQO e DBO<sub>5</sub> foram de 82% e 90%, respectivamente. Em comparação com a fase de startup, a produção de biogás

aumentou em até 79%. Os resultados do estudo dos autores mostraram que grandes quantidades de soro de leite (até 65% em volume) podem ser digeridas simultaneamente sem o uso de produtos químicos para correção de pH.

O estudo realizado por Rico *et al.* (2014) investigou a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos comuns na região de Cantabria, Espanha, incluindo esterco bovino. A metodologia envolveu a realização de testes de co-digestão anaeróbia em reatores específicos, nos quais os pesquisadores variaram as proporções dos resíduos na mistura para avaliar o impacto na produção de metano.

Os resultados do estudo revelaram que a co-digestão desses resíduos orgânicos resultou em um aumento significativo na produção de biogás em comparação com a digestão individual dos materiais. Eles também observaram que a co-digestão de esterco bovino com outros resíduos, como resíduos agrícolas e de alimentos, levou a uma melhoria na produção de metano. Além disso, o estudo identificou que a otimização das proporções dos resíduos na mistura era fundamental para maximizar a eficiência do processo de digestão anaeróbia.

Em resumo, o estudo de Rico *et al.* (2014) destacou a viabilidade e os benefícios da co-digestão de resíduos orgânicos, incluindo o esterco bovino, na produção de biogás. A pesquisa ressaltou a importância de ajustar cuidadosamente as proporções dos materiais na mistura para otimizar a produção de metano e aproveitar os recursos locais para a geração de bioenergia de maneira sustentável na região de Cantabria, Espanha.

Fernandes (2016) abordou a co-digestão da água residuária de laticínio (ARL) com dejetos bovinos em duas etapas distintas, utilizando biodigestores do tipo batelada e contínuos, visando a produção de biogás e biofertilizante. Na primeira etapa, variaram-se as proporções de ARL em relação ao substrato, com os tratamentos incluindo 0%, 50%, 77,5% e 100% de ARL, além do tratamento ARL puro. Nesse estágio, o tratamento ARL puro apresentou a menor produção de biogás (0,00753 m<sup>3</sup>), enquanto o tratamento com 50% de ARL exibiu a menor média para o potencial produtivo.

Na segunda etapa, que foi dividida em dois períodos e utilizou biodigestores contínuos, não houve diferenças significativas na produção de biogás entre os tratamentos. Isso indica que, mesmo com a mudança para um sistema contínuo, o tratamento contendo ARL se mostrou eficaz. Portanto, os resultados sugerem que a co-digestão da água residuária de laticínio com esterco bovino proporciona

condições favoráveis para a produção de biogás e fertilizante, ressaltando a viabilidade dessa abordagem na valorização de resíduos orgânicos e na produção de recursos energéticos e agrícolas sustentáveis.

Bacca, Teleken e Oliveira (2022) realizaram a co-digestão anaeróbia usando diferentes substratos bovinos e suínos, alterando as condições operacionais de temperatura e agitação. Os substratos utilizados foram esterco bovino e suíno, empregando 8 reatores (4 condições em duplicata) com operação batelada de escala laboratorial confeccionados em material policloreto de vinil (PVC), sendo realizados quatro testes. Sendo o teste 1 com agitação a 35°C, o teste 2 sem agitação a 35°C, o teste 3 com agitação a 45°C e o teste 4 sem agitação a 45°C.

A quantidade de metano na composição do biogás se manteve acima de 90% em média, e os valores de H<sub>2</sub>S e H<sub>2</sub> foram insignificantes. Observou-se que os testes 2, 3 e 4 tiveram valores satisfatórios de produção de biogás. Devido à baixíssima produção de biogás no Teste 1, sua produção não foi satisfatória apesar de ter a maior remoção de SV entre os experimentos analisados.

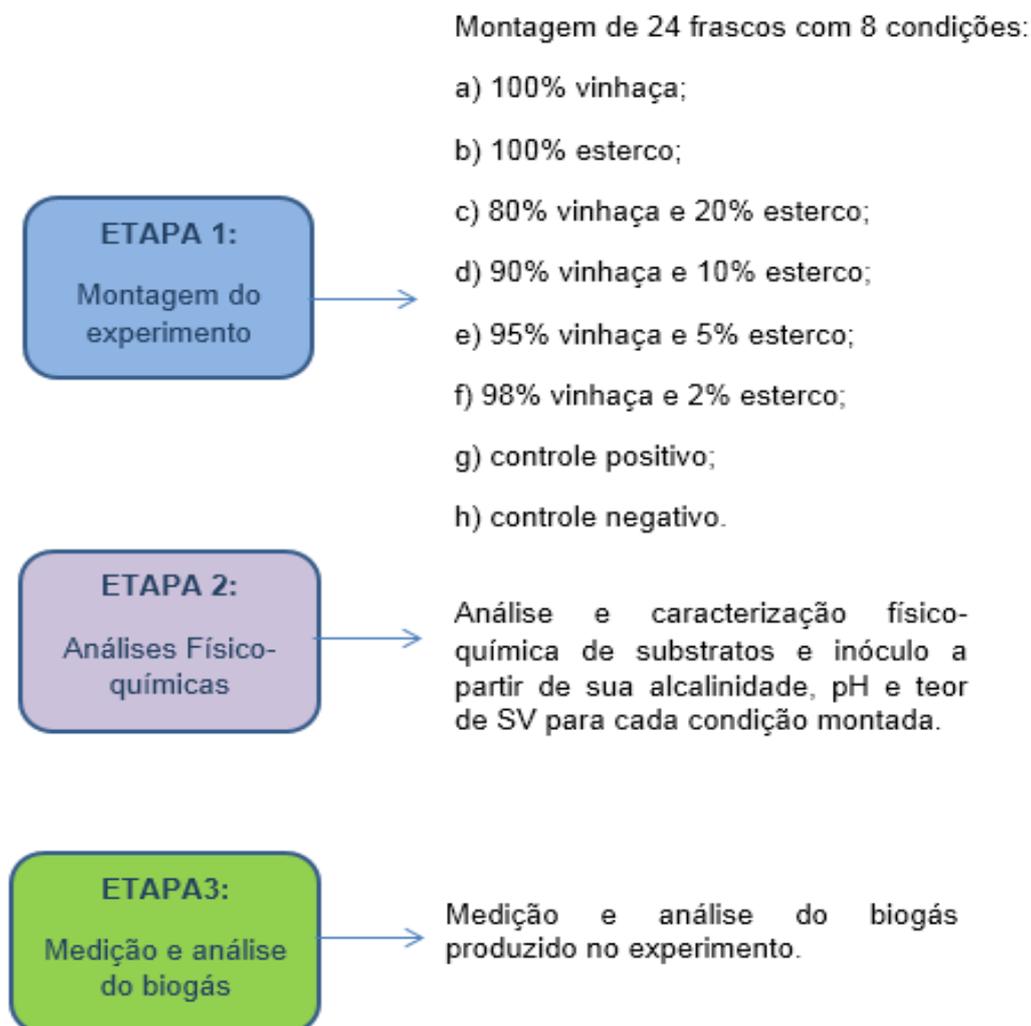
Nesse contexto de estudos envolvendo biodigestão da vinhaça e de resíduos da pecuária para avaliação do potencial bioquímico de metano (PBM), este trabalho propôs um estudo que além da avaliação de produção de biogás, buscou analisar os rendimentos de metano para mono e co-digestão com diferentes proporções, de modo a compreender a interação sinérgica entre os substratos com foco na otimização dos processos de conversão anaeróbia.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Biotecnologia Anaeróbia da Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas. A Figura 4 apresenta o fluxograma com as etapas desenvolvidas no decorrer do projeto, consistindo em 3 etapas principais.

Figura 4 - Fluxograma das etapas principais do desenvolvimento do projeto



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

#### 3.2 SUBSTRATOS, CO-SUBSTRATOS E INÓCULO

A vinhaça foi utilizada como substrato principal para a produção do biogás, sendo coletada durante o período de safra da Usina Iracema (Iracemópolis-SP). O

esterco bovino foi adicionado como co-substrato para o processo de co-digestão com vinhaça e foi coletado de abatedouro frigorífico em regime de confinamento (Poços de Caldas-MG).

Os substratos foram caracterizados em relação aos sólidos voláteis totais em conformidade com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Ambos foram mantidos em refrigeração a temperatura média de 10 graus até a utilização nos ensaios.

O inóculo anaeróbio foi proveniente de reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* 9UASB) tratando efluente de abatedouro de aves (Pereiras-SP).

### 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.3.1 Montagem do experimento

Foram realizados ensaios para potencial bioquímico de metano (PBM) em sistemas de mono e co-digestão, para avaliar o potencial metanogênico do substrato. Para isso foi utilizada uma proporção de duas partes de inóculo para uma parte de substrato em termos de sólidos voláteis totais, de acordo com a metodologia VDI 4630.

