



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



**JOSÉ JOAQUIM DE SOUZA NETO**

**BIOGÁS: VETOR ENERGÉTICO EM UMA AGROINDÚSTRIA NA CIDADE DE  
POMBAL/PB**

**JOÃO PESSOA - PB**  
**FEVEREIRO - 2021**

**PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N°**

**JOSÉ JOAQUIM DE SOUZA NETO**

**BIOGÁS: VETOR ENERGÉTICO EM UMA AGROINDÚSTRIA NA CIDADE DE  
POMBAL/PB**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador (a):  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marta Célia Dantas Silva

**JOÃO PESSOA - PB**  
**FEVEREIRO - 2021**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S729b Souza Neto, José Joaquim de.

Biogás : vetor energético em uma agroindústria na cidade de Pombal/PB / José Joaquim de Souza Neto. - João Pessoa, 2021.

56 f. : il.

Orientação: Marta Célia Dantas Silva.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Biogás - Combustível. 2. Biodigestor sertanejo. 3. Energia térmica. 4. Viabilidade econômica. I. Silva, Marta Célia Dantas. II. Título.

UFPB/BC

CDU 662.767.2(043)

**JOSÉ JOAQUIM DE SOUZA NETO**

**BIOGÁS: VETOR ENERGÉTICO EM UMA AGROINDÚSTRIA NA CIDADE DE  
POMBAL/PB**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para obtenção do título de Mestre.

Aprovado em 26 de fevereiro de 2021.



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marta Célia Dantas Silva  
CEAR/UFPB  
Orientador (a)



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Joelda Dantas  
PNPD/PPGER/CEAR/UFPB  
Membro Interno



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marta Maria da Conceição  
CTDR/UFPB  
Membro Externo

**JOÃO PESSOA – PB**  
**FEVEREIRO - 2021**

## DEDICATÓRIA

Á meu pai, Augusto Fernandes Neto (*in memoriam*) com todo o meu amor e gratidão.

Á minha mãe, Carmem Lucia, essa mulher guerreira da qual tenho muito orgulho.

Aos meus irmãos, Cosmo Gustavo e Damião Augusto, por todo o apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por conceder-me o dom da vida, a disciplina e a determinação necessária para que eu pudesse chegar nesta importante fase da minha vida.

A minha família, por todo o apoio incondicional para que esse sonho se tornasse realidade. O amor, o carinho e o respeito de vocês me conduziram até aqui.

Agradeço a minha orientadora, Professora Dra. Marta Célia Dantas Silva, por acreditar e confiar em mim para a realização deste trabalho. Obrigado pelos ensinamentos, por todo o apoio, confiança e carinho.

Ao meu amigo o técnico Emanuel, que sempre esteve disposto a me ajudar. E que com as suas brincadeiras sempre procura ver o lado positivo dos problemas. Muito obrigado!

Obrigado a todos os irmãos que a pós-graduação me deu: Evandro, Thenison, Hervim e o Paulo. Vocês fazem parte dessa conquista, obrigado por toda a orientação, pela paciência e pelo companheirismo de sempre.

Obrigado às meninas da Agroindústria Bolo das Oliveiras, por todo o carinho para comigo, pela ajuda e pelo empenho nas atividades voltadas ao projeto.

Obrigado a todos os colegas e amigos da Universidade Federal de Paraíba.

Obrigado a todos os professores pelos conhecimentos repassados.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Os resíduos sólidos oriundos de atividades antrópicas, como a agropecuária, externam graves degradações ambientais, em virtude da grande porcentagem de material orgânico na sua composição. Por isso, torna-se imprescindível empregar tecnologias para o seu tratamento. À vista disso, os biodigestores mostram-se como uma opção eficaz de redução da carga orgânica. Perspectiva esta, observada na agroindústria Bolo das Oliveiras, na cidade de Pombal – PB, onde se encontra instalado um biodigestor modelo sertanejo. Assim sendo, este trabalho busca a maximização da produção de biogás, advindo do mesmo. A investigação ocorreu entre julho de 2020 a janeiro de 2021, perfazendo 210 dias. O biodigestor foi alimentado diariamente com dois tipos de diluição. Na primeira fase, foram inseridos 100 kg de dejetos bovinos diluídos em 200 litros de água, proporção de 1:2. Na segunda parte do experimento, foram utilizados 150 kg de esterco diluídos em 150 litros de água, proporção de 1:1. Em ambas as fases adotou-se o tempo de retenção hidráulica de 45 dias, após esse período foram realizadas análises quinzenalmente até o 210º dia. As análises do afluente e dos efluentes abrangem as físicas e químicas, bem com a qualificação e quantificação do metano produzido em ambas as fases. Os resultados obtidos mostraram poucas variações, no que concerne aos substratos, que podem estar associadas à incompleta digestão da massa orgânica em ambas as fases. A produção do biogás indicou chama de boa qualidade durante os 210 dias de investigação. No entanto, a fase 2 apresentou maior eficiência quanto a produção de metano, estando compatível com o indicado na literatura, tornando o equipamento ainda mais eficiente do ponto de vista ambiental, econômico e social. Aumentando assim, a renda das famílias associadas a agroindústria Bolo das Oliveiras com a redução de custos na produção de pães e bolos.

**Palavras-Chave:** Biodigestor sertanejo. Energia Térmica. Viabilidade econômica.

## ABSTRACT

Solid residues arising from anthropic activities, such as agriculture, generate serious environmental disturbances, due to the large percentage of organic material in their composition. Therefore, it becomes essential the use of technologies for its treatment. Then, biodigesters prove to be an effective option for reducing the organic load. Perspective, that was observe in the agroindustry Bolo das Oliveiras, in the city of Pombal - PB, where a sertanejo biodigester is installed. Thus, this work seeks to maximize the biogas production, coming from the same. The investigation took place between July of 2020 and January of 2021, totalizing 210 days. The biodigester was fed daily with two types of dilution. In the first phase, 100 kg of bovine dung diluted in 200 liters of water, 1: 2 ratio, were inserted. In the second part of the experiment, 150 kg of manure was used, diluted in 150 liters of water, 1: 1 ratio. In both phases the hydraulic retention time of 45 days was adopted, after that period analyzes were performed fortnightly until the 210th day. The analysis of the affluent and the effluents embraces the physical and chemical, as well as the qualification and quantification of the methane produced in both phases. The results obtained showed few variations, with regard to the substrates, which can be associated with the incomplete digestion of the organic mass in both phases. The biogas production showed a flame of good quality during the 210 days of investigation. However, phase 2 was more efficient in terms of methane production, being compatible with what is indicated in the literature, making the equipment even more efficient from an environmental, economic and social point of view. Thus, increasing the income of families associated with the Bolo das Oliveiras agroindustry with the reduction of costs in the production of bread and cakes.

**Key words:** Sertanejo biodigester. Thermal Energy. Economic viability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Biodigestor modelo canadense.....	24
Figura 2. Biodigestor modelo chinês.....	25
Figura 3. Biodigestor modelo indiano. ....	25
Figura 4. Biodigestor modelo sertanejo.....	26
Figura 5. Biodigestor sertanejo (A) e agroindústria Bolo das Oliveiras (B). ....	27
Figura 6. Localização da agroindústria Bolo das Oliveiras, zona rural da cidade de Pombal - PB, Brasil.....	28
Figura 7. Corte longitudinal do biodigestor sertanejo implantado na agroindústria (A) e sistema de purificação do biogás (B).....	29
Figura 8. Fluxograma da primeira fase do estudo. ....	31
Figura 9. Fluxograma da segunda fase do estudo.....	31
Figura 10. Kit utilizado para a análise de biogás.....	33
Figura 11. Proporção metano versus dióxido de carbono na primeira fase.....	40
Figura 12. Proporção metano versus dióxido de carbono na segunda fase. ....	41
Figura 13. Proporção gás sulfídrico versus gás amônia na primeira e segunda fase.....	43
Figura 14. Cor da chama na primeira fase.....	44
Figura 15. Cor da chama na segunda fase. ....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de conversão energética para o esterco bovino. ....	34
Tabela 2. Parâmetros físicos referentes ao biodigestor na primeira fase.....	35
Tabela 3. Parâmetros físicos referentes ao biodigestor na segunda fase. ....	37
Tabela 4. Parâmetros químicos referentes ao biodigestor na primeira fase. ....	38
Tabela 5. Parâmetros químicos referentes ao biodigestor na segunda fase.....	39

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

% - Porcentagem

°C – Graus Celsius.

A – Afluente.

AC – Alcalinidade Total.

C – Carbono

CCTA – Centro de Ciência e Tecnologia Agroalimentar

CE – Condutividade Elétrica.

CH<sub>4</sub> – Gás Metano.

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono.

E1 – Efluente 1.

E2 – Efluente 2.

E3 – Efluente 3.

E4 – Efluente 4.

E5 – Efluente 5.

g – Grama

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo.

GPS – Sistema de Posicionamento Global.

H – Hidrogênio

H<sub>2</sub>S – Gás Sulfídrico.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

K – Kelvin

kg – Quilograma.

KWh/m<sup>3</sup> – Quilowatts hora por metro cúbico.

L - Litro

m – Metro

m<sup>3</sup> – Metro Cúbico.

mg/L – Miligrama por Litro.

mS/cm – Milisiemens por Centímetro.

N – Nitrogênio

n – Número de mols.

NaOH – Hidróxido de Sódio

NH<sub>3</sub> – Gás Amônia.

O<sub>2</sub> – Oxigênio

OD – Oxigênio Dissolvido.

P – 13 – Botijão de gás GLP 13 quilogramas.

pH – Potencial Hidrogeniônico.

ppMV – Partes Por Milhão em Volume.

SF – Sólidos Fixos.

ST – Sólidos Totais.

SV – Sólidos Voláteis.

TRH – Tempo de Retenção Hidráulica.

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande.

Lb/in<sup>2</sup> = Libras por polegada quadrada.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1	GERAL.....	15
2.2	ESPECÍFICOS .....	15
3.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
3.1	RESÍDUOS .....	16
3.2	BIODIGESTÃO.....	16
3.2.1	Tipos de Biodigestão.....	17
3.3	BIOGÁS .....	20
3.4	BIOFERTILIZANTE .....	21
3.5	BIODIGESTORES ANAERÓBICOS .....	22
3.5.1	Biodigestor Canadense .....	23
3.5.2	Biodigestor Chinês.....	24
3.5.3	Biodigestor Indiano.....	25
3.5.4	Biodigestor Sertanejo .....	26
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
4.1	MUNICÍPIO DE POMBAL - PB.....	27
4.2	AGROINDÚSTRIA BOLO DAS OLIVEIRAS.....	28
4.3	CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO .....	29
4.4	CARACTERIZAÇÃO.....	31
4.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1	CARACTERIZAÇÃO.....	35
5.1.1	Análises Físicas .....	35
5.1.2	Análises Químicas .....	38
5.4	CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS.....	40
5.4.1	Método Volumétrico.....	40
5.4.2	Método Colorimétrico.....	42
5.5	QUANTIFICAÇÃO/VALORAÇÃO ECONÔMICA DO CH <sub>4</sub> .....	44
6.	CONCLUSÕES .....	48
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

## 1. INTRODUÇÃO

A agropecuária, no Brasil, caracteriza-se, dentre outros fatores, pela grande quantidade de resíduos sólidos orgânicos gerados, e sua disponibilidade permite que sejam utilizados para fins energéticos (VINZELJ *et al.*, 2020). Os incentivos fiscais, e lucro rápido no setor, contribuem para intensificar o aumento da quantidade de dejetos, gerando problemas de ordem sanitária, provocada pelos microrganismos patogênicos presentes no material orgânico, e ambiental, contribuindo para a contaminação do solo, água e ar (STURMER *et al.*, 2021).

A intensificação das atividades agropecuárias tem proporcionado um aumento considerável na produção de biomassa com elevada concentração de genes resistentes a antibióticos (ZHANG *et al.*, 2021). Estando relacionado a utilização em demasia de fármacos na criação de gado. Resultando em problemas sanitários, isso porque são descartados de forma inadequada e sem pré-tratamento, no solo e na água (DAWANGPA *et al.*, 2021).

Segundo Rattanaphan, Rungrotmongkol e Kongsune (2020), vários são os métodos que podem ser utilizados para o tratamento da biomassa. Dentre eles, a biodigestão anaeróbia se resume em uma técnica eficiente, isso porque permite a obtenção de dois produtos, biogás e biofertilizante (MISROL *et al.*, 2021). Além de atenuar os problemas associados ao descarte *in natura* destes resíduos, esse tratamento possibilita também, renda extra com a venda dos “créditos carbono” (VINZELJ *et al.*, 2020).

De acordo com Mensah *et al.* (2021), a geração de eletricidade a partir do biogás utilizando águas cinza pode solucionar, por exemplo, o encolhimento econômico e a qualidade de vida da população de qualquer país. Associado a isso, os autores também enfatizam que a utilização mundial de energia nos próximos 40 anos será 30% maior que a atual. Aumentando principalmente em países emergentes como, por exemplo: Índia, China e África do Sul.

A produção de biogás embasada na quantidade de matéria orgânica bovina disponível proporciona uma economia significativa e, conseqüentemente, menor submissão a fontes de energia proveniente de combustíveis derivados do petróleo (MCVOITTE *et al.*, 2019). Além da contribuição ambiental associada a tal projeto, isso porque de acordo com Bremond *et al.* (2021), o CH<sub>4</sub> apresenta um potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o CO<sub>2</sub>, gás esse resultante do processo de combustão do CH<sub>4</sub>.

No entanto, Mukeshimana *et al.* (2021), ressalta que existem algumas barreiras limitantes à difusão da biodigestão anaeróbia para a produção de bioeletricidade. Dificuldades financeiras, técnicas, socioculturais e institucionais estão entre as principais relatadas pelos

autores. Ao passo que o arranjo energético, diversificação de fontes de energia, é considerado questão indispensável para suprir as necessidades futuras (GANTENBEIN *et al.*, 2021).

O biogás é um composto gasoso com potencial combustível, composto principalmente por quatro gases: metano (CH<sub>4</sub>) 55 a 70%, gás carbônico (CO<sub>2</sub>) 30 a 45%, gás amônia (NH<sub>3</sub>) 0,5 a 2% e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) 0,5 a 2% (TAJMIRIAHI; MOMAYEZ; KARIMI, 2021). Podendo ser utilizado, após tratamento, para a geração de energia térmica, elétrica e como gás veicular (STURMER *et al.*, 2021). Sendo considerado, portanto, como uma fonte de energia limpa e compatível com as necessidades de propriedades rurais nos países em desenvolvimento (LEMMA; ARARSO; EVANGELISTA, 2021). O biofertilizante é um composto que pode ser utilizado no estado líquido ou sólido, rico em nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), assim como em micronutrientes (IOANNOU-TTOFA *et al.*, 2021).

Vários são os modelos de biodigestores utilizados no Brasil, conforme o tipo de resíduo, quantidade de resíduo, exigência técnica e investimento, podendo ser operados em regime de cargas contínuas, semicontínuas ou bateladas (RICARDO *et al.*, 2018).

Os biodigestores de batelada são construídos de forma mais simples comparado aos demais modelos, porém, deve-se tomar o mesmo cuidado com a análise preliminar do projeto, de forma que o mesmo seja rentável economicamente (LINDKVIST; KARLSSON, 2018). Os modelos de biodigestores mais difundidos são: o canadense, indiano e chinês (ZHANG *et al.*, 2021).

