

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALEX PEREIRA CARVALHO
VINÍCIUS MARQUES RODRIGUES ROCHA

**ESTUDO DA VIABILIDADE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DO BIOGÁS PROVENIENTE DO ATERRO SANITÁRIO DE PORTO
NACIONAL - TO**

PALMAS - TO
2025

**ALEX PEREIRA CARVALHO
VINÍCIUS MARQUES RODRIGUES ROCHA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DO BIOGÁS PROVENIENTE DO ATERRO SANITÁRIO DE PORTO
NACIONAL - TO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Valci Ferreira Victor

**PALMAS - TO
2025**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Bibliotecas do
Instituto Federal do Tocantins**

C331e Carvalho, Alex Pereira
ESTUDO DA VIABILIDADE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DO BIOGÁS PROVENIENTE DO ATERRO
SANITÁRIO DE PORTO NACIONAL - TO / Alex Pereira Carvalho, Vinícius
Marques Rodrigues Rocha. – Palmas, TO, 2025.
67 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.

Orientador: Dr. Valci Ferreira Victor

1. Energia Renovável. 2. Resíduos Sólidos Urbanos. 3. Biogás. I. Rocha,
Vinícius Marques Rodrigues. II. Victor, Dr. Valci Ferreira III. , .
IV. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de
estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).

ALEX PEREIRA CARVALHO
VINÍCIUS MARQUES RODRIGUES ROCHA

**ESTUDO DA VIABILIDADE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DO BIOGÁS PROVENIENTE DO ATERRO SANITÁRIO DE PORTO
NACIONAL - TO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins –
Campus Palmas, como requisito à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 25/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



VALCI FERREIRA VICTOR

Data: 18/09/2025 20:19:27-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor Valci Ferreira Victor (Orientador)

IFTO – *Campus* Palmas

Documento assinado digitalmente



WALTER XANTHOPULO

Data: 19/09/2025 11:16:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor Walter Xanthopulo

IFTO – *Campus* Palmas

Documento assinado digitalmente



HUMBERTO RODRIGUES MACEDO

Data: 19/09/2025 14:32:41-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor Humberto Rodrigues Macedo

IFTO – *Campus* Palmas

*“O homem que remove montanhas
sempre começa retirando pequenas
pedras do caminho.”
- Provérbio Chinês*

RESUMO

Introdução: O crescimento populacional e o avanço das práticas agrícolas e industriais têm aumentado a demanda por energia, agravando os impactos ambientais. No Brasil, a geração de resíduos sólidos urbanos é significativa, ultrapassando 77 milhões de toneladas, onde 61,1% tem destinação final adequada, como aterros sanitários, que os resíduos se decompõem e geram biogás. O biogás é um biocombustível versátil, com grande potencial para ampliar o uso de energia renovável. **Objetivo:** Estudar a viabilidade do uso de biogás como fonte renovável para produção de energia elétrica no aterro sanitário de Porto Nacional - TO. **Metodologia:** Trata-se de uma pesquisa caracterizada como descritiva, exploratória, quantitativa, bem como um estudo de caso a ser realizado no aterro sanitário de Porto Nacional – TO. Foi realizado um levantamento dos dados referentes ao aterro, para a realização de cálculos referentes à viabilidade da geração de energia elétrica a partir do biogás, incluindo a quantidade de energia gerada e consequentemente a viabilidade econômica. **Resultados e Discussões:** O estudo indica crescimento contínuo na geração de metano, potência e energia no aterro de 2023 a 2049, passando de 171.008 para 3.455.161 m³CH₄/ano e de 144,5 para 2.919,6 kW. O faturamento acumulado estimado é de R\$ 10,38 milhões em 26 anos, mas a viabilidade depende do modelo de operação e dos custos envolvidos. Em cenários simplificados, há lucro; em projetos completos, pode haver inviabilidade sem apoio externo. **Considerações finais:** Conclui-se que o aproveitamento energético do biogás de aterros pode ser uma alternativa promissora, mas sua viabilidade depende diretamente da escala do empreendimento, do controle operacional e da integração com políticas públicas e incentivos financeiros.

Palavras-chave: Energia renovável. Metano. Resíduos sólidos urbanos. Biogás.

ABSTRACT

Introduction: Population growth and the expansion of agricultural and industrial practices have increased energy demand, exacerbating environmental impacts. In Brazil, the generation of municipal solid waste is significant, exceeding 77 million tons, with 61.1% having an adequate final destination, such as sanitary landfills, where waste decomposes and generates biogas. Biogas is a versatile biofuel with great potential to expand the use of renewable energy.

Objective: To assess the feasibility of using biogas as a renewable source for electricity generation at the Porto Nacional – TO sanitary landfill.

Methodology: This is a descriptive, exploratory, and quantitative case study carried out at the Porto Nacional – TO sanitary landfill. Data related to the landfill were collected to perform calculations on the feasibility of generating electricity from biogas, including the amount of energy produced and, consequently, the economic viability.

Results and Discussion: The study indicates continuous growth in methane generation, power, and energy at the landfill from 2023 to 2049, rising from 171,008 to 3,455,161 m³CH₄/year and from 144.5 to 2,919.6 kW. The estimated accumulated revenue is R\$ 10.38 million over 26 years, but feasibility depends on the operational model and the costs involved. In simplified scenarios, profit is achievable; in complete projects, viability may be compromised without external support.

Final Considerations: It is concluded that the energy recovery of landfill biogas can be a promising alternative, but its feasibility directly depends on the project scale, operational control, and integration with public policies and financial incentives.

Keywords: Renewable energy. Methane. Municipal solid waste. Biogas.

LISTA DE ABREVIACÕES

ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil
BEN	Balanço Energético Nacional
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
GNR	Gás Natural Renovável
H	Hidrogênio
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFTO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
MTEP	Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo
N	Nitrogênio
NH ₃	Amônia
O	Oxigênio
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de Resíduos Sólidos Urbanos por região no Brasil em 2022	18
Figura 2 - Resíduos sólidos urbanos coletados por região no Brasil em 2022.....	18
Figura 3 - Corte da seção transversal de um aterro sanitário.....	21
Figura 4 - Repartição da oferta interna de energia no Brasil 2023.	23
Figura 5 - Etapas da formação do biogás.	28
Figura 6 - Cadeia de valor do biogás em aterros sanitários.	31
Figura 7 - Exemplo de poço vertical.	34
Figura 8 - Poço horizontal de extração de biogás.	34
Figura 9 - Detalhamento das etapas das coletas do biogás em aterro sanitário.	36
Figura 10 - Localização geográfica de Porto Nacional - TO.....	40
Figura 11 - Localização do aterro sanitário de Porto Nacional - TO.....	41
Figura 12 - Aterro sanitário de Porto Nacional - TO.	42
Figura 13 – Projeção de geração de metano (Qx) 2023 a 2049.....	55

LISTA DE EQUAÇÕES

[1]45

[2]45

[3]46

[4]46

[5]47

[6]48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades e composição do biogás.	26
Tabela 2 - Determinação da constante k conforme a precipitação anual.	44
Tabela 3 – Estimativa da população por ano.	50
Tabela 4 - Estimativa do Fluxo de Resíduos 2022 a 2049.	52
Tabela 5 - Estimativa da geração de biogás (Qx) ano a ano.	54
Tabela 6 - Potência e energia diária disponível de metano de 2023 até 2049.	57
Tabela 7 - Retorno financeiro ao longo dos anos da geração de energia.	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1. Problema de pesquisa	14
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.1 Objetivos Específicos	14
1.3 Justificativa	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Resíduos sólidos urbanos	16
2.2 Manejo e panorama de resíduos sólidos no Brasil	17
2.3 Aterros sanitários	21
2.5 Biogás como fonte de energia	24
2.5.1 Formação do Biogás	27
2.6 Aproveitamento energético do biogás	28
2.7 Captação de biogás de aterro sanitário	32
3 METODOLOGIA	39
3.1 Tipo de pesquisa	39
3.2 Objeto de estudo	39
3.3 Quantificação e qualificação do biogás do aterro sanitário de Porto Nacional - TO	42
3.3.1 Coleta dos dados (obtenção das variáveis)	43
3.3.2 Tratamento dos dados	43
3.3.3 Avaliação das variáveis	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 Constante de decaimento (k)	49
4.2 Potencial de geração de metano (L0)	49
4.3 Taxa de crescimento populacional	50
4.4 População para o período analisado	50
4.5 Estimativa do Fluxo de Resíduos (Rx)	51
4.6 Determinação da estimativa de geração de biogás	53
4.7 Determinação da potência disponível	56
4.8 Determinação da energia disponível e estimativa de uso	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62

REFERÊNCIAS.....63

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das práticas agrícolas e industriais, impulsionado pelo aumento populacional, tem gerado uma demanda energética mais robusta, impactando significativamente o meio ambiente. Consequentemente, há uma crescente preocupação em suprir essa demanda energética de maneira sustentável, minimizando os impactos ambientais e sociais. Isso tem levado a uma busca cada vez maior pela exploração de fontes de energia renovável (Melo, 2023).

