



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

PIERRE CAMPOS MEDEIROS

**APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS
COLETADOS NA CIDADE DE SUMÉ-PB PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E
ADUBO ORGÂNICO**

CAMPINA GRANDE

2022

PIERRE CAMPOS MEDEIROS

**APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS
COLETADOS NA CIDADE DE SUMÉ-PB PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E
ADUBO ORGÂNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Valderi Duarte Leite

**CAMPINA GRANDE
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

M488a Medeiros, Pierre Campos.

Aproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos coletados na cidade de Sumé-PB para produção de biogás e adubo orgânico [manuscrito] : / Pierre Campos Medeiros. - 2022.
51 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Valderi Duarte Leite , Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Biofertilizante. 2. Biogás. 3. Digestato. 4. Resíduos Sólidos Orgânicos. 5. Compostagem. I. Título

21. ed. CDD 631.8

PIERRE CAMPOS MEDEIROS

APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS COLETADOS
NA CIDADE DE SUMÉ-PB PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ADUBO
ORGÂNICO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao Departamento de
Engenharia Sanitária e Ambiental da
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)
como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Sanitária e
Ambiental.

Aprovada em: 13 / 07 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

valderi duarte leite

Prof. Dr. Valderi Duarte Leite (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Rui de Oliveira

Prof. Dr. Rui de Oliveira
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Lígia Maria Ribeiro Lima

Profa. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, família e amigos.

Aos meus pais – José Medeiros e Maria do Socorro – por todo amor, carinho e ensinamentos que dão a mim. Sei o quanto me ajudam e do prazer que têm em participar ativamente das conquistas dos filhos. Amo muito vocês!

Às minhas avós – Maria de Lourdes e Josefa Maria (em lembrança) – por todo amor.

Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos pelo carinho e apoio. Um “Xêro” em cada um.

Ao meu orientador Prof. Valderi Duarte pelos ensinamentos e paciência que teve durante a orientação deste trabalho.

Aos membros da banca – Professor Valderi Duarte, Professora Lígia Ribeiro e Professor Rui de Oliveira – pela participação e contribuição que deram na defesa deste trabalho.

Por fim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram na minha formação como cidadão e engenheiro.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

O contexto atual é de demanda cada vez maior por recursos energéticos, de urgência na redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e de insegurança na importação de fertilizantes em quantidade adequada para suprir a produção agrícola nacional. Para se desenvolver de forma sustentável, um país precisa diversificar sua matriz energética com fontes renováveis e garantir o fornecimento de insumos para a indústria. No Brasil, uma grande contribuição para esse processo é o uso da biomassa disponível. Entre outras, duas formas que ela pode ser aproveitada são a produção de biogás e a reciclagem de nutrientes agrícolas. Assim, este trabalho analisou o aproveitamento da fração orgânica dos resíduos sólidos domésticos da cidade de Sumé-PB por meio do volume de biogás produzido em biodigestor e da utilização do seu digestato. A metodologia utilizada foi a pesquisa bibliográfica. Os volumes calculados de biogás para os anos de 2022 e 2042 foram de 117,60 e 131,76 m³.dia⁻¹, respectivamente. Para o ano de 2022, estimou-se que o volume desse biocombustível é suficiente para gerar 8.467,4 kWh.mês⁻¹ ou, quando usado como substituinte do gás liquefeito de petróleo (GLP), produzir o equivalente energético de 1.764 kg GLP.mês⁻¹; para o ano de 2042, esses valores são de 9.486,7 kWh.mês⁻¹ e 1.976,4 kg GLP.mês⁻¹. Do digestato, obtém-se o adubo orgânico, para aplicação em áreas agrícolas do município.

Palavras-Chave: Biofertilizante. Biogás. Digestato. Resíduos Sólidos Orgânicos

ABSTRACT

The current context is one of increasing demand for energy resources, urgent need to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and insecurity in importing fertilizers in adequate amounts to supply national agricultural production. To develop in a sustainable way, a country needs to diversify its energy matrix with renewable sources and guarantee the supply of inputs for the industry. In Brazil, a major contribution to this process is the use of available biomass. Among others, two ways that it can be used are in the production of biogas and recycling of agricultural nutrients. Thus, this work verified the use of FORSU in the city of Sumé-PB, through the volume of biogas produced in a biodigester and the use of its digestate as organic fertilizer. The methodology used was the bibliographic research. The calculated volumes of biogas for the years 2022 and 2042 were 117.60 and 131.76 m³.day⁻¹, respectively. For the year 2022, it was estimated that the volume of this biofuel is sufficient to generate 8,467.4 kWh.month⁻¹ or, when used as a substitute for liquefied petroleum gas (LPG), produce the energy equivalent of 1,764 kg LPG.month⁻¹; for the year 2042, these values are 9.486,7 kWh.mês⁻¹ e 1.976,4 kg LPG.month⁻¹. From the digestate, the organic fertilizer is obtained, for application in agricultural areas of the municipality.

Keywords: Organic fertilizer. Biofuel. Digestate. Organic solid waste

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Rotas metabólicas da digestão anaeróbia	16
Figura 2 – Quantidade de biogás gerada por setor em 2021	20
Figura 3 – Motor a combustão interna com gerador acoplado	22
Figura 4 – Turbina a gás	24
Figura 5 – Variação da temperatura numa leira de compostagem	27
Figura 6 – Localização do município de Sumé no estado da Paraíba.....	35
Figura 7 – Fluxograma das destinações das frações dos RSU em Sumé-PB.....	39
Figura 8 – Biodigestores tipo garagem.....	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Substratos mais utilizados na produção de biogás no Brasil.....	20
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de 1 m ³ de biogás com outras fontes de energia	21
Tabela 2 - Temperatura e tempo de exposição para eliminação de patógenos	29
Tabela 3 - Populações rural e urbana do município de Sumé-PB.....	37
Tabela 4 - Massa da FORSU produzida diariamente.....	38
Tabela 5 - Dados utilizados nos cálculos	40
Tabela 6 - Volume de metano produzido diariamente.....	40
Tabela 7 - Volume de biogás produzido diariamente	41
Tabela 8 - Volume de metano e potências elétricas geradas.....	41
Tabela 9 - Equipamentos do galpão de triagem e seus respectivos consumos de energia elétrica.....	43
Tabela 10 - Volume biogás e massa de GLP.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOGAS	Associação Brasileira de Biogás
FORSU	Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos
FORSUD	Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos Domésticos
GEE	Gás de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
PH	Potencial Hidrogeniônico
PROBIOGAS	Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil
RSO	Resíduos Sólidos Urbanos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 Fundamentação teórica	15
3.1 <i>Digestão anaeróbia</i>	15
3.1.1 Alguns fatores intervenientes na digestão anaeróbia	17
3.1.1.2 Nutrientes	17
3.1.1.3 Temperatura	17
3.2 <i>Biogás</i>	18
3.2.1 Produção de biogás por setor	19
3.2.2 Formas de aproveitamento do biogás	21
3.2.2.3 Geração de eletricidade	21
3.2.2.3.1 Motores a combustão interna	22
3.2.2.3.2 Turbinas a gás.....	23
3.2.2.4 Combustão direta	24
3.2.2.5 Biometano	24
3.3 <i>COMPOSTAGEM</i>	25
3.3.1 Fatores que afetam a compostagem	27
3.3.1.1 Aeração	27
3.3.1.2 Temperatura	28
3.3.1.3 Umidade	29
3.3.1.4 Relação carbono/nitrogênio (C/N)	29
3.3.1.5 Potencial hidrogeniônico (pH)	30
3.3.1.6 Granulometria.....	30
3.4 <i>Compostagem do digestato</i>	31
4 METODOLOGIA	34
4.1 <i>Obtenção das informações</i>	34

4.2 <i>Área de Estudo</i>	34
4.3 <i>Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Sumé-PB</i>	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 <i>Produção de resíduos sólidos orgânicos urbanos</i>	37
5.2 <i>Produção de biogás</i>	39
5.3 <i>Geração de energia elétrica</i>	41
5.4 <i>Produção de energia térmica</i>	44
5.5 <i>Aproveitamento do digestato</i>	44
6 CONCLUSÃO	46
Referências	47

1 INTRODUÇÃO

O contexto atual é de demanda cada vez maior por recursos energéticos, de urgência na redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e de insegurança na importação de fertilizantes em quantidade adequada para suprir a produção agrícola nacional. O Brasil ainda é muito dependente da energia oriunda de hidrelétricas – que são influenciadas pelas condições climáticas, podendo reduzir drasticamente sua produção em períodos de estiagem – e de combustíveis fósseis – que estão entre as principais fontes de poluição do ar, além apresentarem aumentos contínuos nos preços.

A produção nacional de fertilizantes é insuficiente para atender a grande demanda da produção agrícola. Ademais, as reservas naturais de nutrientes utilizados na agricultura, como fósforo e potássio, são cada vez mais raras.

Para se desenvolver de forma sustentável, um país precisa diversificar sua matriz energética com fontes renováveis e garantir o fornecimento de insumos para a indústria. Diante disso, a biomassa disponível no Brasil aparece como um grande trunfo. Entre outras, duas formas que ela pode ser aproveitada é na produção de biogás e reciclagem dos nutrientes agrícolas.

Segundo a ABIOGÁS (2022), somente com os resíduos orgânicos, o Brasil tem um potencial de produção de biogás muito superior ao de qualquer outro país no mundo. As principais fontes de resíduos orgânicos para a geração desse biocombustível são os setores do saneamento básico, da agropecuária e da agroindústria.

No ano de 2021, de acordo com CIBIOGAS (2022), a produção de biogás brasileira foi de $2,6 \times 10^6$ Nm³, obtida pelo aproveitamento dos resíduos desses setores. Esse volume está bem abaixo do potencial estimado, pois o país deixa de aproveitar anualmente 44,1 bilhões de metros cúbicos, que – convertendo em equivalência energética – poderia suprir 34% da demanda por energia elétrica ou substituir 70% do óleo diesel consumido (ABIOGÁS, 2022).