Porém, no Nordeste brasileiro, o modelo de biodigestor sertanejo, tem se tornado cada vez mais comum em pequenas propriedades rurais. Isso porque se trata de uma tecnologia adaptada as condições climáticas e econômicas da região.

É o caso da agroindústria Bolo das Oliveiras, onde se encontra instalado um biodigestor sertanejo de 14,8 metros cúbicos. Onde segundo os administradores, o consumo mensal de 14 botijões de gás de cozinha era considerado o principal gargalo econômico para a manutenção do empreendimento. Diante desta realidade, trabalhos de extensão e iniciação científica junto à Universidade Federal de Campina Grande e ao Parque Tecnológico da Paraíba foram desenvolvidos, no local, na tentativa de tornar a agroindústria um empreendimento rentável.

Os estudos mostraram que seria possível a implantação de um biodigestor no empreendimento, graças a grande quantidade de biomassa bovina disponível na região. Atendendo a necessidade parcial de energia térmica local, reduzindo a carga orgânica dos

dejetos bovinos e aumento a produtividade agrícola com o uso do biofertilizante resultante do processo anaeróbico.

Desta forma, esse trabalho buscou otimizar a cogeração de energia térmica advindo do biodigestor sertanejo implantado na agroindústria Bolo das Oliveiras/PB, sendo o mesmo reservado à utilização nos fogões adaptados para o funcionamento com gás metano proveniente do biodigestor sertanejo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

Cogeração de energia térmica proveniente do biogás produzido de um biodigestor sertanejo instalado na Agroindústria Bolo das Oliveiras, PB.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Analisar a eficiência da técnica de biodigestão anaeróbia mediante o substrato bovino coletado na comunidade rural Várzea Comprida das Oliveiras, localizada no Sertão da Paraíba;
- Avaliar a qualidade do biogás oriundo da técnica de biodigestão anaeróbia, por meio do kit desenvolvido por Kunz e Zulzbach;
- Investigar qual tipo de diluição proporciona maior produção de biogás;
- Quantificar a produção do metano nas duas etapas do processo por meio da equação econômica recomendada pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa;
- Mensurar a economia mensal com a produção do biogás por meio da comparação com o gás GLP, volume/preço, em botijões de 13 quilos.



### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 RESÍDUOS

A biomassa se apresenta de várias formas e pode ser encontrada em grande quantidade no Brasil e no mundo (RATTANAPHAN; RUNGROTMONGKOL; KONGSUNE, 2020). Graças ao seu potencial energético, a biomassa pode ser utilizada na geração de energia térmica, elétrica e mecânica incentivada pelos inúmeros impactos ambientais associados a submissão de fontes tidas como poluidoras (TAJMIRIAHI; MOMAYEZ; KARIMI, 2021).

De acordo com Giannoukos *et al.* (2021) os dejetos de suínos e bovinos se destacam por apresentar maior capacidade de produção de biogás quando comparados a outros resíduos sólidos. Mancini *et al.* (2019) explica que o volume de biogás produzido é diretamente proporcional a quantidade e a composição da biomassa, ou seja, não se faz necessário muitos animais para suprir a necessidade doméstica por energia térmica. No próprio ciclo de produção animal, confinamento e semiconfinamento, pode-se utilizar o biogás resultante do processo de biodigestão anaeróbia, como energia térmica ou elétrica (WANG *et al.*, 2021).

Os resíduos sólidos, semissólidos e líquidos, na sua maioria, são importantes fontes orgânicas e que podem ser utilizados como matéria prima na geração do biogás/biofertilizante (MIYAWAKI *et al.*, 2021). Muitas vezes, esse material, proveniente da atividade agropecuária, é descartado *in natura* no solo ou em corpos hídricos (STURMER *et al.*, 2021). Provocando impactos ambientais como, por exemplo: salinização do solo, desertificação e eutrofização (MANCINI *et al.*, 2019). A composição química, população microbiana e carga de nutrientes presentes nos resíduos sólidos, tem efeito direto no sucesso da biodigestão anaeróbia e na composição do biogás (GIANNOUKOS *et al.*, 2021)

#### 3.2 BIODIGESTÃO

A biodigestão é uma tecnologia conhecida e dominada há séculos por algumas civilizações. Contudo, a relevância por parte de alguns setores da sociedade é recente, principalmente devido aos benefícios econômicos, sociais e ambientais, que sua utilização proporciona (ZHANG *et al.*, 2021). Redução de custos na propriedade, aumento da renda familiar, saneamento rural, preservação do solo e de mananciais figuram entre os principais. Entretanto, Dawangpa *et al.* (2021), lembra que os dados referentes a propagação de microrganismos resistentes, por meio do composto orgânico, são inexistentes.

São poucos os trabalhos voltados para estudos que destacam a viabilidade econômica da inserção de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais (NINDHIA;

MCDONALD; STYLES, 2021). Contudo, para a instalação de um sistema de biodigestão é preciso estudar a implantação do projeto, para que sejam construídas ou adquiridas instalações mais econômicas, facilitando, portanto, o reembolso do investimento inicial.

A conversão da matéria orgânica em biogás se processa em quatro fases distintas e fundamentais, a saber: hidrólise, acidogênese, acetogênese e à metanogênese (GIANNOUKOS *et al.*, 2021). Ainda de acordo com Giannoukos *et al.* (2021), cada fase gera produtos específicos e únicos, os quais serão utilizados nas fases subsequentes do processo de biodegradação dos compostos orgânicos e, conseqüentemente, produção do biogás.

Os microrganismos que são os responsáveis pela manutenção de cada fase do processo de digestão são específicos, tais microrganismos utilizam enzimas intracelulares ou extracelulares para conseguirem quebrar os compostos presentes na matéria orgânica (PERAZZOLI *et al.*, 2020). Desta forma, os produtos gerados em cada fase do processo contribuem como impulsionadores para os grupos microbianos das fases seguintes, portanto, para que a fase seguinte se processe, é necessário que a fase anterior tenha sido realizada (SUNADA *et al.*, 2018).

Vale salientar a importância das bactérias no processo, onde a existência de certas substâncias provoca a inibição ou diminuição dos grupos em qualquer fase, podendo ter conseqüências sobre a taxa global e a eficiência do processo metabólico da biodigestão (ZHANG *et al.*, 2021).

### 3.2.1 Tipos de Biodigestão

#### a) **Biodigestão Aeróbia**

A biodigestão aeróbia é comumente utilizada para o tratamento ou estabilização de lodo ativado, resultante das estações de tratamento de esgoto (GAO *et al.*, 2020). Segundo Xu *et al.* (2020), atualmente a biodigestão aeróbia é empregada, principalmente, em pequenos e médios sistemas urbanos que utilizam o processo de lodos ativados como meio básico para a remoção do material orgânico presente no efluente doméstico. Trata-se de um método no qual o protoplasma de microrganismos vivos é oxidado, proporcionando energia necessária para a sustentação de atividades vitais no meio microbiano (ZHENG *et al.*, 2020).

O processo biológico que ocorre no interior do tanque de digestão, como o próprio nome sugere, deve ser completamente aeróbio. De acordo com Gao *et al.* (2020) no digestor, a aeração tem como objetivo o fornecimento de oxigênio aos microrganismos, evitando a

formação de zonas anaeróbias. O oxigênio é normalmente introduzido nos tanques por meio de aeradores mecânicos, utilizando ar comprimido (KHALAF *et al.*, 2021). Essa técnica torna-se mais vantajosa que a biodigestão anaeróbia no tratamento de efluentes, isso porque proporciona redução do TRH e maior eficiência na remoção da carga orgânica do composto (XU *et al.*, 2020). Contudo, no processo aeróbio não existe a formação de biogás, combustível que pode ser utilizado para a geração de energia térmica, elétrica e/ou mecânica (KOUMAKI *et al.*, 2021).

Após passar pelo tanque de aeração, na estação de tratamento, o efluente é conduzido a um decantador secundário, que tem a finalidade de separar o lodo tratado, sobrenadante, do não estabilizado no processo. Uma vez tratado e livre de impurezas, o efluente pode ser lançado ao corpo hídrico receptor, já o lodo depositado no fundo do decantador secundário, será reconduzido ao digester aeróbio. De acordo Koumaki *et al.* (2021), o sistema de lodos ativados pode se apresentar de duas formas: aeração convencional e aeração prolongada.

Segundo Khalaf *et al.* (2021), a aeração convencional empregada nas estações de tratamento de esgoto se caracteriza por apresentar um decantador primário, aeróbio ou anaeróbio, antes do tanque de aeração, diminuindo a carga orgânica do efluente. Já no sistema de aeração prolongada, não existe a necessidade de um decantador primário, pois o lodo biológico excedente não precisa ser estabilizado.

## **b) Biodigestão Anaeróbica**

A biodigestão anaeróbia é uma das inúmeras técnicas utilizadas atualmente para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos e que se torna atrativa por gerar biogás e biofertilizante (NIERYCHLO *et al.*, 2020). O biogás é um biocombustível que apresenta elevado poder calorífico, graças ao gás CH<sub>4</sub> presente em maior proporção na mistura gasosa (LI *et al.*, 2020). Já o biofertilizante pode ser utilizado na forma líquida ou sólida como fertilizante e/ou inseticida natural (RAJPUT; ZESHAN; HASSAN, 2021). A nível microbiológico, a biodigestão anaeróbia se processa em 4 fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (HUANG *et al.*, 2020).

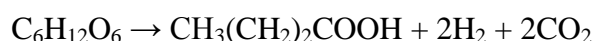
### **Hidrólise**

Moretti, Bertoncini e Abreu-Junior (2020) argumentam que na hidrólise, ligações moleculares complexas como carboidratos, proteínas e gorduras, são quebradas por enzimas

em um processo bioquímico, dando origem a compostos orgânicos simples como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares.

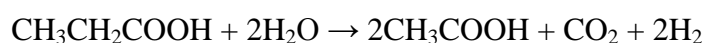
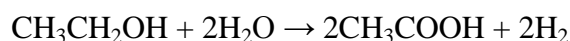
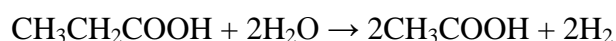
### **Acidogênese**

Na acidogênese, os produtos resultantes da fase anterior, são convertidos em ácido propanoico, ácido butanoico, ácido láctico, alcoóis, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> por meio de bactérias fermentativas (WANG *et al.*, 2021). As reações químicas na fase acidogênese resultantes da glicose, são:



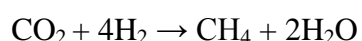
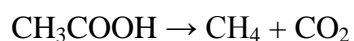
### **Acetogênese**

De acordo com Huang *et al.* (2020), a acetogênese se caracteriza por ser uma das mais importantes e complicadas do processo. Pois é necessário manter o equilíbrio do pH, próximo a neutralidade, para que as bactérias Archeas, responsáveis pela metanogênese, se desenvolvam. Esta fase é representada pelas seguintes reações:



### **Metanogênese**

A metanogênese é a última fase do processo anaeróbio e nela ocorre a formação de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O por meio de vários grupos de bactérias (YANG; CHEN; WEN, 2021). Podendo ser representada pelas reações abaixo:



A técnica de biodigestão anaeróbia da matéria orgânica presente nos resíduos possibilita a diminuição dos sólidos e das demandas química e bioquímica de oxigênio

(MISROL *et al.*, 2021). Reduzindo as emissões de gases poluentes do tipo:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , além de refrear a quantidade de microrganismos patogênicos no composto já estabilizado (GARDONI; AZEVEDO, 2019). Sendo isso possível, principalmente devido a algumas condições ambientais exigidas no processo, altas temperaturas e ausência de oxigênio (PANYAPING; MOONTEE, 2017).

Portanto, a biodigestão anaeróbia surge como uma alternativa vantajosa ao tratamento de compostos orgânicos. Pois, diminui o potencial poluidor e os problemas sanitários associados ao descarte inadequado de resíduos sólidos.

### 3.3 BIOGÁS

O biogás é um complexo gasoso obtido da técnica de decomposição de compostos orgânicos a partir de microrganismos (MANCINI *et al.*, 2019). Onde o mesmo é formado por vários gases, sendo os mais comuns e em maiores proporções, o metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e gás amônia ( $\text{NH}_3$ ) (MIYAWAKI *et al.*, 2021).

O material orgânico utilizado para a produção de biogás é encontrado no ambiente natural e em diversas formas: fezes de animais, resíduos sólidos urbanos e rural, de estações de tratamento de esgoto, agroindústrias, restos de alimentos entre outros (WUANG *et al.*, 2021).

O composto gasoso resultante do processo de degradação anaeróbia pode ser utilizado como meio de aquecimento, em geradores para a produção de energia elétrica e/ou como combustível veicular (PRABHU *et al.*, 2021). Apresenta elevado potencial para a geração de energia térmica, elétrica e/ou mecânica (GONZÁLEZ-CORTES *et al.*, 2021). Hassaneen *et al.* (2020) mostra que quanto mais elevado for o percentual de metano no biogás, entre 50 e 80%, maior será seu poder calorífico. Tornando-se mais eficiente que o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) durante o processo de aquecimento dos alimentos (SADIM *et al.*, 2019).

Lemma, Ararso e Evangelista (2021) também ressalta a importância do poder calorífico do biogás para a conversão energética, no entanto, faz-se necessário técnicas de purificação para aferir qualidade ao metano, especialmente na eliminação do  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . Segundo Feroldi *et al.* (2018), quando o biogás contém 96% de metano na sua composição, o mesmo equipara-se ao GNV (Gás Natural Veicular). Apesar do lento andamento de sua utilização na indústria automobilística, o biogás livre de impurezas (biometano) apresenta perspectivas de crescimento no setor. Isso ocorre devido aos incentivos tecnológicos nos motores a combustão, onde os sistemas, atuais, podem operar com GNV e/ou biometano

(BREMOND *et al.*, 2021). Segundo Blazquez *et al.* (2021) e Mukeshimana *et al.* (2021) a utilização de fontes alternativas e renováveis para a geração de energia elétrica, térmica e/ou mecânica, desponta como uma alternativa socioeconômica e ambiental. Tornando-se adequada porque permite reduzir custos associados ao processo produtivo e aumentar a produtividade.

O biogás, ao ser comparado a outros tipos de energia, apresenta particularidades físicas e químicas únicas, além de ser considerado um biocombustível limpo e renovável, diferentemente dos hidrocarbonetos (RICARDO *et al.*, 2018). Obtido por meio de uma técnica natural e simples, do ponto de vista tecnológico, é visto como uma alternativa para comunidades rurais carentes que sofrem com a falta de energia térmica/elétrica, gerando economia e agregando valor econômico ao imóvel rural (NINDHIA; MCDONALD; STYLES, 2021). Feroldi *et al.* (2018) lembra que a melhoria das pesquisas voltadas para os combustíveis, no Brasil, é necessária principalmente quando consideramos as pequenas agroindústrias e consumidores.

A degradação da matéria orgânica, em biodigestores, tem por objetivo a produção do biogás e do biofertilizante em quantidade e qualidade compatíveis com a necessidade local (GUO *et al.*, 2021). Sendo necessário, de acordo com Guo *et al.* (2021), o acompanhamento técnico, caracterização da biomassa utilizada no processo e o controle de parâmetros físicos e químicos. Nindhia, McDonald e Styles (2021), em suas pesquisas em Bali, Indonésia, relata que o apoio político para reutilização de esterco bovino proporcionou a construção de pequenas unidades de biodigestores anaeróbios (6 m<sup>3</sup>) em mais de 752 criadores. Juntos, esses biodigestores produziram o equivalente a 75.482 m<sup>3</sup> de metano.