Com a crescente inquietação acerca dos impactos ambientais provenientes dos combustíveis fósseis, que não apenas esgotam recursos não renováveis, mas também aumenta a poluição do ar e o aquecimento global, o foco nas pesquisas e implementações de formas alternativas e renováveis de geração de energia tem se intensificado. Além disso, uma preocupação adicional de grande relevância é a crescente produção de resíduos sólidos, muitas vezes desprovida de destinação adequada, agregando uma complexidade adicional ao panorama atual (Fernandes *et al.*, 2022).

Em concomitância ao crescimento populacional e aumento da demanda energética, percebe-se um aumento demasiado na produção de resíduos sólidos. Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente - ABREMA (2023), no ano de 2022 o Brasil produziu cerca de 77,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, correspondendo a 211 mil toneladas diárias. Destes, 43,8 milhões de toneladas (61%) possuem uma destinação adequada, como aterros sanitários, enquanto 27,9 milhões de toneladas (39%) são dispostos inadequadamente.

A Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), determina que os resíduos sólidos sejam destinados em aterros sanitários como uma medida de proteção ambiental, considerando que estes devem seguir rigorosos padrões para minimizar os impactos ambientais (Brasil, 2010).

Embora os aterros sanitários sejam a destinação mais adequada, determinada por lei, estes ainda resultam em algumas questões, como a geração de biogás, que muitas vezes não há uma destinação (Felca *et al.*, 2015). Enquanto não surgem novas tecnologias para destinação final ou reaproveitamento energético dos resíduos de maneira ambientalmente responsável, o aterro sanitário permanece fundamental para

qualquer método de manejo e disposição final dos resíduos sólidos urbanos (Marques *et al.*, 2019).

O biogás, resultante da decomposição anaeróbica da matéria orgânica, é uma fonte energética viável devido à presença de metano em sua composição. Por conseguinte, seu uso como fonte renovável de energia tem ganhado popularidade crescente, especialmente em aterros sanitários, onde sua prática é cada vez mais comum (Maia, 2016).

O biogás surge da decomposição anaeróbia da matéria orgânica nos aterros sanitários, predominantemente composto por metano (CH_4). Este gás metano exerce um impacto vinte e uma vezes mais significativo do que o dióxido de carbono no agravamento do efeito estufa. Por outro lado, o metano presente no biogás possui um alto poder calorífico, o que o torna uma fonte viável para a geração de eletricidade. No entanto, isso requer um sistema de conversão para transformar o combustível em energia elétrica, exigindo análises econômicas para determinar a viabilidade de empreendimentos energéticos em aterros sanitários (Andrade, 2022).

No Brasil, dados do Balanço Energético Nacional – BEN (2024), no Relatório Síntese 2024, no ano de 2023 a oferta interna no país foi 313,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (MTEP), com um aumento de 3,5% em relação ao ano de 2022. Do total, 49,1% refere-se a energia proveniente de fontes renováveis, um número superior se comparado ao restante do mundo, e isso se deve sobretudo ao aumento expressivo de energia eólica, fotovoltaica e outras fontes, como bioenergia. No ano anterior, o percentual de energia renovável foi de 47,4%, demonstrando um aumento atual.

Assim, identifica-se o alto número referente à produção a partir de fontes não renováveis, e frente ao cenário da geração de resíduos e alta demanda por energia elétrica, a geração por meio do biogás em aterros sanitários é uma alternativa de grande representatividade a ser considerada.

Nesse sentido, realizou-se uma pesquisa visando identificar a viabilidade para geração de energia elétrica por meio do biogás produzido no aterro sanitário de Porto Nacional – TO.

1.1. Problema de pesquisa

Há viabilidade econômica para geração de energia elétrica através do biogás produzido no aterro sanitário de Porto Nacional - TO?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade do uso de biogás como fonte renovável para produção de energia elétrica no aterro sanitário de Porto Nacional - TO.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Quantificar e qualificar o biogás gerado pelo aterro sanitário de Porto Nacional.
- Investigar os impactos ambientais associados à produção de biogás e sua conversão em energia elétrica;
- Identificar possíveis desafios regulatórios e legais para a implementação do projeto de geração de energia elétrica a partir do biogás no aterro sanitário de Porto Nacional – TO.

1.3 Justificativa

Durante a crise do petróleo na década de 1970, o Brasil realizou experiências pioneiras com o uso do biogás, chegando a canalizá-lo para abastecer residências e indústrias. Com a crise energética no país, pesquisadores retomaram os estudos para gerar energia elétrica utilizando turbinas especiais alimentadas pela queima do biogás, convertendo essa energia em eletricidade. O modelo de urbanização vigente no Brasil, aliado a uma sociedade pautada no consumismo, gerou graves desafios relacionados à produção e ao manejo de resíduos urbanos, que, ao longo dos últimos anos, foram descartados de forma inadequada na natureza, causando impactos socioambientais irreversíveis (Vieira *et al.*, 2015).

O uso ambiental do biogás gerado em aterros sanitários desempenha um papel importante na redução das emissões atmosféricas e no combate ao aquecimento global, considerando que o metano (CH_4) presente na mistura gasosa é cerca de 21 vezes mais impactante ao meio ambiente que o dióxido de carbono (CO_2). Além disso, essa prática contribui para a diversificação da matriz energética brasileira, promove o avanço de um modelo energético sustentável e permite que um combustível anteriormente desperdiçado seja utilizado para geração de energia elétrica (Marques, 2019).

Na cidade de Porto Nacional – TO, há um aterro sanitário para a destinação final dos resíduos da cidade, no entanto não há nenhum aproveitamento energético. Nesse sentido, a presente pesquisa se justifica pela necessidade de identificar a viabilidade do aproveitamento do biogás produzido no aterro sanitário de Porto Nacional para a produção de energia elétrica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos sólidos urbanos

A Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), define os resíduos sólidos em seu art. 3º como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Brasil, 2010).

Conhecidos popularmente como lixo urbano, esses resíduos são gerados pelas atividades domésticas e comerciais nas cidades. Sua composição varia conforme a população, a situação socioeconômica e a cultura de cada sociedade. Esses materiais apresentam diferentes classificações e tipos, e é essencial que sejam devidamente acondicionados (Maia, 2016).

Em consoante com Silva (2020), há uma diferença entre a conceituação de lixo e resíduos sólidos, onde este último possui características próprias ligadas ao seu material, à sua composição, à sua forma, e que não necessariamente são impróprias para um uso futuro, diferentemente do lixo, que se trata de um conceito de materiais impróprios par uso futuro.

Conforme a norma ABNT NBR 10.004 (2004), os resíduos sólidos são classificados com base na origem, características e constituintes, comparados a listas de substâncias que impactam o meio ambiente e a saúde. A norma os divide em:

- Classe I: Perigosos – apresentam riscos à saúde e ao meio ambiente, requerendo tratamento especial devido a características como inflamabilidade, toxicidade e patogenicidade.
- Classe II: Não perigosos, subdivididos em:
 - Classe II A: Não inertes – não são perigosos, mas possuem propriedades como biodegradabilidade ou combustibilidade; exemplo: lixo doméstico.
 - Classe II B: Inertes – não alteram a qualidade da água quando em contato com ela.

2.2 Manejo e panorama de resíduos sólidos no Brasil

O manejo de resíduos sólidos envolve um conjunto de procedimentos e práticas que englobam a separação, coleta, manipulação, acondicionamento, transporte, armazenamento, transbordo, triagem, tratamento, comercialização (quando aplicável) e a disposição final adequada dos resíduos (Carvalho, 2011).

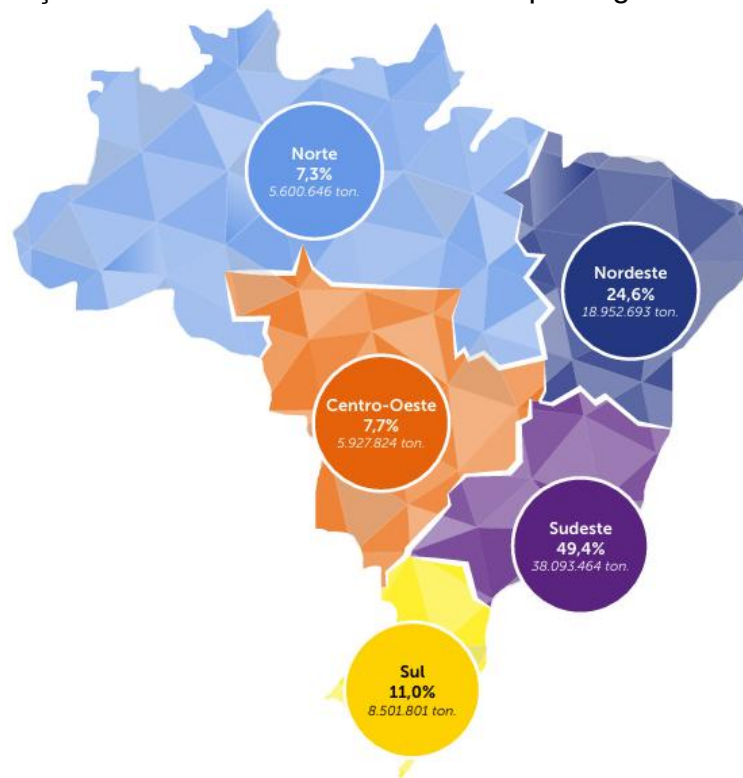
Esse processo abrange todas as etapas, desde a coleta e transporte até a destinação final, sendo essas duas últimas consideradas as mais importantes, pois influenciam diretamente o meio ambiente e a vida cotidiana da sociedade (Neta, 2011).