A partir de um conjunto de 24 (vinte e quatro) frascos foram aplicadas 8 (oito) condições em triplicata, sendo elas:

- a) 100% vinhaça (vinhaça);
- b) 100% esterco (esterco);

Frascos de co-digestão em 4 (quatro) condições (vinhaça como substrato principal e dejetos bovinos como co-substrato):

- a) 2% de esterco e 98% de vinhaça (98:2%);
- b) 5% de esterco e 95% de vinhaça (95:5%);
- c) 10% de esterco e 90% de vinhaça (90:10%);
- d) 20% de esterco e 80% de vinhaça (80:20%);

} Em termos de sólidos voláteis totais

Frascos de controle:

- a) Controle de substratos com celulose microcristalina (controle positivo);

b) Controle de endogenia (controle negativo).

A Tabela 2 apresenta as proporções utilizadas para cada condição realizada.

Tabela 2 – Volume para cada condição desenvolvida

Condição	Volume			
	Lodo (ml)	Vinhaça (ml)	Esterco (g)	Celulose (g)
Vinhaça	106,00	19,00		
Esterco	117,80		7,20	
98:2%	105,50	14,00	0,50	
95:5%	105,50	13,50	1,00	
90:10%	105,50	13,00	1,50	
80:20%	105,50	11,50	3,00	
Controle positivo	125,00			0,63
Controle negativo	125,00			

Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Os experimentos foram conduzidos em 24 frascos Duran de 250 ml, contendo 125 ml de volume útil, sem agitação, em temperatura mesofílica de 30°C e o tempo para retirada de amostra de biogás foi de 24h. Conforme a produção foi tendendo a zero, esse intervalo passou para 3 dias, em seguida 7 dias e posteriormente passado para 15 dias até o fim do experimento, que foi interrompido com 165 dias quando a variação das últimas 3 medidas passou a representar menos de 1% do volume total, como descrito na metodologia VDI 4630.

Primeiramente foram preparadas 8 misturas com as respectivas proporções de volume, subsequentemente foram distribuídos 125 ml em 3 frascos Duran de 250 ml para cada uma das 8 condições e o restante reservado para análises físico-químicas. Ao final da montagem dos 24 frascos, todos foram fluxionados com N<sub>2</sub> por 5 (cinco) minutos e, em seguida, ficaram 2 (dois) minutos no headspace antes de serem devidamente fechados com tampa de rosca e septo de borracha para vedação e colocados na câmara em temperatura de 30° C como mostra a Figura 5.

Figura 5 - 24 Frascos na câmara com temperatura controlada



Fonte: Acervo da Autora (2023).

### 3.3.2 Análises físico-químicas

Foi realizada caracterização físico-química inicial e final nos substratos e no inóculo para todas as condições. Os parâmetros analisados no processo se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 – Análises Físico-Químicas

Parâmetro Analisado	Frequência	Método Analítico	Referência
pH	2 X (início e final)	4500 H <sup>+</sup>	APHA (2012).
SVT (mg/L)	1 X (início)	2540 G	APHA (2012).
Alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	2 X (início e final)	-	Ripley; Boyle e Converse (1986); Dilallo (1961).

Fonte: Elaboração da Autora (2023).

### 3.3.3 Tratamentos de dados

Com fundamentação nos resultados do experimento referentes à geração acumulada de metano sob diversas condições experimentais, utilizou-se a equação adaptada de Gompertz (equação 1) para estimar os valores dos parâmetros experimentais, ou seja, a capacidade potencial de produção de metano, a máxima taxa de produção de metano e o tempo correspondente à fase lag (Posmanik *et al.*, 2020).

$$P_{CH_4}(t) = P_{max} * \exp \left\{ - \exp \left[ \left( \frac{R_{max} * e}{P_{max}} \right) * (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

Onde:

$P_{CH_4}(t)$  – produção acumulada de metano ( $NmlCH_4$ ) no tempo

$P_{max}$  – potencial de produção de biogás ( $NmlCH_4$ )

$R_{max}$  – taxa de produção máxima de metano ( $NmlCH_4 d^{-1}$ )

$\lambda$  - tempo da fase lag (d)

$t$  – tempo de observação (d)

### 3.4 MEDIÇÃO DO BIOGÁS

Foi realizada a medição e coleta de biogás com a utilização da seringa Hamilton S500, que permitiu a implementação de medidas precisas no procedimento como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Medição do biogás com seringa



Fonte: Acervo da Autora (2023).

Em seguida, o biogás foi armazenado em tubos de coleta para análise de sua composição, que foi realizada no laboratório de Bioenergia da Unicamp por cromatografia gasosa no equipamento CONSTRUMAQ modelo U-14, equipado com coluna Hayesep D e detector de filamento de tungstênio. O gás de arraste foi o hidrogênio ( $H_2$ ) a um fluxo de  $40 ml min^{-1}$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS E INÓCULO

A Tabela 4 apresenta os resultados das caracterizações dos substratos – inóculo, esterco e vinhaça.

Tabela 4 - Resultados das caracterizações físico-químicas dos tratamentos avaliados

Condição	Caracterizações Físico-Químicas				
	SV <sub>i</sub> (mg/l)	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>	Alcalinidade <sub>i</sub> (mgCaCO <sub>3</sub> /l)	Alcalinidade <sub>f</sub> (mgCaCO <sub>3</sub> /l)
<b>Vinhaça</b>	42,7	7,58	7,73	34,98	137,50
<b>Esterco</b>	47,2	7,86	7,57	35,24	127,53
<b>80:20%</b>	50,5	7,19	7,53	34,92	125,68
<b>90:10%</b>	48,1	7,27	7,60	32,95	131,98
<b>95:5%</b>	42,9	7,55	7,45	33,19	90,04
<b>98:2%</b>	39,1	8,29	7,36	35,93	83,85
<b>Controle (+)</b>	(*)	7,94	7,77	28,07	101,93

SV<sub>i</sub>: Sólidos voláteis inicial; pH<sub>i</sub>: pH inicial; pH<sub>f</sub>: pH final; Alcalinidade<sub>i</sub>: Alcalinidade inicial; Alcalinidade<sub>f</sub>: Alcalinidade final. (\*): não realizado.

Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Observa-se que para todos os tratamentos a alcalinidade final foi superior à inicial, embora não tenham sido percebidas variações significativas nos valores de pH, indicando manutenção das condições de neutralidade, exceto na condição 98:2%. Valores de pH próximos à neutralidade sugerem uma eficiente fase de metanogênica do procedimento de biodigestão, na qual os ácidos orgânicos produzidos nas fases anteriores são adequadamente consumidos (Cremones, 2019).

Segundo Gomes *et al.* (2017) e Barros, Duda e Oliveira (2016) o uso de biodigestores permite que a carga iônica volumétrica seja mantida na concentração desejada, regulando o pH, promovendo a permanência dos bicarbonatos e aumentando a alcalinidade, de modo que a estabilidade do processo seja garantida. Desse modo, explica-se a alteração na alcalinidade final quando comparada à inicial.

Vale ressaltar que a maior variação de alcalinidade dentre os ensaios de co-digestão aconteceu na mistura de proporção 90:10%, na qual ocorreu também a maior geração de biogás. Já a menor variação de alcalinidade se deu na mistura 98:2% cuja geração de biogás foi a menor.

Outro ponto a se destacar é que o único sistema de co-digestão no qual se observou variação entre o pH inicial e final relevante foi o 98:2%, contudo, esse experimento foi iniciado com o pH acima dos demais então, acredita-se que durante o procedimento houve consumo da alcalinidade excedente pela produção de ácidos intermediários inerente ao sistema de digestão anaeróbia. O pH é um dos principais fatores que restringem o processo da digestão anaeróbia. Ele influencia diretamente a eficácia do processo, impactando no crescimento das bactérias responsáveis pela produção de metano (Quadros *et al.*, 2010; Sánchez-Hernández, Weiland; Borja, 2013).

Foi notado que os valores de sólidos voláteis iniciais aumentaram conforme a proporção de esterco bovino era maior na mistura de co-digestão: 98:2% (39,1 mg/L), 95:5% (42,9 mg/L), 90:10% (48,1 mg/L) e 80:20% (50,5 mg/L).

O ensaio de teor de sólidos voláteis foi realizado somente no início do experimento porque, ao final do processo, o lodo restante foi utilizado como inóculo em outro trabalho desenvolvido pelo mesmo grupo de pesquisa.