### 3.4 BIOFERTILIZANTE

Rajput, Zeshan e Hassan (2021) explicam que na digestão anaeróbia o carbono, um dos principais constituintes da matéria orgânica, é convertido em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, o que proporciona aumento de nitrogênio, fósforo e potássio no biofertilizante. Esse produto, estabilizado, difere dos produtos químicos convencionais empregados na produção agrícola, pois garante o melhoramento dos atributos físicos e químicos do solo, aprimorando o manejo e potencializando a produção de insumos (PAES *et al.*, 2020).

O biofertilizante também é utilizado na produção orgânica, na eliminação de pragas agrícolas e como fomentador de macro e micronutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal (GUO *et al.*, 2021). Possibilitando redução de custos, com a compra de insumos, e equilíbrio ambiental com a diminuição da fronteira agrícola (JANKE *et al.*, 2018). Segundo

GIROTTO *et al.* (2018), a utilização do biofertilizante em solos desgastados promove o melhoramento das suas características físicas, químicas e biológicas. No entanto, segundo Perazzoli *et al.* (2020), quando se é verificado níveis elevados de sais no biofertilizante, e o mesmo é utilizado diretamente no solo, poderá causar impactos ambientais como, por exemplo, salinização e futuramente desertificação da área. Sendo indicado, portanto, pós-tratamento antes da sua aplicação.

### 3.5 BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

Segundo Moretti, Bertoncini e Abreu-Junior (2020), no Brasil, programas governamentais e privados voltados para o fornecimento de energia elétrica, no meio rural, tiveram início ainda no século XX e não foram finalizados. Proporcionando acesso a serviços básicos e fundamentais, iluminação e conforto térmico, a uma parcela da população residente na zona rural. No entanto, vale salientar que o fornecimento de energia elétrica a localidade urbana torna-se menos complexo e mais econômico quando comparado a zona rural das cidades (GARDONI; AZEVEDO, 2019). Por esse motivo, tecnologias como os biodigestores surgem como solução a comunidades que se encontram distantes dos centros urbanos (MANCINI *et al.*, 2019).

Os biodigestores são equipamentos empregados para impulsionar a digestão anaeróbica e o confinamento do biogás, os quais salientam uma repartição isolada que não permite a existência de oxigênio no seu interior (DITTMER; KRUMPEL; LEMMER, 2021). Sendo que os mesmos aparecem como uma opção para pequenos, médios e grandes produtores rurais, assim como para agroindústrias que carecem de uma grande quantidade de lenha e/ou gás GLP (STURMER *et al.*, 2021). Segundo Nierychlo *et al.* (2020), atualmente os biodigestores anaeróbios também são empregados para o tratamento de lodo ativado em estações de tratamento de esgoto, devido a redução de custos operacionais com a sua implantação. Ligado à necessidade de obtenção de uma fonte de energia renovável, barata, considerável e que atenda a demanda energética de produtores rurais, com efetividade econômica, ambiental e social (GANTENBEIN *et al.*, 2021).

Os biodigestores são empregados e implantados especialmente devido a importância econômica, ligada à contenção de custos com a compra do gás de cozinha. No entanto, vale ressaltar sua importância na substituição da lenha em fogões/fornos, a qual ocasiona impactos ao meio ambiente e a saúde das pessoas (LEMMA; ARARSO; EVANGELISTA, 2021). Vários são os seguimentos onde o biogás pode ser utilizado, porém, ainda existem obstáculos que dificultam a disseminação de biodigestores, por exemplo: custo de instalação, educação

ambiental, conscientização da população e mão de obra qualificada no acompanhamento técnico (FEROLDI *et al.*, 2018).

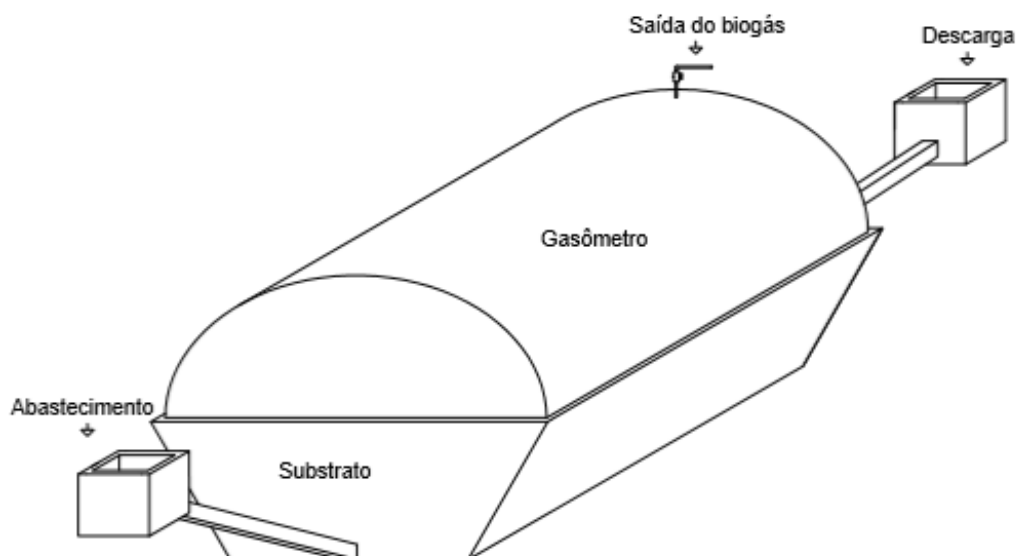
De acordo com Morgan JN *et al.* (2018), esses equipamentos fornecem biogás e biofertilizante, em escala muitas vezes excedente a carência da propriedade ou da agroindústria, assegurando uma gestão ambientalmente acertada e economicamente lucrativa em pouco tempo de funcionamento. Abatendo os custos de todo o seguimento produtivo e colaborando para a sustentabilidade e desenvolvimento socioeconômico local. Segundo Santos *et al.* (2018), a agricultura moderna é responsável por boa parte da eletricidade demandada no país. Só a irrigação, por exemplo, representa metade dos gastos com a produção. Por isso, é exponencial a necessidade de utilização de fontes renováveis, proporcionando redução de impactos ambientais causados pela liberação de gases poluentes na atmosfera (PRABHU *et al.*, 2021).

Segundo Arelli *et al.* (2018), os exemplares, biodigestores, mais utilizados e conhecidos no Brasil são o canadense, o chinês e o indiano. Além desses há o modelo sertanejo altamente utilizado no Nordeste brasileiro devido as suas características construtivas. O desenvolvimento do modelo de biodigestor sertanejo é atribuído a organizações não governamentais que atuam no combate a seca na região nordeste do Brasil. Existindo, portanto, poucos trabalhos na literatura relacionados a real capacidade de produção do biogás quando utilizado o biodigestor modelo sertanejo.

### 3.5.1 Biodigestor Canadense

O biodigestor canadense (Figura 1) é o modelo mais utilizado por pequenos, médios e grandes produtores rurais no Brasil (MORETTI; BERTONCINI; ABREU JUNIOR, 2020).



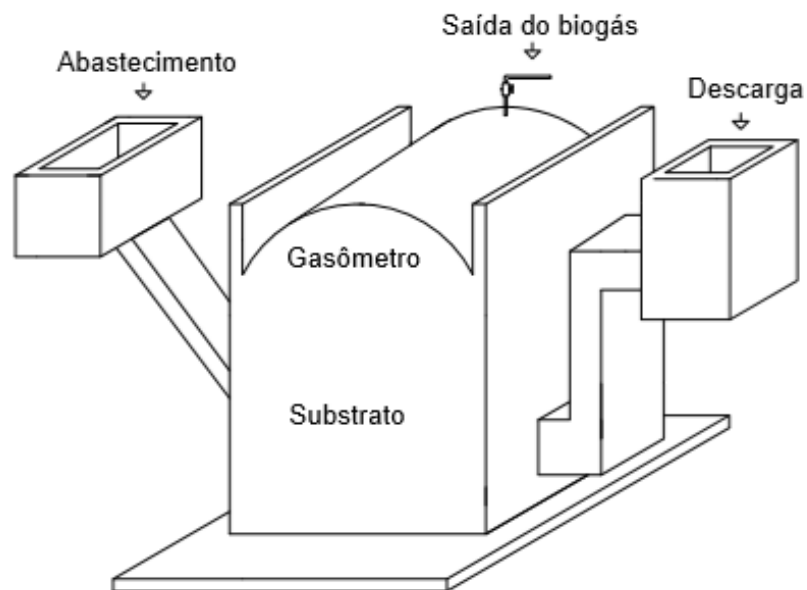


**Figura 1.** Biodigestor modelo canadense. Fonte: Adaptado de Moretti, Bertoncini e Abreu-Junior (2020).

Isso acontece por se tratar de um exemplar construído em manta de PVC adaptável, sendo de fácil acomodação e revelando alta durabilidade, ainda que instalado em áreas com temperatura diferente do seu local de origem (BATISTA *et al.*, 2019). Validando a sua implantação, por exemplo, no semiárido brasileiro onde as temperaturas médias anuais atingem 28 °C (IBGE, 2020). No entanto, Guimarães, Maia e Serra (2018) propõem a implantação do biodigestor canadense abaixo da superfície do solo, dificultando as possíveis alterações da temperatura ao longo do dia, para a maximização do sistema de degradação do material orgânico e consequentemente a produção do biogás.

### 3.5.2 Biodigestor Chinês

O biogestor Chinês (Figura 2) evidencia aspecto rústico por ser arquitetado em alvenaria, não apresenta partes móveis e nem aparatos tecnológicos que potencializam o processo de biodigestão (IOANNOU-TTOFA *et al.*, 2021).

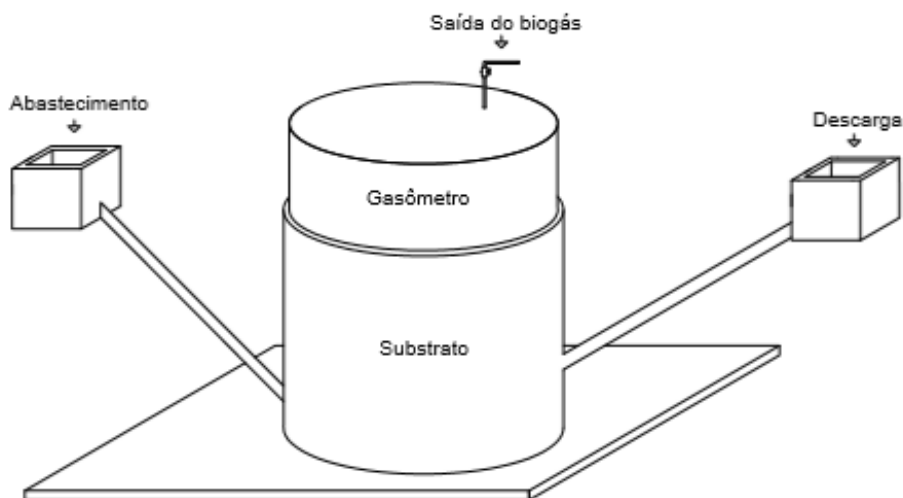


**Figura 2.** Biodigestor modelo chinês. Fonte: Adaptado de Ioannou-Ttofa *et al.* (2021).

Por isso, para fazer uso deste modelo de biodigestor deve-se ter atenção aos critérios técnicos durante e após sua implantação (GUIMARÃES; MAIA; SERRA, 2018). Uma vez que o equipamento deverá trabalhar sob alta pressão e com variações bruscas de temperatura, podendo originar transtornos, como rachaduras e perdas do gás produzido (IOANNOU-TTOFA *et al.*, 2021).

### 3.5.3 Biodigestor Indiano

O biodigestor indiano (Figura 3) é constituído por uma campânula flutuante, que se movimenta verticalmente com a produção e consumo do biogás.

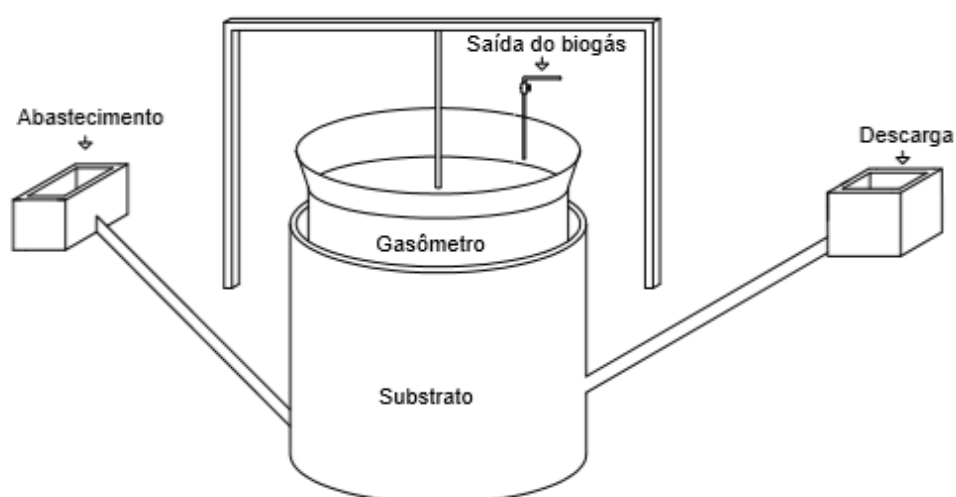


**Figura 3.** Biodigestor modelo indiano. Fonte: Adaptado de Sales, 2017.

O gasômetro pode ser selado com a própria biomassa ou com água, no entanto, faz-se necessário a construção de um segundo esqueleto (PAES *et al.*, 2020). Ainda segundo Paes *et al.* (2020), outro mecanismo característico, deste equipamento, é o tanque de fermentação que é dividido ao meio por um obstáculo, proporcionando a agitação do composto orgânico dentro do reservatório.

### 3.5.4 Biodigestor Sertanejo

O biodigestor modelo sertanejo (Figura 4) contempla as mesmas particularidades do biodigestor modelo indiano.



**Figura 4.** Biodigestor modelo sertanejo. Fonte: Adaptado de Mattos e Júnior, 2011.

A diferença está nas características construtivas, substituição de material, e no valor investido, compatível com a realidade de comunidades dependentes de programas assistencialistas. Uma das principais adaptações é a utilização de placas na sua construção, tecnologia já utilizada em cisternas e conhecida pelas famílias que vivem na região nordeste do Brasil. O biodigestor sertanejo foi construído para atender as necessidades de pequenos e médios produtores rurais, com investimento médio inferior aos demais modelos encontrados no mercado (MATOS; JÚNIOR, 2011). No entanto, são poucos os estudos específicos sobre o biodigestor sertanejo e o seu real impacto social em comunidades rurais carentes.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na comunidade rural Várzea Comprida dos Oliveiras, especificamente na Agroindústria Bolo das Oliveiras, localizada no município de Pombal no estado da Paraíba.

O biodigestor sertanejo (Figura 5A) foi implantado na agroindústria Bolo das Oliveiras (Figura 5B), zona rural da cidade de Pombal – PB. A investigação ocorreu entre 01 de julho de 2020 a 26 de janeiro de 2021, totalizando 210 dias em meio às condições climáticas da região, onde de acordo com Ribeiro Filho *et al.* (2017), qualifica-se como sendo clima semiárido quente e seco e com precipitação pluviométrica média anual de 749,00 mm.