De acordo com a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente – ABREMA (2023), discussões acerca da gestão e manejo de resíduos sólidos tem se tornado cada vez mais complexas em todo o mundo ao longo da última década, em consideração ao impacto causado pela destinação inadequada dos resíduos, bem como devido ao grande volume gerado. Essas discussões dividem-se em torno de uma determinada classificação dos resíduos, entre Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) e Resíduos de Construção e Demolição (RCD), sendo que cada um possui uma definição direta em conformidade com a nomenclatura.

O panorama de resíduos sólidos no Brasil apont que no ano de 2022, cada brasileiro gerou cerca de 1,04kg de RSU por dia, levando ao total de 211 mil toneladas/dia em todo o território nacional e 77,1 milhões de toneladas de RSU no ano. A região sudeste do país apresenta a maior proporção, com uma geração anual de resíduos sólidos urbanos de 449kg por habitante no ano, o que equivale a cerca de 50% da geração nacional, enquanto a região Norte apresenta a menor taxa, com cerca de 15 mil toneladas diárias, equivalente a 7,3% dos RSU do país (ABREMA, 2023).

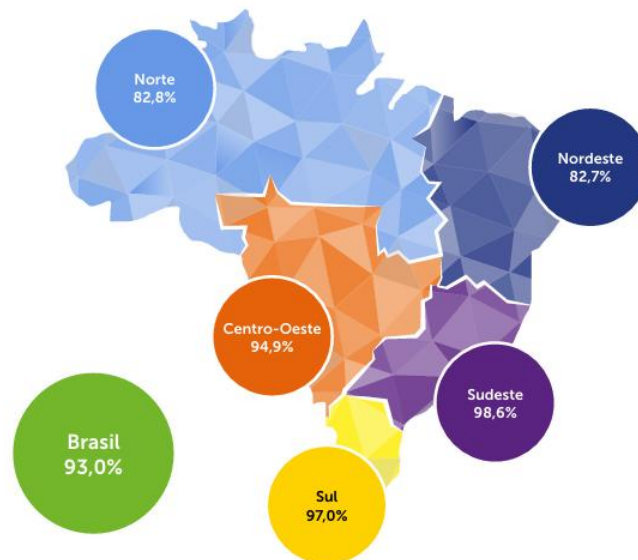
Em 2022, estima-se que 93% dos RSU no Brasil foram coletados (Figura 2), totalizando mais de 196 mil toneladas por dia. Apesar desse número expressivo, os 7% não coletados correspondem a mais de 5 milhões de toneladas com destinação inadequada, causando impactos negativos ao meio ambiente e à saúde pública. Além disso, 38,9% do total de resíduos coletados, equivalentes a 27.917.624 toneladas, também tiveram destinação final inadequada (ABREMA, 2023).

Figura 1 - Geração de Resíduos Sólidos Urbanos por região no Brasil em 2022.



Fonte: ABREMA (2023).

Figura 2 - Resíduos sólidos urbanos coletados por região no Brasil em 2022.



Fonte: ABREMA (2023).

No dia 2 de agosto de 2010, foi sancionada a Lei nº 12.305, que criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), marcando um importante avanço no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Essa legislação define critérios para a destinação adequada desses resíduos, além de atribuir responsabilidades pelo seu manejo. Contudo, apesar da existência da lei, a destinação final apropriada continua

sendo um grande desafio para as administrações municipais. A PNRS determina que os resíduos sólidos urbanos devem ser encaminhados para aterros sanitários caso não possam ser reaproveitados. No entanto, ainda é comum que sejam descartados em aterros controlados ou lixões a céu aberto (Neta, 2011).

De acordo com o artigo 3º, incisos VII e VIII, da Lei nº 12.305/2010, a destinação e a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos referem-se a:

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

VIII - disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (Brasil, 2010).

Conforme supracitado, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) estabelece que, após os tratamentos e destinações possíveis, os resíduos sólidos urbanos remanescentes, ou rejeitos, devem ser encaminhados para uma disposição final ambientalmente adequada. Ao definir essa diretriz, a legislação determina que os aterros sanitários são as instalações mais apropriadas para essa finalidade, pois são projetados com sistemas de impermeabilização do solo, coleta e aproveitamento ou queima de biogás, drenagem e tratamento de chorume, além de contar com monitoramento ambiental e geotécnico. Em contraste, locais como lixões, aterros controlados, valas e vazadouros não possuem essas proteções e são considerados inadequados para a disposição final de resíduos (ABREMA, 2023).

Segundo Fernandes (2019), a disposição dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, assim como os outros tipos de resíduos, ainda representa um grave e urgente problema. Assim, as mais conhecidas formas de disposição final aplicáveis aos resíduos sólidos urbanos são: lixão, aterro controlado, compostagem, reciclagem e aterro sanitário.

O lixão refere-se a um “apelido” para tratar de uma forma inadequada para a disposição dos resíduos, uma vez que estes são depositados a céu aberto, diretamente sobre o solo, sem nenhum cuidado ambiental, o que consequentemente causa problemas significativos à saúde pública, como poluição do solo e águas

subterrâneas, mau cheiro, proliferação de animais que podem causar doenças, entre outros (Machado, 2009).

O aterro controlado trata-se de uma espécie de lixão onde há uma cobertura dos resíduos, ou seja, eles não ficam a céu aberto. No entanto este não possui nenhuma cobertura e impermeabilização do solo, logo, contamina o mesmo e percola contaminando o lençol freático, além de não haver nenhum tratamento do chorume e dos gases provenientes da decomposição do resíduo (Fernandes, 2019).

A compostagem trata-se de uma maneira de destinação de resíduos orgânicos, e sua característica principal é a de fazer com que estes resíduos sejam transformados em compostos orgânicos (Fernandes, 2019).

Em consoante com a Lei nº 12.305/2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a reciclagem pode ser definida, em seu art. 3º, inciso XIV como:

Processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa (Brasil, 2010).

Embora haja lixões e aterros controlados, a destinação ideal para os resíduos sólidos trata-se do aterro sanitário. Onde este refere-se a um conjunto de técnicas para a disposição dos resíduos que reduzem de forma significativa os impactos socioambientais do tratamento destes, através de uma impermeabilização total do solo, impedindo que haja uma percolação do chorume pelo solo e consequentemente impede uma contaminação do lençol freático, bem como através de uma cobertura diária dos resíduos, assim como ocorre no aterro controlado. Além disso, esse chorume é coletado e tratado (Neta, 2011).

O aterro sanitário é a opção ambientalmente adequada, determinada pelas legislações pertinentes, uma vez que se trata da técnica que causa mínimos danos ao meio ambiente e saúde pública, através de uma compactação dos resíduos no solo, dispostos em camadas, coberturas com terra ou outro material inerte, e uma impermeabilização do solo (Fernandes, 2019).

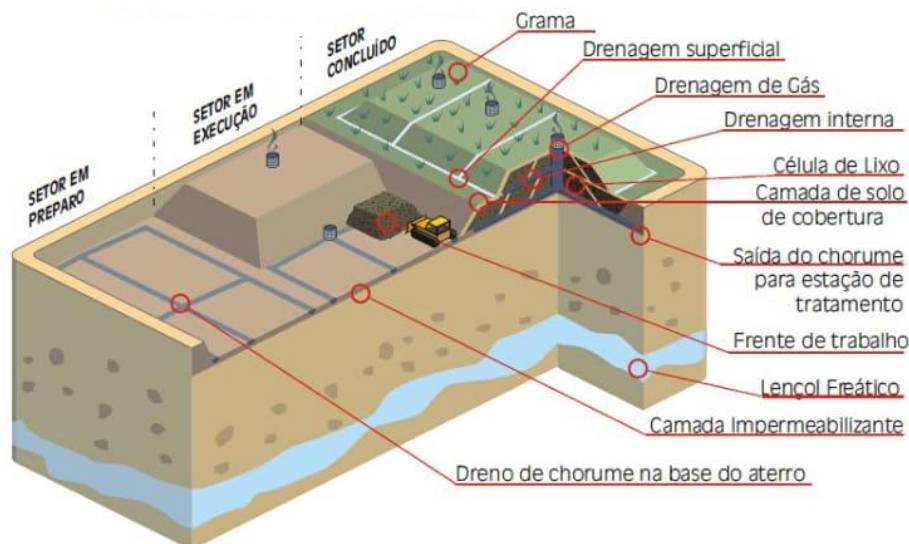
2.3 Aterros sanitários

Segundo a ABNT NBR 15849/2010, os aterros sanitários são definidos como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT NBR 15849, p. 2).

Além de impermeabilização, o aterro sanitário apresenta um sistema de drenagem, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Corte da seção transversal de um aterro sanitário.



Fonte: CONDER, 2010.