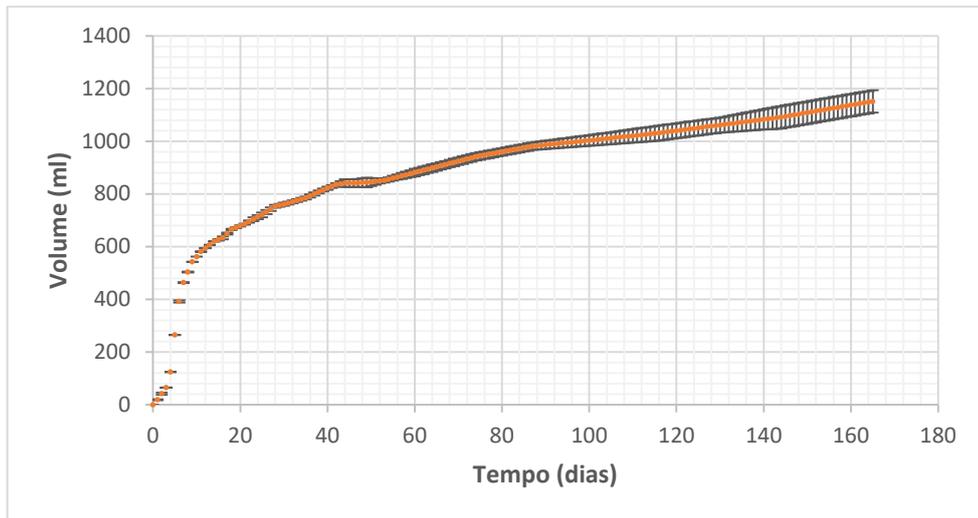
## 4.2 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Os resultados da produção de biogás correspondentes a cada condição analisada estão representados nos Gráficos 1 ao 8. O uso do inóculo, conforme indicado nos experimentos, é importante para que seja descontada a produção endógena de biogás, resultante do consumo de matéria orgânica residual do inóculo. Segundo Oliveira *et al.* (2012) a adição de um inoculante é indispensável para que aconteça um tratamento anaeróbio eficiente, ao que Penteado *et al.* (2018) atribui os processos de catalisação, isso é, aceleração da decomposição de matéria orgânica e a sua conseqüente redução no tempo de geração do biogás.

O Gráfico 1 demonstra a produção de biogás nos frascos contendo celulose como controle do substrato. A celulose microcristalina foi utilizada como substrato padrão no controle positivo para avaliar o valor máximo de produção de metano do

inóculo. E, nesse experimento, foi capaz de gerar uma produção constante de biogás, atingindo uma média das triplicatas de  $11151 \pm 42$  ml em 165 dias.

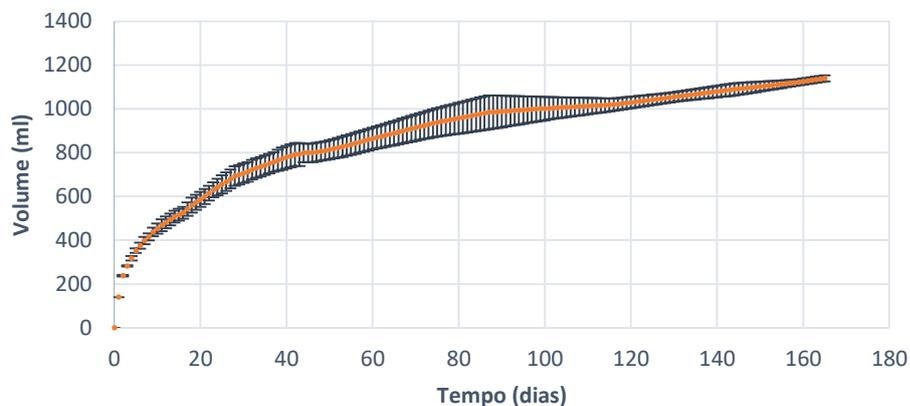
Gráfico 1 - Produção média de biogás nos 3 frascos contendo controle positivo



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Na produção de biogás da mistura de vinhaça pura com o inóculo (Gráfico 2), verificou-se que a vinhaça conseguiu gerar uma média de  $1139 \pm 14$  ml. A utilização da vinhaça pura como único substrato mostrou-se eficiente para a produção de biogás. Não se observou queda de produção em curto período e, durante todo período de 165 dias, a produção de biogás continuou ocorrendo nos reatores de triplicata.

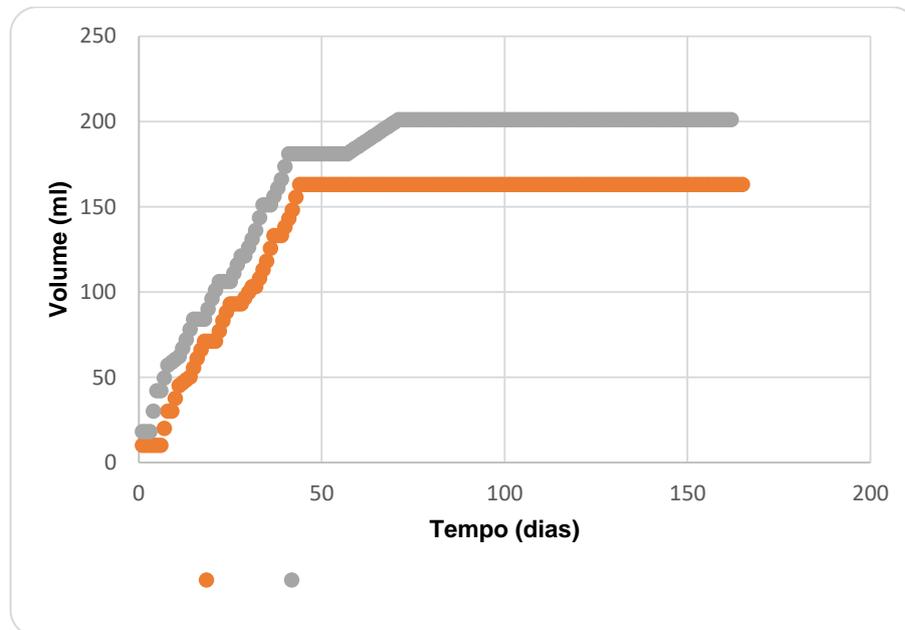
Gráfico 2 - Produção média de biogás nos 3 frascos contendo vinhaça com inóculo



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

O Gráfico 3 ilustra que as amostras enfrentaram grandes dificuldades para começar a produzir biogás e esgotaram a produção em apenas 45 dias. Um dos frascos foi desconsiderado na média de produção pois os dados estavam muito discrepantes em relação aos outros dois. Essa condição teve por objetivo quantificar a produção endógena de biogás, já que não há adição de fonte de carbono ou energia, apenas adição do inóculo usado nas demais condições experimentais. Conseqüentemente era esperado uma baixa produção de biogás ao longo de toda a operação. A média da geração da triplicata foi de apenas  $182 \pm 26,9$  ml ao longo desses 165 dias (Gráfico 3).

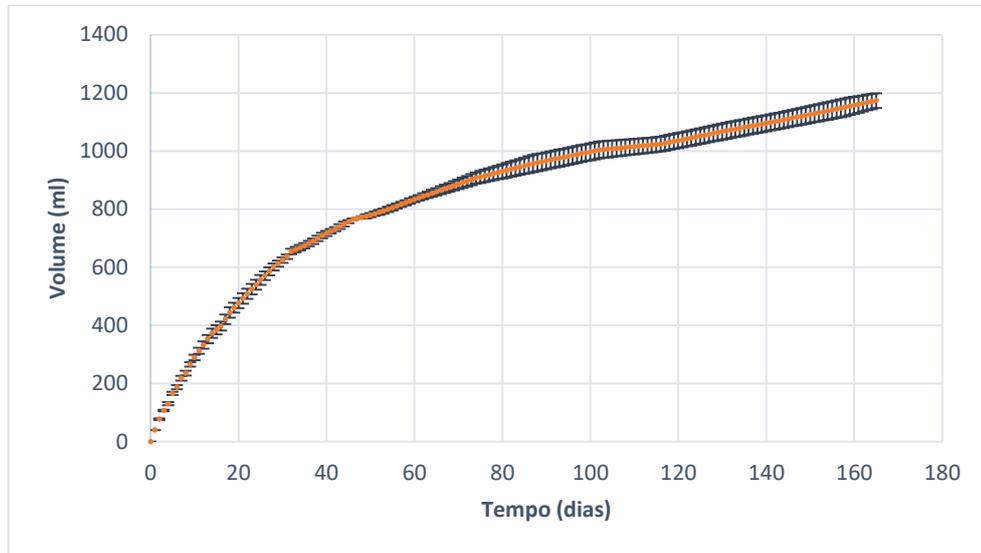
Gráfico 3 - Produção média de biogás nos 3 frascos contendo controle de endogenia



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

O esterco apresentou um bom desempenho na simbiose entre os microrganismos presentes nele e no inóculo, tendo um ótimo desenvolvimento das metanogênicas. A mistura de esterco com inóculo obteve uma produção média dos 3 frascos constante e satisfatória de  $1173 \pm 25$  ml de biogás ao longo dos 165 dias (Gráfico 4). O esterco demonstrou ser um substrato eficiente na condição aplicada.