Em estudo avaliando o potencial energético de resíduos sólidos orgânicos urbanos, de resíduos da agropecuária e de agroindústrias, no estado da Paraíba, BEZERRA (2019) estimou a produção de 332×10^9 Nm³ biogás/ano. Isso equivale a uma potência instalada de energia elétrica de 475 GW/ano.

A Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece que o Distrito Federal e os Municípios são responsáveis pela gestão integrada dos resíduos sólidos gerados nos seus territórios e que, para eles terem acesso a recurso da União, destinados aos serviços de limpeza e de manejo dos resíduos sólidos, é necessária a elaboração do plano municipal de gestão integrada dos resíduos sólidos.

A mesma lei prevê a aplicação de tecnologias visando a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que viáveis ambientalmente. Ela ainda afirma que os planos municipais devem prever mecanismos para a criação de fontes de negócios, emprego e renda, mediante a valorização desses resíduos.

Dessa forma, a biodigestão anaeróbia surge como uma das tecnologias mais indicadas para o tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU). Nesse processo são gerados dois subprodutos de interesse econômico: o biogás e o biofertilizante.

Diante das vantagens econômicas e ambientais promovidas pelo aproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos urbanos, este trabalho se destina a avaliar o potencial dessa biomassa gerada no município de Sumé-PB. Para tanto, foi estimada a produção de biogás, como também, levantadas as possíveis aplicações dos biofertilizantes oriundos do digestato.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é determinar o quanto de biogás é produzido com a biodigestão dos resíduos sólidos orgânicos coletados na Cidade de Sumé – PB e identificar uma aplicação para o digestato.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar o potencial desses resíduos sólidos orgânicos da cidade para a produção de biogás.
- Avaliar o potencial energético para a produção de energia elétrica por meio de um conjunto motogerador.
- Calcular o potencial energético para a queima direta do biogás, comparando este com o gás GLP.
- Definir a forma de aproveitamento do digestato.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Digestão anaeróbia

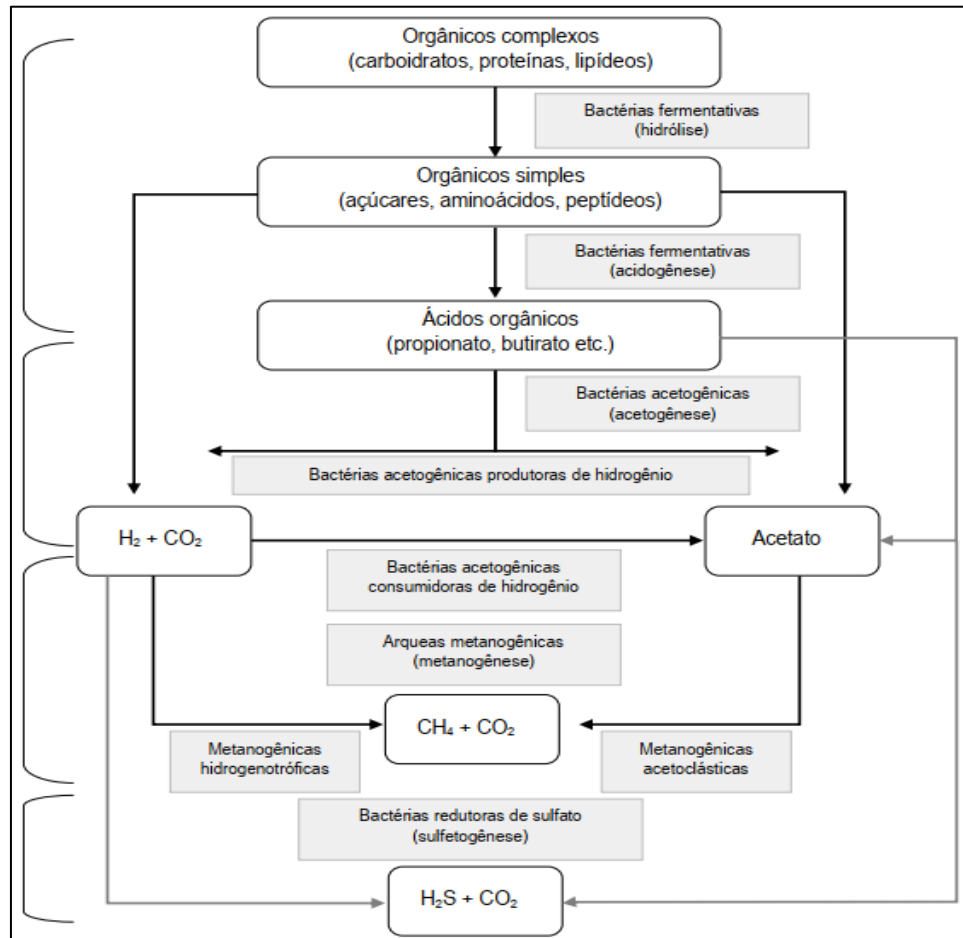
O tratamento biológico é uma forma de estabilização da matéria orgânica biodegradável onde se intensifica a ação de microrganismos. Na ausência de oxigênio molecular, esse processo é denominado de digestão anaeróbia (FEAM, 2012). Nesta, a conversão do material putrescível se dá por meio da interação de diferentes grupos de microrganismos, obtendo-se como subprodutos: metano, água, gás carbônico, gás sulfídrico, amônia e novas células bacterianas (KUNZ et al., 2019; LOBATO, 2011).

Chernicharo (1997) divide o processo de digestão anaeróbia em dois estágios, basicamente: no primeiro, um grupo de bactérias fermentativas e anaeróbias hidrolisam e fermentam orgânicos complexos (como carboidratos, proteínas e lipídios) em compostos mais simples, principalmente ácidos voláteis; no segundo estágio, bactérias estritamente anaeróbias convertem os ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em metano e gás carbônico.

De forma mais detalhada, pode-se dividir esses estágios em quatro fases, e cada uma é realizada por diferentes grupos de microrganismos. São elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHERNICHARO, 1997; KUNZ et al., 2019). Na Figura 1 apresentam-se as rotas metabólicas da digestão anaeróbia.

Na hidrólise, a matéria orgânica particulada é transformada em compostos mais simples, os quais podem ser assimilados pelas bactérias fermentativas. Isso só é possível pela ação das enzimas liberadas por estes microrganismos (CHERNICHARO, 1997). Logo em seguida, ocorre a acidogênese, onde esse mesmo grupo de bactérias metabolizam os monômeros assimilados anteriormente e os convertem em diversos compostos, principalmente ácidos graxos (CHERNICHARO, 1997; PROBIOGAS, 2015a).

Na acetogênese, atuam dois grupos de bactérias acetogênicas para produção de substrato para as metanogênicas. O primeiro transformará os produtos liberados pelas acidogênicas em hidrogênio, dióxido de carbono e acetato (CHERNICHARO, 1997); o segundo, os consumidores de hidrogênio, produzem acetato a partir de H_2 e CO_2 (PROBIOGAS, 2015a).

Figura 1 – Rotas metabólicas da digestão anaeróbia

Fonte: Chernicharo (2007) apud Lobato (2011)

Por último, acontece a metanogênese, a qual finaliza a degradação anaeróbia de compostos orgânicos, produzindo metano e dióxido de carbono. Nesta fase, atuam dois grupos principais de bactérias: as acetoclásticas (utilizadoras de acetato), que produzem cerca de 70% do metano a partir de ácido acético e metanol; e as hidrogenotróficas, as quais transformam hidrogênio e dióxido de carbono em metano (CHERNICHARO, 1997).

Pode ser que ocorra uma quinta fase: a sulfetogênese. Na presença de compostos sulfurados, bactérias sulforredutoras competem com todos os grupos anteriores na oxidação dos compostos orgânicos, formando os gases sulfeto de hidrogênio e CO₂ – consequentemente, diminuindo a produção de biogás (CHERNICHARO, 1997; PROBIOGAS, 2015a).

3.1.1 Alguns fatores intervenientes na digestão anaeróbia

A manutenção de alguns fatores físicos e químicos é extremamente importante para o bom equilíbrio dos grupos de bactérias responsáveis pela digestão anaeróbia. Os fatores físicos atuam como agentes seletivos, enquanto os químicos podem ou não comprometer o desenvolvimento desses microrganismos (CHERNICHARO, 1997).

3.1.1.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

A digestão anaeróbia acontece por meio da interação de diversos grupos de bactérias, sendo que cada um desenvolve-se melhor em uma determinada faixa de pH. Assim, recomenda-se a faixa de pH entre 6,8 e 7,5, na qual ocorre o crescimento máximo da maior parte dos microrganismos (HIRANO, 2015).

O pH pode atuar de duas formas: diretamente, afetando a atividade das enzimas; e indiretamente, afetando a toxicidade de vários compostos (CHERNICHARO, 1997).

3.1.1.2 Nutrientes

Os micronutrientes geralmente exercem muito pouca influência seletiva, diferentemente dos macronutrientes. Dentre estes, o carbono e o nitrogênio. Aquele é responsável por fornecer energia às bactérias; este, pela formação de novas células. A proporção ideal de carbono/hidrogênio varia de 20:1 a 30:1 (SALOMON; FILHO, 2007 *apud* HIRANO, 2015).

3.1.1.3 Temperatura

O processo de biodigestão pode se desenvolver em temperaturas psicrófilas (entre 0 e 20 °C), mesofílicas (entre 25 e 45 °C) e termofílicas (45 a 65 °C), sendo que nas duas últimas a produção de biogás ocorre de forma mais satisfatória (HIRANO, 2015). De acordo com Salomon e Filho (2007) *apud* Hirano (2015), a temperatura influencia no volume de gás produzido, grau de fermentação e tempo de detenção hidráulica.

Variações bruscas de temperatura podem comprometer o processo da biodigestão, visto que as bactérias são muito sensíveis a essas mudanças (CHERNICHARO, 1997).