O aterro sanitário trata-se de um empreendimento, onde atendendo às normas técnicas vigentes que regulamentam o mesmo, ele visa a garantia de um direcionamento correto aos resíduos sólidos urbanos, diminuindo os impactos ambientais que estes resíduos poderiam causar se de repente fossem destinados em um local distinto (Silva, 2020).

O aterro sanitário ainda pode ser entendido como uma estratégia qualificada para um armazenamento e destinação final do lixo urbano, sem que cause uma agressão de grande relevância ao meio ambiente, se apresentando como uma maneira eficaz para o tratamento dos resíduos, e é uma alternativa de custo mais

baixo ao comparar com outros métodos existentes. Assim, apresenta a melhor relação custo x benefício no que tange ao descarte e tratamento dos resíduos, sendo capaz de acomodar os mais diversos tipos de resíduos urbanos, sendo uma forma de descarte segura e adequada (Silva, 2020).

Para Barros (2013), o aterro sanitário refere-se ao local adequado onde os resíduos sólidos urbanos são dispostos sobre o terreno preparado e recoberto com camadas de solo, de modo a isolar esses resíduos do meio ambiente. Por esse motivo, é produzido um gás e chorume, sendo este último captado por meio de tubulações e encaminhado para tratamento, já os gases gerados podem ser captados, queimados e utilizados como fonte de energia.

O aterro sanitário é uma forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos, onde os resíduos são confinados em camadas cobertas por terra, seguindo normas para proteger a saúde pública, garantir a segurança e minimizar os impactos ambientais. Antes de sua implantação, são realizados estudos geológicos e topográficos para selecionar áreas adequadas sem comprometer o meio ambiente (Figueiredo, 2007).

A impermeabilização do solo é feita com camadas de argila e geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), evitando a infiltração de chorume, que é coletado por tubulações e direcionado a tanques de tratamento. O lixo depositado é recoberto com solo local, formando câmaras onde ocorrem a produção de gás e o acúmulo de chorume. Para drenar a água da chuva, tubos ao redor do aterro desviam o excesso para lagos de armazenamento, possibilitando seu uso posterior (Barros, 2013).

Os gases gerados na decomposição podem ser queimados ou utilizados como fonte de energia. O local de instalação do aterro deve ter grandes dimensões e ser afastado de áreas urbanas devido a inconvenientes como odor e tráfego de caminhões (Figueiredo, 2007).

2.4 Matriz energética brasileira

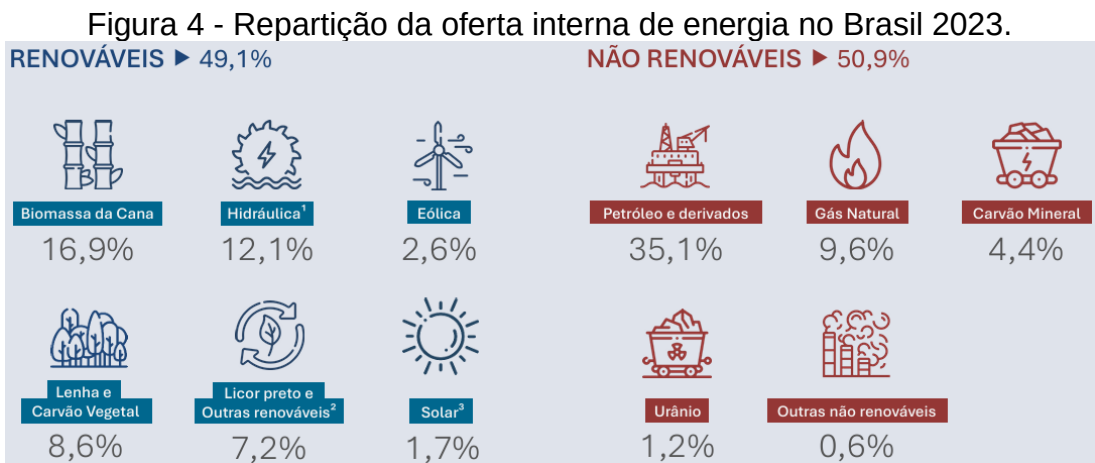
O conceito de energia está relacionado à capacidade de realizar trabalho ou promover movimento, sendo essencial para o progresso humano e tecnológico. A transformação de energia desempenha um papel crucial no desenvolvimento

socioeconômico, já que a sociedade depende cada vez mais dela para garantir sua subsistência (Calijuri; Cunha, 2013).

A energia é um recurso natural que pode ser explorado de forma industrial, mediante o uso de tecnologia e outros recursos associados. O conceito de energia renovável está relacionado à obtenção de energia a partir de fontes naturais inesgotáveis ou capazes de se regenerar naturalmente, como a solar e a eólica. O termo "renovável" remete à ideia de restaurar ou transformar algo que foi interrompido (Biasi *et al.*, 2018).

Segundo Jenne e Cattel (1983), a crise do petróleo nos anos 1970, que elevou os custos dos combustíveis fósseis, destacou a necessidade de desenvolver tecnologias voltadas para a otimização energética. Esse contexto incentivou a busca por fontes alternativas e pelo uso eficiente dos recursos disponíveis. Essas tecnologias continuam em evidência devido às crescentes preocupações com o aquecimento global e as mudanças climáticas, amplamente associadas ao consumo de combustíveis fósseis. A substituição e redução do uso desses combustíveis tornaram-se uma prioridade global, como demonstrado por acordos internacionais, como o Acordo de Paris (Verkuijl, 2018).

De acordo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2024) e Relatório Síntese 2024 de ano base 2023, a matriz energética brasileira se divide em energias renováveis (biomassa da cana; hidráulica; eólica; lenha e carvão vegetal; licor preto e outros renováveis como o biogás; solar) e energias não renováveis (petróleo e derivados; gás natural; carvão mineral; urânio; outras não renováveis), conforme demonstra a Figura 4.



Fonte: BEN, 2024.

A descarbonização da matriz energética é fundamental para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Ampliar a participação das energias renováveis, oferecendo-as a preços acessíveis, é uma tarefa essencial, mas desafiadora (Siqueira, 2018). De acordo com Coelho *et al.* (2018), a superação desses obstáculos depende em grande medida de políticas públicas e regulamentações que incentivem a inclusão de fontes de energia renovável nas matrizes energéticas dos países.

Em resposta à crescente demanda ambiental, a geração de energia a partir de fontes renováveis tem aumentado nos últimos anos, impulsionada pelas pesquisas em inovação tecnológica, como as fontes solar, eólica, biomassa de cana-de-açúcar e biogás, entre outras. A cogeração, que visa otimizar o aproveitamento dessas fontes e reduzir as perdas energéticas, é um exemplo desse avanço (Altoé *et al.*, 2017).

2.5 Biogás como fonte de energia

O biogás é um biocombustível com alto potencial de uso, podendo desempenhar um papel significativo no aumento da participação de energia renovável no setor de transportes. Ele possui ótimas características de combustão, sendo adequado tanto como combustível para veículos quanto para a geração de energia elétrica e calor (Jardim, 2013).

O biogás foi descoberto em 1661, mas o processo de decomposição anaeróbia foi desenvolvido no século XIX por Ulysse Gayon, que demonstrou seu potencial como fonte de energia. Louis Pasteur sugeriu seu uso para aquecimento e iluminação, uma ideia implementada pela primeira vez na Índia em 1857. A China e a Índia pioneiramente usaram biogás de resíduos orgânicos para gerar energia. Em 1776, Alessandro Volta identificou metano no biogás, e em 1895, a Inglaterra registrou o primeiro uso de biogás em uma estação de tratamento de efluentes. Nos anos 1950 e 1960, Índia e China desenvolveram biodigestores, e no Brasil, a tecnologia chegou nos anos 1970, impulsionada pela crise do petróleo, mas com resultados insatisfatórios. Apesar dos avanços, a substituição completa dos recursos fósseis por fontes renováveis ainda não foi alcançada (Bello; Coelho, 2022).

A história do biogás no Brasil começou na década de 1970, durante a crise do petróleo, com a construção de um biodigestor na Granja do Torto, em Brasília. Na década de 1980, o Programa de Mobilização Energética levou à instalação de cerca de 7 mil biodigestores, mas a falta de capacitação resultou em baixa eficiência. Nos

anos 2000, o mercado de créditos de carbono impulsionou um novo ciclo, com a instalação de cerca de 1.000 biodigestores entre 2005 e 2013, especialmente no agronegócio (Bello; Coelho, 2022).

O biogás é um gás incolor, com odor característico e propriedades tóxicas. Seu principal componente, o metano, é um gás incolor, inodoro e não tóxico em condições ambientes. Representado pela fórmula química CH_4 , o metano é um hidrocarboneto simples formado por um átomo de carbono ligado a quatro átomos de hidrogênio. Ele possui uma densidade relativa ao ar de 0,54, sendo aproximadamente metade mais leve. Sua solubilidade é extremamente baixa: a 20 °C e 0,1 kPa, 100 unidades de água conseguem dissolver apenas 3 volumes unitários de metano (Cenbio, 2006).

