

JOSÉ HENRIQUE BORGES PILARSKI

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO EM PROPRIEDADES
DE SUÍNOS EM TERMINAÇÃO NO PARANÁ

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2025

JOSÉ HENRIQUE BORGES PILARSKI

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO EM PROPRIEDADES
DE SUÍNOS EM TERMINAÇÃO NO PARANÁ

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Borges Pilarski, José Henrique
Potencial de produção de biogás e biometano em
propriedades de suínos em terminação no Paraná / José
Henrique Borges Pilarski; orientador Samuel Nelson Melegari
de Souza. -- Cascavel, 2025.
56 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) --
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências
Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Energia na Agricultura, 2025.

1. Bioenergias . 2. Produção de biogás . 3. Potencial de
produção. I. Melegari de Souza, Samuel Nelson, orient. II.
Título.

JOSÉ HENRIQUE BORGES PILARSKI

Potencial de produção de biogás e biometano em propriedades de suínos em
terminação no Paraná

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração
Agroenergia, linha de pesquisa Biocombustíveis, APROVADO pela seguinte banca
examinadora:



Orientador - Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Douglas Bassegio
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Heitor Othelo Jorge Filho
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG)

Cascavel, 28 de fevereiro de 2025

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de digestão anaeróbica.....	09
Figura 1 - Biodigestor <i>Plug Flow</i>	12
Figura 2 - Biodigestor Chinês.....	13
Figura 3 - Biodigestor Indiano.....	14
Figura 4 - Biodigestor CSTR.....	15
Figura 5 - Representação de um sistema de produção/consumo de energia elétrica conectada à rede de distribuição de eletricidade.....	21
Figura 6 - Representação do estado do Paraná.....	23
Figura 7 - Representação das mesorregiões do estado do Paraná, de acordo com a lei estadual 15.825/08.....	24
Figura 9 - Monitor de extração de gases portátil.....	26
Figura 10 - Distribuição do potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação.....	30
Figura 11 - Mapa de calor representando o potencial de cada mesorregião....	31
Figura 12 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Noroeste Paranaense.....	33
Figura 13 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Centro ocidental Paranaense.....	34
Figura 14 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Centro Ocidental paranaense.....	36
Figura 15 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Norte Pioneiro paranaense.....	37
Figura 16 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Centro oriental paranaense.....	39
Figura 17 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Oeste paranaense.....	40

Figura 18 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Sudoeste paranaense.....	42
Figura 19 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Centro Sul paranaense.....	43
Figura 20 - Potencial de produção de biogás por meio de dejetos suínos em terminação da mesorregião Sudeste paranaense.....	45
Figura 21 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião metropolitana de Curitiba.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação no Paraná.....	32
Tabela 2 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano.....	32
Tabela 3 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos no estado do Paraná.....	32
Tabela 4 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Noroeste paranaense.....	33
Tabela 5 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Noroeste paranaense.....	34
Tabela 6 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião noroeste paranaense.....	34
Tabela 7 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Ocidental paranaense.....	35
Tabela 8 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Centro Ocidental paranaense.....	35
Tabela 9 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Ocidental paranaense.....	35
Tabela 10 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Norte Central paranaense.....	36
Tabela 11 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Norte Central paranaense.....	37
Tabela 12 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Norte Central paranaense.....	37
Tabela 13 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Norte Pioneiro paranaense.....	38
Tabela 14 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Norte Pioneiro paranaense.....	38
Tabela 15 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Norte Pioneiro paranaense.....	38
Tabela 16 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Oriental paranaense.....	39
Tabela 17 - Equivalência do biogás em biometano tendo em vista a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Centro Oriental paranaense.....	40

Tabela 18 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Oriental paranaense.....	40
Tabela 19 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na Mesorregião Oeste paranaense.....	41
Tabela 20 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na Mesorregião Oeste paranaense	41
Tabela 21 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Oeste paranaense.....	41
Tabela 22 - Potencial de geração de biogás através de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Sudoeste paranaense.....	42
Tabela 23 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Sudoeste paranaense.....	43
Tabela 24 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Sudoeste paranaense.....	43
Tabela 25 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Sul paranaense.....	44
Tabela 26 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Centro Sul paranaense.....	44
Tabela 27 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Sul paranaense.....	44
Tabela 28 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Sudeste paranaense.....	45
Tabela 29 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Sudeste paranaense.....	46
Tabela 30 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás através de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Sudeste paranaense.....	46
Tabela 31 -- Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Metropolitana de Curitiba	47
Tabela 32 - Equivalência de biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65 de metano na mesorregião Metropolitana de Curitiba.....	47
Tabela 33 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás através de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Metropolitana de Curitiba.....	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados do motor gerador utilizado para conversão do biogás em energia elétrica, e utilizados para cálculo do potencial de produção..... 27

PILARSKI, José Henrique Borges. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, julho de 2024. **Potencial de produção de biogás e biometano em propriedades de suínos em terminação no Paraná.** Orientador: Prof. Samuel Nelson Melegari de Souza.

RESUMO

Dos vários motivos do aumento da demanda por energia elétrica e aumento do consumo de combustíveis fósseis podemos citar o aumento populacional como um dos principais motivos, pois com o aumento da população a demanda por alimentos, moradias, combustíveis para veículos e energia elétrica também aumenta. Além do fato de que a queima de combustíveis fósseis como petróleo acaba por gerar gases poluentes ao meio ambiente. Isso criou, nas últimas décadas, um alerta em relação às fontes de energia fóssil, fazendo com que se iniciasse uma busca por novas fontes de energia que fossem renováveis e menos danosas ao meio ambiente. Dentre as fontes de energia renováveis descobertas que causem menos danos ao meio ambiente, temos o biogás e o biometano. O biogás é um gás obtido por meio da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos como, por exemplo, esterco suíno em biodigestores. O biometano é o biogás purificado com uma concentração de metano superior a 90%, que o faz ter praticamente as mesmas características do gás natural. Com isso, o objetivo deste trabalho foi determinar o potencial de produção de biogás e biometano do estado do Paraná por meio dos dejetos de suínos em terminação. Para isso, foram utilizados dados de medição do motor gerador de uma propriedade real modelo que gera biogás a partir do esterco de suínos em terminação para geração de energia elétrica. A metodologia utilizada foi a multiplicação da produção específica de biogás por suíno em terminação por cabeça de animal no período desejado. Nesse caso, foram utilizados dados da SEAB acerca do abate anual de suínos no estado do Paraná, em 2023. Assim, foi possível determinar o potencial que o estado tem para produzir biogás. Foi oportuno ainda verificar a determinação da equivalência do potencial de biogás em biometano, energia elétrica e combustível veicular. Como resultado desse trabalho, foi determinado que a região oeste do estado do Paraná tem o maior potencial com mais de 72% do abate total do estado. Isso mostra que apenas nessa região é viável a implementação de usinas de biogás e biometano para o abastecimento de residências, indústrias e veículos com biometano. Nas outras regiões, a viabilidade é de apenas produzir biogás para o próprio consumo em propriedades criadouras de suínos em terminação.

PALAVRAS-CHAVE: biogás; biometano; potencial; custo de produção.

“Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)”.

PILARSKI, José Henrique Borges. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste. julho 2024. **Potential for biogas and biomethane production in finishing pig farms in Paraná.** Advisor Prof. Samuel Nelson Melegari de Souza.

ABSTRACT

Of the various reasons for the increase in demand for electricity and increased consumption of fossil fuels we can cite population growth as one of the main reasons, because with the increase in population the demand for food, housing, fuel for vehicles and electric power also increases. In addition to the fact that burning fossil fuels such as oil ends up generating polluting gases to the environment. This created, in the last decades, a warning regarding fossil energy sources, causing a search for new energy sources that were renewable and less harmful to the environment. Among the discovered renewable energy sources that cause less damage to the environment, we have biogas and biomethane. Biogas is a gas obtained by anaerobic digestion of organic waste such as pig manure in biodigesters. Biomethane is the biogas purified with a concentration of methane greater than 90%, which makes it have practically the same characteristics as natural gas. Thus, the objective of this work was to determine the potential for biogas and biomethane production in the state of Paraná through the swine waste in the end. For this, we used measurement data of the generator engine of a real model property that generates biogas from swine manure in termination for electric power generation. The methodology used was the multiplication of specific production and biogas per pig in finishing per animal head in the desired period. In this case, SEAB data was used about the annual slaughter of pigs in the state of Paraná, in 2023. Thus, it was possible to determine the potential that the state has to produce biogas. It was also appropriate to verify the determination of the equivalence of biogas potential in biomethane, electric energy and vehicle fuel. As a result of this work, it was determined that the western region of the state of Paraná has the greatest potential with more than 72% of the total slaughter in the state. This shows that only in this region is feasible the implementation of biogas and biomethane plants for the supply of households, industries and vehicles with biomethane. In the other regions, the feasibility is to produce biogas only for own consumption on finishing pig farms.

KEYWORDS: Biogas; biomethane; potential; production cost.

"This work was carried out with the support of the Coordination of Improvement of Higher Education Personnel - Brazil (CAPES)".

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Crescimento populacional e demanda energética	3
2.2 Biogás, biometano e combustíveis fósseis	4
2.3 Biomassa	6
2.4 Digestão Anaeróbica	7
2.4.1 Hidrólise	8
2.4.1.1 Acidogênese.....	8
2.4.2 Acetogênese	8
2.4.3 Matanogênese.....	9
2.5 Parâmetros importantes na digestão anaeróbica	10
2.5.1 pH.....	10
2.5.1.1 <i>Tempo de retenção hidráulica</i>	10
2.5.2 Temperatura.....	11
2.5.3 Outros fatores que influenciam a digestão anaeróbica	11
2.6 Biodigestores	11
2.6.1 Biodigestor <i>plug flow</i>	12
2.6.1.1 <i>Biodigestor chinês</i>	13
2.6.2 Biodigestor indiano	13
2.6.3 Biodigestor CSTR.....	14
2.7 Qualidade e composição do biogás	15
2.7.1 Poder calorífico do biogás	15
2.7.1.1 <i>Limpeza do biogás</i>	16
2.7.2 Uso do biogás e biometano em áreas rurais do Brasil	16
2.7.3 Motor geradores de energia elétrica a partir do biogás	18

2.8 Purificação do biogás para transformação em biometano	18
2.8.1 Tecnologias para transformação do biogás em biometano	19
2.8.1.1 <i>Custo para produção do biometano</i>	19
2.8.2 Preço de venda do biometano.....	19
2.8.3 Micro e minigeração distribuída a partir de fontes renováveis como biogás e biometano.....	20
2.8.4 Potencial de produção de biogás proveniente da suinocultura	21
2.8.5 Produção de suínos no Paraná	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Caracterização da área de estudo	23
3.1.1 Categorização da produção agropecuária por tipo de animal	24
3.1.2 Caracterização da propriedade típica modelo	25
3.1.3 Coleta de dados da propriedade	25
3.1.4 Produção de biogás	25
3.1.5 Produção de energia elétrica.....	25
3.1.6 Caracterização do biogás.....	26
3.1.7 Estimativas	27
3.1.8 Cálculo para estimativa do potencial de produção de biogás.....	27
3.1.9 Estimativa do potencial de produção de biogás nas mesoregiões	28
3.1.10 Equivalência em energia elétrica.....	28
3.1.11 Potencial de produção do biometano	29
3.1.12 Equivalência em energia veicular	29
3.1.13 Mapas plotados para demonstrar o potencial de geração de biogás	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1 Potencial do Paraná e das mesoregiões para produção de biogás	30
4.1.1 Noroeste Paranaense.....	32
4.1.2 Centro Ocidental Paranaense	34
4.1.3 Norte Central Paranaense	36
4.1.4 Norte Pioneiro Paranaense	37
4.1.5 Centro oriental Paranaense.....	39
4.1.6 Oeste Paranaense	40
4.1.7 Sudoeste Paranaense	42

4.1.8 Centro sul Paranaense.....	43
4.1.9 Sudeste Paranaense	45
4.1.10 Metropolitana de Curitiba	46
4.1.11 Equivalência do potencial de biometano em combustível veicular	47
5 CONCLUSÃO	49
6 REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A população e a economia mundial se expandiram exponencialmente a partir da década de 70, o que provocou um aumento na demanda energética global que se voltou para as fontes de energia primária como combustíveis fósseis (NOGUEIRA; CARDOSO, 2007).

A dependência maior de energia fez com que a degradação ambiental aumentasse, pois, para suprir todas as demandas energéticas, foram necessários mais recursos e investimentos na produção de petróleo, gás natural e carvão mineral. Para diminuir a degradação ambiental e também a extração de combustíveis fósseis, é preciso buscar novas fontes de energia que sejam renováveis (SANTOS; RODRIGUES; CARNIELLO, 2021).

Além disso, o consumo desenfreado de recursos naturais fez com que, na metade do século XX, surgissem legislações ambientais, visto que as nações começaram a se preocupar com o aquecimento global, e a grande dependência de combustíveis fósseis gerou algumas crises do petróleo (como as de 1956, 1973, 1979, 1991 e 2008), o que causou um grande abalo em muitos países (SILVA *et al.*, 2021).

Todos os problemas citados anteriormente fizeram com que iniciasse uma busca por fontes de energias renováveis que pudessem suprir as demandas humanas.

A biomassa é uma opção de energia renovável, especialmente no Brasil, visto que o país tem um grande potencial para aumentar a geração de energia elétrica por meio da biomassa. Sabe-se que todos os anos o país produz grandes quantidades para que se possa aumentar a geração de energia por meio dessa matéria-prima. Exemplos de biomassas produzidas no Brasil anualmente em grande quantidade são bagaço da cana-de-açúcar, palha da cana-de-açúcar, resíduos florestais, resíduos industriais e urbanos, bem como a grande quantidade de resíduos advindos da produção agropecuária. Todos esses materiais podem ser utilizados para gerar energia sem que sejam descartados como resíduo (MACIEL, 2019).

Uma das formas de utilização da biomassa é transformá-la em biogás ou biometano. Tais gases podem ser transformados em eletricidade. Para que isso

possa acontecer, é necessário que a biomassa passe por um processo de fermentação em que é gerado biogás. O referido gás é produzido a partir da digestão anaeróbica em biodigestores, sendo um processo que requer condições específicas que envolvem um sistema microbiológico. Com as operações sendo rigorosamente vigiadas e se as condições forem otimizadas, o processo passa a ser muito eficiente (SOUSA; RIZZATTO, 2021).

A investigação proposta tem por objetivo constatar o potencial da produção de biogás e biometano no Paraná a partir de dejetos de suínos em terminação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho foi a determinação do potencial do estado do Paraná em produzir biogás e biometano por meio dos dejetos de suínos em terminação.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinação do potencial de cada mesorregião do estado em produzir biogás por meio de dejetos de suínos em terminação.
- Avaliar a distribuição espacial do potencial de produção de biogás no estado.
- Determinação da equivalência do potencial de biogás produzido, em biometano, energia elétrica e combustível veicular.
- Identificar quais regiões possuem a viabilidade da construção de usinas de biogás e biometano.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Crescimento populacional e demanda energética

As crises no setor energético não se resumem apenas ao aumento do consumo de combustíveis e ao esgotamento de cada um deles. Os períodos de secas também devem ser considerados na busca por fontes de energias renováveis, principalmente em países que dependem muito de hidroelétricas, como o Brasil (OLIVEIRA, 2017).