3.2 Biogás

O biogás é um produto gasoso resultante da degradação biológica de substratos orgânicos sob condições anaeróbias. O biogás é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) e, em menores quantidades, aparecem o gás sulfídrico (H_2S), a umidade (H_2O) e outros gases como, por exemplo, o nitrogênio (N_2).

A quantidade de metano na composição é o fator determinante para o seu poder calorífico e, conseqüentemente, para o seu potencial energético. O poder calorífico inferior do metano é $35,9 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ e o do biogás com 60% de metano é $21,5 \text{ MJ.Nm}^{-3}$, correspondendo a 67% do poder calorífico inferior do gás natural (SILVEIRA et al., 2015). O conteúdo energético do biogás, com poder calorífico entre $21,5$ e $25,1 \text{ MJ/Nm}^{-3}$ (considerando concentrações de metano entre 60 e 70%, respectivamente), pode ser recuperado para diferentes aplicações, tais como: (i) uso direto como combustível em caldeiras, fornos e estufas em substituição a outros tipos de combustíveis; (ii) geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia; (iii) cogeração de eletricidade e calor; (iv) combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou o aproveitamento como combustível veicular (LOBATO, 2011).

De acordo com Leite (2003), a digestão anaeróbia é influenciada por diversos fatores, como temperatura (mesofílica ou termofílica), carga orgânica aplicada, e a presença de materiais de natureza tóxica. Ainda conforme o mesmo autor, citando Gandolla (2000), a proporção dos gases presentes no biogás é função das condições de biodigestão existentes, do substrato, da presença de populações de bactérias específicas, da pressão parcial do gás dissolvido na fase líquida e de outras variáveis.

Assim, mantendo-se as condições favoráveis, melhor será o desenvolvimento de um grupo específico de microrganismos consumidores de ácidos orgânicos simples, produzindo-se maiores quantidades de metano.

3.2.1 Produção de biogás por setor

No Brasil, a união da produção energética aos serviços ambientais, por meio da digestão anaeróbia, apresenta-se em crescimento. Dessa forma, consegue-se transformar os resíduos da agropecuária, das indústrias e dos serviços de saneamento básico em ativos econômicos (PROBIOGAS, 2015b).

No Quadro 1 são apresentados os principais tipos de substratos que podem ser utilizados como fonte de energia no processo de digestão anaeróbia.

De acordo com CIBIOGAS (2022), a agropecuária, no ano de 2021, foi o setor nacional que apresentou o maior número de unidades de geração de biogás, sendo responsável por 10% da produção de biogás (Figura 2). Segundo o PROBIOGAS (2015b):

A princípio, todos os substratos da agropecuária, de origem vegetal (resíduos da safra) ou animal (esterco, estrume), e algumas culturas dedicadas (milho, sorgo, entre outros), podem ser utilizados como substrato em uma planta de biogás. O esterco tem uma importância adicional, porque pode ser utilizado como substrato base na co-digestão. A aplicação do material digerido como fertilizante é útil e eficaz para as plantações, mas deve ser controlada em termos de balanço de nutrientes e segurança sanitária.

A maioria das indústrias que processam matérias-primas gera subprodutos sólidos e líquidos que podem ser usados como substratos na biodigestão. Além de atender a questões legais e contribuir para a boa qualidade ambiental, o tratamento desse material, pelos empreendimentos, gera insumos passíveis de serem empregados no seu próprio processo produtivo. Segundo CIBIOGAS (2022), 16% do biogás brasileiro eram produzidos por este setor em 2021.

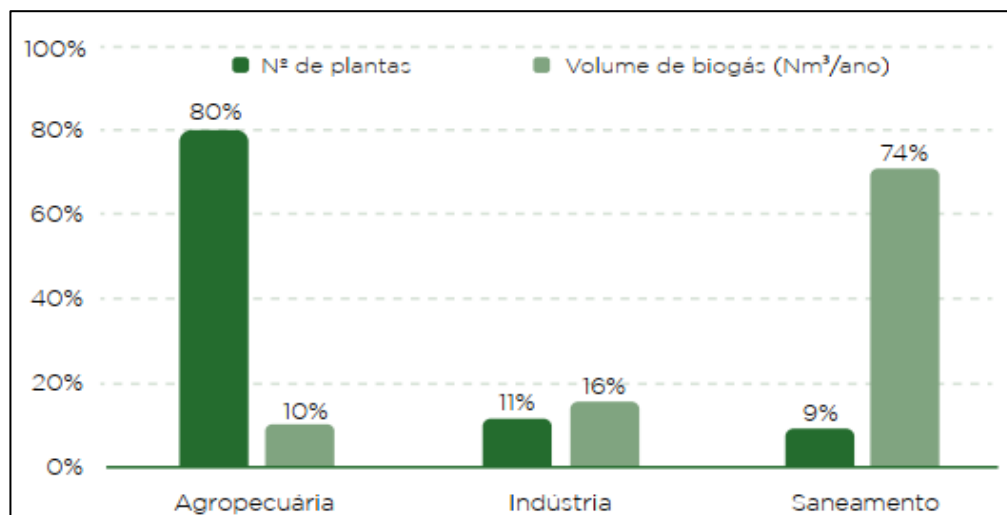
Quadro 1 – Substratos mais utilizados na produção de biogás no Brasil

FONTE	DESCRIÇÃO	SUBSTRATO
Agropecuária	Envolve atividades de criação animal (aves, bovinos, caprinos, suínos, entre outros).	Esterco animal, efluente proveniente do manejo dos dejetos (urina, fezes, água de lavagem etc.), restos de ração, carcaça de animais mortos não abatidos, entre outros.
Indústria (agroindústrias)	Contempla abatedouros e frigoríficos, usinas de açúcar e etanol, fecularias e amidonarias, cervejarias, indústrias de óleo vegetal, gelatina, entre outras.	Efluente industrial e demais resíduos orgânicos provenientes do processo industrial.
Saneamento	Contempla os aterros sanitários (RSU), as usinas de tratamento de resíduos orgânicos e as estações de tratamento de esgoto (ETE).	Resíduos sólidos urbanos (RSU) depositado em aterro sanitário, RSU segregado na fonte (fração orgânica), resíduos de frutas e vegetais (CEASA), restos alimentares (restaurantes, supermercado), esgoto sanitário.

Fonte: CIBIOGAS, 2022

Com menor número de unidades de geração de biogás do que os setores citados acima (9% das unidades), o setor de saneamento básico é o maior produtor de biogás nacional, sendo responsável por 74% do volume produzido deste biocombustível no ano passado (CIBIOGAS, 2022).

Na Figura 2 são apresentados os dados dos números de plantas e os quantitativos de biogás gerados.

Figura 2 – Quantidade de biogás gerada por setor em 2021

Fonte: CIBILOGÁS (2022)

3.2.2 Formas de aproveitamento do biogás

O potencial energético do biogás está relacionado com a quantidade de metano em sua composição, fator determinante para o seu poder calorífico. De acordo com Oliver Jender et al. (2015), a concentração deste varia entre 50 e 72%, dependendo do substrato e das condições de degradação.

Na Tabela 1 faz-se uma relação de 1 m³ de biogás com outras fontes de energia.

Na escolha da tecnologia de conversão, além do poder calorífico, da produção e composição do biogás, é necessário que se observem outras propriedades como pressão, presença de umidade, contaminantes, gases inertes e gases ácidos, estes últimos responsáveis por corrosão precoce dos equipamentos e emissões indesejadas de poluentes Lobato (2011). A mesma autora, citando Chernicharo e Stuetz (2008), afirmam que qualquer que seja o uso pretendido para o biogás, haverá sempre a necessidade de algum tipo de tratamento.

Tabela 1 - Relação de 1 m³ de biogás com outras fontes de energia

Fontes energéticas	1 m ³ de biogás equivalentes
Gasolina	0,61 - 0,70 (L)
Querosene	0,58 - 0,62 (L)
Óleo Diesel	0,55 (L)
GLP	0,40 – 1,43 (kg)
Álcool	0,80 (L)
Lenha	3,50 (kg)
Eletricidade	1,25 - 1,43 (kWh)

Fonte: BEZERRA (2019) *apud* POMPERMAYER (2000)

3.2.2.3 Geração de eletricidade

A obtenção de energia elétrica por meio do biogás é feita de modo a atender diferentes níveis de demanda, além de não ser necessária uma grande infraestrutura para servir de base a esse tipo de produção. Hirano (2015) diz que a geração

distribuída de energia elétrica é estratégica para suprir a crescente demanda mundial e para o acesso de comunidades isoladas.

As principais tecnologias utilizadas na conversão de biogás em energia elétrica são os motores de combustão interna (ciclo Otto e ciclo Diesel) e turbinas a gás. Geralmente, o tratamento dado ao gás é simples, para remoção de sulfeto de hidrogênio (H₂S) e de umidade.

3.2.2.3.1 Motores a combustão interna

Dentre os equipamentos utilizados na geração de eletricidade por meio do biogás, os motores de combustão interna são os mais empregados. Isso se deve ao fato de apresentarem maior rendimento e menores custos. Na maioria dos casos, as máquinas são feitas para operar com outros tipos de combustíveis (álcool, gasolina e diesel), sendo necessárias pequenas modificações para que passem a queimar o biogás (TAVARES *et al.*, 2019).

De acordo com Kunz e Oliveira (2006), esses motores podem operar independentemente da rede de energia elétrica da concessionária, bastando que um gerador elétrico esteja acoplado a ele; ou podem funcionar conectados à rede de distribuição, trocando-se o gerador por um motor assíncrono.

Na Figura 3 apresenta-se um motogerador a combustão interna.