A partir de 2008, políticas como a Resolução nº 482/2012 e o programa RenovaBio (Lei nº 13.576/2017) incentivaram o uso de fontes renováveis e biocombustíveis (Brasil, 2017). Avanços incluíram a conversão de veículos para biometano e projetos como a Unidade de Demonstração de Biogás em Itaipu, que gerou biometano e biofertilizante. O Plano Decenal de Expansão de 2026 previu a produção de 10,7 milhões de m^3/dia de biogás até 2025, consolidando seu papel na matriz energética nacional (Bello; Coelho, 2022).

O metano é um composto orgânico simples, conhecido como um combustível gasoso de alta qualidade. Durante a combustão, produz uma chama azul e atinge uma temperatura máxima de cerca de 1400 °C. Seu valor calorífico, quando puro, é de 36,8 kJ/m^3 . Já o biogás apresenta um valor calorífico aproximado de 23,4 kJ/m^3 , o que corresponde a 0,55 kg de diesel ou 0,8 kg de carvão. Com base na eficiência térmica, a energia liberada por metro cúbico de biogás é equivalente ao calor gerado pela combustão de 3,03 kg de carvão (Costa, 2012).

O biogás pode ser produzido a partir de diferentes materiais orgânicos e em diversas condições de digestão anaeróbica, resultando em composições variadas que permitem sua classificação, por exemplo, como BA e BD. A qualidade do biogás gerado é influenciada por fatores como umidade, acidez, presença de substâncias não combustíveis, como o CO_2 , e de compostos corrosivos, como o H_2S , além do tamanho das partículas, tempo de disposição dos resíduos e a impermeabilidade ao ar (Feitosa *et al.*, 2010).

O biogás de aterro é produzido a partir de resíduos sólidos confinados e cobertos por uma camada de terra por um período específico. Esses resíduos, ao

serem depositados em aterros sanitários, passam por dois processos de decomposição. Inicialmente, ocorre a decomposição aeróbica, caracterizada pela redução do oxigênio presente no solo. Em seguida, inicia-se a fase anaeróbica, durante a qual micro-organismos transformam a matéria orgânica em biogás, conhecido como biogás de aterro (Montagna, 2013).

O processo de biodigestão anaeróbica envolve a ação de uma cultura mista de micro-organismos que metabolizam carboidratos, lipídios e proteínas para produzir metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e material celular. Quando realizado sob condições controladas, esse processo ocorre em biorreatores anaeróbicos, conhecidos como biodigestores, que podem ter diversas configurações, como lagoas anaeróbicas, reatores de contato anaeróbico e reatores anaeróbicos de membrana. O biogás gerado por digestão anaeróbica em aterros sanitários e biodigestores é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), mas também pode conter em menor quantidade outros componentes, como hidrogênio (H_2), amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S), oxigênio (O_2), monóxido de carbono (CO), nitrogênio (N) e água (H_2O). A composição do biogás pode ser influenciada pelo tipo de substrato, tecnologia de fermentação e método de coleta. O potencial energético do biogás depende da quantidade de CH_4 presente, o que define seu poder calorífico (Montagna, 2013).

De acordo com Sun (2015), a composição do biogás é diferente para o de aterro e o de biodigestor, sendo apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades e composição do biogás.

Parâmetros	Unidades	Biogás de Aterro	Biogás de Biodigestor
CH_4	% mol	35 – 60	60 – 70
Hidrocarbonetos pesados	% mol	0	0
H_2	% mol	0 – 3	0
CO_2	% mol	15 – 40	30 – 40
H_2O	% mol	1 – 5	1 – 5
N_2	% mol	15	0,2
O_2	% mol	1	0
H_2S	PPM	0 – 100	0 – 1000
NH_3	PPM	5	0 - 100

Fonte: Adaptado de Sun, 2015.

O biogás, sob condições normais de produção, contém menos de 0,1% de monóxido de carbono. No entanto, a presença de impurezas pode aumentar esse percentual, tornando-o tóxico e até letal. Sua baixa densidade faz com que ocupe um volume considerável, o que dificulta seu armazenamento, transporte e uso. Sendo uma mistura gasosa, o biogás possui várias impurezas, com ênfase para compostos de enxofre e amoníaco (Santos; Lima, 2016).

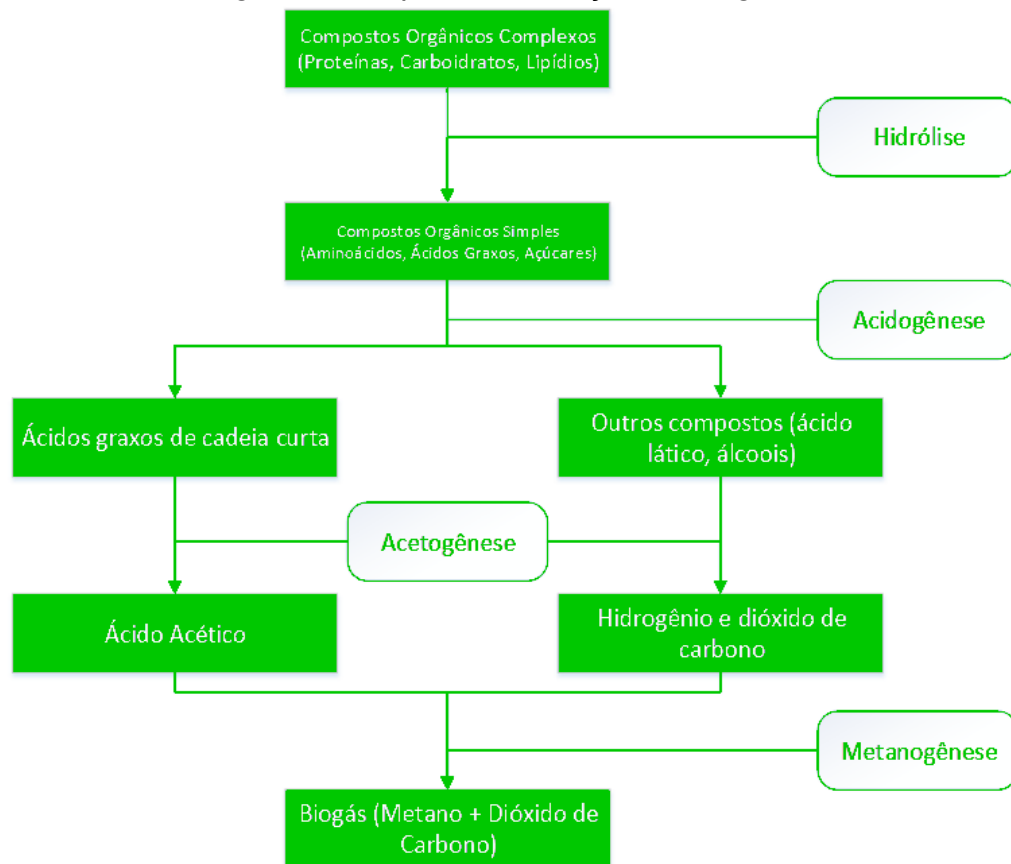
O uso de biodigestores pode aumentar ainda mais a produção de biogás. A decomposição microbiológica da matéria orgânica, essencial para a geração de biogás, é um processo longo e sequencial, envolvendo microrganismos aeróbicos e anaeróbicos. Nos aterros sanitários, a decomposição começa com a fase aeróbica, onde o oxigênio presente nos resíduos é consumido por microrganismos, gerando dióxido de carbono, água e outros subprodutos. Após o esgotamento do oxigênio, inicia-se a fase anaeróbica, que é a mais duradoura e produtiva em metano. Esse processo é dividido em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, que dependem de diversos fatores (Maia, 2016).

2.5.1 Formação do Biogás

O termo "biogás" refere-se a um processo biológico, onde a decomposição da matéria orgânica em ambiente anaeróbico gera uma mistura gasosa conhecida como biogás. Esse processo ocorre naturalmente em locais como pântanos, fundos de lagos e no rúmen de animais, onde há alta concentração de matéria orgânica e bactérias anaeróbicas. A formação do biogás passa por várias etapas que precisam estar alinhadas para garantir a eficiência do processo (Maia, 2016).

Em consoante a Maia (2016), a produção de biogás envolve quatro etapas principais que ocorrem simultaneamente, conforme a Figura 5: na hidrólise, bactérias hidrolíticas decompõem matéria orgânica complexa em substâncias simples; na acidogênese, microrganismos fermentativos transformam esses compostos em ácidos graxos, hidrogênio e dióxido de carbono; na acetogênese, bactérias convertem os produtos anteriores em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono; e, na metanogênese, arqueas transformam esses compostos em metano. Cada etapa exige condições específicas de pH e temperatura, que devem ser ajustadas para otimizar a eficiência do processo.

Figura 5 - Etapas da formação do biogás.



Fonte: Adaptado de Maia, 2016.

O biogás é produzido pela decomposição de matéria orgânica, sendo viável a partir de diversos tipos de resíduos, como lixo doméstico, resíduos agrícolas e pecuários, e lodo de esgoto. Normalmente, sua composição é de cerca de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de outros gases, como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfúrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. Esses percentuais podem variar conforme o tipo de resíduo, o tratamento realizado e a eficiência do processo, podendo alcançar até 80% de metano. Em aterros sanitários, a geração de biogás pode atingir aproximadamente 400 m³ por tonelada de resíduo (Alves, 2000).