A população brasileira cresceu cerca de 10% entre 2011 e 2020 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2020). Nesse período, o consumo de energia elétrica residencial, industrial, comercial, também teve o mesmo crescimento. Isso mostra que, conforme a população cresce, a demanda por energia cresce no mesmo ritmo (LINS *et al.*, 2022).

O crescimento populacional acarreta a elevação da demanda de alimentos e, conseqüentemente, aumenta os resíduos gerados a partir de tal produção. No referido setor, a criação de animais, tais como suínos, bovinos e aves, gera uma quantidade imensa de dejetos que podem ser utilizadas como biomassa, visto que toda a carga orgânica deve ser tratada para não contaminar o solo e os rios (LINS *et al.*, 2022).

Como uma forma alternativa de geração de energia e também para mitigar os gases de efeito estufa, o uso da biomassa para transformação em biogás aparece como uma grande fornecedora de energia para atender às necessidades da humanidade, mesmo que parcialmente (ANTAR *et al.*, 2020).

Pode-se concluir que o aumento do consumo de combustíveis fósseis e suas conseqüências ao meio ambiente fazem com que uma matriz energética mais heterogênea seja algo a ser buscado cada vez mais, pois o conseqüente esgotamento das fontes de combustíveis fósseis solicita uma sociedade menos dependente desses combustíveis, seja algo necessário não somente pelo fato dos combustíveis fósseis serem finitos. Outro fator a ser considerado na busca por novas fontes de energia é a preservação do meio ambiente (LISBOA, 2022).

Logo, para mitigar a poluição do meio ambiente e dar um destino correto aos resíduos que geram poluição, países como o Brasil, que possuem uma grande

criação de aves, suínos e bovinos, podem optar pelo uso do biogás a partir dos dejetos das atividades agropecuárias. Trata-se de algo positivo, visto que o biogás produzido nas propriedades criadouras, além de poder ser utilizado para geração de energia elétrica e térmica, também pode ter o excedente injetado na rede de distribuição de energia elétrica (MATHIAS, 2014).

Tendo em vista ainda as mudanças climáticas e acordos assinados para diminuir o aquecimento global, o biogás pode estimular a transição energética no Brasil, fazendo com que seu uso do cresça mais (MESQUITA, 2022).

2.2 Biogás, biometano e combustíveis fósseis

Biogás é um gás combustível derivado de biomassa e é uma fonte alternativa de geração de energia. Uma das formas de gerar energia com biogás, é com o aproveitamento de resíduos agrícolas e urbanos para gerar o gás preterido, podendo aproveitar o que seria descartado em energia, contribuindo com a solução de dois problemas: o descarte de resíduos e novas fontes de geração de energia (FERNANDES *et al.*, 2021).

Os combustíveis fósseis são restos de organismos vivos fossilizados que ficam expostos ao calor e à pressão da crosta terrestre durante milhões de anos. Por demorarem tanto tempo para que sejam produzidos e por serem muito explorados, são considerados recursos não renováveis. Devemos ponderar também que o uso desses combustíveis fósseis para geração de energia, tais como petróleo, carvão mineral e gás natural, libera dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, um dos gases do efeito estufa que tem causado o aquecimento global (AL SEADI *et al.*, 2008).

O biogás também libera gases do efeito estufa como CO₂ e CH₄, porém o carbono liberado na queima do biogás é absorvido pela fotossíntese das plantas. Por isso, o ciclo do carbono do biogás é tido como fechado (AL SEADI *et al.*, 2008)

Tal como ocorre com os combustíveis fósseis que provêm de organismos vivos, o biogás também é obtido a partir de resíduos orgânicos que é a biomassa, entretanto sua conversão em um combustível não necessita de milhões de anos, mas sim apenas de alguns dias dependendo do sistema utilizado (OLIVEIRA *et al.*, 2024; AL SEADI *et al.*, 2008).

O biogás pode servir para diferentes finalidades, como geração de calor, geração de eletricidade e pode ser operado de forma semelhante a uma termelétrica a gás natural, porém totalmente renovável (ABILOGÁS, 2024).

A composição do biogás é basicamente metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e algumas impurezas como sulfeto de hidrogênio (H_2S). Uma grande vantagem na produção de biogás gerado por meio de resíduos agrícolas é que esse resíduo obtido no processo, chamado de digestato, pode ser utilizado como biofertilizante, pois é rico em nitrogênio, potássio e fósforo. A utilização de biofertilizantes faz com que ocorra uma diminuição no uso de fertilizantes minerais e químicos. O biofertilizante é um efluente, tem baixo custo e não degrada o solo (BARBOSA; LANGER, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2024).

O uso do biogás traz consigo muitos benefícios, tanto ambientais quanto econômicos, pois faz com que ocorra a redução das explorações de recursos naturais, reduz o GEE na atmosfera, e também gera biofertilizantes que podem servir como substitutos, mesmo que seja de maneira parcial, dos adubos químicos (VIEIRA; POLLI, 2020).

Biometano é um gás combustível derivado do biogás. É obtido após a sua purificação. A composição do biogás gira em torno de 45% e 75% de metano (CH_4), entre 25% e 40% de dióxido de carbono (CO_2), bem como outros componentes em menor percentual, como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), porém o biometano tem uma concentração acima de 90% de metano (CH_4). Para sua obtenção, é necessária a purificação do biogás, visto que retira os demais componentes até obter o gás na concentração desejada (TEIXEIRA *et al.*, 2024).

A grande vantagem do biometano é sua composição, que é a molécula de metano (CH_4). Trata-se de um componente principal do gás natural. Por isso, o biometano pode ser injetado na rede de gás natural utilizando a infraestrutura atual e consumido em diversas aplicações que utilizam o gás natural como (combustível veicular, industrial e para termelétricas). Fazer uso das redes de gasodutos e ramais preexistentes para o uso do biometano adiciona sustentabilidade ao setor de gás natural, ajudando a alcançar um futuro com baixas emissões de GEE (TEIXEIRA *et al.*, 2024).

O biometano, por ter sua composição semelhante ao gás natural, e não necessitar da implementação de novas infraestruturas, podendo ser utilizado sem alteração das tecnologias atuais, é uma solução aos processos de descarbonização.

Pode-se considerar também o biometano como um estímulo às construções de novos gasodutos, especialmente no interior do país, para fomentar a indústria no interior (ROITMAN, 2023).

2.3 Biomassa

A biomassa é um material orgânico que contém energia química intrínseca que pode ser convertida em biogás e biometano. A biomassa é obtida por meio de resíduos da agricultura, silvicultura e também resíduos urbanos, o que inclui uma vasta variedade de matérias como, por exemplo, esterco animal, resíduos de madeiras como palha e serragem, resíduos de estações de tratamentos de esgoto, águas residuais entre outras (ANTAR *et al.*, 2020).

A biomassa é caracterizada por qualquer resíduo orgânico e pode ser classificada em três categorias: de origem florestal, agrícola, rejeitos urbanos e agroindustriais (CARDOSO, 2012; ANEEL, 2008).

Biomassa de origem florestal. São produtos e subprodutos de recursos florestais. Estão incluídos nessa classificação basicamente a biomassa lenhosa, que é obtida por meio do desflorestamento de florestas nativa ou cultivadas com objetivo de aberturas para áreas agropecuárias. Estão incluídos ainda os resíduos de atividades que utilizam madeira que o fim não seja energética como serrarias, indústria moveleira, bem como a indústria de papel e celulose. A transformação em energia geralmente ocorre de forma simples com a combustão direta ou carbonização.

Biomassa de origem agrícola. São resíduos do cultivo da cana-de-açúcar, milho, trigo, beterraba, soja, entre outras. São utilizadas, em geral, para produção de etanol, biodiesel e diversos óleos vegetais.

Biomassa de origem de rejeitos urbano e agroindustriais. A biomassa urbana se encontra no lixo e nos esgotos. A transformação de lixo em energia ocorre com a combustão direta, gaseificação, termoquímica, separação de recicláveis e digestão anaeróbica. Já a biomassa oriunda de atividades agroindustriais provém dos resíduos da criação de animais, como o esterco. Tem um potencial energético grande e o caminho geralmente escolhido como forma da transformação em energia é a digestão anaeróbica.

Sendo a biomassa uma fonte de energia renovável disponível tanto em áreas rurais quanto urbanas no Brasil, no meio rural está pode ser encontrada na forma de resíduos vegetais e animais um exemplo abundante de biomassa na região rural do oeste do Paraná é o resíduo animal (SOUZA, 2023).

O potencial da produção de biogás proveniente da pecuária é muito grande, visto que os dejetos da produção de suínos, bovinos, aves e caprinos podem ser utilizados como biomassa para produção de biogás. É importante destacar que dejetos como da produção pecuária utilizados para produzir biogás deixam de ser descartados e passam a ser reaproveitados. Com isso, o que era um desativo passa a ser um ativo econômico (KARLSSON *et al.*, 2014).

2.4 Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbica é um processo de biodegradação da matéria orgânica em biodigestores. A grande vantagem desse tratamento é a conversão da maior parte do material orgânico em biogás, sendo uma ótima opção de fonte de energia e também trazendo vantagens ambientais (EMBRAPA, 2006).

A biodegradação da biomassa em biodigestores é chamada de digestão anaeróbica, pois esse processo ocorre em um ambiente sem a presença de oxigênio (SANTOS *et al.*, 2023).

A biodigestão da biomassa necessita de uma variedade de espécies bacterianas e essas podem depender uma das outras para seu crescimento e ocorrem a sequência de quatro reações: hidrólise, acitogênese, acetogênese e metanogênese (PASQUALINI, 2020).

A digestão anaeróbica é um complexo processo que transforma material orgânico em dióxido de carbono e metano. Para que isso aconteça, é necessário que o material orgânico seja depositado em um local sem a presença de oxigênio, ou seja, em condições anaeróbicas. Além disso, é preciso um conjunto de microrganismos para que os gases preteridos sejam gerados. A digestão anaeróbica é dividida em quatro etapas que são realizadas por diferentes grupos de microrganismos, isso requer sintonia entre eles e também pode necessitar de condições ambientais diferentes (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

2.4.1 Hidrólise

A hidrólise é a primeira etapa da digestão anaeróbica. Nessa etapa, a biomassa submetida ao processo deve ser quebrada em moléculas menores para que os microrganismos possam se alimentar a partir delas. Bactérias disponíveis nos biodigestores segregam enzimas que rompem as moléculas de proteína e as transformam em aminoácidos, hidratos de carbono em açúcares simples e álcoois, ácidos graxos. Essa quebra faz com que os microrganismos absorvam as partes que se dividiram tirando energia que nelas continham. A velocidade desse processo depende de alguns fatores como o tipo de material orgânico e como está estruturado (KARSSON *et al.*, 2014).

2.4.1.1 Acidogênese

Acidogênese ou fermentação ocorre na segunda etapa da digestão anaeróbica. Nessa fase, a maioria dos microrganismos da etapa anterior ainda estão ativos. Entretanto, os componentes menores que se formaram com a quebra das moléculas maiores continuaram a ser quebrados em moléculas menores. Os ácidos formados por essas reações dividem-se em ácidos orgânicos álcoois e amoníaco também hidrogênio e dióxido de carbono. Alguns dos ácidos orgânicos formados são: acético, butílico e láctico. Somente na terceira etapa é que os ácidos graxos irão ser quebrados (KARSSON *et al.*, 2014).

2.4.2 Acetogênese

A penúltima etapa é conduzida por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas. Nesta etapa, acontece sintrofia entre as bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas com as bactérias homoacetogênicas. Ácidos de cadeia longa se transformam em ácidos com um ou dois átomos de carbono simultâneo à produção de hidrogênio e dióxido de carbono. Para que os ácidos de cadeia curta tenham uma formação termodinamicamente positiva, as arqueas metanogênicas devem consumir hidrogênio gasoso simultaneamente. A sintrofia entre os grupos de

microbianos distintos possibilita que ambos cresçam (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

2.4.3 Matanogênese

Na última etapa, tem-se a formação do metano, o produto mais importante de toda a reação, que acontece em condições estritamente anaeróbicas. O metano precisa de ácido acético e dióxido de carbono para ser formado, que são subprodutos das outras etapas. Os microrganismos metanogênicos são mais sensíveis às interferências, porque não pertencem ao grupo Archaea que atua nas fases anteriores. Tal sensibilidade significa que não são tão resistentes às perturbações de alterações no pH, temperaturas etc. Essa fase é a mais importante, pois é o gás metano que irá gerar a um gás combustível. Por isso, é tão importante ter atenção no tocante às bactérias metanogênicas para que consigam se sentir o melhor possível (KARSSON *et al.*, 2014; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

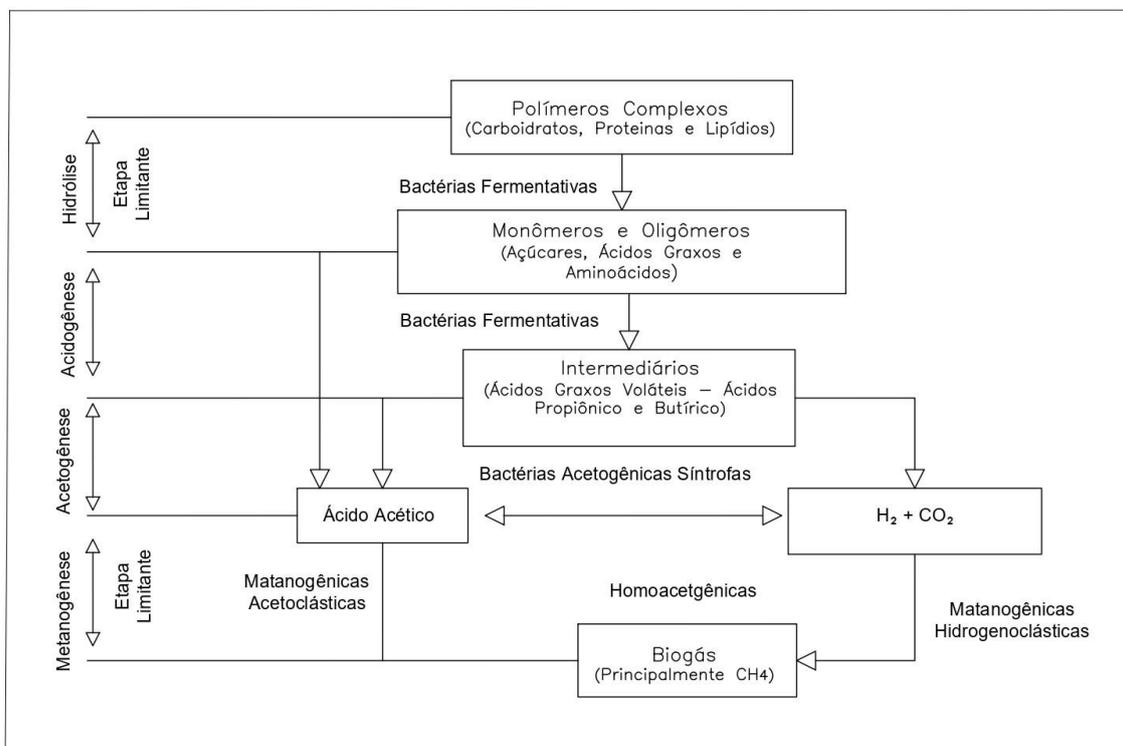


Figura 1 - Processo de digestão anaeróbica
Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2016).