Figura 3 – Motor a combustão interna com gerador acoplado



Fonte: ERBR - Energias Renováveis

3.2.2.3.2 Turbinas a gás

As turbinas a gás (Figura 4) são máquinas térmicas que operam por meio da combustão interna do biogás e expansão dos gases quentes, gerando eletricidade e calor. PROBIOGAS (2015) explica como ocorre sua operação:

Essencialmente, elas funcionam da seguinte forma: o ar é injetado pela admissão da turbina. Em seguida, por meio de uma fileira de palhetas, o ar sofre elevada compressão (compressor), ocasionando o aumento da temperatura. Em seguida, analogamente a um motor do ciclo Otto, o ar é misturado ao combustível e a combustão é disparada por uma vela de ignição (câmara de combustão). A combustão provoca a expansão abrupta da mistura ar/combustível, o que permite realizar trabalho mecânico no estágio seguinte da turbina. Parte da energia de rotação da turbina é utilizada para alimentar o compressor na admissão da turbina, outra parte movimenta um gerador para a produção de eletricidade. A energia térmica de combustão, portanto, primeiro é convertida em energia mecânica e em seguida em energia elétrica.

Esses equipamentos podem ser de micro, médio e grande portes e apresentam custos de operação e manutenção menores do que os motores de combustão. Porém, demandam mais investimento para a aquisição (SENAI, 2016).

Figura 4 – Turbina a gás



Fonte: EPA (2010) apud TAVARES (2019)

3.2.2.4 Combustão direta

Para a combustão direta, as exigências de purificação do biogás são mínimas, tendo em vista que muitos dos equipamentos utilizados no processo já são produzidos com materiais capazes de suportar os níveis de impurezas comumente presentes nesse gás. Isso faz com que a queima para aquecimento seja bastante difundida, pois não há relevantes custos envolvidos no tratamento.

O biogás pode ser utilizado para gerar energia térmica, através da sua queima direta por meio de aquecedores, fogões, esquentadores ou caldeiras. O “Manual para Aproveitamento de Biogás” (2010) apresenta como possíveis usos do biogás, como fonte de energia calorífica, o uso direto em aquecedores a gás para produção de água quente para condicionamento ambiental ou calor de processo, secagem de grãos em propriedades rurais, secagem de lodo em ETEs, iluminação a gás, tratamento de chorume, entre outros (LIMA e PASSAMANI, 2012).

3.2.2.5 Biometano

O biogás pode substituir o gás natural ou complementá-lo. Para que isso ocorra, aquele tem de passar por rigoroso tratamento, para apresentar elevado grau de pureza. Depois de purificado e atendendo às especificações da Resolução 08/2015 da ANP, o biogás recebe o nome de biometano (PROBIOGAS, 2015a).

Em países como Suécia e Alemanha, a injeção do biometano na rede de gás natural já é um processo consolidado, e apresenta como vantagens o transporte por longas distâncias a baixo custo, o uso direto por usuários, termoeletricas e distribuição em postos de abastecimento de veículos para que seja empregado como bio-GNV (SENAI-PR, 2016).

Como pode ser produzido de forma distribuída, o biometano tem grande potencial de promover maior acesso ao gás natural para pessoas e empresas de municípios localizados mais ao interior do Brasil. Isso se dá porque as redes de distribuição podem ser de pequena extensão, necessitando de uma infraestrutura bem menor do que as já existentes.

3.3 COMPOSTAGEM

A ampliação dos serviços de saneamento básico, para o tratamento biológico de esgotos e resíduos orgânicos, incrementa a geração de um subproduto que merece tanta atenção quanto esses: o lodo biológico. A importância deste está no seu potencial de poluição do ambiente e nos custos envolvidos no seu tratamento e disposição.

Fernandes e Silva (1996) dizem que, se referindo ao lodo de esgoto, a gestão adequada deste resíduo representa 60% do custo operacional de uma ETE. Os mesmos autores afirmam que as principais formas de destinação final são os aterros sanitários, incineração, disposição oceânica e disposição no solo – para melhorar as características físicas, químicas e nutricionais deste.

A aplicação do lodo no solo – seja como insumo agrícola ou recuperação de áreas degradadas, por exemplo – é a alternativa mais viável, principalmente para um país agrícola como o Brasil. Por conter organismos patogênicos, o uso deste biossólido pode apresentar riscos à saúde pública, caso seja feito sem nenhum tratamento. Portanto, a compostagem é a via mais adequada para tratar esse material.

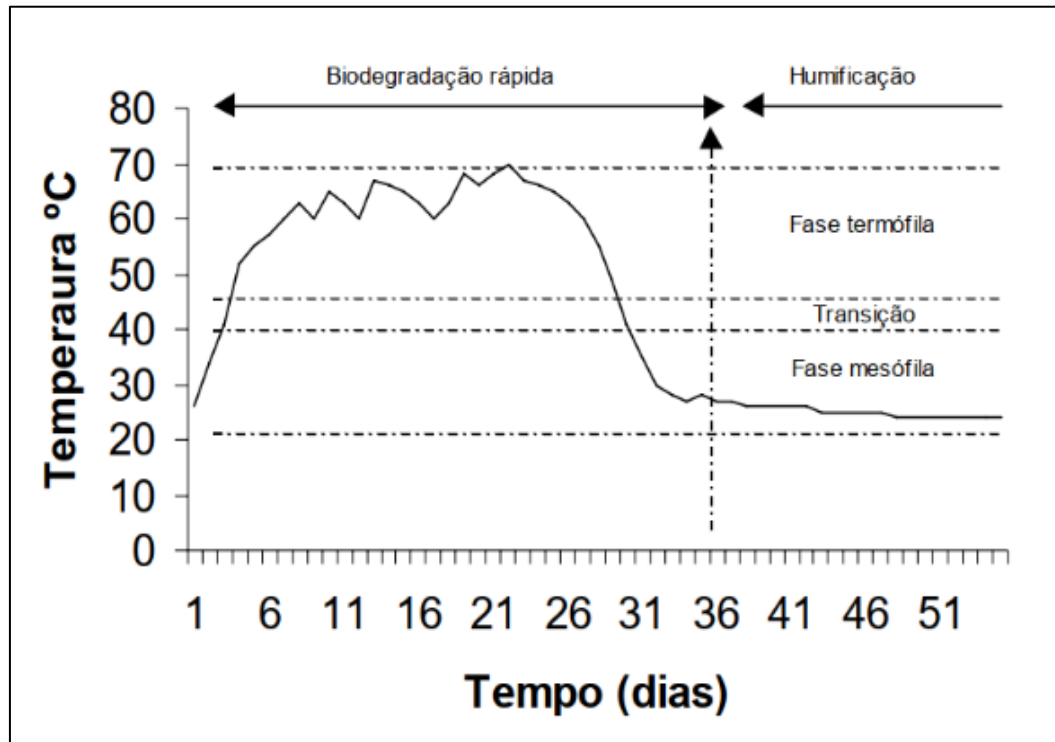
A compostagem é um processo no qual a matéria orgânica sólida sofre degradação biológica por meio da oxidação aeróbia exotérmica, produzindo CO₂ e água, liberando substâncias minerais e formando um material orgânico estável (livre de odor, fácil de manipular e sem microrganismos patogênicos) (FERNANDES e SILVA, 1996). A destruição desses patógenos vai sendo obtida ao longo do processo, o qual alcança temperaturas variando entre 50 e 70 °C (METCALF & EDDY, 2016).

A temperatura é um dos fatores mais importantes na compostagem, além de promover a eliminação de patógenos, define os estágios do processo e os respectivos microrganismos participantes desses. De acordo com Metcalf & Eddy (2016), os estágios são três: mesofílico, termofílico e a cura. No mesofílico, início da compostagem, a temperatura da pilha pode atingir 40 °C aproximadamente, com a participação de fungos e bactérias produtoras de ácidos.

Ainda conforme o mesmo autor, em seguida acontece a fase termofílica, com faixa de temperatura entre 40 e 70 °C, onde os microrganismos da fase anterior são substituídos por fungos e bactérias termofílicas e actinomicetos. Nesta, ocorre a máxima degradação e estabilização da matéria orgânica. Por fim, vem a fase de cura, na qual os organismos termofílicos dão lugar aos fungos e bactérias mesofílicas. Esta fase se caracteriza pela redução da atividade microbiana, estabilização do pH e formação completa do ácido húmico. Na Figura 5 apresenta-se, de forma genérica, a evolução da temperatura de uma leira em compostagem.

Com a manutenção de alguns parâmetros físico-químicos durante o processo, ao final dessas três fases obtém-se um composto nutritivo com grande capacidade de melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo. Pois esse material é fonte de matéria orgânica, micro e macronutrientes, aumenta a resistência do solo e sua capacidade de retenção de água e diminui a necessidade de uso de fertilizantes minerais (FERNANDES; SILVA, 1996).

Figura 5 – Variação da temperatura numa leira de compostagem



Fonte: FERNANDES;SILVA, 1996, p. 5

3.3.1 Fatores que afetam a compostagem

Sendo a compostagem um processo biológico de degradação da matéria orgânica, é necessário oferecer condições para bom desenvolvimento dos microrganismos. Para isso alguns parâmetros físico-químicos devem ser observados.

3.3.1.1 Aeração

O fornecimento de ar é fundamental para a compostagem, pois é por meio dele que se obtém o oxigênio utilizado pelos microrganismos aeróbios na oxidação da matéria orgânica. A demanda por O_2 é bastante elevada nos dois primeiros estágios do processo, onde sua falta pode diminuir a atividade microbiana e prolongar o tempo da compostagem (FERNANDES; SILVA, 1996).

A circulação de ar na massa do composto é primordial, dependendo do material estruturante, da umidade e da tecnologia de compostagem (FERNANDES; SILVA, 1996). A aeração influencia na velocidade de oxidação do material orgânico, controla a temperatura no material em decomposição e diminui a emissão de odores. As

formas de aerar são feitas por insuflação de ar ou por revolvimento manual ou mecânico dessa massa (PEREIRA NETO, 1989 *apud* SCHALCH, MASSUKADO e BIANCO, 2015)

3.3.1.2 Temperatura

Como já foi dito anteriormente, a temperatura é um dos parâmetros mais importantes para ser observado durante a compostagem. A relação temperatura/tempo de exposição é o principal mecanismo de eliminação de patógenos, podendo a temperatura chegar à faixa de 50 a 60 °C em poucos dias (ANDREOLI, 2001). A Tabela 2 apresenta as temperaturas e os tempos de exposição para eliminação de alguns patógenos.