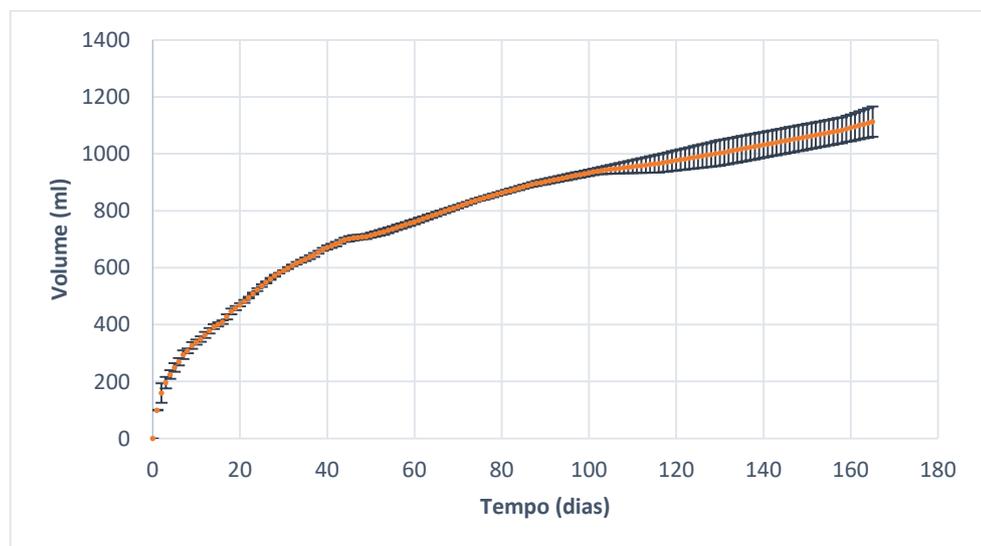
Gráfico 4 - Produção média de biogás nos 3 frascos contendo esterco com inóculo



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

A mistura contendo 90% de vinhaça e 10% de esterco (Gráfico 5) foi a que obteve maior produção dentre as condições de co-digestão, com uma média dos 3 frascos de  $1113 \pm 53$  ml ao longo dos 165 dias. Esta combinação resultou em uma boa interação e co-digestão entre a fonte de matéria orgânica fornecida pela vinhaça, a comunidade de microrganismos benéficos que estimularam uma comunidade metanogênica forte e, conseqüentemente, estabeleceram uma harmonia com o ambiente do lodo aviário.

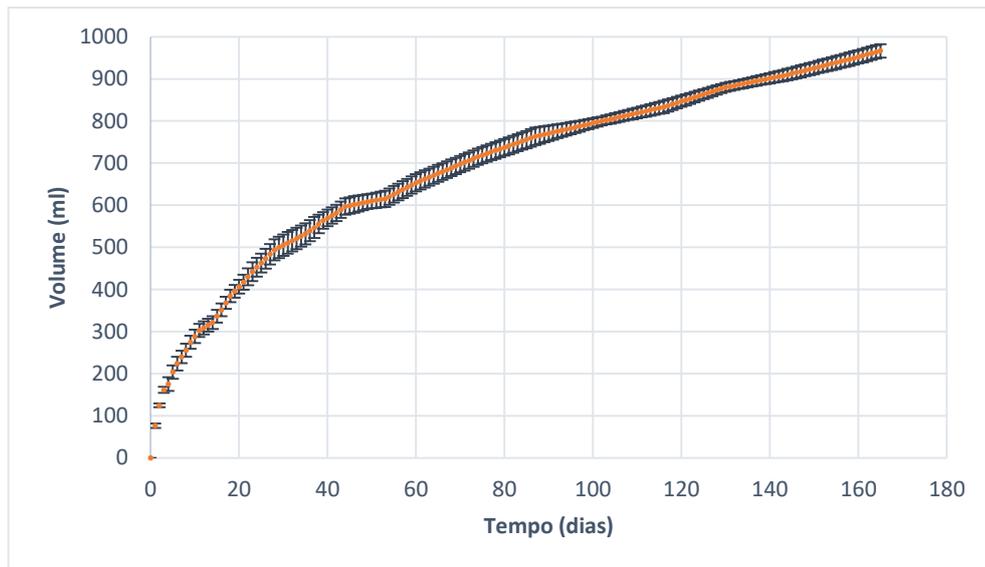
Gráfico 5 - Produção média de biogás nos 3 frascos contendo 90:10%



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Ao longo dos 165 dias, as amostras com proporção de 80% vinhaça e 20% esterco atingiram uma produção média de biogás das 3 amostras de  $967 \pm 16$  ml (Gráfico 6), apresentando um desempenho satisfatório de produção. As triplicatas apresentaram comportamento similar e constante durante o experimento.

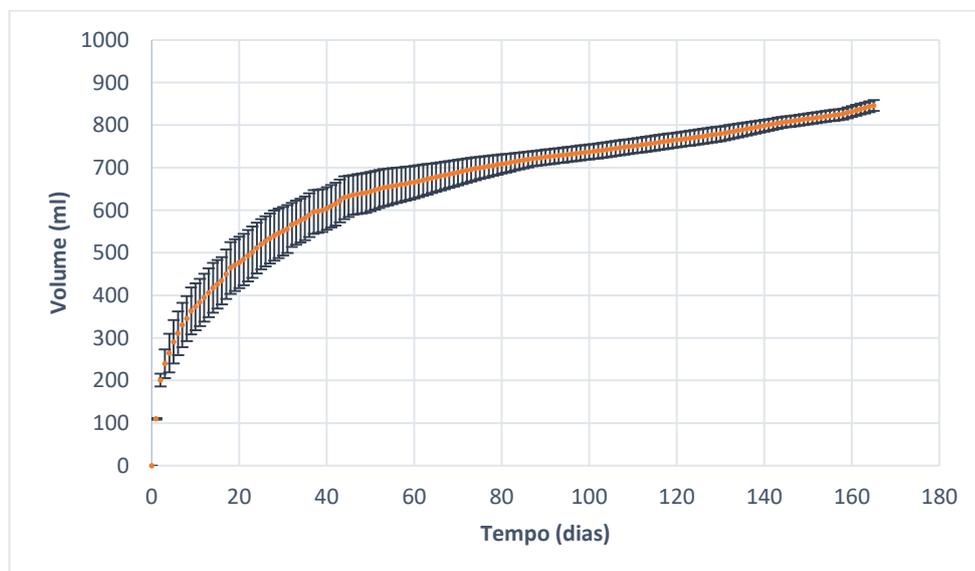
Gráfico 6 - Produção média de biogás nos 3 frascos contendo 80:20%



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Ao longo dos 165 dias, as amostras com proporção de 95% vinhaça e 5% esterco atingiram uma produção média de biogás de  $846 \pm 13$  ml (Gráfico 7), apresentando um desempenho satisfatório de produção.

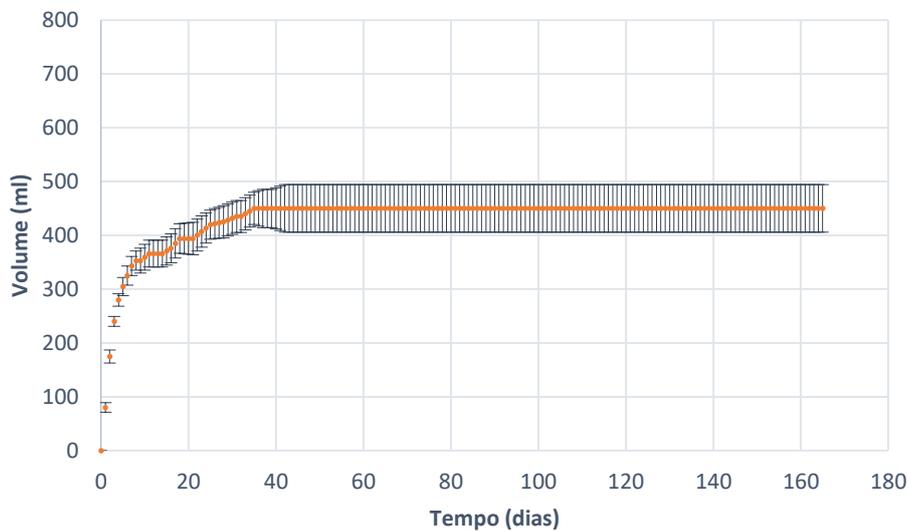
Gráfico 7 - Produção média de biogás nos 3 frascos contendo 95:5%



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

A associação de 98% de vinhaça com 2% de esterco foi a que apresentou menor produção de biogás, com uma média dos 3 frascos de  $473 \pm 44$  ml ao longo dos 165 dias (Gráfico 8). Em aproximadamente 45 dias, as amostras pararam de produzir biogás. Possivelmente porque os microrganismos presentes no esterco não foram suficientes para estabelecer uma relação de co-digestão, o que resultou em uma maior divisão heterogênea quando comparada visivelmente às outras condições, com a parte líquida mais clara e os sólidos mais escuros retidos ao fundo do reator prejudicando assim, o processo sintrófico presente na digestão anaeróbia.