2.5 Parâmetros importantes na digestão anaeróbica

2.5.1 pH

O pH é um parâmetro importante, visto que está sujeito às variações geradas por ácidos durante a digestão anaeróbica, como também pela alcalinidade do substrato que alimenta o biodigestor. Um pH estável é de extrema importância para a digestão anaeróbica. Controlar a estabilidade do pH é essencial, pois microrganismos metanogênicos podem ser inibidos por um pH baixo e um pH muito alto causando alteração na produção de metano (PRADO, 2023).

Um pH com nível ótimo está entre 6,5 e 7,5. Acima ou abaixo disso, a produção de metano já é afetada decrescendo e podendo parar (CAMPOS *et al.*, 2006).

2.5.1.1 Tempo de retenção hidráulica

Tempo de retenção hidráulica (TRH) é o tempo que qualquer substrato leva para ser digerido. É o tempo entre a entrada e saída do substrato do biodigestor. Este tempo depende de alguns fatores como o tipo da biomassa, do modelo do biodigestor e alguns outros fatores, biodigestores de baixa tecnologia como a maioria usada nas regiões rurais do Brasil. Este tempo pode levar dias. Já biodigestores industriais levam algumas poucas horas. A relação entre o volume do biodigestor e a vazão m^3 dia é o (TRH). A taxa de decomposição dos sólidos voláteis é responsável pela performance do biodigestor, sendo combinado com a TRH. O tempo para o substrato ser biodigerido depende do tipo do biodigestor, como também do tipo de efluente a ser degradado, além de outros fatores, podendo variar de 50 dias em alguns tipos de digestores rurais, e em apenas algumas horas em certos digestores industriais (SALOMOM, 2007; SOARES; FEIDEM; TAVRES, 2017; SOUZA, 2023).

É oportuno observar o cálculo do tempo de retenção hidráulica (TRH) para biodigestores *plug flow*. Trata-se do tempo médio no qual o substrato irá permanecer dentro do biodigestor. É calculado como a razão entre o volume do biodigestor e a vazão de alimentação (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

$$TRH=V/Q$$

Equação (1)

Em que:

TRH = Tempo de retenção hidráulica (d);

V = volume do biodigestor (m³);

Q = Vazão de alimentação (m³. d⁻¹)

2.5.2 Temperatura

A temperatura para o processo de digestão anaeróbica pode ser classificada como psicrófilico (abaixo de 20°C), mesófilico (entre 20 e 45 °C) e termofílico (entre 55 e 70 °C). Em países tropicais, como o Brasil, a maior parte dos processos opera na temperatura mesófila, pois está dentro da faixa da temperatura ambiente, isso também garante uma maior diversidade de microrganismos anaeróbicos ativos (PRADO, 2023; KAINTHOLA *et al.*, 2019).

2.5.3 Outros fatores que influenciam a digestão anaeróbica

Além dos fatores citados acima, que influenciam na digestão anaeróbica, podemos citar outros, como nutrientes, íons de enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato. Todos são indispensáveis para uma boa digestão anaeróbica. Traços de ferro, zinco molibdênio e vanádio também são importantes. A concentração de hidrogênio tem que ser estável. Os microrganismos metanogênicos precisam de hidrogênio para produzir metano, porém a pressão parcial de hidrogênio deve estar entre 10⁻⁴ a 10⁻⁶ bar. Para que as bactérias acetogênicas não sofram alterações por excesso de hidrogênio, também deve se controlar o nitrogênio amoniacal e amônia livre (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

2.6 Biodigestores

Os biodigestores figuram como a tecnologia utilizada para processar a biomassa e transformá-la em biogás e biofertilizantes (PASSAGLIA; SANTOS; GUIDINI, 2019).

A escolha do biodigestor ideal a ser construído em uma usina de biogás é algo fundamental para que não ocorram prejuízos. Um biodigestor deve ser escolhido levando em conta a localidade da usina, o tipo de dejetos que o alimentará e o tipo de frequência de alimentação (WEIRICH *et al.*, 2022).

Em relação à alimentação do biodigestor, existem duas técnicas que são as mais utilizadas: fluxo contínuo e batelada. No fluxo batelada, o substrato é adicionado todo de uma vez no biodigestor, sem ser retirado ou adicionado até o fim do processo de produção de biogás, ou seja, só quando todo o material for digerido é realizada uma nova inserção de substrato. Na técnica chamada fluxo contínuo, o biodigestor é abastecido continuamente para que sempre seja mantido cheio, isso faz com que a produção de biogás não pare (WEIRICH *et al.*, 2022).

2.6.1 Biodigestor *plug flow*

O biodigestor *plug flow* ou lagoa coberta é construído por meio da escavação do solo e impermeabilização. Possui geometria com base retangular e seção trapezoidal. Sua cobertura é constituída por uma geomembrana sintética de polietileno (PEAD, PVC etc.) (CALZA *et al.*, 2015; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).

O biodigestor lagoa coberta é considerado de baixo nível tecnológico e normalmente não possui sistema de aquecimento, nem de agitação. Uma característica importante desse modelo está no fato de que precise de um tempo de retenção hidráulica elevado, com uma média de 30 dias a depender do tamanho do biodigestor e da carga (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022).



Figura 2 - Biodigestor Plug Flow
Fonte: Adaptado CIBIOGAS (2023).

2.6.1.1 Biodigestor chinês

Este modelo de biodigestor é construído em alvenaria e enterrado no solo. Sua cúpula também é construída em alvenaria, tem por característica sofrer pouca alteração na temperatura. Não é em todo tipo de solo que pode ser construído esse tipo de biodigestor, pois não possui gasômetro e sua construção é em forma de abóboda (SOARÉS; SILVA, 2010; NICHIMURA, 2009).

O funcionamento deste tipo de biodigestor é do conceito prensa hidráulica, em que o deslocamento dos efluentes da câmara anaeróbica para a caixa de saída é acionado pelo aumento da pressão no interior do biodigestor, sendo que o gás é produzido em razão da força do material na caixa de saída (CALADO, 2022).

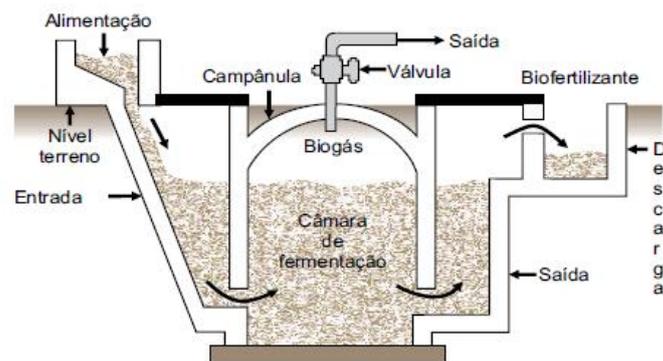


Figura 3 - Biodigestor Chinês
Fonte: Adaptado Casini *et al.* (2014).

2.6.2 Biodigestor indiano

Biodigestor indiano tem por característica principal possuir uma campanula flutuante como gasômetro. É um biodigestor de pressão constante que também tem uma parede central dividindo longitudinalmente o reservatório da digestão anaeróbica em duas partes. Tem em um dos lados um tubo de entrada e, no outro, um tubo de saída. Por ter duas câmaras, permite que o substrato em digestão circule no interior do cilindro. Para que o gás não escape, uma campanula flutua sobre um selo d'água, isso permite uma pressão constante, mesmo com variação de volume (NICHIMURA, 2009).

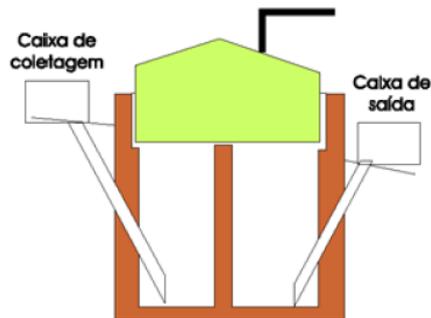


Figura 4 - Biodigestor Indiano
Fonte: Adaptado Rapili (2006).

2.6.3 Biodigestor CSTR

CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), traduzido para o português como reator de tanque de agitação contínua, é caracterizado por seu sistema de agitação que faz com que o substrato se mantenha homogêneo, sendo capaz de abrigar uma grande quantidade de biomassa. Este modelo de biodigestor aceita uma concentração maior de sólidos, possui formato circular, vários componentes e controles de agitação. Além do sistema de agitação, também tem sistema de aquecimento do substrato, que usa o reaproveitamento do calor do escapamento do conjunto motogerador. Por contar com agitação mecânica e sistema de aquecimento, é capaz de receber um volume maior de sólidos (CIBIOGAS, 2023; CORDEIRO, 2022).

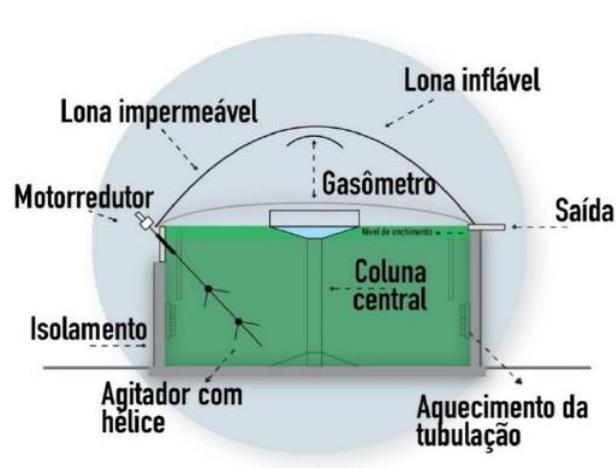


Figura 5 - Biodigestor CSTR
 Fonte: Adaptado de Cordeiro (2022).

2.7 Qualidade e composição do biogás

O biogás é composto principalmente por metano (CH_4), gás carbônico (CO_2) e gás sulfídrico (H_2S) (LINS; MITO; FERNANDES, 2015). Essa composição, no entanto, é variável e estudos indicam que o biogás é composto por 50 – 70% de metano, 25 – 45 de gás carbônico e outros gases em pequenas quantidades, como o ácido sulfídrico (H_2S). Mesmo que a concentração de H_2S seja menor que 3%, este componente gera o deterioramento dos motores (LINS; MITO; FERNANDES, 2015; COELHO *et al.*, 2006; FLARE; GIMENES; PEREIRA, 2009).

Devemos levar outro fator em conta, que é o tipo de biomassa utilizada para a produção do biogás, pois a composição do biogás está ligada ao tipo de biomassa (SCHNÜNER; JARVIS, 2009).

Conhecer a qualidade do biogás é mais importante do que conhecer sua produção dentro de um biodigestor, pois conhecendo sua composição é possível saber se será necessário algum tipo de tratamento antes de aproveitar toda a biomassa (LINS; MITO; FERNANDES, 2015).

2.7.1 Poder calorífico do biogás

Poder calorífico (PC) é a energia liberada na forma de calor na combustão de uma unidade de biomassa. No caso do biogás, quanto mais metano em sua

composição tiver, maior será o seu poder calorífico, pois o metano é o gás que possui potencial energético (SOUZA, 2023).

Costa (2006) salienta que o poder calorífico do biogás também está relacionado com a concentração de impurezas, ou seja, quanto mais impurezas existirem, menor será o poder calorífico do biogás. Normalmente, o poder calorífico inferior (P.C.I) do biogás gira em torno de 5,3 kWh/m³, com a composição do biogás estando na faixa de 65% de metano e 50%.

Vale frisar a existência do poder calorífico inferior e do poder calorífico superior, definições importantes quando se trata de geração de energia elétrica por meio do biogás. O poder calorífico inferior (PCI) é a mínima energia liberada na combustão quando ocorre o resfriamento dos produtos em temperatura ambiente. O poder calorífico superior é a máxima energia liberada na combustão somente quando os produtos são resfriados em temperatura ambiente (SOUZA, 2023).

2.7.1.1 Limpeza do biogás

Para que o biogás possa ser usado, seja em motores estacionários, caldeiras ou microturbinas para geração de energia elétrica ou térmica, é necessário um processo de limpeza para remoção de substâncias não combustíveis. Tais substâncias são sulfeto de hidrogênio, água, oxigênio e nitrogênio. Em biogases provenientes de aterros sanitários, existem ainda siloxanos (GARCILASSO *et al.*, 2018; BORSCHIVER; SILVA, 2014).

A limpeza é necessária pois as impurezas causam problemas de corrosão e desgaste nos equipamentos, e o dióxido de carbono e a água presente no biogás acabam por deixá-lo um combustível menos eficiente (BORSCHIVER; SILVA, 2014).

2.7.2 Uso do biogás e biometano em áreas rurais do Brasil

A produção de biogás pode ser um processo ambientalmente e economicamente útil. A economia do Brasil depende em grande parte da agricultura e da pecuária, que produz soja e milho etc. Também existe muita produção de suínos, bovinos e aves. Isso resulta em uma grande quantidade de resíduos que têm efeitos ambientais prejudiciais se não descartados e tratados de forma correta. Isso inclui a poluição dos rios e do solo, bem como a liberação de gases de efeito estufa

na atmosfera, então, transformar todos esses resíduos em energia é transformar um desativo econômico e um passivo (DUARTE *et al.*, 2022).

Tendo em vista que em algumas comunidades rurais onde o acesso à energia é limitado, existe uma demanda pela autossuficiência energética, sendo o biogás uma dessas soluções. Além disso, uma matriz energética mais heterogênea é algo que só trará benefícios para a sociedade (ALCÂNTARA; ZANG; FONSECA-ZANG, 2022).

Levando em conta que o Brasil é um grande produtor de dejetos agropecuários, a diversificação na geração de energia elétrica é possível, pois existem várias fontes renováveis de energias disponíveis com biomassa em abundância (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018).

O biogás produzido por produtores rurais a partir de dejetos é um negócio viável na maioria das vezes e sustentável, visto que reduz a poluição causada pelas atividades agropecuárias, traz retorno financeiro e ajuda o meio ambiente dando um destino correto aos resíduos animais (VIEIRA; POLLI, 2020)

Como citado anteriormente, o biometano é similar ao gás natural. Vale frisar que, no Brasil, a regulamentação permite que o biometano use as mesmas redes de gasodutos de gás natural. Por sua produção se enquadrar como forma renovável de energia, isso auxilia a criar uma nova fonte de renda rural, ajudando no desenvolvimento da agricultura sustentável (ESTRELLA *et al.*, 2022).

O uso do biometano como combustível veicular é uma ótima alternativa. Por possuir todas as propriedades físico-químicas, o biometano pode substituir o gás natural como combustível em veículos. Após o biogás ser produzido, pode ser purificado por uma biorrefinaria podendo, então, abastecer os veículos da propriedade. Em locais onde isso já acontece, está sendo verificado que o biometano agrega até quatro vezes o valor do metro cúbico do biogás produzido (HÖFIG; LOFHAGEN; SILVA, 2021).

No entanto, a exemplo de países como China e Índia, para que aja desenvolvimento na área de geração de energia a partir do biogás, é preciso que o estado crie medidas favoráveis e promova incentivos econômicos para a implantação do uso de biodigestores (MATHISAS, 2014).

Outra forma de aumentar as fontes de energia renováveis como o biogás é criando políticas como empréstimos, financiamentos específicos etc. Isso irá incentivar o investimento em fontes de energia renovável e, com isso, além da

diminuição dos custos com energia também diminuiria a emissão de CO₂ na atmosfera (SAMPAIO *et al.*, 2020).

2.7.3 Motor geradores de energia elétrica a partir do biogás

No Brasil, a maior parte da energia elétrica gerada por biogás advém de motores de ignição por compressão convertidos para operarem a biogás (SOUZA *et al.*, 2021).