A temperatura também é um indicador de fácil monitoramento do equilíbrio biológico e de alguns parâmetros físico-químicos. Por exemplo, se a leira de compostagem atingir temperaturas entre 40 e 60 °C no segundo ou terceiro dia, é um sinal que a compostagem será bem sucedida (FERNANDES; SILVA, 1996).

A elevação da temperatura deve ter um limite. Apesar de ser importante para a eliminação de patógenos, é necessário que ela não atinja valores próximos de 70 °C – com o risco de eliminar até os microrganismos termófilos e aumentar o tempo da compostagem. Sua manutenção em torno de 60 °C é o ideal para eliminação de patógenos e garantir boa atividade microbiana (ANDREOLI, 2001).

Ainda de acordo com o mesmo autor, a tecnologia de compostagem empregada influenciará na forma de como a temperatura se distribui na massa e na duração da fase termófila. No sistema de leiras revolvidas, a parte externa não atinge temperaturas letais para os agentes patogênicos, sendo necessária a temperatura mínima de 55 °C por pelo menos 15 dias e 5 revolvimentos nesse período a fim de homogeneizar a temperatura no material. Já para leiras estáticas, a exigência é que, também, seja mantida a temperatura mínima de 55 °C, mas por um tempo de três dias (Norma EPA 40 CFR part 503 *apud* ANDREOLI, 2001).

Tabela 2 - Temperatura e tempo de exposição para eliminação de patógenos

Patógenos	Tempo (minuto)	Temperatura (°C)
<i>Salmonella typhosa</i>	Instantâneo	55 a 60
	30	46
<i>Salmonella spp.</i>	15 a 30	60
	60	55
<i>Shigela</i>	60	55
<i>Escherichia coli</i>	5	70
	15 a 20	60
	60	55
<i>Entamoeba histolytica (cistos)</i>	Instantâneo	68
<i>Taenia saginata</i>	5	71
<i>Streptococcus fecais</i>	60	70
Coliformes fecais	60	70
<i>Ascaris spp. (ovos)</i>	60	55
	7	60

Fonte: EPA (1985) *apud* LEITE (2015)

3.3.1.3 Umidade

Sendo indispensável para a atividade microbiana, a umidade deve ser mantida em uma faixa de valores, idealmente entre 50 e 60%. Elevados valores de umidade fazem que a água ocupe os vazios da massa, impedindo a circulação de oxigênio e, conseqüentemente, criando zonas de anaerobiose. Por outro lado, o teor de umidade abaixo de 40% inibe a atividade biológica (FERNANDES; SILVA, 1996).

De acordo com Gomes (2022), citando Silva (2016), a umidade influencia na quantidade de carbono e nitrogênio, porque valores dela fora da faixa ideal reduzem a quantidade disponível destes nutrientes para os organismos decompositores.

O controle da umidade pode ser feito através da mistura dos materiais ou adicionando-se água ao material orgânico. O próprio material estruturante seco é incrementado com o intuito de, também, diminuir a umidade.

3.3.1.4 Relação carbono/nitrogênio (C/N)

O carbono e o nitrogênio são nutrientes para os microrganismos. São usados, respectivamente, como fonte de energia e para síntese proteica. A relação C/N considerada ideal é de 30/1, mas, de acordo com as características do substrato, pode variar de 20/1 à 70/1 (FERNANDES; SILVA, 1996).

De acordo com (VALENTE et al., 2009), a relação 30/1, dita como ótima, considera que todo o carbono está disponível para os organismos. Mas, na prática, esse valor talvez precise ser mais elevado devido a presença de matéria orgânica de difícil degradação – como celulose e lignina –, ou seja, o carbono biodisponível é menor do que o carbono mensurado no início do processo (BOSCO, 2017).

No decorrer da compostagem a relação C/N diminui, chegando a valores entre 10 e 20, pois há maiores perdas de carbono do que nitrogênio (FERNANDES; SILVA, 1996). Uma parte do carbono é convertida de mineral para orgânico e incorporada aos microrganismos e a maior parte é transformada e eliminada como gás carbônico; já a maior parte do nitrogênio é mineralizada, passando a fazer parte do composto (KIEHL 1985, 2004 *apud* BOSCO, 2017)).

3.3.1.5 Potencial hidrogeniônico (pH)

Geralmente, os compostos orgânicos utilizados na compostagem apresentam pH ácido, o qual diminui ainda mais, no início do processo, na fase mesófila, pela produção de ácidos orgânicos (VALENTE et al., 2009). No final da fase mesófila e início da termófila, há uma elevação do pH devido ao consumo de ácidos orgânicos e minerais e à hidrólise de proteínas e à liberação da amônia (FERNANDES e SILVA, 1996; VALENTE *et al.*, 2009).

Valores de pH muito baixos ou muito altos prejudicam a atividade microbiana. A faixa de pH entre 5,5 e 8,0 é considerada ideal, pois nesta a maioria das enzimas encontra-se ativa (VALENTE *et al.*, 2009). Segundo PEREIRA NETO (2007) *apud* BOSCO (2017), os microrganismos conseguem controlar o meio até uma faixa de pH entre 4,5 e 9,5, liberando subprodutos ácidos ou básicos.

3.3.1.6 Granulometria

A granulometria das partículas também é um fator que tem grande influência no processo de compostagem. Um substrato com partículas pequenas tem uma maior

área exposta à ação dos microrganismos, facilitando a degradação do material (FERNANDES e SILVA (1996).

Uma granulometria fina somada a um excesso de umidade pode elevar a densidade da matéria orgânica (VALENTE et al., 2009). Como consequência, ocorreria a compactação da massa e o impedimento da distribuição do ar por ela, prejudicando a compostagem (FERNANDES; SILVA, 1996).

FERNANDES e SILVA (1996) recomendam que o tamanho das partículas, para ótimos resultados na compostagem, deve variar de 2,5 a 5,0 cm. De acordo com Obeng e Wright (1987) *apud* Gomes (2022), a granulometria ideal varia de acordo com a tecnologia de compostagem utilizada, sendo de 1,0 cm para sistemas de aeração forçada e de 5,0 cm para sistemas de aeração passiva ou leiras revolvidas.

3.4 Compostagem do digestato

O digestato anaeróbio é um fertilizante natural que possui elevado valor nutricional, apresentando em sua composição micro e macronutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas. Além disso, sua incorporação ao solo melhora a estrutura deste.

Segundo Kunz *et al.*(2019), a compostagem deste biofertilizante diminui os gastos financeiros das indústrias de biogás, pois não será necessário o emprego de tratamentos mais custosos, como aqueles para a remoção de nutrientes, por exemplo. Há também a possibilidade de ocorrerem grandes gastos com o transporte do digestato para outras localidades, caso a região onde o biodigestor está instalado não tenha área suficiente para recebê-lo (LI et. al. 2018b *apud* SILVA, 2021).

O digestato anaeróbio tem algumas características que prejudicam a sua aplicação direta na agricultura. Esse material orgânico não se encontra totalmente estabilizado, apresentando elevada concentração de AGV, excesso de umidade, odor desagradável e exige maquinário complexo e caro para seu manuseio (SILVA, 2021).

Existe ainda a preocupação com contaminantes que podem estar presentes no digestato, os quais podem ser químicos (metais pesados) ou biológicos (agentes patogênicos). A presença e concentração destes vão depender do tipo de substrato utilizado na biodigestão.

Fernandes e Silva (1996) afirmam que:

“São considerados como metais pesados os elementos que possuem massa específica maior que $6,0 \text{ g/cm}^3$. No entanto, o termo “metal pesado” é, às vezes, utilizado indiscriminadamente para os elementos químicos que contaminam o meio ambiente e podem provocar diferentes níveis de dano à biota. Os principais elementos químicos enquadrados neste conceito são: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se e Zn. Estes elementos são encontrados naturalmente no solo em concentrações que variam de μg a mg.kg^{-1} , as quais são inferiores àquelas consideradas tóxicas para diferentes organismos vivos. Dentre eles As, Co, Cr, Cu, Se e Zn são essenciais aos organismos vivos.

O aumento da concentração de metais pesados no solo pode ser provocado tanto por adubos industriais (fungicidas e fertilizantes, por exemplo), que contenham metais em sua composição, como os adubos orgânicos (esterco de animais e resíduos urbanos) (CIPOLETA, 2018).

Nos resíduos sólidos domésticos, a fonte desses metais são materiais como lâmpadas, baterias, tintas etc.

Com relação aos agentes biológicos, Leite (2015) afirma que eles podem ser divididos em ovos de helmintos, cistos de protozoários, vírus, fungos e bactérias. Dentre estes, a maior preocupação é com os ovos de helmintos devido à alta frequência na população brasileira, sua maior resistência às condições adversas e sua baixa dose infectante (FERNANDES e SILVA, 1996).

M.M.P. Silva et al. (2010), avaliando a FORSUD no semiárido paraibano, dizem que:

As condições de saneamento ambiental, a irrigação de culturas agrícolas com esgoto bruto ou tratado primariamente, a lavagem inadequada de vegetais utilizados na alimentação humana, somadas à prevalência destes helmintos no Brasil e aos meios de transmissão, explicam a prevalência de ovos de helmintos nos resíduos sólidos orgânicos investigados.

No mesmo artigo citado acima, os valores de ovos de helmintos identificados variaram de 12,82 a 14,39 ovos/gST, onde a grande maioria era de ovos viáveis – ou seja, com potencial de causar doenças aos humanos. Gomes (2022), em estudo realizado no Bairro da Malvinas, em Campina Grande – PB, encontrou um valor de

4,1 ovos de helmintos/gST na FORSUD. Esses resultados demonstram a necessidade de um tratamento para a eliminação dos patógenos.