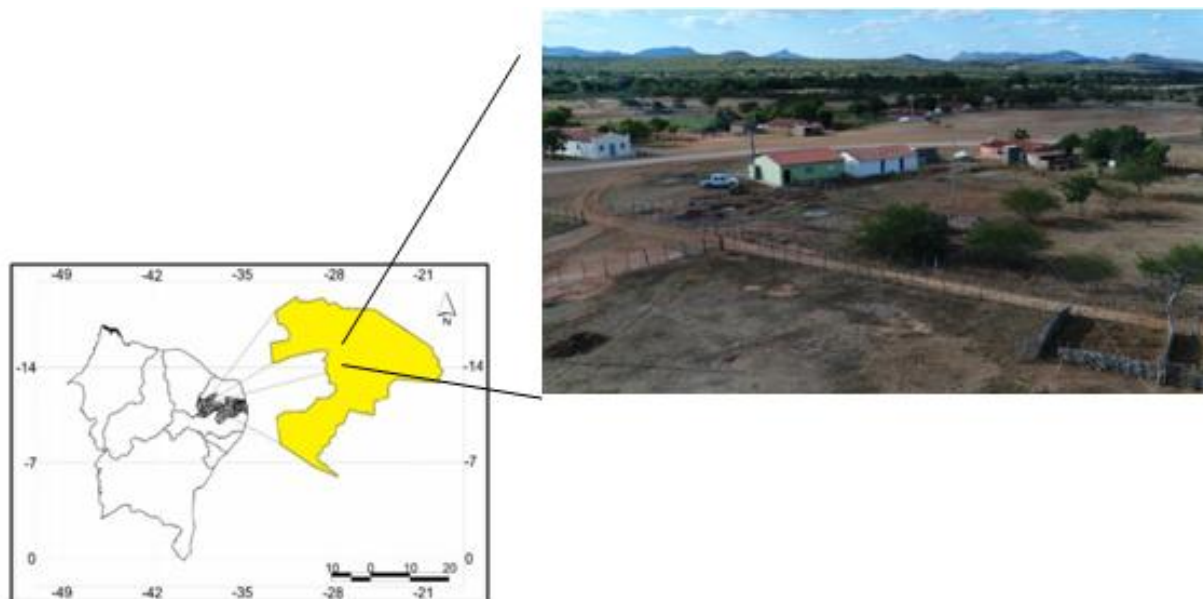


**Figura 5.** Biodigestor sertanejo (A) e agroindústria Bolo das Oliveiras (B). Fonte: Acervo do Autor.

##### 4.1 MUNICÍPIO DE POMBAL - PB

Pombal possui uma área de 894,099 km<sup>2</sup>. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população estimada para o ano de 2020 foi de 32.802 habitantes e seu Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) é 0,634 (IBGE, 2020). A cidade caracteriza-se por ter uma economia dependente do setor agrícola e do comércio local, assim como de algumas fábricas e laticínios instalados na cidade, contribuindo para um PIB per capita de R\$ 12.083,64 (IBGE, 2020).

As coordenadas geográficas do local de realização do experimento são dadas em Graus, Minutos e Segundos: Longitude 37°51'46,86" Oeste e Latitude 6°45'24,19" Sul (Figura 6). Estas coordenadas foram obtidas a partir de um dispositivo móvel de navegação via satélite, um GPS Garmin (marca) Map 64S (modelo).



**Figura 6.** Localização da agroindústria Bolo das Oliveiras, zona rural da cidade de Pombal - PB, Brasil. Fonte: Google Earth (2021).

#### 4.2 AGROINDÚSTRIA BOLO DAS OLIVEIRAS

A agroindústria Bolo das Oliveiras (Figura 5B), de acordo com o relato das responsáveis, associadas, utilizava 14 botijões de gás GLP (P – 13) por mês na produção de massas. Proporcionando maiores gastos no processo produtivo, menos lucro aos associados e geração de gases poluentes para a atmosfera. Contudo, graças a parcerias com Universidade Federal de Campina Grande e ao Parque Tecnológico da Paraíba, a agroindústria Bolo das Oliveiras é umas das pioneiras, no estado da Paraíba, a utilizar energia renovável, térmica e elétrica, em todo o processo produtivo.

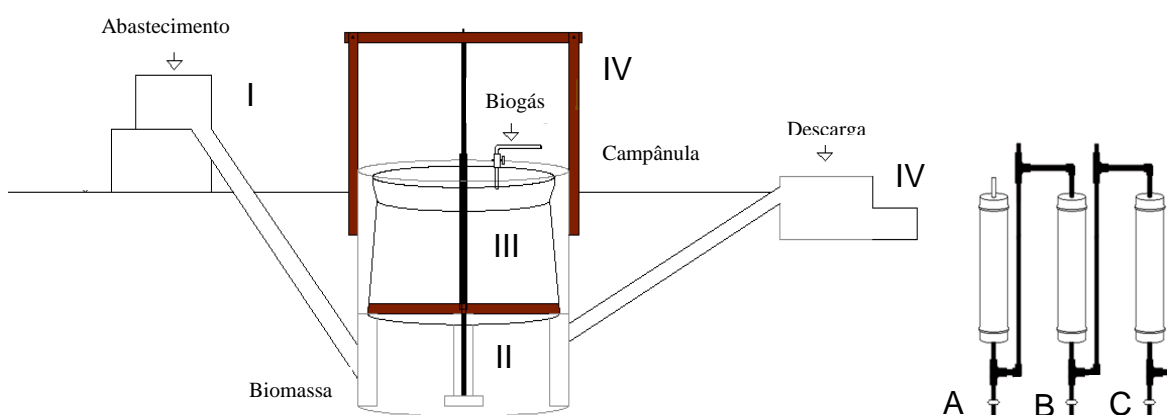
Diante do exposto o biodigestor sertanejo surgiu como uma das alternativas para a agroindústria Bolo das Oliveiras devido a sua necessidade eminente de redução de custos, associado à disponibilidade em grande quantidade de matéria orgânica de origem bovina, na própria comunidade rural. Onde os estudos de viabilidade de implantação do biodigestor na agroindústria, realizados por pesquisadores da Universidade Federal de Campina Grande e do Parque Tecnológico da Paraíba, para a geração de energia térmica se mostraram satisfatórios.

Assim, na comunidade foi implantado um módulo de biodigestor sertanejo com um volume de  $14,8 \text{ m}^3$ , o qual necessita de uma carga diária de  $0,44 \text{ m}^3$  de biomassa (JÚNIOR, 2017) para que seja gerado, segundo Pinas *et al.* (2018), o equivalente energético a 7,3 botijões de gás de cozinha por mês utilizando como matéria prima o esterco bovino. Produção essa que perfaz uma economia de mais de 50% com a compra do gás GLP para o empreendimento.

A investigação utilizando dois tipos de diluição, a primeira indicada pelo manual do equipamento e a segunda recomendada pela literatura, permitiu definir a real produção de  $\text{CH}_4$  no biodigestor sertanejo. Norteador qual tipo de diluição proporcionou maiores benefícios econômicos, sociais e ambientais aos associados a agroindústria. Assim com também, evidenciou a inexistência de problemas técnicos relacionados à redução do volume de água utilizado no processo.

### 4.3 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O equipamento, implantado na agroindústria, com  $14,8 \text{ m}^3$  de volume foi alimentado com esterco bovino de 10 animais na primeira fase e 15 animais na segunda fase, oriundo das propriedades pertencentes aos membros da Associação Comunitária Rural de Várzea Comprida dos Oliveiras que administram a agroindústria Bolo das Oliveiras. O biodigestor sertanejo (Figura 7A) possui: caixa de carga de  $0,25 \text{ m}^3$  (I), câmara de fermentação com volume de  $14,8 \text{ m}^3$  (II), campânula de  $5 \text{ m}^3$  (III), corta chama (IV), caixa de descarga de  $0,38 \text{ m}^3$  (V) e um sistema de purificação de biogás (Figura 7B).



**Figura 7.** Corte longitudinal do biodigestor sertanejo implantado na agroindústria (A) e sistema de purificação do biogás (B). A) Hidróxido de sódio; B) Filtro de  $\text{H}_2\text{S}$ ; C) Coluna de água. Fonte: Autor, 2021.

O sistema de purificação do biogás (Figura 7B), adaptado da literatura, tem como objetivo retirar do composto gasoso produzido durante o experimento, gases indesejáveis como a  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}_2$ . Elevando o poder calorífico do biogás e limitando a formação de subprodutos com a futura combustão do metano como, por exemplo: óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) (GONZÁLEZ-CORTÉS *et al.*, 2021). Os filtros foram construídos com material reciclado, tubos de PVC, registros e adaptadores de volume.

Seguindo as recomendações de Lindkvist e Karlsson (2018), no primeiro filtro (a) foi

introduzido hidróxido de sódio (NaOH) com o objetivo de retirar parte do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); o segundo (b) foi preenchido com palha de aço, material esse que reage com o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) presente em menor proporção no biogás; e no terceiro filtro (c) contém água proveniente do sistema de tratamento de águas residuais da agroindústria, e que tem por finalidade retirar outros gases presentes na mistura gasosa além de servir como um corta-chamas, caso aja refluxo de chama dos fornos. Devido à distância que o biodigestor se encontra da agroindústria, aproximadamente 38 metros de distância, foi instalado um compressor para que o volume de gás que chega aos fornos permaneça constante e em quantidade ideal, 110 Lbf/in<sup>2</sup>.

O acompanhamento da pesquisa ocorreu em duas etapas adotando-se dois tipos de diluição ao resíduo bovino. O primeiro tipo de diluição, 2:1, adotado foi recomendado pelo manual técnico de construção do biodigestor rural (JÚNIOR, 2017), tendo como justificativa o perfeito funcionamento hidráulico do equipamento. O segundo tipo de diluição, 1:1, é recomendado pela literatura quando a biomassa utilizada no processo é o esterco bovino.

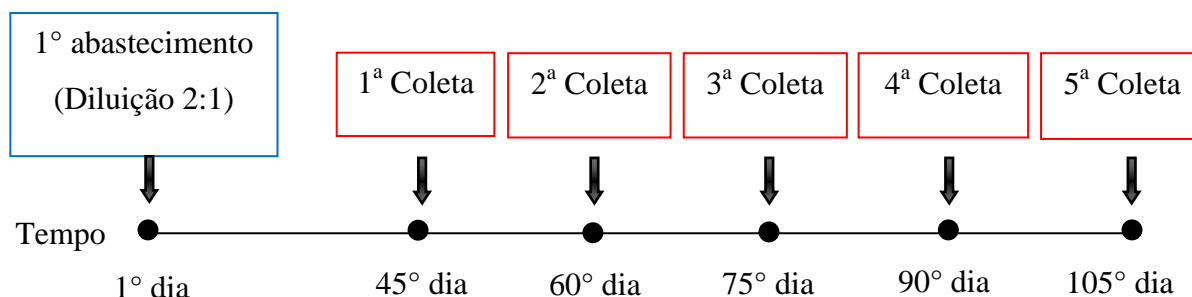
Porém, as mesmas, ocorreram de forma contínua e padronizada com um volume diário de 0,3 m<sup>3</sup> de biomassa, esterco diluído em água proveniente de um poço artesiano da agroindústria. O Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) adotado, nas duas fases, foi de 45 dias, devido ao volume do tanque de digestão e a quantidade de excrementos que poderia ser coletada. As análises físicas e químicas dos resíduos foram feitas, em 5 repetições, de acordo com as orientações de Baird *et al.* (2017).

O biofertilizante resultante das duas etapas do processo foi utilizado na produção orgânica de hortaliças e como insumo agrícola no cultivar de capim-elefante e cana-de-açúcar para a produção de silagem, na própria comunidade rural. Não foi realizada a caracterização de micro e macronutrientes do composto orgânico, porém, os agricultores relatam aumento da produção por m<sup>2</sup> de área plantada e redução de pragas nas lavouras.

## FASE 1

Na primeira fase o fermentador foi alimentado com aproximadamente 100 kg de biomassa bovina, gerados por 10 animais em fase de lactação, coletada na comunidade rural, local da agroindústria, acrescidos a 200 litros de água. A diluição adotada foi de 2:1, dois litros de água para cada quilograma de esterco bovino. Após 45 dias de início do abastecimento do biodigestor com a diluição adotada, tempo necessário para que a caixa de descarga começasse a receber o composto orgânico, as coletas do afluente, dos efluentes e do

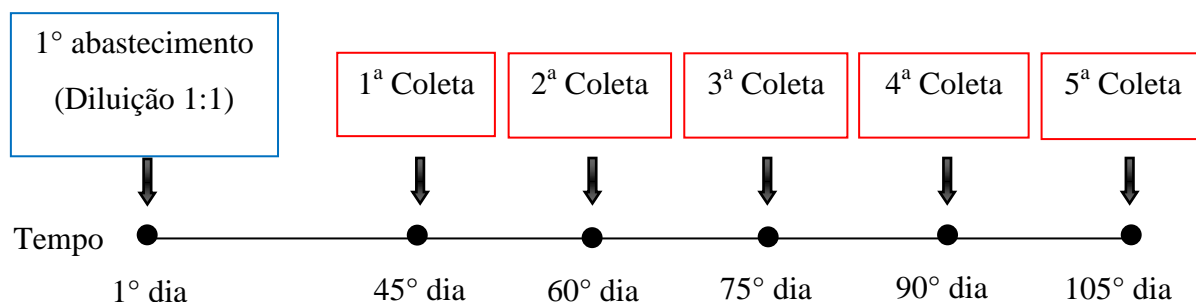
biogás eram realizadas, a cada 15 dias, sendo finalizada com 105 dias de inspeção (Figura 8). As coletas ocorreram da seguinte forma: 45° dia (1ª coleta), 60° dia (2ª coleta), 75° dia (3ª coleta), 90° dia (4ª coleta) e no 105° dia (5ª coleta).



**Figura 8.** Fluxograma da primeira fase do estudo.

## FASE 2

Na segunda fase o tanque de digestão foi alimentado com 150 kg de esterco, provenientes de 15 animais lactantes, dos criadouros locais, diluídos em 150 litros de água. A diluição foi de 1:1, um litro de água para cada quilograma de biomassa. Depois de 45 dias de encerramento da primeira etapa e já sendo alimentado com a segunda diluição 1:1, as coletas do afluente, dos efluentes e do biogás tiveram início. Sendo repetidas quinzenalmente, até completarem quantitativo de cinco coletas (Figura 9). Sendo assim, as mesmas se procederam da seguinte forma: 45° dia (1ª coleta), 60° dia (2ª coleta), 75° dia (3ª coleta), 90° dia (4ª coleta) e no 105° dia (5ª coleta).



**Figura 9.** Fluxograma da segunda fase do estudo.

## 4.4 CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios físicos e químicos dos substratos, assim como a caracterização do biogás, foram realizados nos Laboratórios de Energias Renováveis e de Química, pertencentes à



Escola Estadual Cidadã Integral Técnica Chiquinho Cartaxo, Sousa - PB. Enquanto, a do biogás foi realizada *in loco* nos dias de coleta.