2.6 Aproveitamento energético do biogás

No Brasil, devido à predominância da energia hídrica na matriz elétrica, não houve grandes incentivos para a geração de energia elétrica por outras fontes. O setor privado também demonstrou pouco interesse em investir em fontes alternativas devido a fatores como o alto custo do capital nacional, a limitada capacidade de desenvolver

projetos com financiamento externo, a escassez de fontes de pesquisa tecnológica e as barreiras regulatórias, uma vez que fontes renováveis, como o biogás, geralmente envolvem diversas esferas da administração pública (Paes, 2013).

O biogás surge como uma alternativa viável, devido à sua capacidade de ser armazenado e gerado de forma contínua, ao contrário das fontes solar e eólica, que são intermitentes. Além disso, o aumento nos preços dos combustíveis e a busca por fontes de energia limpa impulsionam o desenvolvimento de novas soluções. A conversão do biogás em eletricidade não apenas aproveita resíduos, especialmente os sólidos, mas também reduz as emissões de metano, proporcionando benefícios ambientais e econômicos à sociedade (Maia, 2016).

A geração de energia a partir de biogás em aterros sanitários costuma ser rentável, e essa lucratividade é ampliada quando o biogás é utilizado em cogeração com motores de Ciclo Otto, permitindo a recuperação do calor de exaustão do motor, aproveitando as perdas térmicas (Caresana *et al.*, 2011).

O poder calorífico do biogás está diretamente associado à concentração de metano (CH_4) presente na mistura gasosa. O biogás originado em aterros sanitários é composto principalmente por metano e dióxido de carbono, com proporções aproximadas de 55% e 40%, respectivamente. Devido ao alto teor de metano, esse gás apresenta um significativo potencial energético, alcançando um poder calorífico de cerca de 22 MJ/m³ (Santos; Barros; Lúcio, 2015).

O aproveitamento do biogás para geração de energia em aterros sanitários é amplamente utilizado em diversos países. Nos Estados Unidos e na Europa, por exemplo, a capacidade instalada para geração de energia com biogás é estimada em aproximadamente 1.200 MW e 500 MW, respectivamente (Costa; Barros; Falcão, 2014).

A energia elétrica gerada a partir do biogás pode ser utilizada pelo próprio aterro sanitário ou, caso haja excedente, ser comercializada, gerando receita adicional para o empreendimento (Garcilasso, 2010).

Devido ao baixo consumo de energia nos aterros, o excedente pode ser vendido. Em contraste, para estações de tratamento de esgoto, a geração de eletricidade atende apenas a cerca de 20% da demanda, devido ao alto consumo energético necessário para a digestão anaeróbia dos efluentes (Coelho, 2006).

Em 2009, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL regulamentou a geração e comercialização de energia elétrica a partir do biogás com a Resolução

Normativa nº 390/2009, permitindo que distribuidoras de energia elétrica realizem chamadas públicas para adquirir eletricidade de fontes alternativas. Seguindo as normas da ANEEL, os produtores podem enviar a eletricidade gerada para a rede de distribuição, além de consumi-la (Siqueira, 2018).

Do ponto de vista econômico, a escolha por investimentos em aproveitamento energético está diretamente vinculada à rentabilidade da alternativa selecionada. No que se refere à comercialização, as possibilidades de monetização incluem a venda para o mercado elétrico, de acordo com as normas estabelecidas pela ANEEL, ou a utilização do biometano, substituindo o gás natural em mercados como o de gás canalizado, além dos setores residencial, industrial e veicular (EPE, 2018).

A Política Nacional de Biocombustíveis (Renovabio), instituída pela Lei nº 13.576 de 26 de dezembro de 2017 e regulamentada pelo Decreto Federal nº 9.308 de 15 de março de 2018, tem como objetivo definir estratégias para ampliar a produção de biocombustíveis. Entre os resultados esperados dessas iniciativas está a descarbonização da matriz energética brasileira, em consonância com os compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris (Coelho *et al.*, 2018).

Desde o lançamento da Renovabio em 2017, o setor de biocombustíveis tem demonstrado grande potencial de crescimento. No âmbito do saneamento, estima-se que seja possível produzir 7 milhões de m³ diários de biocombustível. No total, o potencial de biogás no Brasil equivale a 44% da demanda nacional de diesel. Segundo a EPE, o biogás deverá alcançar, em termos energéticos, uma participação equivalente à da energia fotovoltaica, com projeções de produção de 32 milhões de m³ diários de biometano até 2030 (Siqueira, 2018).

O biometano é obtido pela purificação do biogás, com a remoção de contaminantes como umidade, CO₂, H₂S e siloxanos. Com propriedades semelhantes às do gás natural, apresenta maior poder calorífico e densidade energética, facilitando seu transporte e armazenamento. A desumidificação e a retirada de H₂S, etapas conhecidas como "*cleaning*", são essenciais para proteger instalações e assegurar a eficiência do processo. Além disso, para que o biometano atenda aos padrões de qualidade exigidos como gás natural renovável (GNR), é necessário eliminar o CO₂ por meio do "*upgrading*" (Coelho *et al.*, 2018).

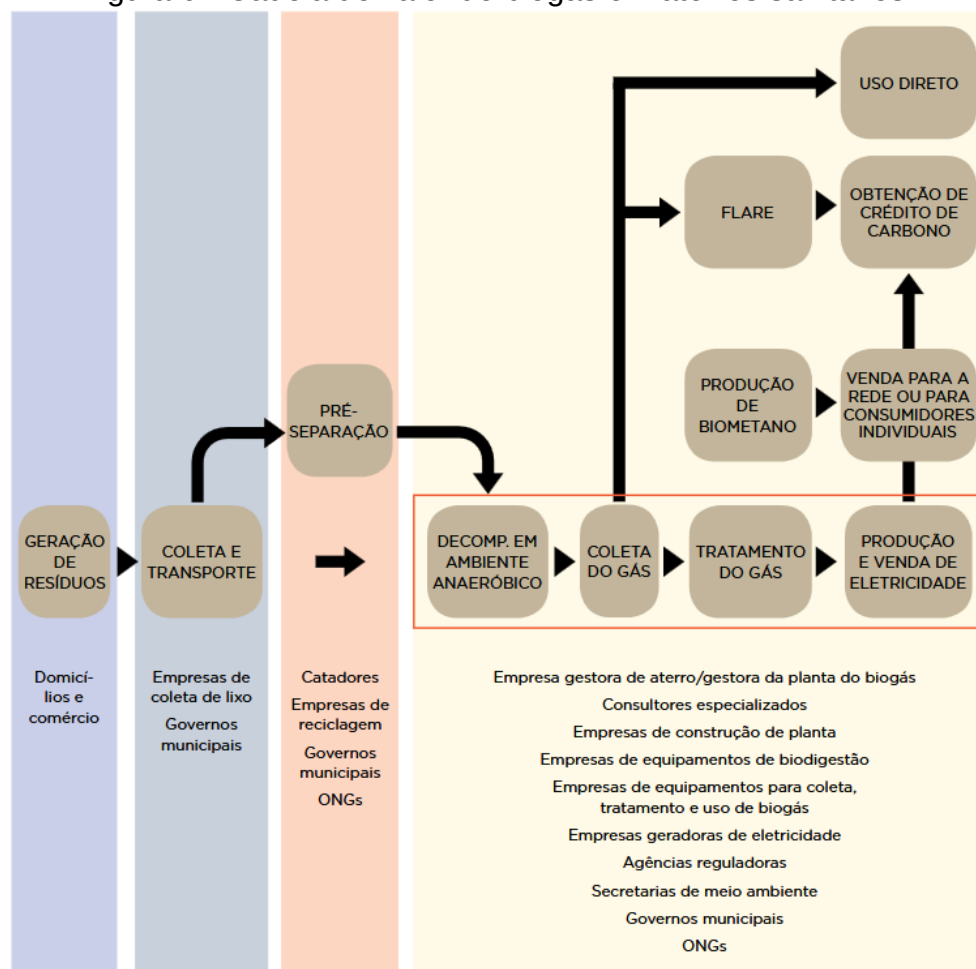
Os siloxanos, compostos originados de produtos cosméticos e de higiene, estão presentes no biogás de aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes. Durante a combustão, eles se transformam em óxidos de silício,

substâncias abrasivas que danificam equipamentos como motores e turbinas, tornando sua remoção indispensável. A Resolução nº 685/2017 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil - ANP estabelece que o biometano deve conter no máximo 0,3 mgSi/m³ de siloxanos para garantir sua qualidade e viabilidade como combustível em redes de distribuição, transporte ou aplicação veicular (Coelho *et al.*, 2018).

A geração de biogás geralmente se inicia logo após a disposição dos resíduos sólidos, com registros de produção de metano já nos primeiros três meses. Esse processo pode perdurar por 20, 30 anos ou até mais, mesmo após o encerramento das atividades do aterro (Brasil, 2012).

O aproveitamento do biogás de RSU envolve uma cadeia de valor complexa, conforme apresentado na Figura 6, com a participação de diversos agentes.

Figura 6 - Cadeia de valor do biogás em aterros sanitários.



Foco de análise da indústria de biogás de aterros sanitários

Fonte: Carvalho *et al.*, 2019.