Diante do exposto, a compostagem surge como a via mais sensata para o tratamento do digestato anaeróbio. Além de promover a eliminação dos patógenos, esse processo aeróbio produz um material capaz de complexar parte dos metais presentes no solo e completar a estabilização do digestato.

Geralmente, a temperatura nos biodigestores alcança apenas a faixa mesófila, a qual não viabiliza a eliminação da maioria dos patógenos, entre eles os helmintos. A higienização do digestato só será feita quando este for submetido à compostagem, onde são alcançadas temperaturas entre 45 e 70 °C. Temperaturas entre 55 e 60 °C já são suficientes para a inviabilização dos ovos de helmintos em minutos.

Com relação aos metais pesados, a compostagem pode ajudar na diminuição da toxicidade dos metais pesados encontrados no solo, por meio de um dos seus produtos finais: o húmus. Este tem capacidade de complexar os metais do solo, reduzindo a disponibilidade destes para as plantas (FERNANDES; SILVA, 1996).

Para que a compostagem do digestato ocorra de forma satisfatória, é preciso adicionar nele material estruturante, o qual pode ser oriundo de podas de árvores, serragem, palhas etc. Estes materiais tanto ajudam a reduzir a umidade da massa efluente do biodigestor como a aumentar a relação C/N, já que esta é baixa na FORSUD e parte de seu carbono orgânico foi usado na digestão anaeróbia.

4 METODOLOGIA

4.1 Obtenção das informações

Este trabalho iniciou-se com uma pesquisa bibliográfica acerca da FORSU e de formas para o seu tratamento e reaproveitamento dos subprodutos deste. De forma mais específica, buscou-se informação sobre a digestão anaeróbia da biomassa e da produção de biogás, como também, da compostagem (tratamento aeróbio) do digestato.

Para quantificação da massa de resíduos sólidos orgânicos urbanos coletados, utilizaram-se dados disponíveis em artigos acadêmicos e em documentos e sites dos governos municipal de Sumé - PB, do estado da Paraíba e Federal.

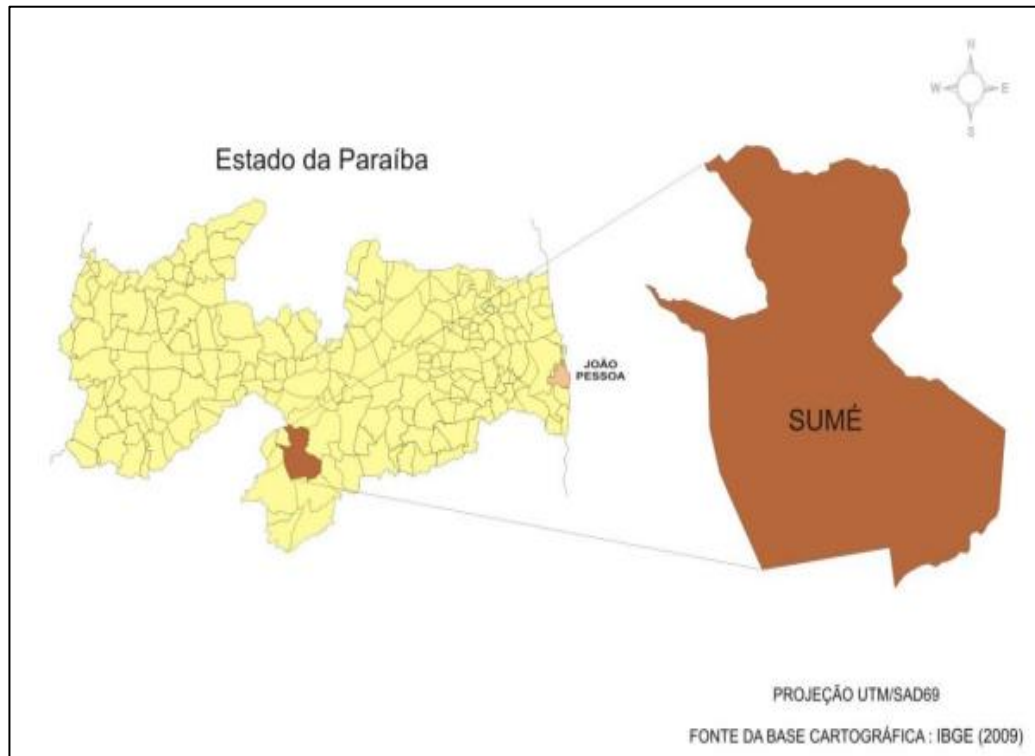
4.2 Área de Estudo

O local onde foi avaliado o potencial de aproveitamento da FORSU é a cidade de Sumé – PB. Esta encontra-se na mesorregião da Borborema e microrregião do Cariri Ocidental paraibano, conhecido como Cariris Velhos. A cidade encontra-se a uma altitude média de 532 metros e possui a seguinte posição geográfica: 7° 40' 13" latitude sul e 36° 52' 58" longitude oeste. Na Figura 6 identifica-se a localização do município de Sumé no estado da Paraíba

O clima do município é o semiárido, caracterizado por altas temperaturas ao longo do ano (26 a 31 °C) e regime pluviométrico baixo e irregular, com média anual em torno de 871 mm/ano (SUME, 2014).

Segundo o IBGE (2022), a população estimada do município, no ano de 2021, era de 17.096 habitantes e a sua área territorial é de 833,3 km². De acordo com (PARAÍBA, 2014), 76% da população residem na zona urbana.

Figura 6 – Localização do município de Sumé no estado da Paraíba



Fonte: Base cartográfica IBGE (2009)

4.3 Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Sumé-PB

A população estimada para o município de Sumé-PB é de 17.096 habitantes, onde 12.992 destes residem na sede municipal. Com isso, estima-se que a produção de resíduos sólidos urbanos, para uma geração de $0,6 \text{ kg.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, seja de aproximadamente $7,8 \text{ ton.dia}^{-1}$. Desde 2014, o município possui o Plano Municipal de Resíduos Sólidos.

Em uma avaliação realizada pelo governo municipal, cerca de 50% dos resíduos gerados passam por algum estágio de coleta seletiva (SUMÉ, 2022). O restante dos resíduos é destinado a um aterro sanitário de pequeno porte em valas. Este caracteriza-se como um sistema simplificado de disposição no solo, para até 20 ton.dia^{-1} , dos resíduos sólidos urbanos – sem causar danos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais (NBR 15.849/2010).

A coleta é realizada em toda a cidade, sendo feita porta a porta na maior parte. Em pontos específicos, há cestos metálicos nos quais as pessoas que moram próximo

deixam os resíduos sólidos das suas casas, sendo estes recolhidos pelos agentes de limpeza.

O serviço de limpeza urbana conta também com varrição de ruas e coleta de podas de árvores e de entulho da construção civil. Os equipamentos utilizados nesse serviço são carrinhos de mão, caminhão compactador, caminhão caçamba, retroescavadeira e triturador de galhos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os dados e os modelos matemáticos utilizados, assim como os resultados obtidos referentes à quantidade de resíduos sólidos orgânicos gerados na cidade e de metano produzida pela digestão anaeróbia destes. Também serão mostradas as formas de aproveitamento do biogás e do digestato.

5.1 Produção de resíduos sólidos orgânicos urbanos

O método utilizado para estimativa da população foi o geométrico. Este é indicado para períodos de tempo menores do que trinta anos e para populações inferiores a 50.000 habitantes. O tempo de projeto considerado foi de vinte anos – de 2022 a 2042.

A quantidade de habitantes para o início de projeto é de 17.096; para o final, de 19.263. No Tabela 3 são apresentados os dados sobre número de pessoas que moram nas zonas rural e urbana para o início e final de projeto. As mesmas porcentagens de habitantes foram consideradas para os anos de 2022 e 2042.

Tabela 3 - Populações rural e urbana do município de Sumé-PB

ANO 2022	
RURAL (24%)	URBANA (76%)
4.126	13.067
ANO 2042	
RURAL (24%)	URBANA (76%)
4.623	14.640

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022

Para determinar a massa de resíduos sólidos orgânicos destinados à digestão anaeróbia, considerou-se somente os gerados na cidade. A partir da equação (1) obtém-se a quantidade da FORSU produzida diariamente, em que foram usados para o cálculo a taxa de $0,6 \text{ kg RSO.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ e a porcentagem de resíduos sólidos orgânicos de 50% da massa total.

$$M_{FORSU} = hab \times PP \times FO \quad (1)$$

Onde:

hab = número de habitantes;

PP = produção per capita de RSU (kg.hab⁻¹.dia⁻¹); e

FO = fração orgânica (%).

Na Tabela 4 são apresentados os valores da massa da FORSU produzida diariamente para o início e final de projeto:

Tabela 4 - Massa da FORSU produzida diariamente

ANO	MASSA DE RSO (kg RSO.dia⁻¹)
2022	3.921,1
2042	4.392,0

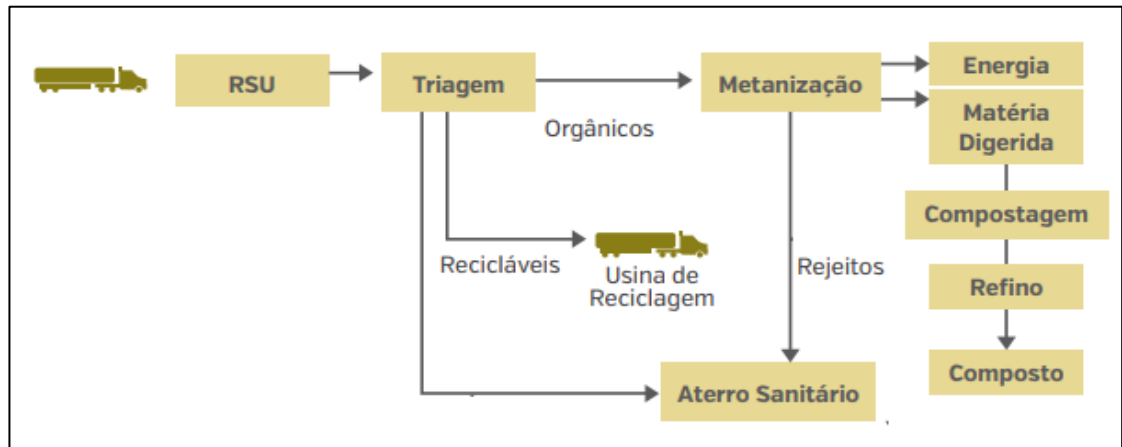
Fonte: Elaborada pelo autor, 2022

Neste trabalho optou-se por manter a taxa inicial de 0,6 kg RSO.hab⁻¹.dia⁻¹ constante ao longo dos anos, mas a tendência é que ela aumente. Conseqüentemente, o volume dos resíduos sólidos urbanos gerados expandirá não apenas com crescimento da população, como também, com a mudança de hábitos desta.