As análises físicas e químicas dos substratos foram realizadas, em 5 repetições, de acordo com as recomendações de Baird *et al.* (2017). Foram analisadas as características físicas de sólidos fixos (SF, incineração em forno mufla, 550 °C/ 1 h), sólidos totais (ST, incineração em forno mufla, 550 °C/ 1 h; e secagem em estufa, 105 °C/ 24 h) e sólidos voláteis (SV), considerando as Equações 1, 2 e 3, respectivamente. Também foram avaliadas as características físicas e químicas de condutividade elétrica (CE, leitura direta em eletrodo), oxigênio dissolvido (OD, leitura em medidor portátil sob condições aeróbias controladas, 20 °C/ 5 dias), pH (pHmetro, calibrado com soluções tampão de pH 4.0, 7.0 e 10.0) e alcalinidade total [AT, método volumétrico, utilizando solução padronizada de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)], considerando a Equação 4.

$$SF \text{ (mg. L}^{-1}\text{)} = \frac{(P_2 - P_0) \times 10^6}{V_a} \quad (1)$$

$$ST \text{ (mg. L}^{-1}\text{)} = \frac{(P_1 - P_0) \times 10^6}{V_a} \quad (2)$$

$$SV \text{ (mg. L}^{-1}\text{)} = \frac{(P_1 - P_2) \times 10^6}{V_a} \quad (3)$$

$$AT \text{ (mg. L}^{-1}\text{ de HCO}_3\text{)} = \frac{V \times M \times 61000}{V_a} \quad (4)$$

Em que: P<sub>0</sub> – Peso inicial;

P<sub>1</sub> – Peso seco;

P<sub>2</sub> = Peso final;

V<sub>a</sub> – Volume da amostra;

V – Volume de base utilizada na titulação;

M – molaridade da base;

6100 – massa de HCO<sub>3</sub> em mg.

A quantificação do biogás, pós-sistema de purificação, foi realizado por meio do kit desenvolvido por Kunz e Sulzbach (2007) (Figura 10 A e B), onde foi possível a confirmação da presença de quatro constituintes na mistura gasosa, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Sendo realizada

por dois métodos distintos: colorimétrico, para a determinação da  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2\text{S}$  e volumétrico, determinando a porcentagem de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ .

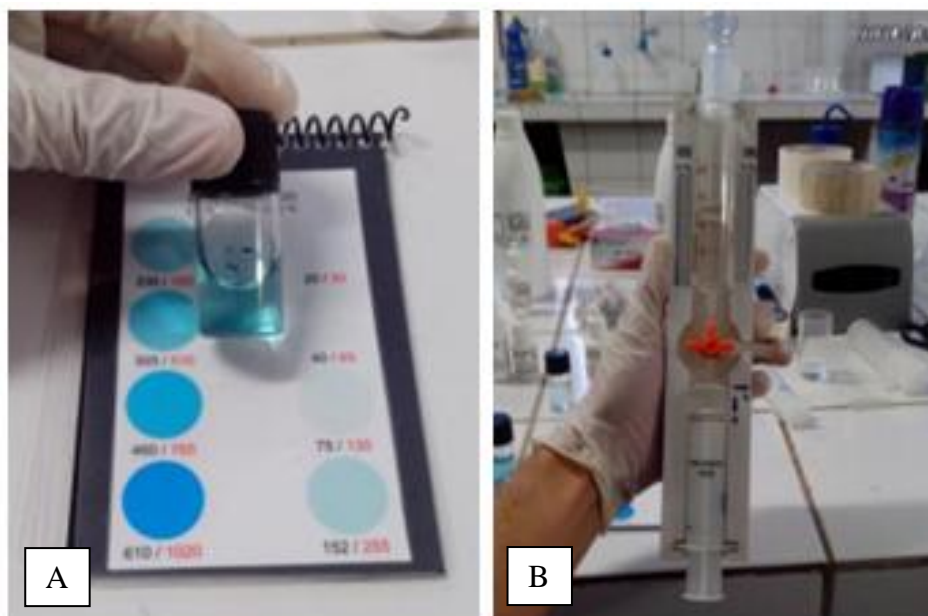


Figura 10. Kit utilizado para a análise de biogás. Fonte: Sales, 2017.

O acompanhamento da coloração da chama produzida com a combustão do biogás foi realizado nos fogões e fornos do empreendimento. A quantificação de  $\text{CH}_4$  em  $\text{m}^3$  foi efetuada por meio da Equação 5 e 6, utilizando os dados da Tabela 1, com o objetivo de avaliar viabilidade econômica da cogeração de energia térmica em ambas as fases do estudo, recomendado pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), adaptado por Colatto e Langer (2011).

$$\text{CH}_4 \text{ (m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}\text{)} = \frac{Qa \times Qd \times Et \times C \times Pb}{VE} \quad (5)$$

$$d = \frac{m}{V} \quad (6)$$

Em que:  $Qa$  – Quantidade de animais;

$Qd$  – Quantidade de dias;

$Et$  – Esterco total ( $\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{unidade geradora}^{-1}$ );

$C$  – % de  $\text{CH}_4$  no biogás;

$Pb$  – Produção de biogás ( $\text{kg biogás} \cdot \text{kg esterco}^{-1}$ );

$VE$  – Volume específico de  $\text{CH}_4$  ( $0,67 \text{ kg CH}_4^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{CH}_4^{-1}$ );

d – Densidade de CH<sub>4</sub> (0,72 kg.m<sup>-3</sup>);

m – Massa;

V – Volume.

**Tabela 1.** Valores de conversão energética para o esterco bovino.

Material	kg de esterco/dia.cabeça	kg de CH <sub>4</sub> /kg de esterco	Concentração de CH <sub>4</sub> (Maior valor/fase)
Fase 1: Bovinos	10	0,037	78%
Fase 2: Bovinos	10	0,037	83%

Fonte: CENBIO. Adaptado por Colatto e Langer (2011).

#### 4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Assim como Xiao *et al.* (2018) e Hassaneen *et al.* (2020) a aferição estatística dos resultados físicos e químicos do composto orgânico, coletado no tanque de entrada e saída do biodigestor, e dos gases presentes na mistura gasosa foi explorada, em 5 repetições, por meio de Análise de Variância (ANOVA), em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Por meio do *software Assistat* versão 7.7 beta, utilizando o teste de comparação de média *Tukey* em nível de 5% de significância ( $p < 0,05$ ).

A utilização de programas estatísticos é fundamental na análise de dados experimentais. Segundo Yu *et al.* (2020) vários são os programas profissionais que atendem a essa demanda, por exemplo: SAS, SAEG, STATISTICA, SPSS e XLSTAT. No entanto, a aquisição de alguns desses programas se torna inviável devido ao elevado custo de aquisição e manutenção, dificultando sua utilização por parte da literatura. Tornando a utilização de programas gratuitos e confiáveis comum, por parte dos pesquisadores.

É o caso do *software Assistat* versão 7.7 beta, ferramenta utilizada para analisar dados experimentais, principalmente fatores não controlados que necessitam de análises estatísticas (CEDRAN; RODRIGUES; BICAS, 2021; NUNES *et al.*, 2021). De acordo com Nunes *et al.* (2021), embora possa ser utilizado por várias áreas do conhecimento, o *software Assistat* é comumente destinado à pesquisa agropecuária por contemplar os principais modelos da análise de variância (ANOVA) e afins. Possuindo também no seu pacote de serviços a análise de componentes principais (PCA) e os mais difundidos testes estatísticos não paramétricos.

Os softwares utilizados para análise estatística de dados experimentais faz uma análise sólida dos parâmetros analisados e torna fácil a interpretação dos resultados, até mesmo para aqueles com um mínimo de conhecimento estatístico (YU *et al.*, 2020).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO

#### 5.1.1 Análises Físicas

Nas Tabelas 2 e 3, são apresentadas as concentrações de ST, SF, SV CE do afluentes (A) e dos efluentes (E1, E2, E3, E4 e E5) analisados na primeira e segunda fase do experimento respectivamente.

**Tabela 2.** Parâmetros físicos referentes ao biodigestor na primeira fase.

Amostras	Tempo (dias)	Parâmetros Físicos			
		ST (mg/L)	SF (mg/L)	SV (mg/L)	CE (mS/cm)
A	-	70,98 ± 0,71 a	14,41 ± 0,35 d	56,57 ± 0,38 a	3,76 ± 0,18 c
E1	45	19,62 ± 0,08 f	6,96 ± 0,06 f	12,65 ± 0,10 f	4,05 ± 0,10 a
E2	60	27,03 ± 0,46 e	7,98 ± 0,50 e	19,05 ± 0,94 e	3,91 ± 0,14 b
E3	75	70,61 ± 0,98 b	18,01 ± 0,52 b	52,61 ± 0,49 b	3,42 ± 0,33 e
E4	90	66,97 ± 0,96 d	19,41 ± 0,39 a	47,56 ± 0,98 d	3,53 ± 0,23 d
E5	105	69,19 ± 0,63 c	17,55 ± 0,22 c	51,64 ± 0,59 c	3,39 ± 0,12 f

Sólidos Totais (ST); Sólidos Fixos (SF); Sólidos Voláteis (SV); Condutividade Elétrica (CE). Os resultados estão expressos em médias ± desvio padrão. As letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem pelo teste de *Tukey*, ao nível de 5% de probabilidade.

A determinação dos parâmetros físicos é fundamental, pois evidencia a proporção carbono/nitrogênio presente no composto orgânico, influenciando diretamente na biodigestão e conseqüentemente produção do biogás. Então, provavelmente o volume do biogás é diretamente proporcional a quantidade de material orgânico no composto (HASSANEEN *et al.*, 2020).

A concentração de sólidos totais se mostrou superior no afluentes quando comparado aos efluentes E1, E2, E3, E4 e E5, estatisticamente ( $P < 0,05$ ). Panyaping e Moontee (2017) em um estudo similar utilizando dois biodigestores de batelada, alimentados com diferentes proporções de esterco bovino, também observou uma razoável alternância nas concentrações

de ST em seu estudo. Este associou a variância nas concentrações de ST com a falta de pré-tratamento do resíduo.

Com relação aos sólidos fixos presentes no afluente, foi observado que foram inferiores quando comparados aos efluentes E3, E4 e E5, com uma concentração de 14,41 mg/L. Porém, a concentração de sólidos fixos nos efluentes E1 e E2 foram inferiores quando comparados com o afluente estatisticamente ( $P < 0,05$ ). Nos sólidos voláteis, a concentração no afluente (A), estatisticamente ( $P < 0,05$ ), assume valor superior a todos os efluentes, mostrando-se ideal para a geração de biogás, segundo Xiao *et al.* (2018). Sendo que, a concentração de sólidos voláteis nos efluentes E1 e E2 representam as menores proporções dentre as amostras analisadas, quando comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Desta forma, os resultados encontrados provavelmente devem estar associados tanto à composição da biomassa (nutrientes e a proporção de água), quanto ao TRH adotado nesse processo de digestão anaeróbia. Promovendo a incompleta biodegradação da matéria orgânica, principalmente nos últimos 45 dias de análise, o que corresponde aos efluentes E3, E4 e E5. Segundo Hartung *et al.* (2020), este processo pode ocorrer principalmente devido à falta de agitação no tanque de digestão, fazendo com que ocorra a formação de zonas onde a matéria orgânica é completamente degradada e zonas onde a matéria orgânica não é completamente degradada.

Os valores de condutividade elétrica observados nos efluentes E1 e E2 foram superiores quando comparados ao afluente, exceto nas amostras E3, E4 e E5. Sendo que o efluente com a menor concentração de sais foi E5, com 3,39 mS/cm, e o que apresentou a maior concentração foi o efluente E1, com 4,05 mS/cm. Contudo, todos diferiram estatisticamente ( $P < 0,05$ ) entre si. Estes valores podem estar associados a dois fatores: água utilizada na diluição do esterco bovino e dieta dos animais. Isso porque se utilizou água proveniente de um poço artesiano local, salobra (com elevados níveis de sais) e sem pré-tratamento. E a dieta dos animais, composta basicamente por capim e pastagem, sendo irrigados com a mesma água utilizada no processo de diluição. Para a utilização do composto orgânico resultante do processo anaeróbio, na produção agrícola da comunidade, foi necessária a diluição do biofertilizante em água como o objetivo de reduzir os valores de CE para cerca de 1 mS/cm, assim como recomendado por Liang *et al.* (2021).

**Tabela 3.** Parâmetros físicos referentes ao biodigestor na segunda fase.

Amostras	Tempo (dias)	Parâmetros Físicos			
		ST (mg/L)	SF (mg/L)	SV (mg/L)	CE (mS/cm)
A	-	71,19 ± 0,47 a	11,57 ± 0,18 a	59,62 ± 0,59 a	3,82 ± 0,20 b
E1	45	43,95 ± 0,12 e	7,46 ± 0,04 f	36,49 ± 0,11 e	3,76 ± 0,19 c
E2	60	53,95 ± 0,40 c	8,28 ± 0,19 e	45,67 ± 0,27 c	4,17 ± 0,56 a
E3	75	52,09 ± 0,56 d	9,92 ± 0,23 d	42,16 ± 0,57 d	3,49 ± 0,44 e
E4	90	56,90 ± 1,00 b	10,54 ± 0,25 c	46,36 ± 0,82 b	3,50 ± 0,21 d
E5	105	41,06 ± 0,76 f	11,33 ± 0,57 b	29,73 ± 0,61 f	3,76 ± 0,23 c

Sólidos Totais (ST); Sólidos Fixos (SF); Sólidos Voláteis (SV); Condutividade Elétrica (CE). Os resultados estão expressos em médias ± desvio padrão. As letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Na segunda parte do experimento a concentração de ST, SF e SV foram superiores no afluente, comportamento normal e esperado de acordo com a literatura, quando comparado aos seus respectivos efluentes, estatisticamente ( $P < 0,05$ ). Sunada *et al.* (2018), ao avaliar a produção de metano com esterco de gado leiteiro e óleo de cozinha, matéria orgânica facilmente biodegradável, constatou que a produção de metano era diretamente proporcional ao volume de óleo de cozinha acrescido ao composto orgânico. Tendo o maior pico de produção de metano quando 45,1 gramas de óleo de cozinha foram diluídos ao esterco bovino.

A redução de sólidos voláteis durante a segunda fase da pesquisa variou entre 22,24 e 50,13%. Este resultado pode estar associado a falta de pré-tratamento da biomassa antes de ser inserida no biodigestor para a retirada de sólidos indesejáveis como, por exemplo, grãos de areia (PAES *et al.*, 2020). Anjos *et al.* (2017) em seu estudo com esterco bovino notou que a redução de sólidos voláteis ficou entre 33,09 e 37,84%. O mesmo associou os baixos valores a falta de homogeneização do tanque de fermentação.

O valor da condutividade elétrica observado no efluente E2 foi superior quando comparado ao afluente e aos efluentes E1, E3, E4 e E5. Sendo que o efluente com a menor concentração de sais foi o E3, com 3,49 mS/cm. Contudo, todos diferiram estatisticamente ( $P < 0,05$ ) entre si. A variação da concentração de sais nos efluentes pode estar associada a incompleta homogeneização da biomassa colocada no fermentador (LIANG *et al.*, 2021), já que o biodigestor não conta com o agitador mecânico necessário. Não há pesquisas mostrando a relação da proporção de sais com a geração de biogás no interior de biodigestores. No entanto, Perazzoli *et al.* (2020) mostra que o pré-tratamento do composto orgânico antes de

ser colocado nos biodigestores potencializa a produção de biogás e, reduz a concentração de sais e sólidos indesejáveis ao processo.

### 5.1.2 Análises Químicas

As Tabelas 4 e 5, sumariza os valores de OD, pH e AT do afluyente (A) e dos efluentes (E1, E2, E3, E4 e E5) obtidos na primeira e na segunda fase do experimento, respectivamente.