Após o processo de decomposição da energia química que produz o biogás, este é transformado em energia mecânica, que ativa um gerador sendo possível a produção de eletricidade (CIBIOGAS, 2021).

No Brasil, podemos considerar que os motores mais difundidos são os de combustão interna, e podem ser divididos basicamente em dois tipos que são os motores de ignição por centelha ou Otto e os de ignição por compressão ou diesel. Esses motores de combustão interna são muito utilizados no Brasil e podem funcionar tanto com combustíveis líquidos quanto gasoso. Por serem simples e robustos, são muito difundidos. São chamados de motores estacionários. Existem outras formas de conversão do biogás em energia, como caldeiras para obtenção de energia térmica, motores Stirling, ou seja, um tipo de motor a pistão movido por calor externo que converte energia térmica em trabalho. Pode-se ainda citar as microturbinas que também convertem biogás em energia elétrica (SALOMON, 2007).

2.8 Purificação do biogás para transformação em biometano

Para obter o biometano, é necessária a purificação do biogás. A limpeza, como citado anteriormente, irá remover impurezas e compostos nocivos, porém, para obter o biometano, só a remoção dessas impurezas não é o suficiente, pois é necessário um gás com concentração de metano acima de 90%. Logo, é preciso limpar e refinar o biogás para atingir a finalidade de reduzir as porcentagens de gás carbônico e aumentar a concentração de metano do biogás. O poder calorífico do gás é aumentado melhorando sua eficiência (CLEMENTINO, 2021).

A Resolução ANP n° 886 2022 (ANP, 2022) que determina a composição e tolerâncias do biometano para fins de comercialização.

Como citado anteriormente, o biometano deve conter o mínimo de 90% de metano na sua composição. Outro ponto a ser destacado é o índice de Wobbe, o limite e teores de enxofre e dióxido de carbono e ponto de orvalho, que é requerido ao gás natural comercializado no Brasil (ANP, 2017).

2.8.1 Tecnologias para transformação do biogás em biometano

A purificação ou *upgrading* do biogás é necessária para obter o biometano e injetá-lo na rede de distribuição de gás natural ou usar como combustível veicular. O refino ou purificação consiste em basicamente remover o CO₂ do biogás. Existem várias formas de purificação de biogás disponíveis comercialmente como: lavagem com aminas, lavagem com água, adsorção por balanço de pressão (PSA), separação por membrana e lavagem por solventes orgânicos. Todas essas tecnologias citadas são utilizadas prioritariamente para remover o CO₂. Além das citadas, também existe a utilização de criogenia para purificar o biogás (GARCILASSO *et al.*, 2018).

2.8.1.1 Custo para produção do biometano

Segundo EPE (2018), os custos aproximados para produção de biometano estão relacionados com a capacidade da planta de biogás, quando se diz que quanto maior o volume de produção menor o custo para transformar o biogás em biometano. Tal estudo aponta os seguintes valores: R\$ 238 reais por metro cúbico para plantas (com capacidade acima de 50mil m³/dia). Para plantas com capacidade de 19 mil m³/dia, os valores para investimento e conversão do biogás em biometano giram em torno de R\$ 426 por metro cúbico. Especialmente para o CAPEX (Capital Expenditure), traduzido como Despesas de Capital, inclui o custo dos ativos físicos, equipamentos, planta industrial e tecnologia.

2.8.2 Preço de venda do biometano

De acordo com Pereira (2023), o valor da venda do biometano gerado em aterro sanitários em seu estudo foi de R\$ 4,10/m³. O valor do GNV no mesmo período do ano estava R\$ 4,82/m³ para o consumidor direto e R\$ 3,71 para postos de

combustíveis. Os valores do GNV foram consultados do boletim mensal da Indústria de Gás Natural, divulgado pelo (MME, 2023). O valor de venda adotado de R\$ 4,10 adotado no estudo citado é um valor estimado considerando o valor do GNV de R\$ 4,82 menos 15% que da R\$ 4,10 para maior atratividade do mercado.

2.8.3 Micro e minigeração distribuída a partir de fontes renováveis como biogás e biometano

Desde que a Resolução Normativa ANEEL n° 482/2012, de 17 de abril de 2012, entrou em vigor, o brasileiro passou a poder gerar a própria energia elétrica vinda de fontes renováveis ou cogeração qualificada. A partir desta resolução, além do consumidor pode produzir sua própria energia, também passou a poder injetar o excedente na rede de distribuição local, sendo compensado por isto (ANEEL,2022).

Em 2023, entrou em vigor uma nova resolução da ANEEL n° 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, alterando as resoluções anteriores de 2021, que estavam em vigor. A nova aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (ANEEL, 2023).

A geração distribuída de energia é a prática utilizada por pessoas que geram a própria energia. A forma de geração de energia centralizada ocorre quando a energia que chega até a rede de distribuição e também ao consumidor final, passa antes por um sistema de transmissão (SANTANA, 2021).

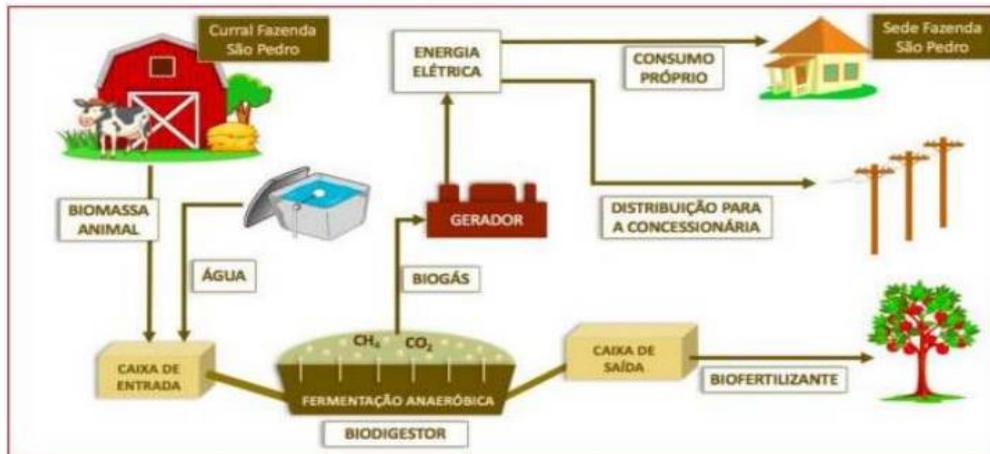


Figura 6 - Representação de um sistema de produção/consumo de energia elétrica conectada à rede de distribuição de eletricidade
 Fonte: Adaptado de Santana (2021).

A geração distribuída no Brasil diz a respeito à microgeração de energia elétrica com potência menor ou igual a 75 kW, e também a minigeração com potência superior a 75kW e menor ou igual a 5MW. No Brasil, existem quatro tipos de geração distribuída. A número um faz referência à geração de energia que será produzida e consumida na própria unidade, denominada consumo local. A número dois trata da geração de energia que é gerada em um local diferente de onde ela será consumida, ou seja, é consumo remoto. A número três é a geração compartilhada em que quem consome pode ser representado por cooperativas ou consórcios. Por último, a número quatro é a geração de múltiplas unidades, visto que os consumidores podem estar em uma mesma propriedade ou em propriedades contiguas (SANTANA, 2021).

2.8.4 Potencial de produção de biogás proveniente da suinocultura

A criação de suínos em sistema de confinamento de produção, e a consequente expansão da atividade, fez com que ocorresse um aumento na geração de dejetos, pois, quando não tratados e lançados em rios, são prejudiciais ao meio ambiente (ANGONESE *et al.*, 2006).

Quando tratados os dejetos suínos, ao invés de serem algo prejudicial ao meio ambiente, viram algo benéfico, principalmente se transformados em

bioenergias, considerando que os dejetos gerados diariamente por suínos variam entre 8 a 10% de sua massa corporal e também variando de acordo com sua fase produtiva (POSSA, 2013).

De acordo com IBGE (2024), em 2023, considerando somente suínos que foram abatidos no Brasil, o total ficou em 57,17 milhões de cabeças. Os dados apresentados sobre a produção de dejetos têm potencial para gerar bioenergias por meio da biomassa de suínos em terminação, sendo muito grande.

O Brasil é o 4º maior produtor de suínos do mundo, posicionado atrás somente da China, União Europeia e Estados Unidos. Em 2023, o país produziu 5,6 milhões de toneladas. A bioenergia proveniente da suinocultura, por meio da produção de biogás e biometano, caracteriza um exemplo de como este ramo da agropecuária tem se tornado sustentável (NEVES, 2024).

2.8.5 Produção de suínos no Paraná

O Paraná é o segundo estado com maior produção de suínos ficando atrás de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A região sul do país foi responsável por 67,8% da produção nacional no segundo trimestre de 2024 (AEN, 2024).

O estado do Paraná é subdividido em 399 municípios, 39 microrregiões e 10 mesorregiões considerando a subdivisões da Lei Estadual nº 15.825/08 (IPARDES, 2024).

De acordo com dados da SEAB (2023), no estado do Paraná foram abatidos 11461027 de cabeças de suínos, sendo a região oeste a maior produtora e, conseqüente, as mesorregiões que mais abateram suínos em 2023.

3 MATERIAL E MÉTODOS

As etapas de realização do estudo proposto consistem na escolha dos locais para coleta de dados, da categoria e animais estudados, das metodologias e formas de aplicação, resultando na plotagem de mapas de calor, e na estimativa do potencial do estadual e mesorregional, e a equivalência do biogás em biometano, energia elétrica e combustível veicular. Esta metodologia foi baseada no trabalho de Barizol (2020).

3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo desenvolvido foi baseado no estado do Paraná. Foi realizado o levantamento de abate de suínos nos 399 municípios paranaenses e em cada uma de suas dez mesorregiões Noroeste Paranaense, Centro Ocidental Paranaense, Norte Central Paranaense, Norte Pioneiro Paranaense, Centro Oriental Paranaense, Oeste Paranaense, Sudoeste Paranaense, Centro-Sul Paranaense, Sudeste Paranaense e Metropolitana de Curitiba.

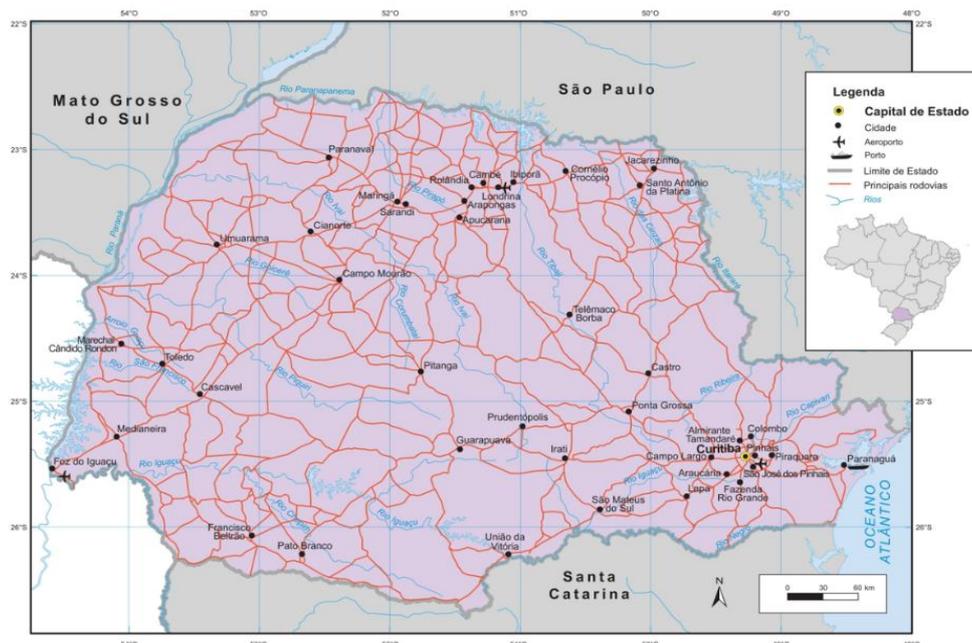


Figura 7 - Representação do estado do Paraná
Fonte: Adaptado IBGE (2024)

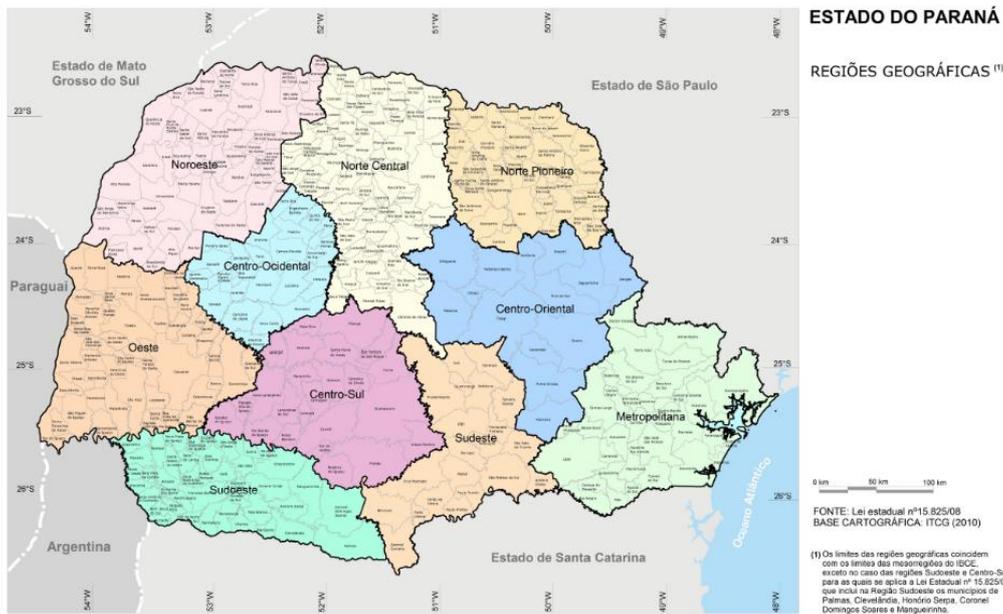


Figura 8 - Representação das mesorregiões do estado do Paraná, de acordo com a lei estadual 15.825/08
 Fonte: Adaptado IBGE (2008).

Com os dados do total de suínos abatidos no estado no ano de 2023, e de cada um dos 399 municípios foi possível a realização dos cálculos das estimativas do potencial de produção.

3.1.1 Categorização da produção agropecuária por tipo de animal

O estudo considerou a capacidade de produção de biogás a partir de dejetos provenientes da produção de suínos em terminação. O critério de escolha dessa categoria levou em conta produções agropecuárias de relevante importância econômica no estado e escassez de estudos relacionados, bem como a disponibilidade de informações referentes ao número de animais abatidos pela SEAB. O número de animais abatidos por município também foi obtido pela SEAB, tendo em vista os dados do levantamento do Valor Bruto da Produção agropecuária de 2023.

3.1.2 Caracterização da propriedade típica modelo

A propriedade na qual foram coletados os dados para o estudo possui 3000 cabeças de suínos terminação alojados onde a principal atividade econômica é a suinocultura. Tem um biodigestor do tipo *plug flow* e gerou, no ano de 2022, uma média de 11.433m³ de biogás por mês. A produção específica de biogás por animal ficou em torno de 0,13 m³/dia. Foram utilizados ainda os dados da mesma propriedade como base para estimar a equivalência em energia elétrica que pode ser gerada com determinado volume de biogás. A seguir, estão os dados usados no estudo.

3.1.3 Coleta de dados da propriedade

Os dados coletados na propriedade são referentes ao ano de 2022, dados esses da produção de biogás por mês, da produção de energia elétrica e da caracterização do biogás.