Gráfico 8 – Produção média de biogás nos 3 frascos contendo 98:2%



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

A Tabela 5 apresenta um resumo das produções médias das 8 condições de ensaio realizadas em laboratório.

Tabela 5 - Produções médias de biogás das 8 condições

Condição	Volume acumulado médio de biogás (ml)
100% vinhaça	$1139 \pm 14$
100% esterco	$1173 \pm 25$
98:2%	$473 \pm 44$
95:5%	$846 \pm 13$
90:10%	$1113 \pm 53$
80:20%	$967 \pm 16$
Controle positivo	$1151 \pm 42$
Controle negativo	$182 \pm 27$

Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Em relação aos ensaios com as quatro proporções de co-substrato, foi observado que a redução do percentual de esterco abaixo do limite de 10% resultou em uma conseqüente diminuição na produção de biogás. Este resultado sugere fortemente que a manutenção de uma proporção de esterco acima de 10% é importante para garantir uma produção estável e ótima. Esse equilíbrio na proporção de esterco parece ser um fator-chave na maximização da eficiência dos sistemas de produção de biogás, o que pode ter implicações significativas para o planejamento e implantação de futuros projetos de biogás.

A condição que continha 98% de vinhaça e 2% de esterco obteve o menor resultado do experimento, tendo uma produção semelhante ao controle negativo. As combinações do inóculo com vinhaça pura e do inóculo com esterco bovino puro também mostraram uma boa eficiência na produção de biogás. A amostra de co-digestão que demonstrou melhor desempenho na produção foi a de 10% de esterco e 90% de vinhaça.

Mata-Alvarez *et al.* (2014) e Alvarez, Otero e Lema (2010) corroboram ao indicar que a co-digestão é uma opção interessante para aumentar o processo de biodigestão, sendo que, o uso de um co-substrato, na maioria dos casos, melhora a produção do biogás em função do fornecimento de nutrientes. Desse modo, pode-se justificar as diferentes produções de biogás para cada proporção do co-substrato, conforme observado no presente estudo.

#### 4.3 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

A quantificação da produção de metano foi realizada com base no teor de matéria volátil do reator, conforme ilustrado no Gráfico 9. Para chegar no valor de volume específico de metano, primeiramente foi descontado do volume de biogás medido o volume do inóculo desse e, assim, multiplicado pelo percentual médio de metano inicial encontrada no ensaio de cromatografia, em seguida foi dividido pelos sólidos voláteis da condição aplicada.

Tomando como exemplo o primeiro dia da condição 90:10%: foi medido 90, 100 e 100 ml de biogás respectivamente nos 3 frascos, sendo assim a média de produção foi 99,3 ml. Logo:

$$V_{\text{biogás}95:5\%} = 99,3 \text{ ml} \quad (2)$$

$$V_{CH_4} = V_{\text{biogás}95:5\%} - \left( \frac{V_{\text{biogásinóculo}}}{V_{\text{inóculo}}} \times V_{\text{LodoAdicionado}} \right) \times \text{percentual médio } CH_4$$

$$V_{CH_4} = 99,3 - (0,112 \times 105,5) \times 0,466 = 40,8 \text{ ml}$$

$$BMP = \frac{V_{CH_4}}{(SV_{\text{vinhaça}} \times V_{\text{vinhaça}}) + (SV_{\text{esterco}} \times V_{\text{esterco}})}$$

$$BMP = \frac{40,84}{(0,023 \times 13) + (0,070 \times 1,5)} = 87,8 \text{ ml } CH_4/\text{g SVT}$$

Onde:

$V_{\text{biogás}95:5\%}$  = média de produção de biogás da condição 95:5% (ml)

$V_{CH_4}$  = volume de metano descontando o inóculo (ml)

$V_{\text{biogásinóculo}}$  = média de produção de biogás do controle endógeno (ml)

$V_{\text{inóculo}}$  = volume de lodo adicionado à condição de controle endógeno (ml)

$V_{\text{LodoAdicionado}}$  = volume de lodo adicionado à mistura 95:5% (ml)

Média  $CH_4$  = percentual de metano encontrado no ensaio de cromatografia (%)

$SV_{\text{vinhaça}}$  = sólidos voláteis da vinhaça (g/ml)

$V_{\text{vinhaça}}$  = volume de vinhaça adicionado à mistura 95:5% (ml)

$SV_{\text{esterco}}$  = sólidos voláteis do esterco (g/ml)

$V_{\text{esterco}}$  = volume de esterco adicionado à mistura 95:5% (g)

BMP = potencial bioquímico de metano (ml  $CH_4$ /g SVT)

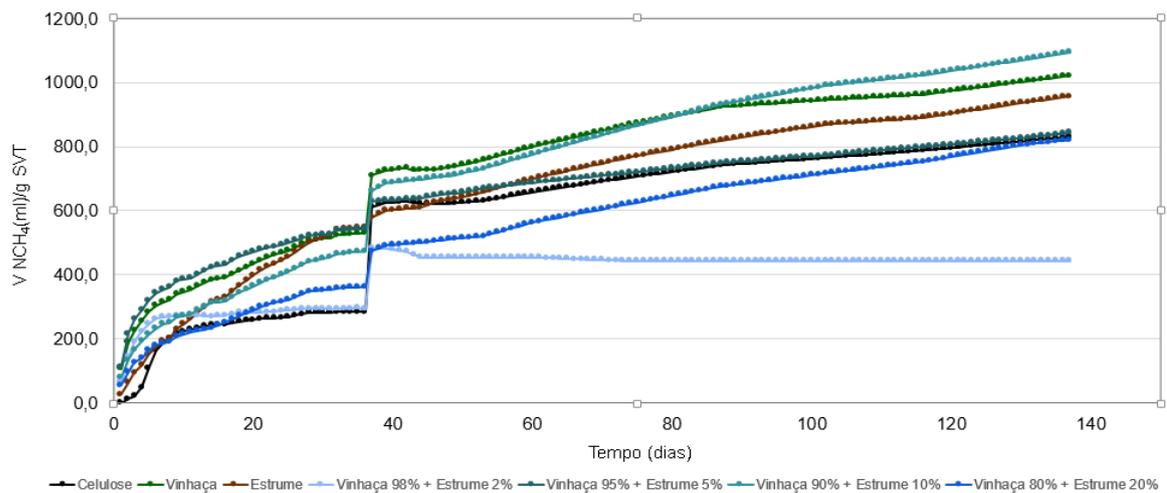
A produção de metano apresentou dois momentos distintos: até 35 dias e após isso, sendo que posteriormente aos 35 dias de operação foi observado um aumento significativo em todos os cenários avaliados. Essa observação pode ser interpretada como uma das curvas convencionais de produção de biogás descritas na metodologia VDI 4630, conhecida como comportamento de degradação gradual. Tal característica também foi constatada na pesquisa conduzida por Rodriguez-Chiang e Dahl (2015), que analisaram os efeitos de diferentes razões de inóculo e substratos, eles notaram que as proporções de 1 e 0,8 revelaram esse comportamento.

De forma semelhante ao que foi observado na produção de biogás, o sistema de co-digestão com proporção de 98:2% mostrou a menor produção específica de metano (472,9 ml/g SVT), significativamente inferior aos demais sistemas

analisados. Já o experimento com proporção de 90:10% obteve o maior resultado (1095,1 ml/g SVT).

Os resultados com proporções de 95:5% e 80:20% alcançaram a produção de 843,5 ml/g SVT e 821,5 ml/g SVT respectivamente. Um resultado satisfatório, porém, inferior comparado aos de mono digestão da vinhaça (1021,4 ml/g SVT) e do esterco (957,4 ml/g SVT).

Gráfico 9 - Produção específica de metano ao longo do experimento



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Após 35 dias de operação, houve um aumento no teor de metano no biogás em todas as condições analisadas (conforme Tabela 6). Isso sugere que os sistemas em operação se adaptaram às condições metanogênicas após esse período, uma vez que em todas as combinações de substrato, o teor de metano atingiu 65%. Além disso, todas as condições apresentaram um volume de metano acumulado superior a 200ml após 5 dias de operação.

Tabela 6 - Conteúdo de metano no biogás para o sistema antes e após 35 dias

Substrato	CH4 (%) até 35 dias	CH4 (%) após 35 dias
100% vinhaça	49	65
100% esterco	61	65
80:20%	50	65
90:10%	47	65
95:5%	56	65
98:2%	39	65
Controle (+)	30	65

Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Ressalta-se que o metano é o principal componente do biogás, com concentrações que variam de 55 a 70% (Penteado *et al.*, 2018). Assim, o valor encontrado em todas as combinações de substrato no presente estudo (65%) corrobora com o estipulado pela literatura, demonstrando o potencial de uso desses materiais para a geração eficiente de biogás.