Assim, os problemas sanitários, econômicos e ambientais relacionados à gestão da FORSU já existentes só aumentarão com o passar do tempo, caso medidas sustentáveis não sejam tomadas. Dentre estas, destacam-se a compostagem e a biodigestão.

Comparando com outras formas de tratamento e de disposição ambientalmente adequadas, os processos de compostagem natural e a biodigestão são os tratamentos mais baratos (SENAI-PR, 2016). Além disso, apresentam a vantagem de retorno financeiro oriundo do aproveitamento dos seus subprodutos. A Figura 7 é um fluxograma ilustrando as etapas de tratamento dos RSU gerados na cidade.

Figura 7 – Fluxograma das destinações das frações dos RSU em Sumé-PB



Fonte: PROBIOGÁS (2015b, com adaptações)

5.2 Produção de biogás

A digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos pode ocorrer por via úmida (até 15% de sólidos totais) ou por via seca, onde o tratamento desses resíduos é feito com conteúdo de sólidos totais entre 20 e 40% (LEITE *et al.*, 2003).

Um dos modelos de biodigestores mais indicados para o tratamento da FORSU em seu estado original (com porcentagem de ST em torno de 20) é o do tipo garagem (Figura 8). Este opera em batelada, sem a necessidade de agitação e circulação de resíduos – tratando-se de um sistema simples e robusto (MOURA, 2017).

Figura 8 – Biodigestores tipo garagem



Fonte: PROBIOGÁS (2015b)

Com o uso das equações a seguir, chega-se ao volume teórico de metano produzido diariamente. Os valores dos parâmetros utilizados nos cálculos estão na Tabela 5.

$$M_{RSO-BS} = M_{FORSU} \times ST \quad (2)$$

$$M_{DQO-BS} = M_{RSO-BS} \times DQO \quad (3)$$

$$M_{CH_4} = M_{DQO-BS} \times E_T \times F_C \quad (4)$$

$$V_{CH_4} = M_{CH_4} \times M.E_{CH_4} \quad (5)$$

Em que:

M_{RSO-BS} = massa diária de RSO em base seca (kg.dia⁻¹)

M_{DQO-BS} = massa diária de DQO dos RSO em base seca (kg.dia⁻¹)

M_{CH_4} = massa diária de metano (kg)

V_{CH_4} = volume de gás metano produzido diariamente (m³ CH₄)

Tabela 5 - Dados utilizados nos cálculos

ST – Porcentagem de Sólidos Totais (%)	20
DQO – DQO dos RSO em base seca (%)	30
ME – Massa específica do gás metano (kg.m ⁻³)	0,66
E _T – Eficiência de transformação de massa de DQO (%)	80
F _C – Fator de conversão de massa de DQO em massa de metano	0,25

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022

Na Tabela 5 estão os valores dos volumes de metano produzidos:

Tabela 6 - Volume de metano produzido diariamente

ANO	VOLUME DE METANO (m ³ CH ₄ .dia ⁻¹)
2022	71,27
2042	79,85

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022

Para determinar o volume de biogás, considera-se que 65% dos gases constituintes é de metano. Assim, chega-se aos seguintes valores de biogás

produzidos (Tabela 6):

Tabela 7 - Volume de biogás produzido diariamente

ANO	VOLUME DE BIOGÁS (m ³ .dia ⁻¹)
2022	117,60
2042	131,76

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022

5.3 Geração de energia elétrica

A tecnologia escolhida para a transformação do metano em energia elétrica foi o motor de combustão interna (MCI) a biogás ou já adaptado para operar com esse gás, ao qual é acoplado um gerador. No mercado, esse tipo de motor pode ser encontrado com potência variando entre 5kW e 5MW, e se caracteriza por apresentar custo baixo, partida rápida, operação estável e elevado potencial de recuperação de calor (LOBATO, 2011).

A estimativa de geração de energia elétrica é feita considerando que o poder calorífico inferior (CPI) do metano é de 9,9 kWh.m⁻³ (COLDEBELLA *et al.*,2006 *apud* MOURA, 2017). Na Tabela 7 são apresentados os valores de energia elétrica produzida diariamente e mensalmente para os anos de 2022 e 2042, para um rendimento de 40% do motogerador:

Tabela 8 - Volume de metano e potências elétricas geradas

ANO	VOLUME DE METANO (m ³ CH ₄ .dia ⁻¹)	POTÊNCIA GERADA (kWh.dia ⁻¹)	POTÊNCIA GERADA (kWh.mês ⁻¹)
2022	71,27	282,25	8467,4
2042	79,85	316,22	9486,7

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022

Uma parcela dessa energia gerada poderia ser utilizada para suprir a demanda elétrica da central de triagem dos resíduos urbanos coletados e sobriaria boa parte para ser usada em outros locais. Na Tabela 8 é apresentado um levantamento preliminar dos equipamentos elétricos utilizados no galpão de triagem. O consumo de energia elétrica obtido foi de 1.364,2 kWh.mês⁻¹. Este representa 16,1% e 14,4% da energia produzida mensalmente para os anos de 2022 e 2042, respectivamente.

A energia elétrica não utilizada no galpão, cerca de 7.103,2 kWh.mês⁻¹, para o ano de 2022, por exemplo, é capaz de abastecer 46 residências – para o consumo médio residencial brasileiro de 152,2 kWh (FEDRIGO; GONÇALVE; LUCAS, 2022). Essa quantidade de energia pode, também, ser utilizada em prédios públicos ou pequenos empreendimentos.

Devido à capacidade de geração elétrica ser pequena, essas últimas alternativas de uso da energia excedente são mais indicadas, pois podem ser abastecidas diretamente pelo motorgerador, desde que estejam localizados próximo à usina de biogás. De acordo com Prati (2010), a venda de energia elétrica para a concessionária requer a instalação de equipamentos de proteção e sincronismo pelo produtor para que ele possa alimentar a rede, o que eleva bastante o custo do investimento.

Tabela 9 - Equipamentos do galpão de triagem e seus respectivos consumos de energia elétrica

EQUIPAMENTO	POTÊNCIA UNITÁRIA (W)	QUANTIDADE	POTÊNCIA TOTAL (W)	TEMPO DE OPERAÇÃO DIÁRIO (HORAS)	Nº DE DIAS DE OPERAÇÃO NUM MÊS	CONSUMO DIÁRIO (kWh/D)	CONSUMO MENSAL (kWh/MÊS)
Prensa Enfardadeira 3 CV	2.207,0	2	4.414,0	5	22	22,1	485,5
Luminária 9000 Lúmens	100,0	27	2.666,7	8	22	21,3	469,3
Luminária Poste Externo	300,0	3	900,0	12	30	10,8	324,0
Aparelho de som	110,0	1	110,0	8	22	0,9	19,4
Lâmpada de 15 W	15,0	4	60,0	2	22	0,1	2,6
TV 40" LED	83,0	1	83,0	2	22	0,2	3,7
Geladeira 2 Portas	67,0	1	67,0	24	30	1,6	48,2
Gela Água	65,0	1	65,0	8	22	0,5	11,4
TOTAL MENSAL							1364,2

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

5.4 Produção de energia térmica

A queima direta do biogás é a forma mais simples de realizar seu aproveitamento energético. Os usos mais comuns são o aquecimento de prédios, criadouros de animais, estufas e processos de secagem (SENAI-PR, 2016).

Os queimadores de biogás apresentam eficiência energética superior aos geradores de eletricidade, estes apresentam valores que variam de 30 a 45% e aqueles, de 30 a 60% (SENAI-PR, 2016).

Para determinar o potencial energético térmico do biogás gerado na cidade de Sumé-PB, foi feita uma comparação entre volume de biogás gerado e seu equivalente em GLP. Segundo a EPE (2007), o m³ do biogás equivale a 0,45 kg de GLP.

O volume estimado de biogás produzido diariamente foi de 117,6 e 130,8 m³, para os anos de 2022 e 2042, respectivamente. Na Tabela 9 são apresentados os dados de volume de biogás e massa produzida de GLP.

Tabela 10 - Volume biogás e massa de GLP

ANO	VOLUME BIOGÁS (m ³ .dia ⁻¹)	GLP (kg.mês ⁻¹)
2022	117,6	1764,0
2042	131,8	1976,4

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022

Tomando por base o botijão de 12 kg e considerando o consumo mensal de 1 botijão por residência, para o ano de 2022, o volume de biogás produzido seria capaz de atender à demanda de gás de cozinha de 147 casas mensalmente.

De acordo com Lobato (2011), a principal desvantagem da queima direta é que o consumidor deve se localizar próximo à fonte geradora. Nesse sentido, o ideal é destinar o biogás para prédios presentes no entorno da usina, sejam eles: residências, prédios públicos ou granjas de frango.