3.1.4 Produção de biogás

Para determinar a produção de biogás, foi necessário medir a vazão de biogás. Para isto, foi utilizado um transmissor de fluxo térmico de massa. O equipamento realiza a medição de vazão mássica por meio da dispersão térmica. A faixa de medição de vazão do equipamento é de 0,05 a 275 Nm/s, com precisão de +- 1% da leitura +0,5% da calibração.

O aparelho foi instalado na linha de gás próxima da admissão do motor, de forma que mede a vazão consumida pelo motor durante a operação. O aparelho mede a vazão instantânea (em m³.h⁻¹).

3.1.5 Produção de energia elétrica

Para medir a produção de energia elétrica do sistema de geração de energia conectado à rede de distribuição, foi utilizado um controlador microprocessado, que integra o painel de comando do grupo gerador. Esse controlador tem a função de

supervisionar e proteger o sistema de geração de energia elétrica. Conta com um acumulador e, ao final de cada período de operação do conjunto motogerador, o valor foi registrado manualmente em planilhas de controle.

3.1.6 Caracterização do biogás

O biogás foi analisado na propriedade por meio de um monitor de extração de gases portátil, Modelo Landtec GEM 5000. O equipamento identifica a concentração de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S no biogás.



Figura 9 - Monitor de extração de gases portátil
Fonte: Arquivo da pesquisa.

O Quadro abaixo mostra os dados coletados na propriedade para o desenvolvimento do trabalho. Como descrito acima, esses dados são referentes à energia gerada em cada mês durante o ano de 2022. A produção de biogás por mês, dia e hora, também mostra a produção específica de biogás em m³ por animal dia. Com a média anual desses dados, foi possível a realização do trabalho proposto.

Quadro 1 - Dados do motor gerador utilizado para conversão do biogás em energia elétrica, e utilizados para cálculo do potencial de produção

Mês Referência	Energia Gerada (kWh)	Produção de gás (m3/mês)	Produção de gás (m3/dia)	Produção de gás (m3/hora)	Produção específica de biogás (m ³ /suíno.dia)	Suínos alojados
jan./22	14760	14.022	467	39	0,1558	3000
fev./22	18640	17.708	590	49	0,196755556	3000
mar./22	22160	21.052	702	58	0,233911111	3000
abr./22	15920	15.124	504	42	0,168044444	3000
maio/22	3.400	3.230	108	9	0,035888889	3000
jun./22	12760	12.122	404	34	0,134688889	3000
jul./22	13800	13.110	437	36	0,145666667	3000
ago./22	16080	15.276	509	42	0,169733333	3000
set./22	11.360	10.792	360	30	0,119911111	3000
out./22	2.940	2.793	93	8	0,031033333	3000
nov./22	8.200	7.790	260	22	0,086555556	3000
dez./22	4.400	4.180	139	12	0,046444444	3000
Média	12.035	11.433	381	32	0,13	

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.7 Estimativas

A seguir, são evidenciada as metodologias que permitem o cálculo da estimativa do potencial de produção de biogás, bem como sua equivalência em termos de biometano, energia elétrica e veicular.

3.1.8 Cálculo para estimativa do potencial de produção de biogás

O cálculo para determinar o potencial de geração de biogás por meio de suínos em terminação consiste na multiplicação do número de cabeças de suínos abatidos no período desejado pela produção específica de biogás média anual de suínos terminação da propriedade modelo. O índice PE foi obtido por meio da análise dos dados de produção de biogás, no ano de 2022, na propriedade modelo. Para estimar o potencial de produção de biogás no Paraná, será multiplicado o

número de cabeças de suínos abatidos no ano de 2023 por 0,13, que corresponde à média anual da produção de biogás específico animal dia.

Equação (2)

$$P = N * PE$$

Em que:

P = Potencial de geração de biogás (m³/dia);

N = Número de animais abatidos no período desejado;

PE = Média da produção específica de biogás terminação (m³/animal dia).

3.1.9 Estimativa do potencial de produção de biogás nas mesoregiões

Em cada uma das dez mesoregiões, será replicado o cálculo descrito acima, multiplicando o número de cabeças de suínos abatidos, no ano de 2023, pela média da produção específica de biogás. Espera-se obter valores elevados na região oeste e valores baixos em outras regiões como, por exemplo, a região metropolitana de Curitiba.

3.1.10 Equivalência em energia elétrica

Sganzerla (1983) mostra em seu estudo que 1m³ de biogás corresponde a 1,43kWh de energia elétrica. Serão utilizados os mesmos dados da propriedade modelo.

Para a conversão do volume de produção de biogás em termos de energia elétrica, foram usados os dados coletados a partir da propriedade modelo que mostra aproximadamente 0,95 m³ de biogás para gerar 1 kWh de energia elétrica.

Será utilizado este dado como parâmetro para determinar a equivalência da geração de energia elétrica a partir do biogás no estado do Paraná. Para estimar a contribuição da equivalência do biogás em energia elétrica no consumo, foram observados os dados da EPE (2024) sobre o consumo de energia elétrica residencial per capita anual na região sul do país em 2023 de 3167 kWh/hab.

3.1.11 Potencial de produção do biometano

Para Teixeira *et al.* (2024), a composição do biogás gira em torno de 45% e 75% de metano (CH₄), entre 25% e 40% de dióxido de carbono (CO₂). Portanto, o potencial da produção de biometano no estudo proposto será considerado. Tem-se um biogás com 65% de metano, frisando que com m³ de biogás se obtém 0,65m³ de biometano.

3.1.12 Equivalência em energia veicular

A metodologia para equivalência em combustível veicular leva em conta o biometano, como substituto do GNV. O biometano tem as mesmas características químicas do gás natural. Assim, pode substituir o gás natural como combustível veicular.

De acordo com Scania (2022), a fabricante sueca de caminhões, ônibus e motores a diesel, GNV e biometano, os caminhões podem percorrer aproximadamente 500 quilômetros com um tanque de 944 litros, sendo que consegue armazenar entre 200 a 230 metros cúbicos de gás, isso mostra que o consumo médio de um caminhão movido a biometano é de aproximadamente 2,2 km/m³. Esse dado será utilizado como base para estimar quantos caminhões podem ser abastecidos com biometano no Paraná e suas subdivisões.

3.1.13 Mapas plotados para demonstrar o potencial de geração de biogás

Foram plotados mapas de calor usando o software QGIS 3.28.5 (2023). Com o uso do método da densidade de Kernel, todos os limites territoriais foram feitos com dados do IBGE, em 2022, que são os mais recentes. Nas mesorregiões, foram utilizados os dados de 2008, conforme a Lei Estadual n. 15.825/08. A referida forma de exibição dos dados permite a visualização espacial das áreas com maior potencial de produção de biogás.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item, serão apresentados os resultados obtidos a partir dos objetivos e metodologias empregadas. Os principais resultados envolvem o potencial de produção de biogás no estado do Paraná e, em suas mesorregiões, a distribuição espacial desse potencial, a equivalência em biometano, energia elétrica e veicular.

4.1 Potencial do Paraná e das mesorregiões para produção de biogás

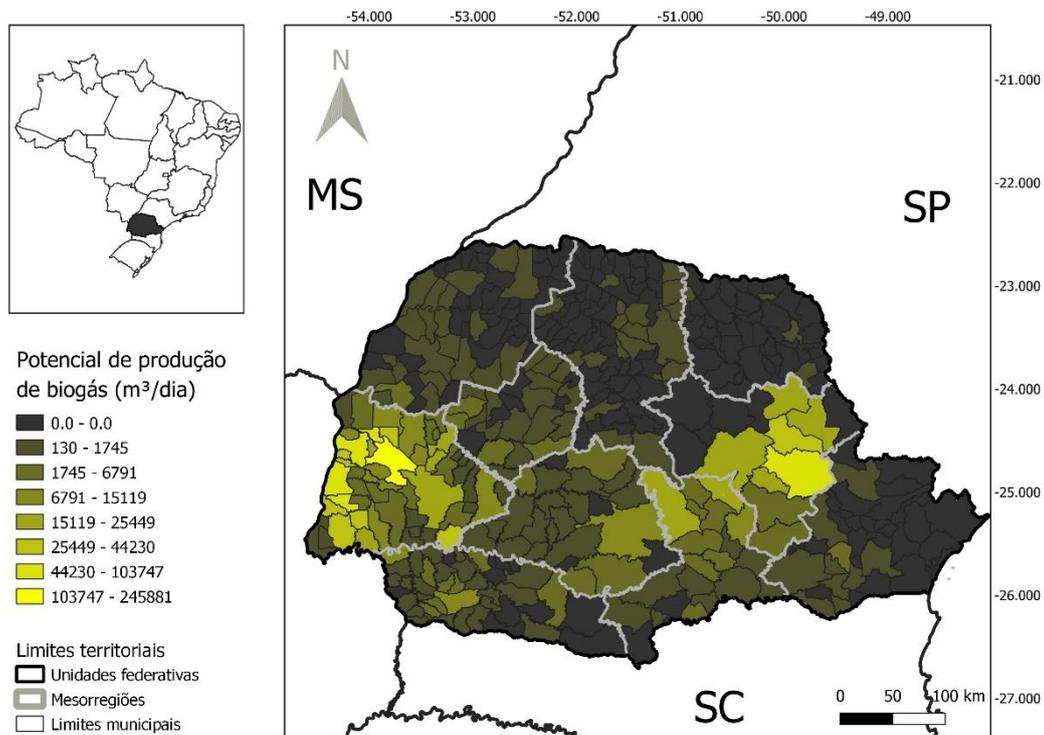


Figura 10 – Distribuição do potencial de geração de biogás por meio de dejetos de suínos em terminação
Fonte: Autor (2024).

Observando os dados da SEAB acerca do valor bruto da produção no ano de 2023, o estado abateu 11461027. Ademais, levando em conta o valor médio da produção específica de biogás na propriedade modelo que, em 2022, ficou em 0,13 m³/dia, o Paraná tem um potencial de geração de biogás de 1.489.933,51 m³/dia.

Para as mesorregiões, foi replicado o mesmo cálculo, porém apenas foi alterado o número de cabeças de suínos.

Os resultados obtidos comprovam o grande potencial do Paraná em gerar biogás por meio de suínos em terminação, podendo gerar mais de 543 milhões m³ por ano, com destaque para região oeste com potencial de gerar mais de 394 milhões m³ por ano representando pouco mais de 72% do total produzido no estado, isso se deve muito ao município de Toledo, o maior produtor da cidade que mais abate no estado.

O mapa de calor abaixo mostra claramente o grande potencial do oeste paranaense em produzir biogás por meio dos resíduos de suínos terminação em relação às outras regiões.

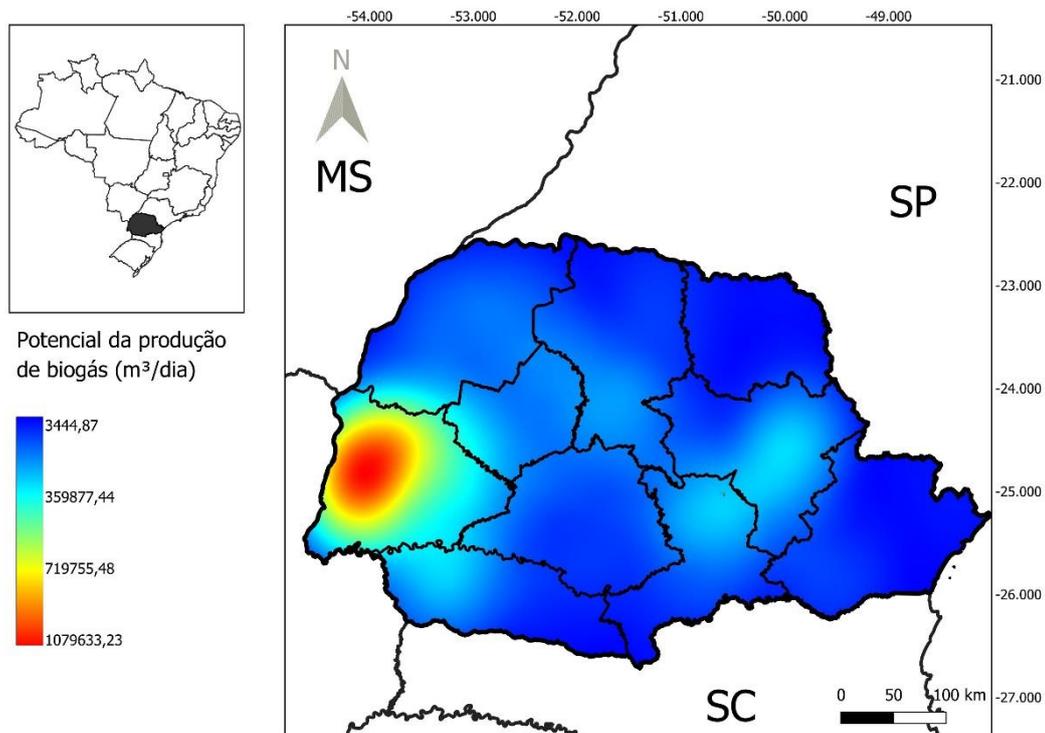


Figura 11 – Mapa de calor representando o potencial de cada mesorregião
Fonte: Autor (2024).

Tabela 1 - Potencial de geração de biogás por meio de dejetos de suínos em terminação no Paraná

Biogás	
1.489.933,51	M3.dia-1
446988005,3	M3.mês-1
543825731,2	M3.ano-1

Fonte: Autor (2024).

Tabela 2 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano

Fonte: Autor (2024).

Tabela 3 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos no estado do Paraná

Suínos em Terminação	
kWh.dia	1568351,063
kWh.mês	47050531,89
kWh.ano	572448138,1

Fonte: Autor (2024).

Levando em conta os dados da EPE (2024), o consumo de energia elétrica residencial per capita anual na região sul do país, em 2023, foi de 3167 kWh/hab. Portanto, pode-se ponderar que mais de 572 milhões de kWh/ano são capazes de suprir o consumo residencial de uma cidade com aproximadamente 180 mil habitantes ao longo de um ano.

A estimativa do potencial de produção de biogás por mesorregiões é mostrada nos tópicos a seguir.

4.1.1 Noroeste Paranaense

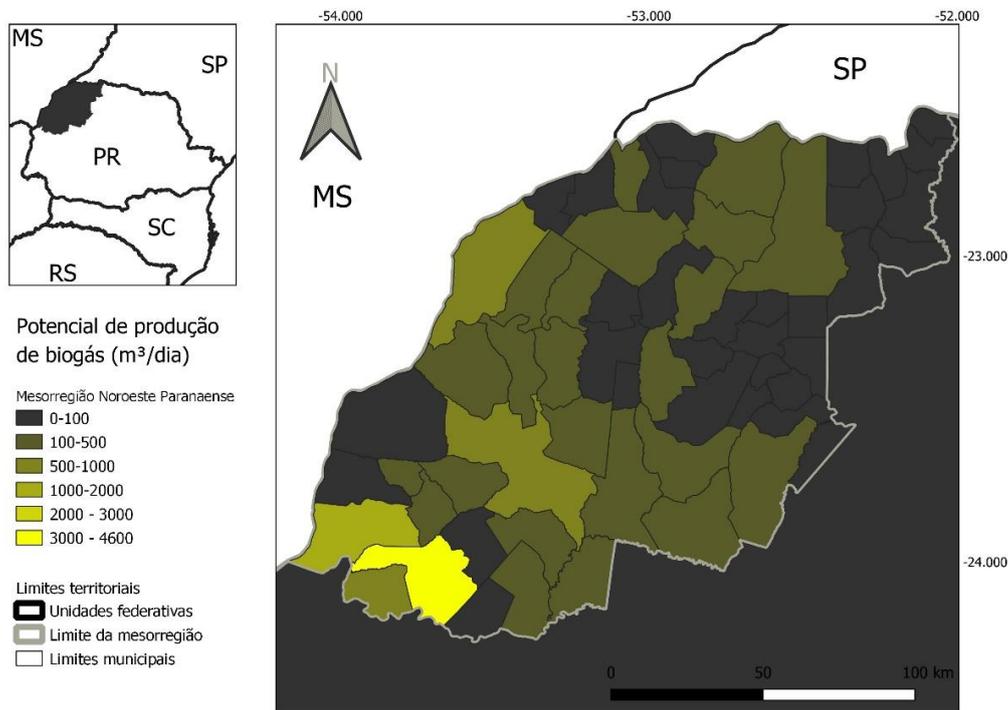


Figura 12 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Noroeste Paranaense
Fonte: Autor (2024).