**Tabela 4.** Parâmetros químicos referentes ao biodigestor na primeira fase.

Amostras	Tempo (dias)	Parâmetros Químicos		
		OD (mg/L)	pH	AT (mg/L de HCO <sub>3</sub> )
A	-	6,74 ± 0,11 a	6,86 ± 0,28 f	1258,80 ± 0,84 f
E1	45	3,68 ± 0,93 b	7,11 ± 0,31 a	1532,80 ± 0,84 b
E2	60	3,18 ± 0,49 f	7,01 ± 0,20 b	1450,80 ± 0,84 d
E3	75	3,24 ± 0,52 e	6,96 ± 0,15 d	1529,60 ± 0,55 c
E4	90	3,44 ± 0,77 d	7,00 ± 0,26 c	1610,40 ± 0,89 a
E5	105	3,58 ± 0,31 c	6,93 ± 0,29 e	1259,20 ± 0,84 e

Oxigênio Dissolvido (OD); Potencial Hidrogeniônico (pH); Alcalinidade Total (AT). Os resultados expressos em médias ± desvio padrão. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos de oxigênio dissolvido diferem estatisticamente ( $P < 0,05$ ) entre si. Este comportamento pode estar associado a biomassa bovina, que é coletada em diferentes propriedades na comunidade rural. Sendo que a amostra que apresentou a maior taxa de oxigênio dissolvido foi o afluyente (A), como já esperado, atingindo o valor de 6,74 mg/L de O<sub>2</sub>. Já a menor taxa de oxigênio dissolvido foi obtida na amostra E2, com o valor de 3,18 mg/L de O<sub>2</sub>. Porém, as amostras coletadas no tanque de saída do biodigestor apresentam ainda elevadas concentrações de oxigênio dissolvido, o que evidencia a existência de atividade microbiana no composto (MORGAN JR *et al.*, 2018). Segundo Perazzoli *et al.* (2020), nestas condições é recomendado, um pós-tratamento deste composto para que uma vez utilizado como adubo orgânico, não venha a poluir e contaminar os corpos hídricos, o solo e o ar.

Os valores de AT e o pH são fundamentais e podem indicar um bom desempenho da biodigestão anaeróbia, pois proporcionam o equilíbrio da população microbiana no meio (RAJPUT; ZESHAN; HASSAN, 2021). Os valores de pH estudados se mantiveram próximos da normalidade e corroboram com os dados obtidos na literatura, indicados como ideais para

o processo de digestão anaeróbia (ZHANG *et al.*, 2021), sendo desnecessário, portanto, a correção desse parâmetro.

A AT correspondente aos efluentes E1, E2, E3, E4 e E5 mostraram valores mais elevados, quando comparados com o afluente (A). Diferindo significativamente entre si quando submetidos ao teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Este comportamento de acordo com Rajput, Zeshan e Hassan (2021) mostra a elevada capacidade do meio em neutralizar ácidos, o que é ideal para a biodigestão anaeróbia. Sendo que o valor da alcalinidade total da amostra E4 com 1610,40 mg/L de  $\text{HCO}_3$  é superior aos demais, seguido pela amostra E1, E3, E2, E5 e A, respectivamente.

**Tabela 5.** Parâmetros químicos referentes ao biodigestor na segunda fase.

Amostras	Tempo (dias)	Parâmetros Químicos		
		OD (mg/L)	pH	AT (mg/L de $\text{HCO}_3$ )
A	-	6,90 ± 0,16 a	6,68 ± 0,28 e	1259,40 ± 0,89 f
E1	45	2,82 ± 0,31 b	6,78 ± 0,26 c	1610,80 ± 0,84 a
E2	60	2,62 ± 0,50 d	6,92 ± 0,22 a	1543,00 ± 0,71 e
E3	75	2,70 ± 0,21 c	6,84 ± 0,21 b	1569,20 ± 0,84 d
E4	90	2,40 ± 0,25 e	6,72 ± 0,41 d	1604,20 ± 0,84 b
E5	105	2,14 ± 0,21 f	6,84 ± 0,27 b	1591,20 ± 0,84 c

Oxigênio Dissolvido (OD); Potencial Hidrogeniônico (pH); Alcalinidade Total (AT). Os resultados expressos em médias ± desvio padrão. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos na fase final do estudo mostraram que os valores de OD diferem estatisticamente ( $P < 0,05$ ) entre si. Essa diferença deve estar relacionada a composição da biomassa utilizada no processo e a diluição adotada. Sendo que a amostra que apresentou a maior taxa foi o afluente (A), atingindo o valor de 6,90 mg/L de  $\text{O}_2$ , comportamento natural devido a proporção de material orgânico. Já a menor taxa de OD foi obtida na amostra E5, com o valor de 2,14 mg/L de  $\text{O}_2$ . Contudo, as amostras coletadas no tanque de saída do biodigestor apresentam ainda elevadas concentrações de oxigênio dissolvido, inferiores aos valores iniciais do estudo, o que evidencia a incompleta estabilização do biofertilizante (ABRAHAM *et al.*, 2020).

Os valores de pH obtidos se mantiveram dentro da faixa “ótima” para o processo de biodigestão anaeróbia (ZHANG *et al.*, 2021), (SINBUATHONG; SILLAPACHAROENKUL, 2021). A análise estatística feita com os valores de pH, mostrou que as amostras E3 e E5 não



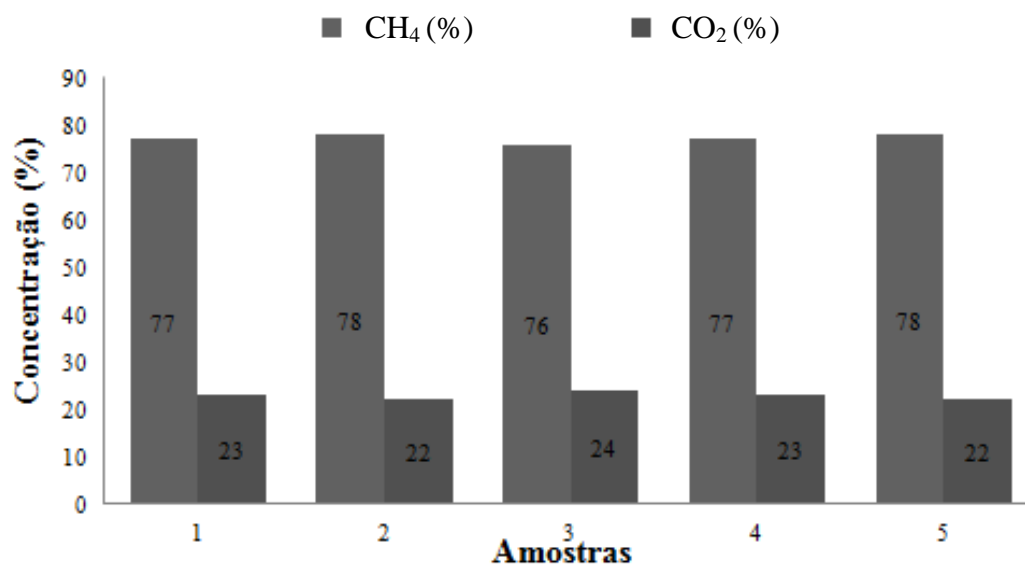
diferem estatisticamente ( $p < 0,05$ ). A alcalinidade total correspondente aos efluentes mostraram valores mais elevados, quando comparados com o afluente. Sendo que o valor da alcalinidade total da amostra E1 com 1610,80 mg/L de  $\text{HCO}_3$  é superior aos demais, seguido pela amostra E4, E5, E3, E2 e A, respectivamente. Todos diferem significativamente entre si quando submetidos ao teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

#### 5.4 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS

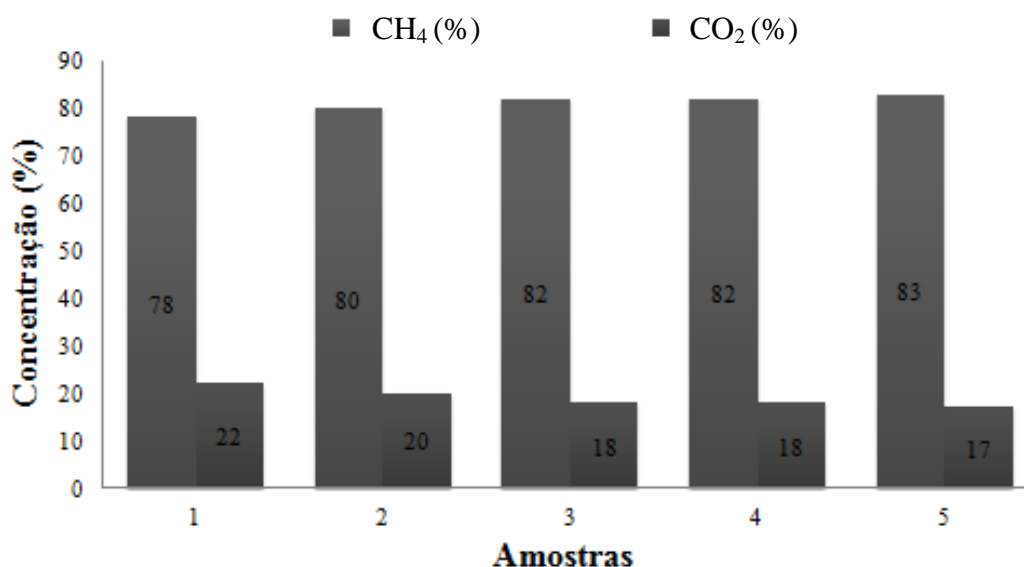
As análises estatísticas feitas com as proporções de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2\text{S}$  não apresentaram diferença significativa entre si quando submetidas ao teste de Tukey em nível de 5% probabilidade. Isso pode ser explicado pela proximidade dos volumes de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2\text{S}$  observados ao longo de todo o experimento.

##### 5.4.1 Método Volumétrico

Nas Figuras 11 e 12 são apresentadas as concentrações, em proporção do  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . O procedimento analítico utilizado foi o volumétrico, durante a primeira e segunda fase da investigação, respectivamente.



**Figura 11.** Proporção metano versus dióxido de carbono na primeira fase.



**Figura 12.** Proporção metano versus dióxido de carbono na segunda fase.

O maior percentual de metano no biogás, durante a primeira fase do estudo, foi de 78% na amostra 2 e 5, nos dias 60° e 105° de análise. Já as demais amostras (1, 3 e 4), coletadas nos dias 45°, 75° e 90° apresentaram proporção média de 77% de CH<sub>4</sub> na sua composição gasosa. Matter *et al.* (2017) observou uma concentração entre 72 e 77% de metano em amostras purificadas, na digestão anaeróbia de dejetos suínos. Sinbuathong e Sillapacharoenkul (2021) ao avaliar a produção de biogás em biodigestores de bancada e com TRH de 40 dias, utilizando a Crotalaria como matéria prima, concluiu que a porcentagem de CH<sub>4</sub> era de 89% pós-sistema de purificação.

Já na segunda fase, verificou-se tendência de aumento gradual da porcentagem de metano no biogás. O maior valor foi de 83% na amostra 5, no dia 105° de investigação. A menor proporção de metano na mistura, e consequentemente maior percentual de dióxido de carbono, foi encontrada na amostra 1, primeiro dia de estudo. Já as amostras 2, 3 e 4 apresentaram média de 81% de metano na sua composição. Os resultados chamam a atenção porque demonstram crescimento gradual da porcentagem de metano na mistura gasosa, demonstrando que ainda não houve estabilização na produção. Fatores ambientais como temperatura pouco oscilante ao longo do dia e melhoramento do valor nutricional dos animais, podem estar associados ao aumento da produção do CH<sub>4</sub>, já que a fase 2 coincide com a época de chuvas na região do semiárido nordestino.

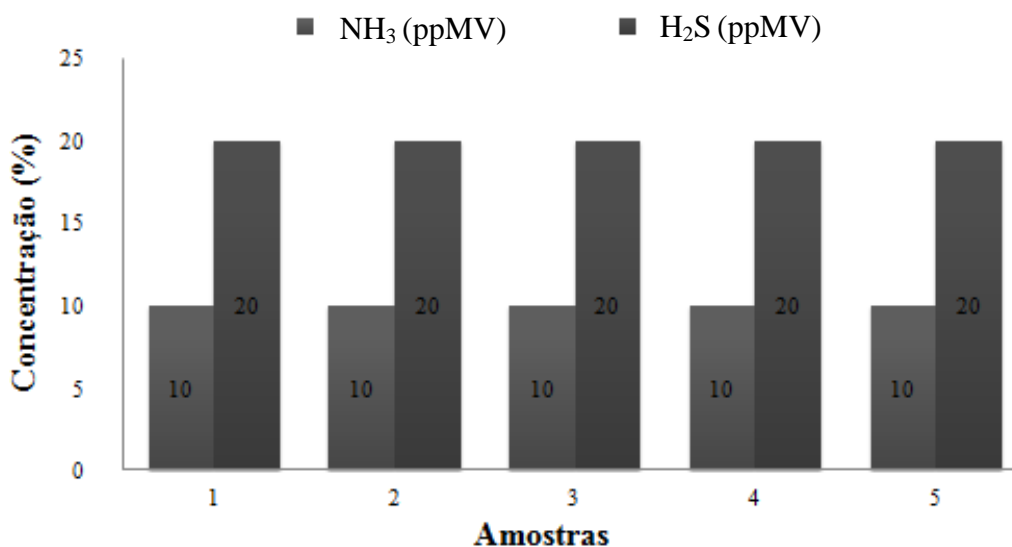
Segundo Blazquez *et al.* (2021), dependendo da origem do biogás, a concentração de CH<sub>4</sub> na mistura fica entre 50 e 75% da composição global, *in natura*, sendo por este motivo considerado uma energia renovável, com zero emissão de CO<sub>2</sub>. Ou seja, o volume de CO<sub>2</sub>

resultante do processo anaeróbio torna-se insignificante, já que pode se enquadrar no ciclo curto do carbono (BLAZQUEZ *et al.*, 2021). Isso porque o CO<sub>2</sub> proveniente da mistura gasosa ou resultante da queima do biogás é o mesmo produzido na degradação biológica da matéria orgânica.

A variação da proporção de metano na mistura gasosa pode estar relacionada com a origem dos resíduos bovinos. Pois, os animais pertencem a diferentes famílias da comunidade, e ocorre variação na dieta dos animais, prejudicando a biodigestão dos resíduos e geração do metano (CHIN *et al.*, 2020). Na comunidade rural, onde encontra-se inserida a Agroindústria Bolo das Oliveiras, os proprietários de animais utilizam sistema de manejo e alimentação, do rebanho, compatível com a sua realidade e com os recursos disponíveis. O que interfere negativamente na composição orgânica do material utilizado para alimentar o biodigestor (HARTUNG *et al.*, 2020). Já que não existe sistema de peneiramento para regular o tamanho das partículas utilizadas, restos de vegetais, na alimentação do biodigestor.

#### 5.4.2 Método Colorimétrico

Os constituintes H<sub>2</sub>S e NH<sub>3</sub> foram quantificados por meio do método colorimétrico, representados em ppMV, e observa-se que provavelmente, foram estáveis durante as duas fases do estudo. As concentrações do H<sub>2</sub>S e do NH<sub>3</sub>, durante o experimento, permaneceram na fração mínima (H<sub>2</sub>S 20 ppMV e NH<sub>3</sub> 10 ppMV), estipulada no modelo de cores (KUNZ; SULZBACH, 2007), parâmetro comparativo para as amostras coletadas pós-sistema de purificação. Portanto, não houve variação quanto a sua proporção no biogás (Figura 13), mesmo a biomassa sendo submetida a dois níveis de diluição.