A cadeia inicia-se na geração de resíduos por domicílios e comércios, com coleta e transporte realizados por empresas de limpeza pública e governos municipais. A pré-separação, quando ocorre, é feita por catadores, empresas de reciclagem, organizações da sociedade civil e poder público. Nas etapas posteriores, incluem-se empresas gestoras de aterros, empresas de biodigestão, fornecedores de equipamentos, consultores especializados, empresas de geração de energia, agências reguladoras e entidades ambientais nacionais e internacionais. O biogás é gerado exclusivamente em ambientes anaeróbicos, como aterros sanitários ou biodigestores (Carvalho *et al.*, 2019).

Uma vez coletado, o biogás pode ser aproveitado de diferentes formas: queimado para conversão do metano em CO_2 , o que pode gerar créditos de carbono em países em desenvolvimento; usado diretamente em processos industriais como a produção de asfalto ou cimento, substituindo combustíveis tradicionais; melhorado para biometano, similar ao gás natural, permitindo seu uso em redes de distribuição, processos industriais ou como combustível veicular; e, finalmente, na produção de energia elétrica, que pode ser consumida localmente ou injetada na rede de distribuição (Carvalho *et al.*, 2019).

Os métodos biológicos para a produção de combustíveis a partir de resíduos sólidos baseiam-se na ação de bactérias anaeróbicas, que transformam a matéria orgânica em produtos combustíveis, como metano e hidrogênio, por meio do seu metabolismo (Lima, 1995).

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, reduz a eficiência da combustão, pois essas impurezas absorvem parte da energia gerada durante o processo. Assim, o poder calorífico do biogás diminui à medida que aumenta a concentração de contaminantes (Alves, 2000).

Com base na proporção de metano presente, o poder calorífico do biogás varia entre 5.000 e 7.000 kcal/m³, podendo alcançar até 12.000 kcal/m³ caso todo o dióxido de carbono seja removido da mistura (Deganutti; Palhaci; Rossi, 2002).

2.7 Captação de biogás de aterro sanitário

O biogás possui diversas aplicações, como combustível para motores, aquecimento e geração de energia elétrica, sendo uma alternativa aos gases minerais, como GLP, GNV e GN. Além disso, pode ser utilizado para abastecer comunidades

isoladas e oferecer uma destinação sustentável a resíduos de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto. Nos aterros, os resíduos são armazenados de forma a evitar contaminação, e as emissões de gases são monitoradas. O biogás gerado pela fermentação dos resíduos é captado, purificado e queimado em *flares*, convertendo metano em dióxido de carbono, que possui menor impacto ambiental (Bello; Coelho, 2022).

Segundo Cunha (2002), a coleta de biogás gerado pela degradação de resíduos orgânicos compactados em aterros é viável tanto do ponto de vista econômico quanto energético e ambiental, contribuindo para a redução de custos das administrações municipais e dando um destino sustentável ao lixo.

Um sistema de coleta de biogás em aterros sanitários utiliza poços, tubos condutores, sistemas de compressão e purificação de gás. Tubos verticais perfurados e canais conduzem o biogás, podendo haver membranas protetoras. Em aterros com recuperação energética, o gás excedente é queimado em *flares* durante manutenções. A coleta do gás começa após o fechamento de uma porção do aterro, onde tubos laterais conectam-se ao coletor principal. O sistema permite monitorar e ajustar o fluxo de gás, que é extraído por pressão nos tubos de transmissão (Barros, 2013).

A coleta de biogás em aterros sanitários pode ser realizada por meio de poços verticais ou drenos horizontais. Após a coleta, o biogás passa por um tratamento básico que inclui remoção de água líquida, conversão do gás e conversão em energia elétrica. Dependendo das condições do aterro e das previsões econômicas do projeto, etapas adicionais podem ser inovadoras, como remoção de espuma, redução de vapores, eliminação de ácido sulfídrico (H_2S), controle de siloxanos e remoção de CO_2 , com o objetivo de aumentar o poder calorífico do gás e proteger os equipamentos contra desgaste excessivo (Carvalho *et al.*, 2019).

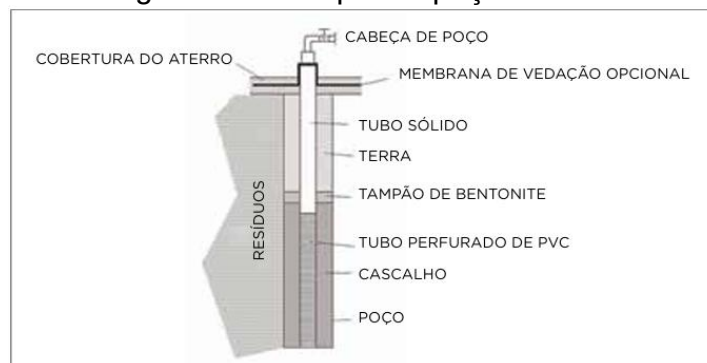
A coleta de biogás em aterros sanitários pode ser realizada por meio de poços verticais ou drenos horizontais (EPA, 2010). Os poços verticais são instalados antes do início do depósito de resíduos, sendo posicionados sobre as membranas inferiores do aterro. Durante a operação, o lixo é disposto ao redor desses poços, que podem ser estendidos caso seja necessário aumentar o nível de resíduos no aterro (Dudek *et al.*, 2010).

Essa técnica apresenta a vantagem de minimizar danos às membranas inferiores, diferentemente da perfuração e instalação de novos poços em massas de resíduos já consolidadas. Quando a instalação prevista não é possível ou o aterro é

subdimensionado, os poços são escavados com diâmetro de 400-460 mm até alcançar a base do aterro, sempre que viável (Carvalho *et al.*, 2019).

Os poços de coleta de biogás, independentemente da técnica de construção, possuem estrutura semelhante, conforme ilustrado na Figura 7. São compostos por uma atração para o transporte do gás, com o espaço ao redor preenchido por cascata. A abertura superior é parcialmente coberta por argila e geomembrana, garantindo o isolamento necessário para evitar a entrada de ar ou a fuga de biogás, que comprometeriam o ambiente anaeróbico do aterro (Dudek *et al.*, 2010). Cada poço vertical possui um raio de influência de 30 a 40 metros, exigindo, em média, 10 unidades por hectare (ICLEI-Brasil, 2009).

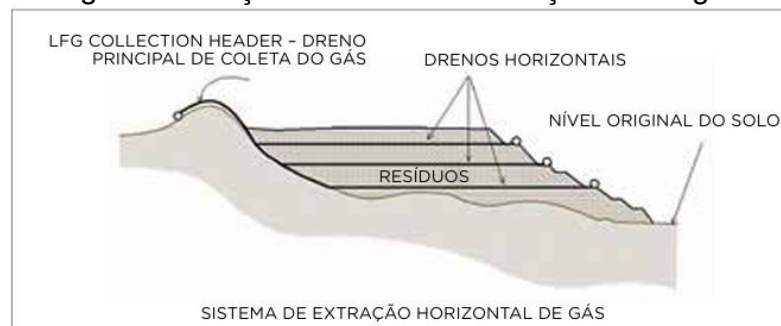
Figura 7 - Exemplo de poço vertical.



Fonte: EPA, 2010.

O sistema de drenos horizontais, por sua vez, utiliza camadas permeáveis de material inerte, como mostrado na Figura 8. A principal vantagem dessa técnica é a possibilidade de coleta de biogás antes do fechamento da célula. Contudo, a maior pressão sobre os tubos representa um desafio adicional no gerenciamento do projeto, em comparação com os drenos verticais (Carvalho *et al.*, 2019).

Figura 8 - Poço horizontal de extração de biogás.



Fonte: EPA, 2010.

Em ambos os sistemas, os poços ou drenos são conectados a pontos intermediários que direcionam o gás para uma linha principal, transportando-o às etapas de tratamento e utilização, sendo impulsionados pela pressão negativa gerada pelo compressor (ICLEI-Brasil, 2009). A escolha entre os sistemas depende das condições específicas do aterro, já que ambos, quando bem projetados e implementados, apresentam eficiência semelhante à coleta de biogás (EPA, 2010).