A mesorregião Noroeste Paranaense apresenta baixo potencial, com um total de 13293,41 m³ dia⁻¹, sendo a cidade de Iporã aquela com melhor potencial, evidenciando 4539,08 m³ dia⁻¹, representado 34,15% do total da região (Figura 11 e Tabelas 5 e 6).

Tabela 4 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Noroeste paranaense

Biogás	
M3.dia-1	13293,41
M3.dia-1	398802,3
M3.dia-1	47856727,6

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Noroeste paranaense

Equivalência em biometano	
Suínos em terminação	
m3.dia	8640,72
m3.mês	259221,5
m3.ano	3153861,52

Fonte: Autor (2024).

Tabela 6 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na Mesorregião Noroeste paranaense

Equivalência em energia elétrica	
Suínos em Terminação	
kWh.dia	13993,06
kWh.mês	419791,9
kWh.ano	5107468,05

Fonte: Autor (2024).

4.1.2 Centro Ocidental Paranaense

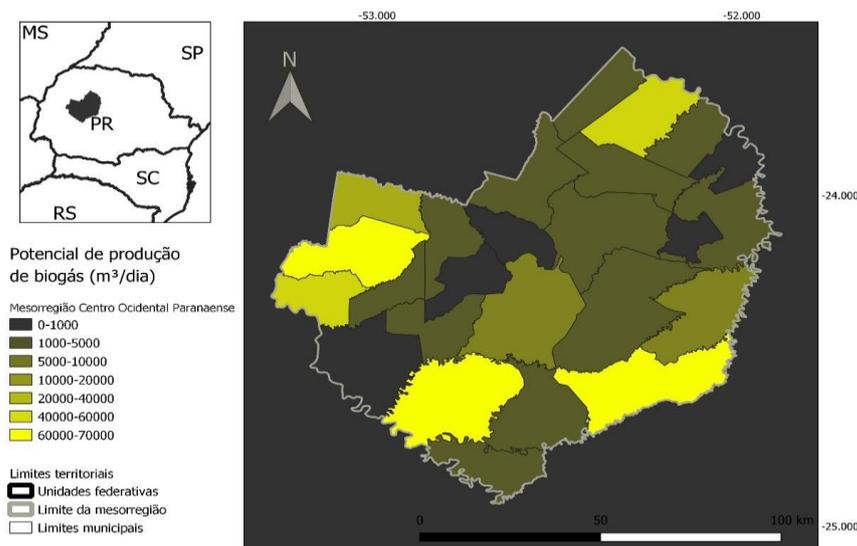


Figura 13 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Centro ocidental Paranaense

Fonte: Autor (2024).

A mesorregião Centro Ocidental Paranaense apresentou um potencial de produção de 16.103,23 m³ dia-1, sendo Goioerê a cidade com maior potencial, podendo gerar 2.470 m³ dia-1, representado 14,34% do total da região.

Tabela 7 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Ocidental paranaense

Biogás	
M3.dia-1	16103,23
M3.mês-1	483096,9
M3.ano-1	5877678,95

Fonte: Autor (2024).

Tabela 8 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Centro Ocidental paranaense

Equivalência em biometano	
Suínos em terminação	
m3.dia	10467,09
m3.mês	314012,98
m3.ano	3820491,32

Fonte: Autor (2024).

Tabela 9 – Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Ocidental Paranaense

Equivalência em energia elétrica	
Suínos em Terminação	
kWh.dia	16950,77
kWh.mês	508523,05
kWh.ano	6187031,05

Fonte: Autor (2024).

4.1.3 Norte Central Paranaense

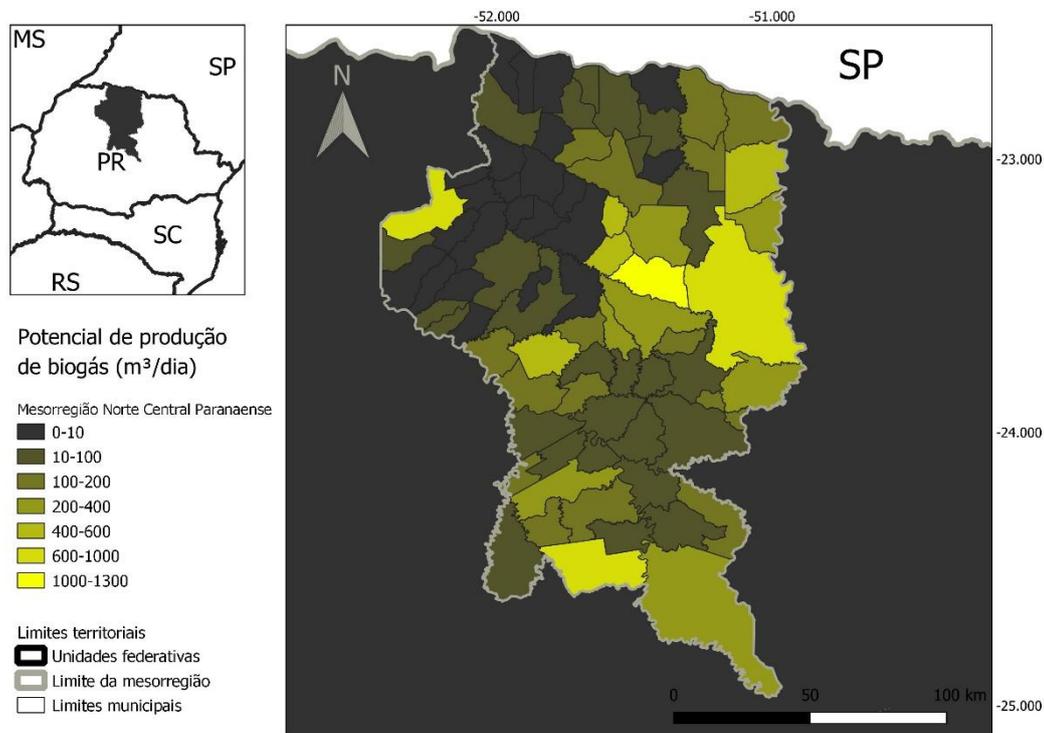


Figura 14 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Norte Central paranaense
Fonte: Autor (2024).

A mesorregião Norte Central Paranaense exibiu um potencial equivalente a 10.892,57 m³ dia⁻¹, sendo a cidade de Arapongas apresentando o maior potencial, com uma produção de 1.265,55 m³ dia⁻¹ de biogás, representando 11,62% do total da região.

Tabela 10 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Norte Central paranaense

	Biogás
M3.dia-1	10892,57
M3.mês-1	326777,1
M3.ano-1	3921325,2

Fonte: Autor (2024).

Tabela 11 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Norte Central paranaense

Equivalência em biometano	
Suínos em terminação	
m3.dia	7080,17
m3.mês	212405,11
m3.ano	2584262,05

Fonte: Autor (2024).

Tabela 12 – Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Norte Central paranaense

Equivalência em energia elétrica	
Suínos em Terminação	
kWh.dia	11465,86
kWh.mês	343975,89
kWh.ano	4185038,9

Fonte: Autor (2024).

4.1.4 Norte Pioneiro Paranaense

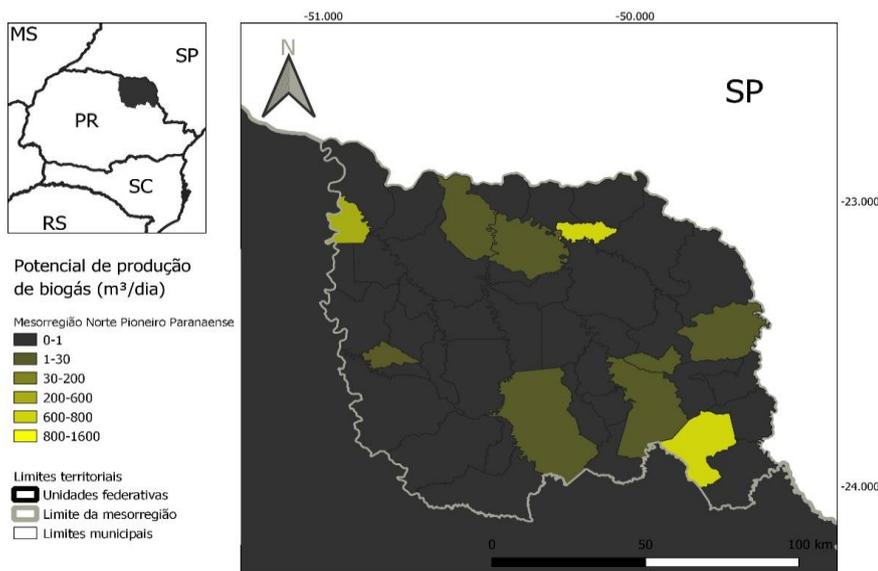


Figura 15 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Norte Pioneiro paranaense

Fonte: Autor (2024).

A região do Norte Pioneiro Paranaense é a região com o menor potencial de todas as regiões estudadas com um equivalente potencial de 3.444,87 m³ dia-1, com a cidade de Joaquim Távora sendo a com melhor potencial podendo gerar 1.684,8 m³ dia-1 de biogás, representando 48,9% do total da região.

Tabela 13 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Norte Pioneiro paranaense

Biogás	
M3.dia-1	3444,87
M3.mês-1	103346,1
M3.ano-1	1240153,2

Fonte: Autor (2024).

Tabela 14 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Norte Pioneiro paranaense

Equivalência em biometano	
Suínos em terminação	
m3.dia	2239,16
m3.mês	67174,965
m3.ano	806099,58

Fonte: Autor (2024).

Tabela 15 – Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Norte Pioneiro paranaense

Equivalência em energia elétrica	
Suínos em Terminação	
kWh.dia	3626,18
kWh.mês	108785,37
kWh.ano	1323555,7

Fonte: Autor (2024).

4.1.5 Centro Oriental Paranaense

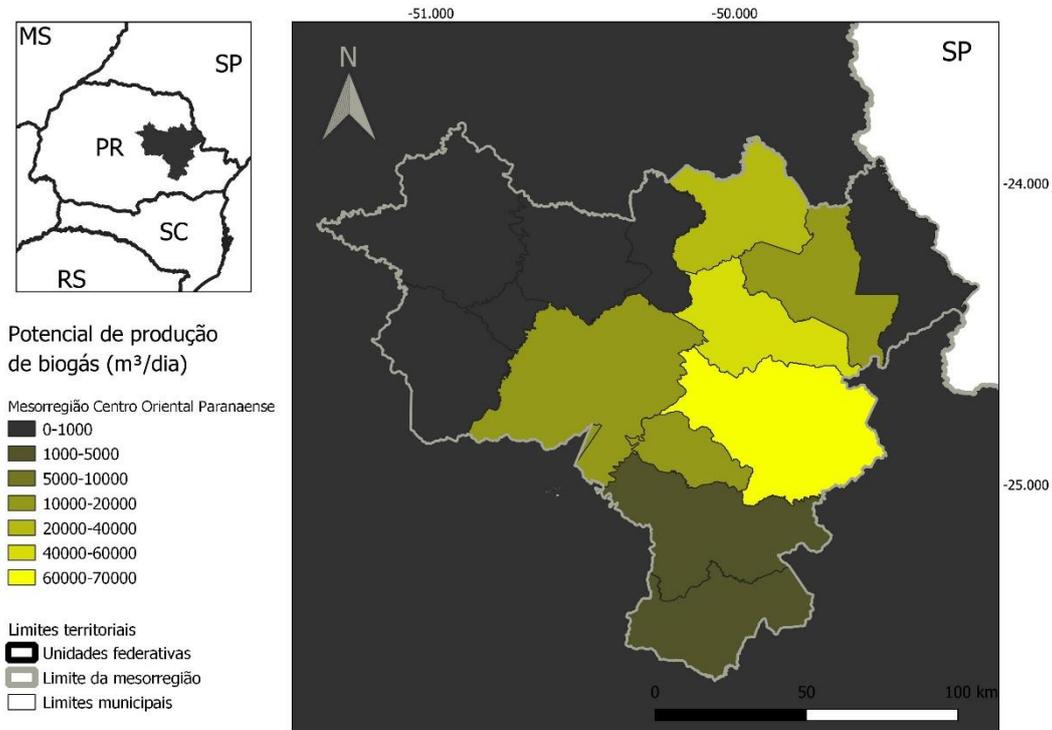


Figura 16 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Centro Oriental paranaense
Fonte: Autor (2024).

A mesorregião Centro Oriental Paranaense é a segunda região com melhor potencial de geração de biogás, com um valor de 196.836,77 m³ dia⁻¹. A cidade de Castro apresenta o maior potencial da região, com 67.783,3 m³ dia⁻¹, representando 34,44% do total da região.

Tabela 16 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Oriental paranaense

Biogás	
M3.dia-1	196836,77
M3.mês-1	5905103,1
M3.ano-1	70851237,2

Fonte: Autor (2024).

Tabela 17 - Equivalência do biogás em biometano tendo em vista a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Centro Oriental paranaense

Equivalência em biometano	
Suínos em terminação	
m3.dia	127943,9005
m3.mês	3838317,015
m3.ano	46059804,18

Fonte: Autor (2024).

Tabela 18 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Oriental paranaense

Equivalência em energia elétrica	
Suínos em Terminação	
kWh.dia	207196,6
kWh.mês	6215898
kWh.ano	75626832

Fonte: Autor (2024).

4.1.6 Oeste Paranaense

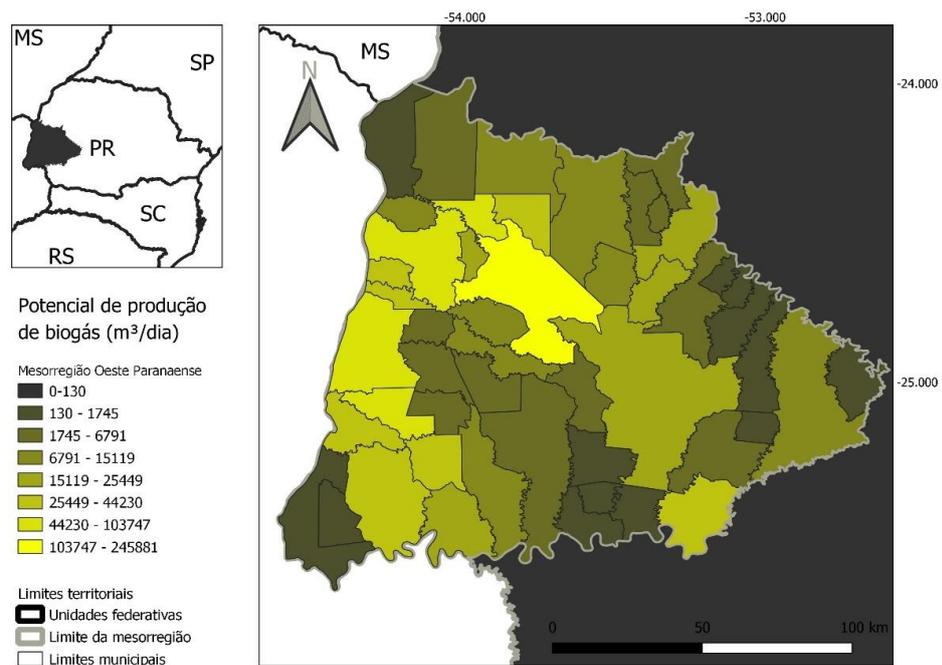


Figura 17 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Oeste paranaense

Fonte: Autor (2024).