#### 4.4 MODELAGEM CINÉTICA

A velocidade de degradação dos substratos pode ser compreendida por meio do comportamento cinético de decomposição desses materiais. A equação de Gompertz modificada é a mais utilizada em estudos para o teste de PBM (Moraes, Zaiat; Bonomi, 2015; Li *et al.*, 2014; Feng *et al.*, 2013). A partir desta equação, foram encontrados os parâmetros: potencial máximo de produção de metano, tempo de fase lag e a taxa de produção máxima de metano para as condições aplicadas, que estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos parâmetros da equação modificada de Gompertz para as condições aplicadas

Condição	Produção acumulada CH4 (ml)	Pmax (ml/gSV)	$\lambda$ (dia)	Rmax (gSV/dia)	Coef
100% vinhaça	1021,4	1011,5	16,5	12,0	0,982
100% esterco	957,4	928,1	12,8	11,2	0,986
80:20%	821,5	833,7	16,2	7,8	0,989
90:10%	1095,1	1099,6	11,5	11,8	0,990
95:5%	843,5	816,8	27,8	9,7	0,979
98:2%	472,9	452,5	17,1	8,8	0,876
Controle (+)	830,1	806,6	1,3	12,4	0,971

Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Foi realizado o ajuste da equação em todas as proporções do experimento, a Figura 7 exibe o resultado obtido.

Como é possível observar, os valores de coeficiente de determinação para os reatores controle positivo, 100% vinhaça, 100% esterco, 80:20%, 90:10% e 95:5% foram 0,971, 0,982, 0,986, 0,0989, 0,990 e 0,979 respectivamente, indicando que os valores previstos apresentaram um bom ajuste aos valores experimentais. Em

contrapartida, o teste de 98:2% que, inclusive, obteve o pior desempenho de produção no experimento, foi o único que apresentou coeficiente abaixo de 0,90, todos os outros foram acima de 0,97.

Todos os valores de potencial de produção de metano encontrados pelo modelo estão próximos aos observados no experimento, apresentando menos de 10% de diferença e vale ressaltar que a condição 90:10% foi a única que obteve potencial de produção maior que o observado no experimento.

A partir dos resultados, percebe-se que as diferentes proporções de substratos influenciaram o desempenho da produção de metano. Dentre os sistemas de co-digestão, o reator 90:10%, que também obteve a maior produção de metano do experimento, apresentou o maior potencial de produção ( $P_{max}$ ) e taxa máxima de produção, potencial de produção de 1099,64 ml de  $CH_4$  e taxa de 11,77 ml por dia. Logo, a menor produção diária e total, assim como o observado no experimento, foi para o reator 98:2%, com taxa de 8,83 ml por dia e potencial de produção de 452,54 ml.

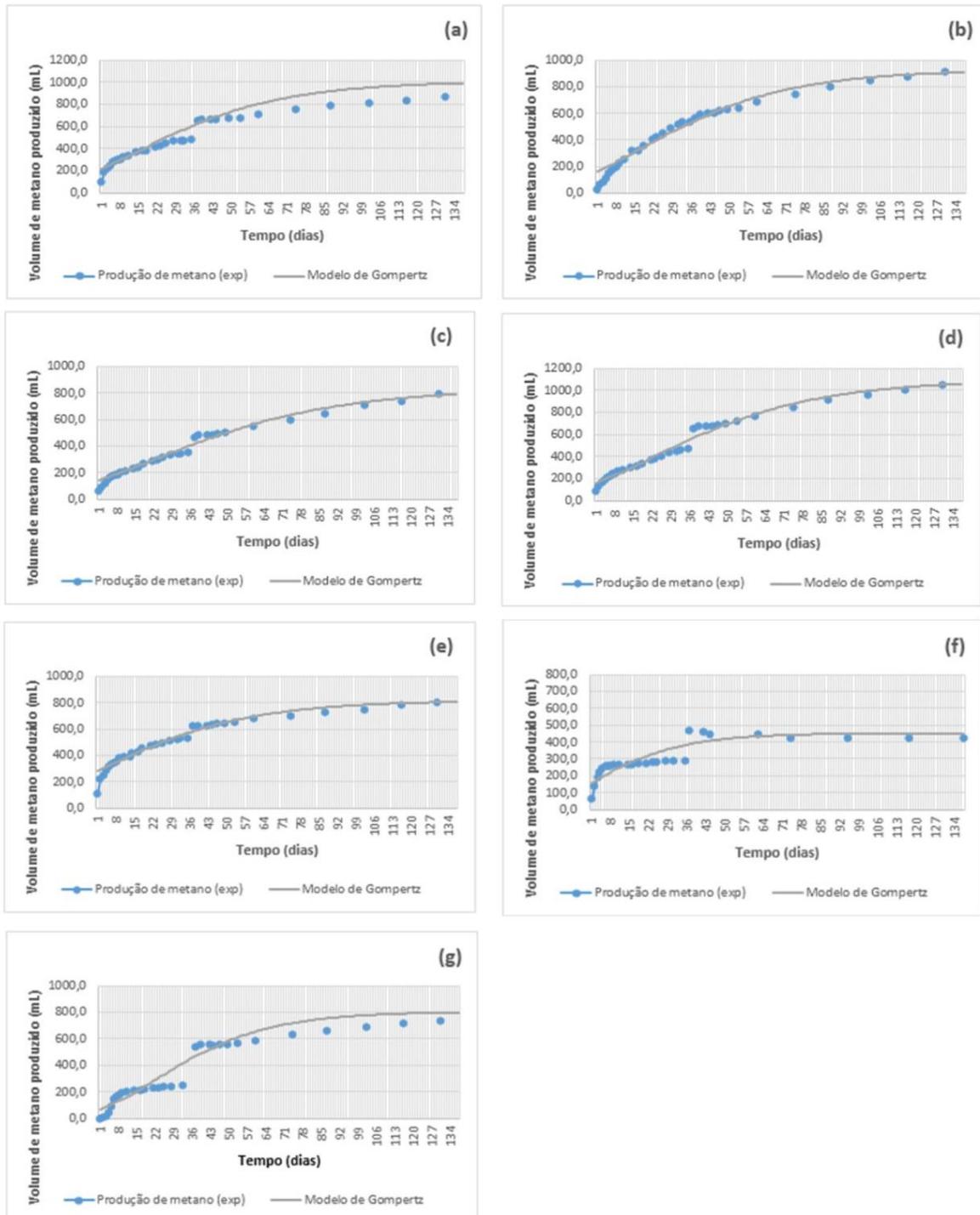
A fase lag, também conhecida como a fase de adaptação do inóculo a cada substrato, é mais uma característica adquirida pelo modelo. O experimento de 95:5% foi a condição que apresentou maior fase de atraso na produção de metano, chegando a quase um mês para o início efetivo da produção. Já a condição 90:10% obteve o menor tempo de fase lag, 11,46 dias, o que indica que os microrganismos desse modelo se adaptaram rapidamente ao ambiente, fazendo com que ele apresentasse um bom desempenho por todo o experimento. Li *et al.* (2019) observaram uma fase lag curta (de 0 a 1,1 dias) para resíduos de cultivo de vegetais durante a digestão anaeróbia mesofílica, por outro lado, Yang *et al.* (2018) destacam uma fase de defasagem mais prolongada (de 0,7 a 35,7 dias).

Os sistemas de co-digestão com 80:20% e 95:5% apresentaram potencial de produção de metano 833,67 ml e 816,83 ml respectivamente, todas menores que os experimentos de mono digestão com vinhaça (1011,49 ml) e esterco bovino (928,06 ml).

Nota-se pela Figura 7 que as curvas de controle positivo e de mono digestão da vinhaça geradas pelo modelo de Gompertz modificado demonstraram baixa aderência aos dados reais de experimento, não representando um bom modelo, mesmo com o alto índice de coeficiente de correlação (0,971 e 0,982). Sendo assim,

é importante conduzir pesquisas de modelagem cinética utilizando diferentes modelos matemáticos para identificar qual descreve melhor o processo.

Figura 7 - Ajustes modelo de Gompertz: a) 100%vinhaça; b) 100%esterco; c) 80:20%; d) 90:10%; e) 95:5%; f) 98:2%; g) controle (+)



Fonte: Elaboração da Autora (2023).

Os resultados obtidos sugerem que a combinação de vinhaça e esterco bovino apresenta potencial para produção de metano. Entretanto as proporções de cada substrato e os parâmetros das misturas afetaram o resultado das produções.