**Figura 13.** Proporção gás sulfídrico versus gás amônia na primeira e segunda fase.

González-Cortés *et al.* (2021), explica que uma das formas de reduzir o volume de H<sub>2</sub>S na mistura gasosa, resultante do processo de biodigestão anaeróbia, é o agitação contínuo do tanque de digestão sob condições anóxicas. Chin *et al.* (2020) e Sousa *et al.* (2020), ao investigarem o comportamento do NH<sub>3</sub> e do H<sub>2</sub>S, concluíram que a concentração desses gases muda conforme o tipo de biomassa empregada no processo de biodigestão anaeróbia e que em quantidade mínima, não apresentam riscos à saúde humana e a vida útil dos equipamentos.

A coloração da chama, proveniente do processo de combustão do metano, é outro parâmetro importante para a avaliação da qualidade do biogás (ZHANG *et al.*, 2021). Em ambas as fases do estudo, a chama apresentou aspecto visual, azul claro, compatível com o encontrado por Luo *et al.* (2018), indicando concentração significativa do metano na mistura gasosa (Figura 14 e 15). Estando assim, de acordo com o mostrado nos gráficos de proporção de metano (Figura 11 e 12), apresentados acima.



**Figura 14.** Cor da chama na primeira fase. Acervo do Autor.



**Figura 15.** Cor da chama na segunda fase. Acervo do Autor.

### 5.5 QUANTIFICAÇÃO/VALORAÇÃO ECONÔMICA DO CH<sub>4</sub>

A produção de biogás é influenciada diretamente pelas características do material orgânico e pelas condições climáticas locais, proporcionando uma produção mutável durante o dia (SOUSA *et al.*, 2020). Segundo Guilera *et al.* (2020) a diminuição drástica da temperatura e a chuva, por exemplo, são fatores que podem influenciar consideravelmente a produção do biogás. Por isso, em muitos casos, o armazenamento do biogás tornar-se indispensável para que o suprimento energético não seja comprometido (GUILERA *et al.*, 2020).

## FASE 1

Para quantificar o CH<sub>4</sub> na primeira fase do estudo, foi utilizada a seguinte equação 5, descrita a cima:

$$\text{CH}_4 \text{ (m}^3\text{/mês)} = 10 \text{ (cabeças)} \times 30 \text{ (dias)} \times 10 \text{ (kg/dia.cabeça)} \times 0,78 \text{ ( maior \% de CH}_4\text{ na fase 1)} \times 0,037 \text{ (kg de CH}_4\text{/kg de esterco)} \times 0,67^{-1}$$

A quantidade de CH<sub>4</sub> calculada foi estimada em 129,22 m<sup>3</sup>/mês (30 dias), de acordo com as condições experimentais adotadas nesse estudo. A massa de CH<sub>4</sub> produzido por mês foi calculada utilizando a densidade do CH<sub>4</sub> e o volume mensal de 129,22 m<sup>3</sup> produzido no biodigestor, por meio da equação 6:

$$M \text{ (kg de CH}_4\text{/mês)} = 0,72 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 129,22 \text{ (m}^3\text{ de CH}_4\text{/mês)}$$

Fazendo o comparativo com os botijões de gás de cozinha (P – 13) em termos de massa e com preço atual de R\$ 90,00 por unidade, 129,22 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> substitui o equivalente a 7,16 botijões de gás GLP. Proporcionando uma economia mensal de R\$ 644,40, para a agroindústria Bolo das Oliveiras. Assim, o investimento inicial para a construção do equipamento, R\$ 9.500,00, terá auto ressarcimento após 15 meses de operacionalização, aproximadamente. Alavancando a economia da agroindústria Bolo das Oliveiras e aumentando o poder de compra dos associados, já que os lucros são divididos de forma igualitária.

Da mesma forma, Sousa *et al.* (2020) ao avaliar a viabilidade econômica da produção de biogás com esterco suíno, constatou ser viável a produção em larga escala. Principalmente ao utilizar o biocombustível gasoso em máquinas que trabalham acima de 10 horas diárias, tendo um tempo de autorressarcimento de 70 a 80 meses. Montoro, Santos e Lucas Junior (2017) também afirmam existir viabilidade econômica com a implantação de um biodigestor utilizado para o tratamento de esterco bovino em uma propriedade no Estado de São Paulo. Possibilitando retorno do investimento em 44 meses de operacionalização do equipamento.

Os resultados mostram que mesmo utilizando uma taxa de diluição diferente da recomendada pela literatura, houve aumento da produção de biogás no biodigestor sertanejo. Alavancando a fronteira do conhecimento e elevando este equipamento a categoria de tecnologia socioambiental. Já que promove a melhoria da qualidade de vida das pessoas,

aumento da renda mensal, e reduz o potencial poluidor de compostos orgânicos que seriam descartados a céu aberto, contaminando o solo e os poucos corpos hídricos da região.

## FASE 2

A quantificação do CH<sub>4</sub>, na segunda fase do estudo, foi feita por meio da equação 5, descrita a cima:

$$\text{CH}_4 \text{ (m}^3\text{/mês)} = 15 \text{ (cabeças)} \times 30 \text{ (dias)} \times 10 \text{ (kg/dia.cabeça)} \times 0,83 \text{ ( maior \% de CH}_4\text{ na fase 2)} \times 0,037 \text{ (kg de CH}_4\text{/kg de esterco)} \times 0,67^{-1}$$

Logo, o volume de CH<sub>4</sub> estimado na segunda fase do estudo foi de 206,26 m<sup>3</sup>/mês (30 dias), seguindo os critérios técnicos adotados para esta fase da pesquisa. A massa de CH<sub>4</sub> estimada na segunda fase foi calculada por meio da equação 6:

$$M \text{ (kg de CH}_4\text{/mês)} = 0,72 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 206,26 \text{ (m}^3\text{ de CH}_4\text{/mês)}$$

Em termos comparativos de massa com o gás GLP, botijões (P – 13), o quantitativo mensal de 206,26 m<sup>3</sup>/mês de CH<sub>4</sub> pode substituir o equivalente a 11,42 botijões. Corroborando para a contenção mensal de R\$ 1.027,80 utilizado na compra desse combustível. Logo, o tempo necessário para o ressarcimento do valor investido na aquisição do equipamento será de aproximadamente 9 meses. Superando o volume produzindo na primeira fase da pesquisa e aumentando substancialmente a receita mensal da agroindústria.

Paes *et al.* (2020) ao avaliar o uso de inoculo com esterco bovino sob sistemas de produção orgânica e convencional, em um biodigestor indiano, concluiu que o tratamento convencional, matéria orgânica e água, apresentou maior produção de biogás. No entanto, ao ser utilizado inoculo em ambos os sistemas, 20% de inoculo, houve aumento significativo do volume de biogás. Hirano e Silva (2018) avaliando o uso do biogás proveniente da biodigestão de esterco bovino leiteiro para a geração de energia elétrica e térmica concluíram que a geração de energia elétrica ficou entre 6,2 e 16,1 kWh/mês e o volume de água quente entre 6,8 e 13,6 m<sup>3</sup>/dia. Proporcionando independência energética a propriedade rural.

Logo, o biodigestor sertanejo implantado na agroindústria mostrou-se eficiente ao ser submetido ao tipo de diluição 1:1, recomendado pela literatura quando utilizado o esterco bovino, não apresentando problemas técnicos. Vale salientar, também, a contribuição

ambiental com a utilização de volume reduzido de água no processo de diluição da biomassa, comparada a primeira fase e aumento do volume de biomassa tratada em uma mesma unidade de área. Tornando o biodigestor sertanejo, um *case* de sucesso local e que pode ser implantado em várias regiões do Brasil e de Mundo.



## 6. CONCLUSÕES

Com os dados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa, foi possível verificar que as taxas de SV nas duas fases do projeto apresentaram algumas variações. No entanto, a biodigestão anaeróbia demonstrou ser eficiente no tratamento dos resíduos bovinos durante os 210 de investigação.

Os valores de oxigênio dissolvido indicados nas amostras sinalizam presença microbiológica no material orgânico, principalmente na primeira fase. Limitando a utilização direta do composto orgânico no cultivo agrícola local.

O biogás, ao ser utilizado no processo de combustão, expõe chama de boa qualidade nas duas fases do estudo, tendo como evidência a sua coloração azulada e eficiência no processo produtivo por meio da redução de horas de trabalho, segundo as associadas. Estando de acordo com a literatura, já que o metano apresenta poder calorífico superior ao GLP.

No entanto, pode-se afirmar que a diluição do tipo 1:1 adotada na segunda fase do estudo, é a que proporciona a melhor degradação da biomassa e, conseqüentemente maior produção de metano e melhor rendimento econômico para a agroindústria Bolo das Oliveiras. Gerando ainda uma economia de 50 litros de água por dia em uma das regiões mais secas do sertão nordestino.

Assim como também, que o biodigestor sertanejo implantando na agroindústria Bolo das Oliveiras é uma tecnologia que atende as necessidades ambientais, tratamento dos resíduos, sociais, qualidade de vida, e econômicas dos associados. Podendo ser replicado como parâmetro de sucesso em outras comunidades rurais.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Instalação de agitadores mecânicos no biodigestor sertanejo;

Promover o pré-tratamento da biomassa antes de ser inserida no biodigestor;

Instalação de sistema de pós-tratamento para o composto orgânico resultante do processo;

Realizar análises de micro e macronutrientes no biofertilizante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, A.; MATHEW, A. K.; PARK, H.; CHOI, O.; SINDHU, R.; PARAMESWARAN, B.; PANDEY, A.; PARK, J. H.; SANG, B. Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. **Bioresource technology**, v. 301, p. 122725, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122725>

ANJOS, I.; TONELI, J. T. C. L.; SAGULA, A. L.; JUNIOR, J. L. BIOGAS PRODUCTION IN DAIRY CATTLE SYSTEMS, USING BATCH DIGESTERS WITH AND WITHOUT SOLIDS SEPARATION IN THE SUBSTRATES. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 37, n. 3, p. 426-432, jun. 2017. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n3p426-432/2017>

ARELLI, V.; BEGUM, S.; ANUPOJU, G. R.; KURUTI, K.; SHAILAJA, S. Dry anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure: Impact of total solids, substrate ratio and thermal pre treatment on methane yield and quality of biomanure. **Bioresource Technology**, v. 253, p. 273-280, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.050>

BAIRD, R. B.; RICE, C. E. W.; EATON, A. D. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd**. Water Environment Federation, American Public Health Association, American Water Works Association, 2017. <http://dspace.uniten.edu.my/jspui/handle/123456789/14241>

BATISTA, S. P.; GUERRA, E. P.; RESENDE, J. T. V.; GUERI, M. V. D.; CARVALHO, G. C.; CRESTANI, J. N. S.; SILVA, I. F. L. Potential for biogas generation from sweet potato genotypes. **Rev. Ambient. Água**, Taubaté, v. 14, n. 2, e2317, 2019. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2317>

BLÁZQUEZ, C. S.; BORGE-DIEZ, D.; NIETO, I. M.; MARTIN, A. F.; GONZALÉZ-AGUILERA, D. Multi-parametric evaluation of electrical, biogas and natural gas geothermal source heat pumps. **Renewable Energy**, v. 163, p. 1682-1691, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.080>

BRÉMOND, U.; BERTRANDIAS, A.; STEYER, J.; BERNET, N.; CARRENE, H. A vision of European biogas sector development towards 2030: Trends and challenges. **Journal of Cleaner Production**, p. 125065, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125065>

CEDRAN, M. F.; RODRIGUES, F. J.; BICAS, J. L. Encapsulation of Bifidobacterium BB12® in alginate-jaboticaba peel blend increases encapsulation efficiency and bacterial survival under adverse conditions. **Applied Microbiology and Biotechnology**, p. 1-9, 2020. <https://doi-org.ez15.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00253-020-11025-9>

CHIN, K. F.; WAN, C.; LI, Y.; ALAIMO, C. P.; GREEN, P. G.; YOUNG, T. M.; KLEEMAN, M. J. Statistical analysis of trace contaminants measured in biogas. **Science of the Total Environment**, v. 729, p. 138702, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138702>

COLATTO, L.; LANGER M. Biodigestor – resíduo sólido pecuário para produção de energia. **Unoesc & Ciência – ACET**, v. 2, n. 2, p. 119-128, 2011. [https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/738/pdf\\_203](https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/738/pdf_203)

DAWANGPA, A.; LERTWATCHARASARAKUL, P.; RAMASOOTA, P.; BOONSOONGNERN, A.; RATANAVANICHROJN, N.; SANGUAKIAT, A.; PHATTHANAKUNANAN, S.; TULAYAKUL, P. Genotypic and phenotypic situation of antimicrobial drug resistance of *Escherichia coli* in water and manure between biogas and non-biogas swine farms in central Thailand. **Journal of Environmental Management**, v. 279, p. 111659, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111659>

DITTMER, C.; KRÜMPEL, J.; LEMMER, A. Power demand forecasting for demand-driven energy production with biogas plants. **Renewable Energy**, v. 163, p. 1871-1877, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.099>

FARHAT, A.; MILADI, B.; HAMDI, M.; BOUALLAGUI, H. Fermentative hydrogen and methane co-production from anaerobic co-digestion of organic wastes at high loading rate coupling continuously and sequencing batch digesters. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 28, p. 27945-27958, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2796-2>

FEROLDI, M.; CAROLINE, A.; BORBA, N. C. E.; ARANTES, M. K.; JOSE, A. H. Storage of purified biogas (biomethane) at low pressure. **Braz. arch. biol. technol.**, Curitiba, v. 61, n. spe, e18000014, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2018000014>

GANTENBEIN, A.; WITTE, J.; BIOLLAZ, S. M. A.; KROCHER, O.; SCHILDHAUER, T. J. Flexible application of biogas upgrading membranes for hydrogen recycle in power-to-methane processes. **Chemical Engineering Science**, v. 229, p. 116012, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116012>

GARDONI, R. A. P.; AZEVEDO, M. A. Estudo da biodegradação de carcaças de aves por meio do processo de compostagem em biodigestores fechados descontínuos. **Revista Engenharia Sanitária**, v. 24, n. 3, p. 425-429, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019118916>

GAO, J.; WENG, W.; YAN, Y.; WANG, Q. Comparison of protein extraction methods from excess activated sludge. **Chemosphere**, v. 249, p. 126107, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126107>

GIANNOUKOS, S.; TARIK, M.; LUDWING, C.; BIOLLAZ, J. S.; BALTENSBERGER, U.; PREVOT, A. S. H. Detection of trace metals in biogas using extractive electrospray ionization high-resolution mass spectrometry. **Renewable Energy**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.047>

GIROTTO, F.; PENG, W.; RAFIEENIA, R.; COSSU, R. Effect of aeration applied during different phases of anaerobic digestion. **Waste and Biomass Valorization**, 2018, 9.2: 161-174. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9785-9>

GONZÁLEZ-CORTÉS, J. J.; TORRES-HERRERA, S.; ALMENGLO, F.; RAMÍREZ, M.; CANTERO, D. Anoxic biogas biodesulfurization promoting elemental sulfur production in a Continuous Stirred Tank Bioreactor. **Journal of Hazardous Materials**, v. 401, p. 123785, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123785>

GOOGLE EARTH. **Google Earth**, 2021. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>.