A região Oeste é a região com melhor potencial de produzir biogás a partir de dejetos de suínos em terminação, com um valor de 1.079.633,23 m³ dia-1, representando 72% do total do estado. A cidade com mais potencial foi Toledo, com 245881,48 m³ dia-1, representado 22,77% do total da região.

Tabela 19 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na Mesorregião Oeste paranaense

Biogás	
M3.dia-1	1079633,23
M3.mês-1	12955598,76
M3.ano-1	155467185,1

Fonte: Autor (2024).

Tabela 20 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na Mesorregião Oeste paranaense

Equivalência em biometano	
Suínos em terminação	
m3.dia	701761,6
m3.mês	21052847,99
m3.ano	252634175,8

Fonte: Autor (2024).

Tabela 21 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Oeste paranaense

Equivalência em energia elétrica	
Suínos em Terminação	
kWh.dia	1136456,032
kWh.mês	34093680,95
kWh.ano	409124171,4

Fonte: Autor (2024).

4.1.7 Sudoeste Paranaense

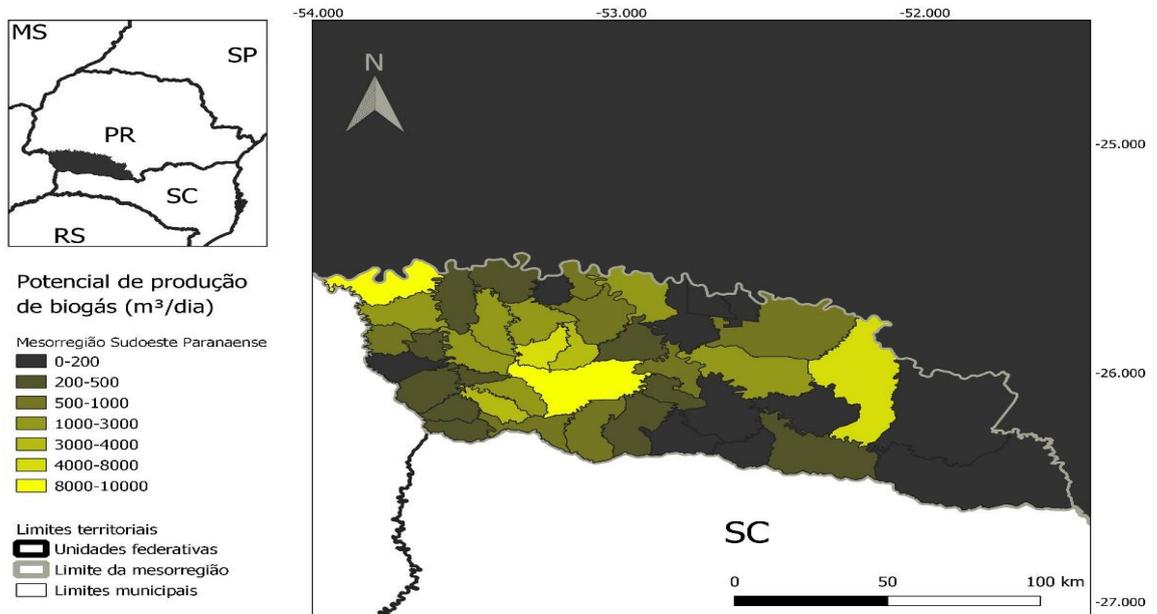


Figura 18 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Sudoeste paranaense
Fonte: Autor (2024).

A região Sudeste Paranaense apresentou um equivalente potencial de 54.720,38 m³ dia-1, sendo a cidade de Francisco Beltrão a que exibiu o maior potencial, com um valor de 9457,5 m³ dia-1, representando 17,28 % do total da região.

Tabela 22 - Potencial de geração de biogás através de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Sudoeste paranaense

	Biogás
M3.dia-1	54720,38
M3.mês-1	1641611,4
M3.ano-1	19699336,8

Fonte: Autor (2024).

Tabela 23 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Sudoeste paranaense

Equivalência em biometano	
	Suínos em terminação
m3.dia	35568,247
m3.mês	1067047,41
m3.ano	12804568,92

Fonte: Autor (2024).

Tabela 24 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Sudoeste paranaense

Equivalência em energia elétrica	
	Suínos em Terminação
kWh.dia	57600,4
kWh.mês	1728012
kWh.ano	21024146

Fonte: Autor (2024).

4.1.8 Centro Sul Paranaense

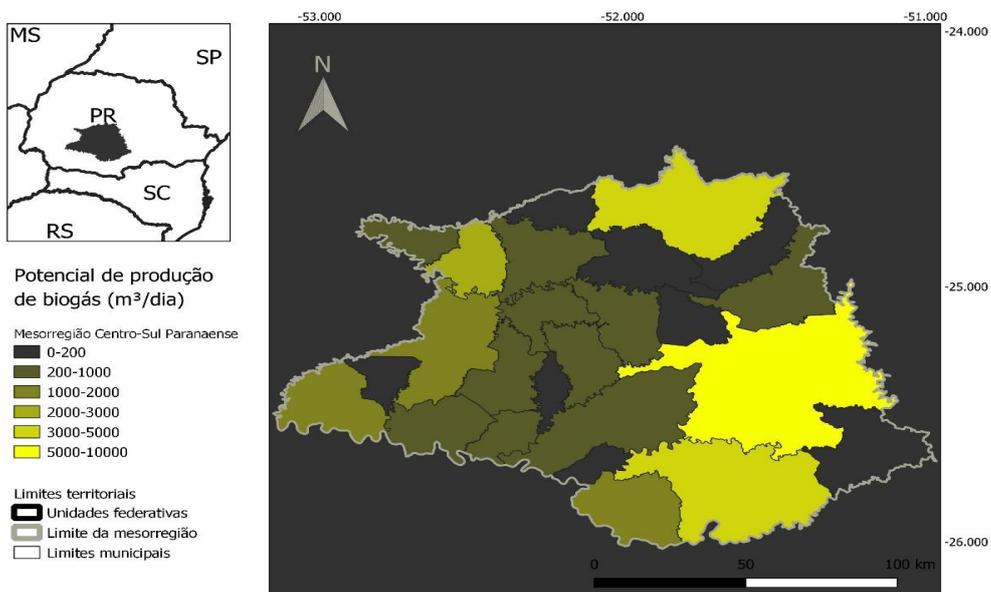


Figura 19 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião Centro Sul paranaense
Fonte: Autor (2024).

A região Centro-Sul Paranaense tem um potencial de 27.745,9 m³ dia-1, sendo a cidade de Guarapuava com maior potencial de produção, com um valor de 9.464 m³ dia-1, representando 34,11% do total da região.

Tabela 25 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Sul paranaense

Biogás	
M3.dia-1	27745,9
M3.mês-1	332959,8
M3.ano-1	3995409,6

Fonte: Autor (2024).

Tabela 26 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Centro Sul paranaense

Equivalência em biometano	
Suínos em terminação	
m3.dia	18034,835
m3.mês	541045,05
m3.ano	6492540,6

Fonte: Autor (2024).

Tabela 27 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Centro Sul paranaense

Equivalência em energia elétrica	
Suínos em Terminação	
kWh.dia	29206,21
kWh.mês	876186,32
kWh.ano	10660266,65

Fonte: Autor (2024).

4.1.9 Sudeste Paranaense

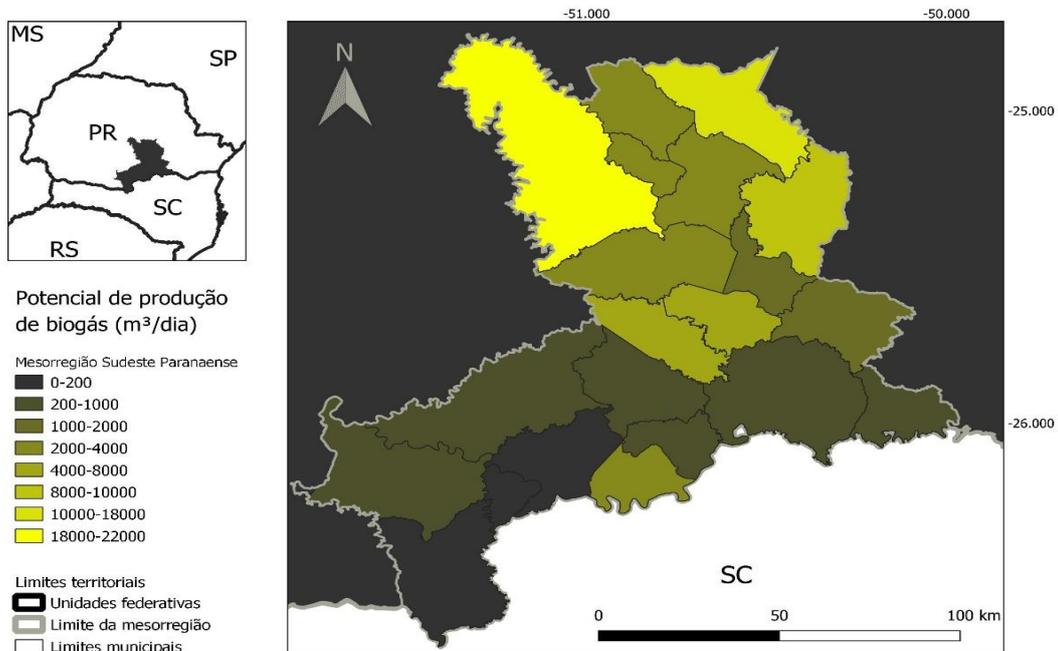


Figura 20 - Potencial de produção de biogás por meio de dejetos suínos em terminação da mesorregião Sudeste paranaense
Fonte: Autor (2024).

A região Sudoeste Paranaense é a terceira com melhor potencial e um valor de 79.441,44 m³ dia-1, sendo a cidade de Prudentópolis aquela com mais potencial de produção do biogás, com um valor de 21.788 m³ dia-1, representando 27,42% do total da região.

Tabela 28 - Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Sudeste paranaense

	Biogás
M3.dia-1	79441,44
M3.mês-1	2383243,2
M3.ano-1	28598918,4

Fonte: Autor (2024).

Tabela 29 - Equivalência do biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65% de metano na mesorregião Sudeste paranaense

Equivalência em biometano	
Suínos em terminação	
m3.dia	51636,936
m3.mês	1549108,08
m3.ano	18589296,96

Fonte: Autor (2024).

Tabela 30 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás através de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Sudeste paranaense

Equivalência em energia elétrica	
Suínos em Terminação	
kWh.dia	83622,57
kWh.mês	2508677,05
kWh.ano	30522238,05

Fonte: Autor (2024).

4.1.10 Metropolitana de Curitiba

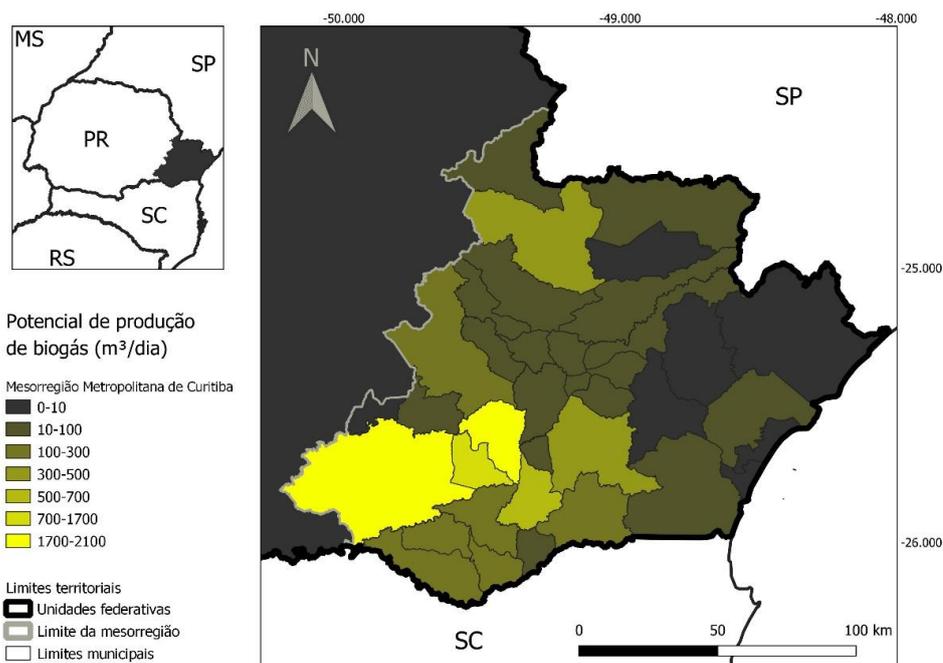


Figura 21 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos em terminação da mesorregião metropolitana de Curitiba.

Fonte: Autor (2024).

A mesorregião Metropolitana de Curitiba é a segunda região com menor potencial com um valor de 7821,71, sendo Araucária a cidade com o maior potencial com um valor de 2080 m³ dia-1, representado 26,6% do total da região.

Tabela 31 -- Potencial de geração de biogás a partir de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Metropolitana de Curitiba

Biogás	
M3.dia-1	7821,71
M3.mês-1	234651,3
M3.ano-1	2815815,6

Fonte: Autor (2024).

Tabela 32 – Equivalência de biogás em biometano considerando a composição do biogás a 65 de metano na mesorregião Metropolitana de Curitiba

Equivalência em biometano	
Suínos em terminação	
m3.dia	5084,1115
m3.mês	152523,345
m3.ano	1830280,14

Fonte: Autor (2024).

Tabela 33 - Equivalência em energia elétrica sobre o potencial de produção de biogás através de dejetos de suínos em terminação na mesorregião Metropolitana de Curitiba

Equivalência em energia elétrica	
Suínos em Terminação	
kWh.dia	8033,38
kWh.mês	247001,37
kWh.ano	2932183,7

Fonte: Autor (2024).

4.1.11 Equivalência do potencial de biometano em combustível veicular

Tento em vista os valores obtidos pela fabricante de caminhões Scania (2022), visto que um caminhão movido a biometano faz em média 2,3 km/m³, na região oeste onde está concentrada a maior parte da criação de suínos em

terminação e em que seria viável a instalação de usinas para produzir e armazenar o biometano, como definido acima, a região oeste paranaense tem o potencial de produzir 7080,17 m³ de biometano por dia e 2584262,05 por ano. A região oeste tem a capacidade de abastecer uma frota com 30 caminhões por dia para rodar aproximadamente 500km. Um caminhão Scania poderia percorrer o trajeto de Toledo para Curitiba até que fosse necessário abastecer novamente.