O teor de metano encontrado em todos os sistemas desse experimento (65%) foi compatível com os usuais encontrados na literatura (50 – 75%) (Penteado *et al.*, 2018).

Silva *et al.* (2013) conduziram uma análise da biodigestão anaeróbia utilizando um substrato composto pela mistura de esterco de ovino e caprino, manipueira e 25% de biofertilizantes derivado do mesmo substrato. Durante um período de 17 semanas (equivalente a 120 dias), os pesquisadores observaram uma média de produção de biogás de 5,36 L/Kg de substrato biodigerido, inferior aos encontrados nesse experimento. O estudo ressaltou a importância da composição do material (qualidade do substrato na produção de biogás).

Haryanto *et al.* (2018) estudaram a co-digestão de capim elefante e esterco bovino com diferentes proporções e notaram que a produção de metano aumentou proporcionalmente com a diluição da mistura alcançando uma produção máxima de 111,7 ml de CH<sub>4</sub>/g de SV. Como resultado, concluiu-se que a adição de capim elefante ao esterco bovino teve um efeito positivo na produção de metano, sugerindo também a necessidade de um pré-tratamento mecânico do capim-elefante.

Os experimentos conduzidos com a co-digestão mesofílica da vinhaça de cana-de-açúcar e glicerol destilado como co-substrato, demonstraram resultados favoráveis em relação ao rendimento de produção de metano, atingindo aproximadamente 352±17 Nml CH<sub>4</sub>/g DQO removida na proporção de 50% de vinhaça para 50% de glicerol. Destacando a capacidade do setor sucroenergético de gerar biogás durante sua entressafra por meio de outro substrato (Borges *et al.*, 2021).

Marshi, Bressiani e Barbosa (2014) destacam que a quantidade e composição do biogás gerado durante o processo de digestão anaeróbia estão sujeitos ao substrato introduzido no digestor, bem como as condições ambientais e aos parâmetros operacionais. Sendo assim, considerando as condições experimentais e os parâmetros empregados neste estudo, é possível deduzir que o sistema contendo 90% de vinhaça e 10% de esterco bovino apresenta-se como alternativa mais viável para a geração de biogás com a maior proporção de metano.

## 5 CONCLUSÃO

Em conclusão, este estudo investigou os efeitos da co-digestão de vinhaça e esterco bovino em diferentes proporções, bem como a monodigestão de ambos os substratos. Os resultados obtidos forneceram percepções sobre a eficácia da co-digestão como uma estratégia de melhoramento do processo de digestão anaeróbica para a produção de biogás.

Ficou evidente que a co-digestão de vinhaça e esterco bovino em proporções de 95% vinhaça e 5% de esterco, 80% vinhaça e 20% de esterco e, sobretudo, 90% vinhaça e 10% de esterco resultaram em produções de biogás satisfatórias, indicando uma sinergia positiva entre os dois substratos. Essas condições proporcionaram uma fermentação estável e eficiente.

No entanto, a proporção de 98% vinhaça e 2% de esterco mostrou-se inadequada para a produção de biogás em níveis satisfatórios. Isso sugere que a concentração extremamente alta de vinhaça nessa proporção pode ter afetado negativamente o processo de digestão anaeróbia, possivelmente devido à elevada carga de compostos inibidores que foram formadas.

Em relação à monodigestão, tanto a vinhaça quanto o esterco com inóculo demonstraram potencial para produzir biogás de maneira eficiente, em quantidade satisfatória em comparação com as proporções otimizadas de co-digestão. Isso indica que ambos os substratos podem ser tratados individualmente no processo de digestão anaeróbia, mas a co-digestão ainda representa uma opção vantajosa para maximizar a produção de biogás enquanto otimiza o aproveitamento dos resíduos orgânicos ou para ser utilizada em um possível período de entressafra da cana-de-açúcar.

O modelo de Gompertz modificado foi identificado como um ajuste adequado para a maioria dos resultados experimentais.

Em resumo, os resultados deste estudo enfatizam a importância da seleção adequada das proporções de substratos na co-digestão de vinhaça e esterco bovino para maximizar a produção de biogás. A proporção de 90% vinhaça com 10% de esterco apresentou o maior valor de PBM mostrando-se promissora para aplicações práticas. No entanto, é fundamental considerar as características específicas dos resíduos e as condições locais para otimizar o processo de co-digestão em cada caso.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho contribui para o conhecimento sobre a gestão de resíduos orgânicos e a produção sustentável de biogás, abrindo caminho para futuras pesquisas e aplicações nessa área. Sendo assim, são apresentadas algumas propostas que devem ser consideradas para estudos futuros, visando aprimorar o trabalho atual:

- a) Realizar investigação aprofundada dos efeitos de outras diferentes proporções de vinhaça e esterco bovino sobre a produção de biogás e o PBM;
- b) Fazer uso de outras temperaturas e de agitação no experimento;
- c) Avaliar o impacto ambiental e econômico desta proposta em grande escala.

## REFERÊNCIAS

- AĞDAĞ, O. N.; SPONZA, D.T. Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors. **Journal of hazardous materials**, v. 140, n. 1-2, p. 75-85, 2007.
- ÁLVAREZ, J. A.; OTERO, L.; LEMA, J. M. A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agroindustrial wastes. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 4, p. 1153-1158, 2010.
- ANDRADE, J. M. **Construção de um índice de sustentabilidade ambiental para a agroindústria paulista de cana-de-açúcar (ISAAC)**. 2009, 259 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Agroenergia) – Escola de Economia de São Paulo, Faculdade Getúlio Vargas, São Paulo, 2009.
- APHA AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2005.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2012.
- ARAÚJO, I. S. **Cultivo de cana de açúcar fertirrigada com vinhaça**: uma revisão de literatura. [S.l.:s.n.], 2021.
- BACCA, L. A. M.; TELEKEN, J. G.; OLIVEIRA, E. C. L. Co-digestão anaeróbia de substratos suínos e bovinos em diferentes condições operacionais. **Open Science Research**, v.8, p. 1096-1109, 2022.
- BAFFA, D. C. F.; FREITAS, R. G.; BRASIL, R. P. C. **O uso da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar**. Ituverava: Nucleus, 2009.
- BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc & Ciência-ACSA**, Joaçaba, v. 2, n. 1, p. 87-96, jan./jun. 2011.
- BARROS, V. G.; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. Biomethane production from vinasse in upflow anaerobic blanket reactors inoculated with granular sludge. **Brazilian Journal of Microbiology**, 47 p. 628-639, 2016.
- BEHERA, S. K. *et al.* Methane production from food waste leachate in laboratory-scale simulated landfill. **Waste Management**, v. 30, n. 8-9, p. 1502-1508, Aug./Sep. 2010.

BORGES V. A. *et al.* Co-digesting sugarcane vinasse and distilled glycerol to enhance bioenergy generation in biofuel-producing plants. **Energy Conversion And Management**, v. 250, p. 114897, 2021.

BRASIL. **Biocombustíveis**. [S.l.:s.n.], 2011. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/11/biocombustiveis>. Acesso em: 10 jan. 2023.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 303, de 28 de Fevereiro de 1967**. Cria o Conselho Nacional de Controle da Poluição Ambiental e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da Republica, 1967. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/declei/1960-1969/decreto-lei-303-28-fevereiro-1967-376059-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 9 jun. 2023.

BRASIL. **Portaria 323, de 29 de novembro de 1978**. Proíbe o lançamento, direto ou indireto do vinhoto em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool do país. Brasília, DF: Ministro de Estado do Interior, 1978. Disponível em: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/bra25137.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2023.

CAGDAG, O.N.; SPONZA, D.T., Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors. **J. Hazard Mat.**, n. 140, p. 75-85, 2007.

CARAÇA, M. S.; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. Co-digestão anaeróbia de vinhaça e águas residuárias da bovinocultura leiteira. **Ciência & Tecnologia**, v. 12, n. 1, p. 82-88, 2020.

CARNEIRO, D. R. C. **Viabilidade técnica e económica de uma unidade centralizada de co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos**. 2009. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2009.

CARNEIRO, P. A.; LIMA, H. Q. da. Biodigestão da vinhaça: maior sustentabilidade à cadeia produtiva do etanol. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 8., 2010, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: CRESESB, 2010.

CARVALHO, C. P.; PISANO, L. C. Resíduos Pecuários: uma Avaliação em Indústria de Alimentos do Município de Bauru-SP. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 21, n. 2, p. 105-109, 2017.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, 2008.

COLATTO, L.; LANGER, M. Biodigestor–resíduo sólido pecuário para produção de energia. **Unoesc & Ciência – ACET**, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 119-128, 2011.

COMINO, E.; RIGGIO, V. A.; ROSSO, M. Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 46–53, 2012.

CREMONEZ, P. A. **Digestão anaeróbia de um polímero à base de fécula de mandioca**. 2019. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

CREMONEZ, P. A. *et al.* Codigestão de água residual de suinocultura e vinhaça sob diferentes condições térmicas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, n. 1, p. 103-110, 2015.