Também poderiam ser desenvolvidos novos projetos na mesma área da usina de biogás, como a construção de uma cozinha municipal para a produção de refeições para restaurantes populares ou escolas públicas.

5.5 Aproveitamento do digestato

O digestato anaeróbio é um excelente biofertilizante, apresentando em sua constituição micro e macro nutrientes necessários ao desenvolvimento de plantas, além de melhorar características físicas e aumentar a atividade microbiana dos solos. Autores afirmam que, em alguns casos, esse efluente dos digestores é um problema, pois, quando não há áreas próximas disponíveis para sua aplicação, é necessário altos gastos com seu tratamento e disposição adequada. Esse não é o caso do município de Sumé-PB, onde são diversas as formas de aproveitamento do digestato: agricultura, pastagens, recuperação de áreas degradadas etc.

A agricultura e a pecuária estão entre as principais atividades econômicas de vários municípios do Cariri Paraibano, inclusive de Sumé. Nestes, boa parte dos solos são rasos e têm baixa quantidade de matéria orgânica e nutrientes, apresentando baixa capacidade produtiva. Além disso, as formas como essas atividades são desenvolvidas acabam por intensificar o processo de degradação dos solos.

Segundo Crispiniano (2017), 90% das terras paraibanas estão vulneráveis ao processo de desertificação, onde mais de duzentas municípios já podem estar sofrendo esse processo. Francisco et al. (2014) constataram que cerca de 45% das áreas do município de Sumé estão em processo de perda de biomassa e degradação.

De acordo com o Censo Agropecuário do IBGE, em 2017, no município sumeense, a área ocupada com estabelecimentos agropecuários era de 48.571 hectares, destes 2.603 eram ocupados por lavouras e 12.129, por pastagens. Aproximadamente 96% usaram adubos orgânicos, exclusivamente.

Diante desses dados, percebe-se que o uso de biofertilizante orgânico pode, simultaneamente, contribuir bastante para a economia e para melhoria da qualidade dos solos do município.

Como já mencionado anteriormente, o digestato passará pelo tratamento da compostagem, resultando num produto rico em nutrientes, húmus e livre de patógenos. Este adubo poderá ser ensacado e distribuído para os agricultores locais.

6 CONCLUSÃO

O emprego do tratamento anaeróbio, por meio de biodigestores, nos resíduos sólidos orgânicos coletados na Cidade de Sumé – PB é a forma mais adequada para se aproveitar ao máximo esse material, pois são gerados nesse processo dois subprodutos de apreciável valor para aplicação no município: o biogás e o digestato.

O biogás pode ser utilizado para a produção de energia elétrica ou como substituinte do GLP. No emprego para a geração de energia elétrica, esse gás produziria 8.467,4 e 9.486,7 kWh.mês⁻¹ nos anos de 2022 e 2042, respectivamente. Se for usado como substituinte do gás liquefeito de petróleo, o volume estimado do biocombustível, no ano de 2022, é equivalente a 1.764,0 kg GLP.mês⁻¹; para o ano de 2042, a 1.976,4 kg GLP.mês⁻¹.

Pelo fato da agricultura ser uma das principais atividades econômicas do município sumeense, a melhor forma de aproveitamento do digestato é produção de adubo orgânico, sendo este distribuído para agricultores locais.

Adicionado à geração de insumos energético e agrícolas, esse gerenciamento adequado da FORSU diminui, no mínimo, em 50% dos resíduos que são destinados ao aterro sanitário atualmente – aumentando a vida útil deste e reduzindo custos.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o reaproveitamento dos resíduos orgânicos da cidade traz benefícios econômicos e ambientais, pois, além de diminuir a pressão sobre os recursos naturais e reduzir a liberação de poluentes para o meio ambiente, há a possibilidade de obtenção de renda com os insumos produzidos nos processos biológicos de tratamento.

REFERÊNCIAS

ABILOGÁS. **Programa Nacional de Biogás e Biometano**. São Paulo: [s.n.], 2022.

ABNT. **NBR 15849 Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. [S.l.]. 2010.

ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES: PROSAB, 2001.

BEZERRA, V. R. **Avaliação do Potencial Energético de Biomassa Gerada no Estado da Paraíba**. Campina Grande. 2019.

BOSCO, T. C. D. **Compostagem e Vermicompostagem de Resíduos Sólidos: resultados de pesquisas acadêmicas**. São Paulo: Blucher, 2017.

BRASIL. **Lei Federal n.º 12.305, de 02 de Agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. [S.l.]. 2010.

CHERNICHARO, C. A. D. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: [s.n.], 1997.

CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - BIOGÁS.

Panorama do Biogás no Brasil 2021. CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico Nº 001/2022. Foz do Iguaçu. 2022.

CIPOLETA, N. S. **Potencial de resíduos orgânicos na atenuação de contaminação por cobre de solo e água**. Universidade Federal de São Carlos. Araras. 2018.

CRISPINIANO, F. F. **Inserção de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos na Recuperação de Solos Degradados pelo Processo de Desertificação**. UEPB. Campina Grande. 2017.

EPE. **EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA: PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2030**, 2007. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 29 mai. 2022.

FEAM. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação**. Belo Horizonte: [s.n.], 2012.

FEDRIGO, N. S.; GONÇALVES, G.; LUCAS, P. F. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**, 2022. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/node/480>>. Acesso em: 20 mai. 2022.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. D. **Manual Prático para Compostagem de Biossólidos**. [S.l.]: PROSAB, 1996.

FRANCISCO, P. R. M. et al. Avaliação da Degradação da Caatinga do Município de Sumé-PB Estimado pelo Volume de Biomassa da Vegetação Lenhosa. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, p. 117-129, 2014.

GOMES, R. B. **Tratamento Biológico Aeróbio Resíduos Sólidos Orgânicos Domiciliares: análise de parâmetros físicos, químicos e sanitários**. UEPB. Campina Grande. 2022.

HIRANO, M. Y. **Geração de Energia por Microturbina Alimentada à Biogás em uma Propriedade Rural - Estudo de Caso**. Universidade Estadual Paulista. Bauru. 2015.

IBGE. **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**, 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/sume/pesquisa/24/76693>>. Acesso em: 29 mai. 2022.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2022.

Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/sume/panorama>>. Acesso em: 29 maio 2022.

JENDE, O. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás. Brasília: [s.n.], 2015.

KUNZ, ; OLIVEIRA, P. A. V. D. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Política Agrícola**, n. 3, Jul./Ago./Set 2006.

KUNZ, A.; STEINMETZ, L. R.; AMARAL, C. D. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato**. [S.l.]: [s.n.], 2019.

LEI 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; [S.l.].

LEITE, T. A. **Compostagem Termofílica de Lodo de Esgoto: higienização e produção de biossólido para uso agrícola**. USP. São Paulo. 2015.

LEITE, V. D. et al. Biodigestão de Resíduos Sólidos Orgânicos. In: CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: PROSAB, 2003. p. 210.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES, Vitória, 2012.

LOBATO, L. C. D. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. Belo Horizonte. 2011.

LUSTOSA, G. N.; MEDEIROS, H. B. D. **Proposta de um Biodigestor Anaeróbio Modificado para a Produção de Biogás e Biofertilizante a Partir de Resíduos**

Sólidos Urbanos. Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia. Brasília. 2014.

METCALF, E. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos.** Tradução de Ivanildo Hespanhol e José Carlos Mierzwa. Porto Alegre: AMGH, 5ª ed., 2016.

MOURA, R. P. **Avaliação do Potencial de Geração de Energia a Partir dos Resíduos Orgânicos do Restaurante Universitário Central da UFRJ.** UFRJ. Rio de Janeiro. 2017.

PARAÍBA. **PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO ESTADO DA PARAÍBA: RELATÓRIO SÍNTESE,** 2014. Disponível em: <<http://static.paraiba.pb.gov.br/2013/01/PLANO-ESTADUAL-VERSAO-PRELIMINAR.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2022.

PRATI, L. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Gerado por Biodigestores.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.

PROBIOGÁS. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás .** Brasília: [s.n.], 2015a.

PROBIOGAS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás.** Brasília-DF: Ministérios das Cidades: Probiogás, 2015b.

SCHALCH, ; MASSUKADO, L. ; BIANCO,. Compostagem. In: NUNES, ; REZENDE, O. D. O. **Recurso Solo: propriedades e usos.** [S.l.]: Cubo, 2015.

SENAI-PR. **Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná.** Curitiba: [s.n.], 2016.

SILVA, A. R. D. M. **Avaliação do potencial da compostagem de digestato da digestão anaeróbia seca de resíduo alimentar.** UFSC. Florianópolis. 2021.

SILVA, M. M. P. et al. Avaliação Sanitária de Resíduos Sólidos Orgânicos Domiciliares em Municípios do Semiárido Paraibano. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, p. 87-92, abr.-jun. 2010. ISSN 1983-2125.

SILVEIRA, B. Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. In: PROBIOGÁS **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília: [s.n.], 2015.

SUMÉ, 2022. Disponível em: <<https://www.sume.pb.gov.br/2022/02/prefeito-reune-se-com-empresarios-para-ampliar-a-coleta-seletiva-em-sume/>>. Acesso em: 2022 MAI 28.

SUMÉ. **PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE SUMÉ-PB**, 2022. Disponível em: <<http://sume.tempsite.ws/arquivos/vfm-admin/vfmdownloader.php?q=dXBsb2Fkcy9QbGFuby1NdW5pY2lwYWwtZGUtUmVzJUMzJUFZHVvcy1TJUMzJUJzbGk3NfUGxhbm8tQ29tcGxldG8ucGRm&h=39e5a4b3928c8ce02b2666a41b8eb3af>>. Acesso em: 28 mai 2022.

TAVARES, A. N. et al. **Oportunidades enterradas**: geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos. Vitória: EDUFES, 2019.

VALENTE, B. S. et al. Fatores que Afetam o Desenvolvimento da Compostagem de Resíduos Orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, v. 58, p. 59-85, 2009.