5 CONCLUSÃO

Com este estudo, pode-se concluir que o potencial de geração de biogás e biometano por meio dos dejetos de suínos em fase de terminação, no estado do Paraná, estava concentrado na região Oeste do estado. Essa região apresenta o maior potencial de produzir biogás a partir de dejetos de suínos em terminação, com um valor de 1.079.633,23 m³dia⁻¹, representando 72% do total do estado. As demais regiões pouco dispuseram desse tipo de dejetos. Assim, com exceção da região oeste, a produção de biogás e biometano nas outras regiões só foi possível para consumo na propriedade e a injeção na rede só iria ocorrer caso tivesse excedente. Na região Oeste, seria possível implementar usinas para o abastecimento de indústrias ou até mesmo bairros de algumas cidades, como Toledo que apresentou um potencial de 245881,48 m³dia⁻¹, representado 22,77% do total da região. O mesmo vale para o biometano, visto que, na região oeste, possivelmente seria viável a implementação de usinas para abastecimento de veículos movidos a biometano. Nas outras regiões, isso só seria viável para bastecer os veículos da propriedade produtora.

6 REFERÊNCIAS

- ABIOGÁS (Brasil). **Guia do Produtor. 2024**. Disponível em: <https://abiogas.org.br/guia-do-produtor>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa ANEEL n° 1.059**: Resolução normativa ANEEL n. 1.059. Brasília: Aneel, 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP n. 886, de 29 de Setembro de 2022**. Diário Oficial de 29.09.2022. 886. ed. Brasil, 29 set. 2022. p. 1-7. *aneira*, v. 13, n. 32, p. 1-43, jan. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução n° 685**: Resolução n. 685. Brasília: ANP, 2017.
- ALCÂNTARA, L. P.; ZANG, J. W.; FONSECA-ZANG, W. A. A viabilidade econômica de modelos de biodigestores para a produção de biogás. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 13, n. 32, 2022.
- ANGONESE, A. R. *et al.* Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 746-750, 24 dez. 2005.
- ANTAR, M. *et al.* Biomass for a sustainable bioeconomy: an overview of world biomass production and utilization. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 139, p. 110691, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110691>.
- ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, v. 1, n. 1, 2008.
- BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc & Ciência – Acsa**, Joaçaba, v. 2, n. 1, p. 87-96, jan. 2011.
- BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciência**, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.
- BORSCHIVER, S.; SILVA, A. L. R. DA. Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais. *In: XX 71 CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA. Anais [...]*. São Paulo, 2014, p. 8757–8765. DOI: <https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1453-19217-143735>.

BOECHAT, C. L. *et al.* Lodos de esgoto doméstico e industrial no crescimento inicial e qualidade de mudas de pinhão-manso. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p. 782-791, 2014.

BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano. **Empresa de Pesquisa Energética**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 2-20, jun. 2018.

BRASIL - PARANÁ GOVERNO DO ESTADO. Com recordes, Paraná lidera aumento na produção de frangos e suínos em 2024. **Agência Estadual de Notícias. Curitiba**, p. 1-1. 05 set. 2024. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Com-recordes-Parana-lidera-aumento-na-producao-de-frangos-e-suinos-em-2024#:~:text=Gra%C3%A7as%20ao%20desempenho%20mais%20recente,do%20Sul%20completa%20o%20p%C3%B3dio>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CALADO, L. F. **Análise do Produção de bioenergia gerada a partir dos resíduos de uma pequena comunidade rural em um biodigestor do tipo indiano**. 2022. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

CALZA, L. F. *et al.* Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 990-997, 2015.

CAMINHÃO MOVIDO A GÁS: tire suas dúvidas. Brasil: Jornal Scania, 4 fev. 2022. Mensal. Disponível em: <https://jornadascania.com.br/detalhesgas.php>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CAMPOS, A. *et al.* Tratamento de águas residuárias de fecularia por meio de lagoas de estabilização. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 235-242, jan. 2006.

CARDOSO, B. M. **Uso da Biomassa como Alternativa Energética**. 2012. 112 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CASSIN, S. T.; COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P. Biogás – Biocombustíveis ANP. **Biocombustíveis_Phr.Indd**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 85-117, jan. 2014.

CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; PECORA, V. Biogás - Biocombustíveis ANP. *In*: PERLINGEIRO, C. A. G. (org.). **Biocombustíveis no Brasil - Fundamentos, Aplicações e Perspectivas**. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2014, v. 1. P. 136-167.

CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS (Brasil). **Produção de Biogás: o que são biodigestores e como produzir biogás?** 2023. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/roducao-de-biogas-o-que-sao-biodigestores-e-como-gerar-biogas/>. Acesso em: 10 jun. 2024.

CIBIOGAS, O que é Biogás? 2020. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/o-quee-biogas/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

CIBIOGAS. **Florestas energéticas Manual de Plantio de Florestas Energéticas**, 2018.

CIBIOGÁS. **Panorama do Biogás no Brasil**. Foz do Iguaçu: Cibiogás Energias Renováveis, 2021.

COELHO, S. T., VELAZQUEZ, S. M. S. G., SILVA, O. C. *et al.* Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. *In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 6., 2006, Campinas.

CORDEIRO, M. F. **Avaliação Comparativa do desempenho de biodigestores mistura completa (CSTR) versus lagoa coberta no sudoeste goiano**. 2022. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Instituto Federal Goiano de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio Verde, 2022.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento e esgoto**. 2006. 195 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energias, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DESCENTRALIZADAS. Foz do Iguaçu: Cibiogas Energias Renováveis, 2018.

DO TRATAMENTO ANAERÓBIO, DA VINHAÇA E. *et al.* **Especialização em energias renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. Disponível em: https://www.grupogen.com.br/livro-energias-renov-ger-distribuida-e-eficiencia-energetica-jose-roberto-simoes-moreira-editora-ltc-9788521638919?srsIid=AfmBOoo6jGauYnbCioftXzuozLflG6ciiEkwi_pCrcHJsN8V3qrqc9HC

DUARTE, V. *et al.* Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 4, n.2, p.50-68, 2022.

ESTRELLA, L. M. *et al.* **Biometano em Santa Catarina: os modelos de Pomerode e Itapiranga como inspiração para braço do norte**. Evolução da suinocultura brasileira. São Paulo: Veja, 17 maio 2024. Mensal. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/coluna/mundo-agro/a-evolucao-da-suinocultura-brasileira>. Acesso em: 15 jan. 2025.

FERNANDES, G. L. *et al.* Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 67-77, fev. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220200210>.

FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C. Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v.14, n. 2, 2009.

GARCILASSO, V. P. *et al.* **Tecnologias de Produção e uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: Synergia, 2018.

GUIMARÃES, L. S. **O custo nivelado da eletricidade e seu impacto na transição energética**. 2019. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/opinioes/o-custo-nivelado-da-eletricidade-e-seu-impacto-na-transicao-energetica-02019>. Acesso em: 14 nov, 2014.

HÖFIG, P. *et al.* Viabilidade econômica do uso do biogás como combustível veicular em uma grande propriedade rural. **Informe Gepec**, v. 25, n. 1, p. 185-202, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (org.). **Em 2023, abate de bovinos cresce e o de suínos e frangos atinge recordes**. Rio de Janeiro: Estatísticas Econômicas, 2023. Disponível em: [https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/39452-em-2023-abate-de-bovinos-cresce-e-o-de-suinos-e-frangos-atingem-recordes#:~:text=Em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20aos%20su%C3%ADnos%2C%20em,cabe%C3%A7as\)%20em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20a%202022..](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/39452-em-2023-abate-de-bovinos-cresce-e-o-de-suinos-e-frangos-atingem-recordes#:~:text=Em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20aos%20su%C3%ADnos%2C%20em,cabe%C3%A7as)%20em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20a%202022..) Acesso em: 30 jul. 2024.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **MAPAS: base física e política**. Base Física e Política. 2024. Disponível em: <https://www.ipardes.pr.gov.br/>. Acesso em: 19 out. 2024.

KAINTHOLA, J. *et al.* Fungal pretreatment and associated kinetics of rice straw hydrolysis to accelerate methane yield from anaerobic digestion. **Bioresource technology**, v. 286, p. 121368, 2019.

KARLSSON, T. *et al.* **Manual Básico do Biogás**. Lajeado: Univates, 2014.

KUNZ, A. *et al.* Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, uso e Tratamento do Digestato. **Sbera Embrapa Suínos e Aves, Concordia**, v. 2, n. 4, p. 1-2014, 2022.

LINS, L. P. *et al.* Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS*. Não use números Romanos ou letras, use somente números Árabicos., 2015, Rio de Janeiro. **IV SIGERA**. Rio de Janeiro: Sigera, 2015. v. 4, p. 1-4.

LINS, L. P. *et al.* O aproveitamento energético do biogás como ferramenta para os objetivos do desenvolvimento sustentável. **Interações (Campo Grande)**, [S.L.], p. 1275-1286, 22 dez. 2022. Universidade Católica Dom Bosco. <http://dx.doi.org/10.20435/inter.v23i4.3704>.

LISBOA, L. S. C. **Energias Renováveis: considerações sobre energia eólica, vantagens e desvantagens, e participação na matriz energética brasileira até 2022**. 2022. 19 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialista em Engenharia Consultiva – Gerenciamento, Fiscalização e Supervisão de Obras e Projetos, Faculdade Ari de Sá, Fortaleza, 2022.

MACIEL, L. L. L. **Biomassa: uma fonte renovável para geração de energia elétrica no Brasil.** Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, v.1, n. 1, p. 1-9, 2019.

MATHIAS, J. F. C. M. Biogás em propriedades rurais familiares: uma opção de desenvolvimento local sustentável. *in*: Congresso Brasileiro de Sistemas, 10., 2014, Ribeirão Preto. **Biogás em propriedades rurais familiares: uma opção de desenvolvimento local sustentável.** Ribeirão Preto: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MESQUITA, J. C. M. **Estudo sobre a transição energética na matriz elétrica brasileira.** 2022. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

NISHIMURA, R. **Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos: implementação de aplicativo computacional.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Mato Grosso, 2009.

NOGUEIRA, L. A. H.; CARDOSO, R. B.L Perspectivas da Matriz Energética mundial e no Brasil P. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 32-42, nov. 2007.

OLIVEIRA, H. R. *et al.* Biogas potential of biowaste: a case study in the state of rio de janeiro, brazil. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 221, p. 119751, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2023.119751>.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIRAGASHI, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos.** Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2006.

OLIVEIRA, V. C. **Análise de viabilidade para a produção e utilização de um gerador a combustão por Etanol.** 2017. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

PARANÁ. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Paraná: mapas. Mapas. 2024.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/panorama>. Acesso em: 19 dez. 2024.

PASQUALINI, A. A. Aplicação dos biodigestores na pecuária sustentável. **Revista faculdades do saber**, [s. l], v. 9, n. 5, p. 598-609, jul. 2020.

PASSAGLIA, R. C. *et al.* Análise de investimento para geração de energia elétrica através do biogás em uma propriedade de suínos. *In*: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO AMBIENTAL E MEIO AMBIENTE, Não use números Romanos ou letras, use somente números Árabicos., 2019, São Paulo. **XII ENGEMA.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2019. v. 1, p. 1-11.

PEREIRA, J. S. M. **Perspectivas de produção e uso de biometano para transporte de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.** 2023. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Cascavel, 2023.

POSSA, R. D. **Tecnologia alternativa para purificação do metano contido no biogás proveniente da digestão anaeróbica de dejetos de suínos**. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Unioeste, Toledo, 2014. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/1844>. Acesso em: 10 dez. 2024.

PRADO, D. K. J. **Produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de águas residuárias: uma revisão sistematizada e bibliométrica**. 2023. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2023.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J.. Trace compounds affecting biogas energy utilisation – A review. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 52, n. 12, p. 3369-3375, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.005>.

RENOVÁVEIS, C. E. **Produção de Biogás: o que são biodigestores e como produzir biogás?** 2022. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/producao-de-biogas-o-que-sao-biodigestores-e-como-gerar-biogas/>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ROITMAN, T. Diálogos da Energia: biogás e biometano na nova economia. **Núcleo de Governança Energética do Mackenzie Integridad**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 1-53, nov. 2023.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007. 247 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SAMPAIO, G. A. *et al.* Fontes renováveis: análise dinâmica de sistemas aplicada à matriz energética do Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 438-459, 2020.

SANTANA, R. **Análise da regulação da geração distribuída de energia elétrica no Brasil: estimativa da distribuição do subsídio**. 2021.

SANTOS, F. L. C. **Projeto e construção de um biodigestor de baixo custo para pequenas propriedades rurais**. 2023. 52 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2023.

SANTOS, R. M.; RODRIGUES, M. S.; CARNIELLO, M. F. Energia e Sustentabilidade: panorama da matriz energética brasileira. **Revista Scientia, Salvador**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 13-33, jan/abr. 2021.

SCHNÜRER, A.; JARVIS, A. Microbiological Handbook for Biogas Plants Swedish Waste Management U2009:03. **Swedish Gas Centre Report 207**, Suécia, Abril 2009.

SEADI, T. Al. *et al.* **Biogas HANDBOOK**. Esbjerg: University Of Southern Denmark Esbjerg, 2008.

SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. **Valor Bruto da Produção**. 2024. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/vbp>. Acesso em: 17 out. 2024.

SILVA, C. W. **Análise de condicionantes para injeção do biometano na rede de distribuição de gás canalizado**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2021.

SILVA, S. P. *et al.* A importância da biomassa na matriz energética brasileira. **Pensar Acadêmico, Manhauçu**, [s. l], v. 19, n. 2, p. 557-583, maio 2021.

SOARES, C. M. T.; FEIDEN, A.; TAVARES, S. G. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. **Nativa**, v. 5, p. 522-528, 2017.

SOARES, R. C.; SILVA, S. R. C. M. **Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível**. 2010. 6 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Cuiabá, 2010.

SOUSA, A. L.; RIZZATTO, M. L. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 72-77, 31 jan. 2022. Scientific Electronic Archives. <http://dx.doi.org/10.36560/15220221511>.

SOUZA, J.. **Desempenho Energético de Diferentes Motores Geradores em Sistemas de Geração Distribuída de Energia Elétrica a Biogás**. 2023. 98 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2023.

SOUZA, J. *et al.* Viabilidade econômica da geração de energia elétrica em motor dual biogás/diesel no meio rural. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, p. e106101724528-e106101724528, 2021.

TEIXEIRA, C. A. N. *et al.* A hora do biometano no Brasil. **BNDES**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 1-38, jan. 2024.

VIEIRA, H. G.; POLLI, H. Q. O BIOGÁS COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA. *Revista Interface Tecnológica*, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 388-400, 30 jul. 2020. *Interface Tecnológica*. <http://dx.doi.org/10.31510/infa.v17i1.766>.

VIEIRA, H. G.; POLLI, H. Q. O biogás como fonte alternativa de energia. **Revista Interface Tecnológica**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 388-400, 30 jul. 2020. *Interface Tecnológica*. <http://dx.doi.org/10.31510/infa.v17i1.766>.

WASTE Management U2009:03. Swedish Gas Centre Report 207, Suécia, abril 2009.

WEIRICH, C. S. *et al.* Cezar. Análise do potencial brasileiro para a geração de eletricidade a partir das fontes de energia solar fotovoltaica e o biogás no contexto da geração distribuída. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 11, n. 8, p. 1-19, 24 jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i8.31096>.