CRUZ, L. F. L. S. *et al.* Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça: fertirrigação, concentração e biodigestão. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Carlos, n. 29, p. 111-127, set. 2013.

DAMIANO, E. D. S. G. **Tratamento da vinhaça em reator anaeróbio de leito fluidificado**. 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DIAS, M. I. A. *et al.* Viabilidade econômica do uso do biogás proveniente da suinocultura em substituição a fontes externas de energia. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 28, n.3, p. 155-164, jul./set. 2013.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O. R. Volatile acids by Direct Titration. **Journal Pollution Control Federation**, v. 23, n. 4, p. 356-365, 1961.

DOMINIAC, A. L.; TONELLO, J. P. C.; SILVA, W. A. **Projeto e implantação de sistemas de geração de biogás em pequenas propriedades rurais como fonte alternativa de energia**. 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

DOTTO, R. B.; WOLFF, D. B. Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 13-26, 2012.

FENG, L.; LI, Y. *et al.* Biochemical Methane Potential (BMP) of Vinegar Residue and the Influence of Feed to Inoculum Ratios on Biogas Production. **BioResources**, v. 8; p.2487- 2498, 2013;

FERNANDES, A. **Água residuária de laticínio em co-digestão com dejetos de bovinos leiteiros**. 2016. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016.

FUESS, L. T. **Biodigestão anaeróbia termofílica de vinhaça em sistemas combinados do tipo acidogênico-metanogênico para potencialização da recuperação de bioenergia em biorrefinarias de cana-de-açúcar de primeira geração.** 2017. 3456 f. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hídrica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

GOMES, V. *et al.* Bioresource Technology Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of Methanothermobacter and Methanosarcina archaea and Thermotogae bacteria. **Bioresource Technology**, v. 244, n. July, p. 371–381, 2017.

HAGOS, K. *et al.* Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1485–1496, 2017.

HARYANTO, A. *et al.* Biogas production from anaerobic codigestion of cowdung and elephant grass (*Pennisetum Purpureum*) using batch digester. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 141, n. 1, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/141/1/012011>. Acesso em: 10 jun. 2023.

JEONG, E. M. M. A. *et al.* Enhancement of bioenergy production and effluent quality by integrating optimized acidification with submerged anaerobic membrane bioreactor. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 1, p. S7-S12, jan. 2010.

JINGURA, R. M.; MATENGAIFA, R. Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1116-1120, 2009.

KIM, J. K. *et al.* Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 102, n. 4, p. 328-332, oct. 2006.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia: Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LASKRI, N.; HAMDAOUI, O.; NEDJAH, N. Experimental Factors Affecting the Production of Biogas during Anaerobic Digestion of Biodegradable Waste. **Int. J. Environ. Sci**, v. 6, n. 6, p. 451-454, 2015.

LI, P. *et al.* Avaliação do potencial bioquímico e cinética do metano na digestão anaeróbia de resíduos de hortaliças. **Energias**, v. 12, n. 1, p. 26, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/1/26>. Acesso em: 10 jun. 2023.

LI, J. *et al.* Processing anaerobic sludge for extended storage as anaerobic digester inoculum. **Bioresource Technology**, v. 166, p. 201- 210, 2014.

LOPES, W. S.; LEITE, V. D.; PRASAD, S. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. **Bioresource technology**, v. 94, n. 3, p. 261-266, 2004.

MARCHI, M. E. V.; BRESSIANI, P. A.; BARBOSA, P.M. **Digestão anaeróbia de resíduos orgânicos para cozinha industrial dos restaurantes LATIFE**. 2014. 114 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MATA-ALVAREZ, J. *et al.* A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 36, p. 412-27, 2014. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002664>. Acesso em: 7 jun. 2023.

MATHERI, A. N. *et al.* Analysis of the biogas productivity from dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2328-2334, 2018.

MORAES, B.S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888-903, 2015.

MORAIS, F. T. L. **Biodigestor**: uma tecnologia sustentável. 2017. 49 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Biosistema) – Universidade Federal de Campina Grande, Sumé, 2017.

MOURA, L. F. *et al.* Construção de Biodigestor modelo Indiano no Instituto Federal Campus Apodi-RN. *In*: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFRN: TECNOLOGIA DE INOVAÇÃO PARA O SEMIÁRIDO, 9., 2013, Rio Grande do Norte. **Anais [...]**. Rio Grande do Norte: CONGIC/IFRN, 2013. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ocs/index.php/congic/ix/paper/viewFile/1243/130>. Acesso em: 5 jun. 2023.

OLIVEIRA, M. C. R. *et al.* Concentração de inóculo e produção de biogás em reator de batelada alimentado com água residuária de suinocultura. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 48, p. 1-22, 2012.

OLIVEIRA JÚNIOR, F. A. **Ensino não formal da diminuição da carga poluidora de dejetos animais a partir da produção de biogás e biofertilizante em pequenas propriedades rurais**. 2013. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

OLIVEIRA, D. C. S. **Otimização da produção de biogás a partir da biodigestão de vinhaça da fabricação de cachaça artesanal**. 2019. 104 f. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

PENTEADO, M. C. *et al.* Análise do potencial de geração de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da vinhaça e bagaço de cana. **Biofix Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 26-33, 2018.

PONSÁ, S.; GEA, T.; SÁNCHEZ, A. Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates. **Biosystems Engineering**, v. 108, n. 4, p. 352-360, Apr. 2011.

POSMANIK, R. *et al.* Granular sludge is a preferable inoculum for the biochemical methane potential assay for two complex substrates. **Bioresource Technology**, v. 309, p. 123359, ago. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852420306313?via%3Dihub>. Acesso em: 10 jan. 2023.

QUADROS, D. de G. *et al.* Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.3 p. 326–332, 2010.

RICO, C. *et al.* Biogas production from various typical organic wastes generated in the region of Cantabria (Spain): Methane Yields and Co-Digestion Tests. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 5, p. 128-136, 2014.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J.C. Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digester of High-Strength Wastes. **Journal Water pollution Control Federation**, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

RODRÍGUEZ-CHIANG, L. M.; DAHL, O. P. Effect of Inoculum to Substrate Ratio on the Methane Potential of Microcrystalline Cellulose Production Wastewater. **BioResource**, v. 10, p. 898-911, 2015.

ROSSETTO, R. *et al.* Potássio. *In*: DINARDO, L. *et al.* **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 289-312.

SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ, E. P.; WEILAND, P.; BORJA, R. The effect of biogas sparging on cow manure characteristics and its subsequent anaerobic biodegradation. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 83, p. 10-16, 2013.

SATYAWALI, Y.; BALAKRISHNAN, M. Removal of color from biomethanated distillery spentwash by treatment with activated carbons. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 14, p. 2629-2635, 2007.

SEIXAS, F. L.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. RC. Tratamento da vinhaça por adsorção em carvão de bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, v. 39, n. 2, p. 172-179, fev. 2016.

SFEIR, F. P. **Resíduos da indústria sucroalcooleira: vinhaça e torta de filtro**. 2013. 41 f. Monografia (Especialização em Ensino de Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2013.

SILVA, C. O. *et al.* Biodigestão anaeróbia com substrato formado pela combinação de esterco ovinocaprino, manipueira e biofertilizante. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aquidabã, v. 4, n. 1, 2013.

SILVA, O. E. R. **Produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de capim elefante com vinhaça em reator em batelada**. 2020. 87 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

SOARES, R. *et al.* Produção de metano a partir de esterco bovino fresco no sul do estado de Roraima. **Fórum de Integração Ensino, Pesquisa, Extensão e Inovação Tecnológica do IFRR-e-ISSN 2447-1208**, v. 6, n. 1, 2019.

TOSELLO, M. E. C. *et al.* Influência de materiais recicláveis e vinhaça da cana de açúcar na resistência mecânica de tijolos ecológicos. **Research, Society and Development**, São Paulo, v.10, n.2, p. 1-11, 2021.

TUNES, C. R. **Produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de efluentes orgânicos em reator UASB**. 2017. 71 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2017.

VAN LIER, J. *et al.* Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, n. 4, p. 681-702, 2015.

VOLPINI, V. *et al.* Biomethane generation in an AnSBBR treating effluent from the biohydrogen production from vinasse: optimization, metabolic pathways modeling and scale-up estimation. **Renewable Energy**, v. 116, p. 288-298, Feb. 2018.

WATANABE, J. Y. **Geração de gás metano a partir de dejetos da pecuária leiteira e o aproveitamento energético no processo de ordenha mecânica**. 2022. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2022.

YANG, F. *et al.* Improved Buffering Capacity and Methane Production by Anaerobic Co-Digestion of Corn Stalk and Straw Depolymerization Wastewater. **Energies**, v. 11, p. 1751, 2018.