GUILERA, J.; FILIPE, M.; MONTESO, A.; MALLOL, I.; ANDREU, T.. Carbon footprint of synthetic natural gas through biogas catalytic methanation. **Journal of Cleaner Production**, p. 125020, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125020>

GUIMARÃES, C. S.; MAIA, D. R.; SERRA, E. G. Construction of biodigesters to optimize the production of biogas from anaerobic co-digestion of food waste and sewage. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 1-10, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11040870>

GUO, X.; CUI, X.; LI, H.; XIONG, B. Purifying effect of biochar-zeolite constructed wetlands on arsenic-containing biogas slurry in large-scale pig farms. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123579, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123579>

HARTUNG, C.; ANDRADE, D.; DANDIKAS, V.; EICKENSCHIEDT, T.; DROSLER, M.; ZOLLFRANK, C.; HEUWINKEL, H. Suitability of paludiculture biomass as biogas substrate– biogas yield and long-term effects on anaerobic digestion. **Renewable Energy**, v. 159, p. 64-71, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.156>

HASSANEEN, F. Y.; ABDALLAH, M. S.; AHMED, N.; TAHA, M. M.; ELAZIZ, S. M. M. A.; EL-MOKHTAR, M. A.; BADARY, M. S.; ALLAM, N. K. Innovative nanocomposite formulations for enhancing biogas and biofertilizers production from anaerobic digestion of organic waste. **Bioresource Technology**, v. 309, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123350>

HIRANO, M. Y.; SILVA, C. L. DAIRY CATTLE BIOGAS USAGE IN MICROTURBINES FOR ENERGY GENERATION AND THERMAL EXPLOITATION. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 38, n. 4, p. 526-535, ago. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n4p526-535/2018>

HUANG, X.; LIU, X.; CHEN, F.; WANG, Y.; LI, X.; WANG, D.; TAO, Z.; XU, D.; XUE, W.; GENG, M.; YANG, Q. Clarithromycin affect methane production from anaerobic digestion of waste activated sludge. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120321, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120321>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População**, 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/pombal/panorama>>.

IOANNOU-TTOFA, L.; FOTEINIS, S.; MOUSTAFA, A. S.; ABDELSALAM, E.; SAMER, M.; FATTA-KASSINOS, D. Life cycle assessment of household biogas production in Egypt: Influence of digester volume, biogas leakages, and digestate valorization as biofertilizer. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125468, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125468>

JANKE, L.; WEINRICH, S.; LEITE, A. F.; STRAUBER, H.; RADETSKI, C. M.; NIKOLAUSZ, M.; NELLES, M.; STINNER, W. Year-round biogas production in sugarcane biorefineries: Process stability, optimization and performance of a two-stage reactor system. **Energy Conversion and Management**, v. 168, p. 188-199, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.101>

JÚNIOR, F. A. O. Manual de construção do biodigestor rural. 2017. <https://www.agriverdes.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2019/06/manual-do-biodigestor-rural.pdf>

KHALAF, A. H.; IBRAHIM, W. A.; FAYED, M.; ELOFFY, M. G. Comparison between the performance of activated sludge and sequence batch reactor systems for dairy wastewater treatment under different operating conditions. **Alexandria Engineering Journal**, v. 60, n. 1, p. 1433-1445, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.062>

KOUMAKI, E.; NOUTSOPOULOS, C.; MAMAI, D.; FRAGKISKATOS, G.; ANDREADAKIS, A. Fate of Emerging Contaminants in High-Rate Activated Sludge Systems. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 2, p. 400, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020400>

KUNZ, A.; SULZBACH, A. **Kit Biogás Portátil: Para análise da concentração de gás metano, dióxido de carbono, amônia e gás sulfídrico em biogás**. KUNZ, A. [et al.]. Brasil. Patente 012070001117. 09 out. 2007. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br/pePI/jsp/patentes/PatenteSearchBasico.jsp>>.

LEMMA, B.; ARARSO, K.; EVANGELISTA, P. H. Attitude towards biogas technology, use and prospects for greenhouse gas emission reduction in southern Ethiopia. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124608, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124608>

LI, L.; GENG, S.; LI, Z.; SONG, K. Effect of microplastic on anaerobic digestion of wasted activated sludge. **Chemosphere**, v. 247, p. 125874, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125874>

LIANG, F.; XU, L.; JI, L.; HE, Q.; WU, L.; YAN, S. A new approach for biogas slurry disposal by adopting CO<sub>2</sub>-rich biogas slurry as the flower fertilizer of *Spathiphyllum*: Feasibility, cost and environmental pollution potential. **Science of The Total Environment**, p. 145333, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145333>

LINDKVIST, E.; KARLSSON, M. Biogas production plants; existing classifications and proposed categories. **Journal of Cleaner Production**, 2018, 174: 1588-1597. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.317>

LUO, L.; GONG, W.; QIN, L.; MA, Y.; JU, W.; WANG, H. Influence of liquid-and solid-state coupling anaerobic digestion process on methane production of cow manure and rice straw. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 2018, 20.3: 1804-1812. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0750-5>

MANCINI, F. N.; MILANO, J.; ARAUJO, J. G.; IASTRENSKI, K. T.; SILVEIRA, N. S.; PERTILE, R. C. Energy Potential of Animal Waste in the State of Paraná (Brazil). **Braz. arch. biol. technol.**, Curitiba, v. 62, n. spe, e19190009, 2019. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2019190009>

MATTOS, L. C.; JÚNIOR, M. F. **Manual do biodigestor sertanejo**. Recife: Projeto Dom Helder Camara, 2011. 55p.: il. <http://cumaru-pe.com.br/data/documents/Manual-do-Biodigestor-Sertanejo-1.pdf>

MATTER, J. M.; COSTA, M. S. S. M.; COSTA, L. A. M.; PEREIRA, D. C.; VARENNES, A.; TESSARO, D. Anaerobic co-digestion of hatchery waste and wastewater to produce energy and biofertilizer - Batch phase. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 21, n. 9, p. 651-656, set. 2017. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n9p651-656>

MCVOITTE, W. P. A.; CLARK, O. G. The effects of temperature and duration of thermal pretreatment on the solid-state anaerobic digestion of dairy cow manure. **Heliyon**, v. 5, e02140, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02140>

MENSAH, J. H. R.; SILVA, A. T. Y. L.; SANTOS, I. F. S.; RIBEIRO, N. S.; GBEDJINOU, M. J.; NAGO, V. G.; FILHO, G. L. T.; BARROS, R. M. Assessment of electricity generation from biogas in Benin from energy and economic viability perspectives. **Renewable Energy**, v. 163, p. 613-624, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.014>

MISROL, M. A.; ALWI, S. R. W.; LIM, J. S.; MANAN, Z. A. An optimal resource recovery of biogas, water regeneration, and reuse network integrating domestic and industrial sources. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125372, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125372>

MIYAWAKI, B.; MARIANO, A. B.; VARGAS, J. V. C.; BALMANT, W.; DEFRANCHESCHI, A. C.; CORRÊA, D. O.; SANTOS, B.; SELESU, N. F. H.; ORDONEZ, J. C.; KAVA, V. M. Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment. **Renewable Energy**, v. 163, p. 1153-1165, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.045>

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; ABREU-JUNIOR, C. H. Characterization of raw swine waste and effluents treated anaerobically: parameters for Brazilian environmental regulation construction aiming agricultural use. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, p. 1-12, 2020. <https://doi-or.ez15.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10163-020-01115-1>

MORGAN JR, H. M.; XIE, W.; LIANG, J.; MAO, H.; LEI, H.; RUAN, R.; BU, Q. A techno-economic evaluation of anaerobic biogas producing systems in developing countries. **Bioresource technology**, 2018, 250: 910-921. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.013>

MUKESHIMANA, M. C.; ZHAO, Z.; AHMAD, M.; IRFAN, M. Analysis on barriers to biogas dissemination in Rwanda: AHP approach. **Renewable Energy**, v. 163, p. 1127-1137, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.051>

NIERYCHLO, M.; ANDERSEN, K. S.; XU, Y.; GREEN, N.; JIANG, C.; ALBERTSEN, M.; DUEHOLM, M. S.; NIELSEN, P. H. MiDAS 3: An ecosystem-specific reference database, taxonomy and knowledge platform for activated sludge and anaerobic digesters reveals species-level microbiome composition of activated sludge. **Water Research**, v. 182, p. 115955, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115955>

NINDHIA, T. G. T.; MCDONALD, M.; STYLES, D. Greenhouse gas mitigation and rural electricity generation by a novel two-stroke biogas engine. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124473, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124473>



NUNES, S. B.; HODEL, K. V. S.; SACRAMENTO, G. C.; MELO, P. S.; PESSOA, F. L. P.; BARBOSA, J. D. V.; BADARÓ, R.; MACHADO, B. A. S. Development of Bacterial Cellulose Biocomposites Combined with Starch and Collagen and Evaluation of Their Properties. **Materials**, v. 14, n. 2, p. 458, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14020458>

PAES, J. L.; ALVES, T. B. S.; SILVA, L. D. B.; MARQUES, A. S.; DIAS, V. R. S. USE OF INOCULUM IN BIODIGESTERS WITH CATTLE MANURE UNDER CONVENTIONAL AND ORGANIC PRODUCTION SYSTEMS. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 40, n. 2, p. 146-153, abr. 2020. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p146-153/2020>

PANYAPING, K.; MOONTEE, P. Potential of biogas production from mixed leaf and food waste in anaerobic reactors. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, p. 723-737, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-017-0629-x>

PERAZZOLI, B. E.; PAULETTI, V.; QUARTIERI, M.; TOSELLI, M.; GOTZ, L. F. Changes in leaf nutrient content and quality of pear fruits by biofertilizer application in northeastern Italy. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 42, n. 1, e-530, 2020. <https://doi.org/10.1590/0100-29452020530>

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; ROALCABA, O. D. C. Technical assessment of mono-digestion and co-digestion systems for the production of biogas from anaerobic digestion in Brazil. **Renewable Energy**, v. 117, p. 447-458, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.085>

PRABHU, A. V.; AVINASH, A.; BRINDHADEVI, K.; PUGAZHENDHI, A. Performance and emission evaluation of dual fuel CI engine using preheated biogas-air mixture. **Science of the Total Environment**, p. 142389, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142389>

RATTANAPHAN, S.; RUNGROTMONGKOL, T.; KONGSUNE, P. Biogas improving by adsorption of CO<sub>2</sub> on modified waste tea activated carbon. **Renewable Energy**, v. 145, p. 622-631, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.104>.

RIBEIRO FILHO, J. C.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; BRASIL, J. B. Caracterização da chuva e respostas sedimentológicas de Bacias Hidrográficas com diferentes usos da terra à precipitação na região semiárida do Brasil. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 2, p. 468-478, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n222rc>

RICARDO, C. M.; CAMPOS, D. B.; MARIN, D. B.; VELOSO, A. V.; MATTIOLIN, M. C. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE TRAMENTO DE RESÍDUOS DA SUINOCULTURA CONTENDO BIODIGESTORES TUBULARES. **Revista Engenharia na Agricultura**, 2018, 26.6: 516. <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i6.799>

SALES, J. C. F. **Digestão anaeróbia de dejetos suínos e resíduos de alimentos em biodigestor canadense**. 2017. 81f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Pombal/PB. 2017. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/537>

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N. D. B.; NÓBREGA, L. G. B.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources**,



**Conservation and Recycling**, v. 131, p. 54-63, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>

SINBUATHONG, N.; SILLAPACHAROENKUL, B. Enhancement of biogas production from sunnhemp using alkaline pretreatment. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.058>

SOUSA, I. P.; ROSA, A. P.; BORGES, A. C.; RENATO, N. S. ENERGY POTENTIAL OF BIOGAS FROM PIG FARMS IN THE STATE OF MINAS GERAIS, BRAZIL. **Eng. Agric.**, Jaboticabal, v. 40, n. 3, p. 396-404, jun. 2020. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n3p396-404/2020>

STÜRMER, B.; LEIERS, D.; ANSPACH, V.; BRUGGING, E.; SCHARFY, D.; WISSEL, T. Agricultural biogas production: A regional comparison of technical parameters. **Renewable Energy**, v. 164, p. 171-182, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.074>

SUNADA, N. S. ORRICO, A. C. A.; JUNIOR, M. A. P. O.; JUNIOR, J. L.; LOPES, W. R. T.; SCHWINGEL, A. W. Anaerobic co-digestion of animal manure at different waste cooking oil concentrations. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 48, n. 7, e20170517, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20170517>

TAJMIRIAHI, M.; MOMAYEZ, F.; KARIMI, K. The critical impact of rice straw extractives on biogas and bioethanol production. **Bioresource Technology**, v. 319, p. 124167, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124167>

VINZELJ, J.; JOSHI, A.; INSAM, H.; PODMIRSEG, S. M. Employing anaerobic fungi in biogas production: Challenges & opportunities. **Bioresource technology**, v. 300, p. 122687, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122687>

WANG, R.; LI, C.; LV, N.; PAN, X.; CAI, G.; NING, J.; ZHU, G. Deeper insights into effect of activated carbon and nano-zero-valent iron addition on acidogenesis and whole anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 324, p. 124671, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124671>

WANG, Y.; WEHRLE, L.; BANERJEE, A.; SHI, Y.; DEUTSCHMANN, O. Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling. **Renewable Energy**, v. 163, p. 78-87, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.091>

XIAO, B.; ZHANG, W.; WU, J.; QIANG, H.; LIU, J.; LI, Y. Temperature-phased anaerobic digestion of food waste: A comparison with single-stage digestions based on performance and energy balance. **Bioresource Technology**, v. 249, p. 826-834, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.084>

XU, W.; BRAND, V. R.; SURESH, S.; JENSEN, M. A.; DAVIS, R. W.; CRIDDLE, C. S.; ONGE, R. P. S.; HYMAN, R. W. Community members in activated sludge as determined by molecular probe technology. **Water research**, v. 168, p. 115104, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115104>

YANG, S.; CHEN, Z.; WEN, Q. Impacts of biochar on anaerobic digestion of swine manure: Methanogenesis and antibiotic resistance genes dissemination. **Bioresource Technology**, v. 324, p. 124679, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124679>

YU, X.; SHI, J.; KHAN, A.; YUN, H.; ZHANG, P.; ZHANG, P.; KAKADE, A.; TIAN, Y.; PEI, Y.; JIANG, Y.; HUANG, H.; WU, K.; LI, X. Immobilized-microbial bioaugmentation protects aerobic denitrification from heavy metal shock in an activated-sludge reactor. **Bioresource technology**, v. 307, p. 123185, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123185>

ZHANG, Y.; KAWASAKI, Y.; OSHITA, K.; TAKAOKA, M.; MINAMI, D.; INOUE, G.; TANAKA, T. Economic assessment of biogas purification systems for removal of both H<sub>2</sub>S and siloxane from biogas. **Renewable Energy**, v. 168, p. 119-130, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.058>

ZHANG, Y.; ZHENG, Y.; ZHU, Z.; CHEN, Y.; DONG, H. Dispersion of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) from stored swine manure biogas digestate to the atmosphere. **Science of The Total Environment**, v. 761, p. 144108, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144108>

ZHENG, Y.; HU, Z.; TU, X.; WU, K.; CHEN, G.; CHAI, X. In-situ determination of the observed yield coefficient of aerobic activated sludge by headspace gas chromatography. **Journal of Chromatography A**, v. 1610, p. 460560, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460560>