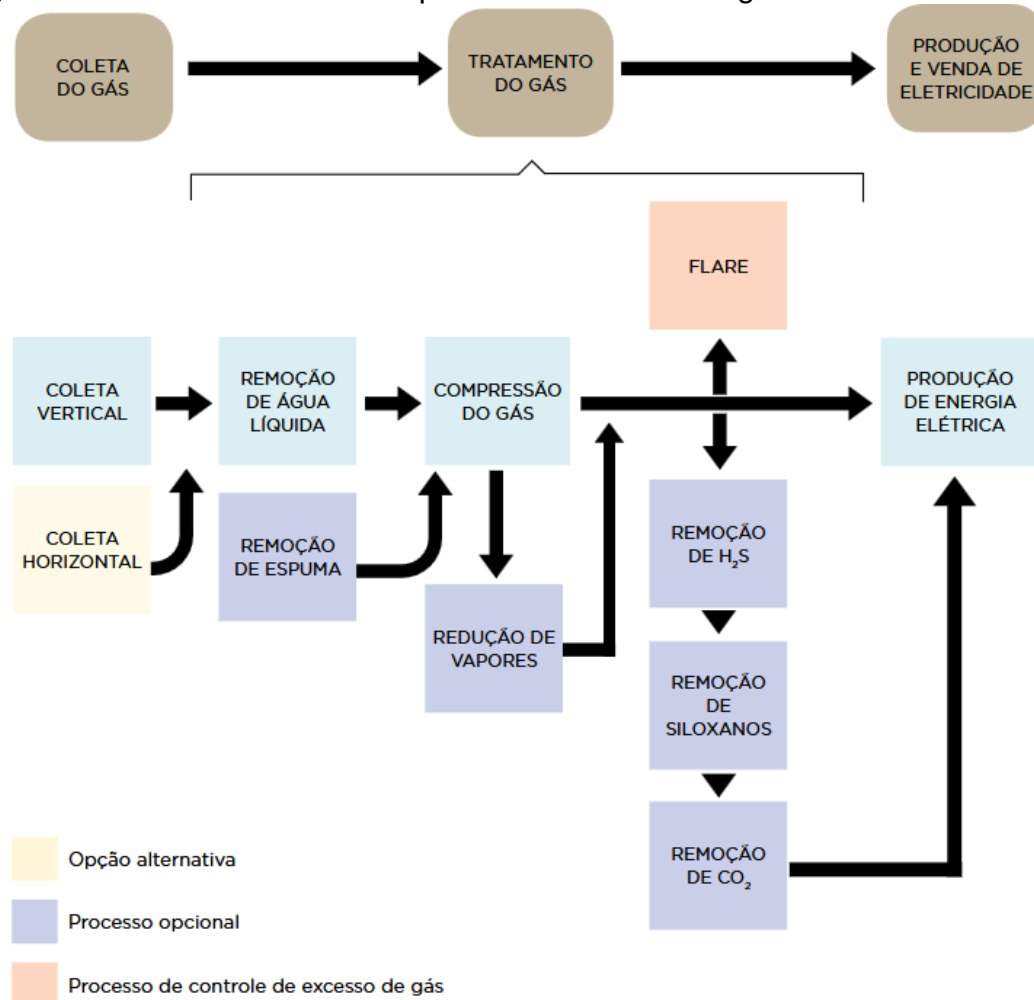
De acordo com Maia (2016), o mecanismo mais simples para a coleta de biogás em aterros sanitários, utilizado como base para a preparação do fluxo de caixa, consiste em uma rede de tubos verticais. O processo inicia-se após o fechamento de uma seção do aterro com terra ou resíduos, conectando cada extremidade dos tubos a uma artéria lateral, que transporta o biogás para um coletor principal. Esse sistema exige planejamento adequado para permitir o monitoramento e o ajuste do fluxo de gás por um operador, caso necessário. O biogás é extraído do aterro por meio de pressão negativa nos tubos de transmissão, sendo os principais desafios desse sistema a regulação da qualidade e da quantidade do gás, além da gestão de possíveis vazamentos.

A conexão entre os poços de coleta e o sistema de aproveitamento de biogás é feita por tubos ligados a um sistema principal. Para maior eficiência, utiliza-se uma bomba e uma casa de regulação por poço. A sucção do gás é feita por compressores, que podem comprimir o biogás antes de sua utilização energética. O número e a capacidade dos compressores dependem do fluxo e da pressão desejados. O biogás resfriado nas tubulações forma um condensado que precisa ser removido para evitar bloqueios no sistema. O condensado é drenado para tanques e pode ser descartado, tratado ou recirculado, conforme regulamentações locais (Barros, 2013).

O tratamento do biogás inicia-se com sua proteção por meio de um filtro, que remove partículas sólidas arrastadas pelo gás. Em seguida, ocorre o processo de desumidificação, responsável pela separação de gotículas de líquido presentes no biogás. A fase líquida coletada é direcionada, por gravidade, a um tanque de condensados e, posteriormente, bombeada para o sistema de coleta de chorume para tratamento. Após a remoção de partículas sólidas e líquidas, o biogás é direcionado ao soprador, que é direcionado para queima controlada no flare ou para sistemas de aproveitamento energético. A vazão de biogás é controlada por uma válvula e um inversor de frequência, que suga o gás do interior do aterro (Almeida, 2016).

O sistema também utiliza o flare como medida de segurança para controlar o excesso de gás e garantir o funcionamento durante a manutenção da planta. Esse dispositivo transforma o metano em dióxido de carbono, reduzindo riscos ambientais e operacionais. O processo completo de coleta e tratamento do biogás garante maior eficiência no aproveitamento energético e estabilidade nas operações (Carvalho *et al.*, 2019). Essas etapas são visualizadas na Figura 9.

Figura 9 - Detalhamento das etapas das coletas do biogás em aterro sanitário.



Fonte: Carvalho *et al.*, 2019.

O flare é utilizado para queimar o biogás, sendo essencial nos processos de recuperação de energia e durante manutenções. Pode ser aberto ou enclausurado, com este último oferecendo maior eficiência e redução de ruídos e iluminação (Barros, 2013).

Após a coleta, o biogás passa por tratamento para remoção de condensados, partículas e impurezas. Para uso em caldeiras, é necessário tratamento rigoroso para

minimizar poluentes, como CO. Na geração de energia, filtros eliminam partículas antes do gás ser enviado ao motor ou turbina, garantindo maior eficiência (Barros, 2013).

Após o tratamento, o biogás pode ser utilizado em diversas aplicações, como em caldeiras, veículos e motogeradores instalados em aterros sanitários para a geração de energia elétrica. O calor rejeitado pelos motores também pode ser aproveitado para evaporar o chorume no próprio aterro. Tecnologias mais recentes permitem seu uso para iluminar e aquecer áreas urbanas e rurais, combinando o biogás como matéria-prima principal com sistemas automatizados para controle da iluminação pública (Silva, 2021). Além disso, os resíduos da queima do biogás, compostos por uma substância lodosa contendo água, sais minerais e microrganismos, podem ser reaproveitados como fertilizantes (Almeida, 2016; Silva, 2021).

Antes de ser utilizado no processo de conversão de energia, o biogás passa por tratamento para a remoção de condensados remanescentes, partículas sólidas e impurezas. O objetivo do tratamento é aumentar a potência calorífica do gás e eliminar o gás sulfídrico, que, no caso presente, pode oxidar componentes como o motor e o gerador, reduzindo a eficiência do sistema (Maia, 2016).

A conversão do biogás em energia pode ser realizada por meio de diferentes tecnologias. Esse processo consiste em transformar a energia química contida nas moléculas do gás em energia mecânica por meio de uma combustão controlada. Entre as tecnologias mais empregadas para geração de energia elétrica a partir do biogás destacam-se os motores de combustão interna de ciclo Otto e as microturbinas a gás (Santos; Lima, 2016).

O motor de combustão interna opera em quatro etapas principais: aspiração da mistura de ar e combustível, compressão no interior dos cilindros, combustão gerada por uma centelha e a liberação dos gases. Essa tecnologia é amplamente utilizada devido ao seu maior rendimento elétrico, baixo custo inicial e simplicidade operacional. Contudo, sua principal desvantagem está nas altas emissões de NOx e CO. Além disso, os motores precisam ser adaptados para funcionar com biogás (Melo; Grassi, 2014).

Por outro lado, nas microturbinas a gás, o ar é aspirado e comprimido a altas velocidades e pressões, sendo então misturado ao biogás e queimado na câmara de combustão. A combustão gera gases quentes, cujo calor pode ser aproveitado para

aquecer o ar de combustão. Apesar de apresentarem vantagens, como a possibilidade de aproveitamento energético, essas turbinas possuem custos iniciais e operacionais elevados, além de demandarem um sistema rigoroso de limpeza do biogás para funcionamento adequado, o que as torna menos competitivas em comparação aos motores de combustão interna (Melo; Grassi, 2014).

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

Trata-se de uma pesquisa caracterizada como descritiva, exploratória, quantitativa, bem como um estudo de caso a ser realizado no aterro sanitário de Porto Nacional – TO.

A pesquisa descritiva, conforme Prodanov e Freitas (2013), busca descrever, analisar e compreender as relações entre fatos e fenômenos, investigando suas causas e consequências em detalhes. Já a pesquisa exploratória, segundo Praça (2015), amplia o conhecimento sobre o tema, familiarizando-se com os fenômenos observados e utilizando pesquisa bibliográfica como base. Assim, esta pesquisa combina essas características ao descrever e aprofundar o conhecimento sobre o funcionamento do aterro sanitário de Porto Nacional.

Quanto à abordagem quantitativa, conforme Gerhardt e Silveira (2009), utiliza técnica estatísticas e numéricas para apresentar e interpretar os dados da pesquisa, de modo a facilitar o entendimento por meio destes. Nesse contexto, o foco está na demonstração através de cálculos referente à geração de biogás do aterro sanitário de Porto Nacional e seu potencial para energia elétrica.

Por fim, trata-se de um estudo de caso, que, segundo Prodanov e Freitas (2013), é caracterizado pelo aprofundamento direto e específico do objeto de estudo por meio da coleta e análise de dados. Dessa forma, a pesquisa aprofunda-se na viabilidade da geração de energia elétrica, a partir do biogás gerado no aterro sanitário de Porto Nacional.

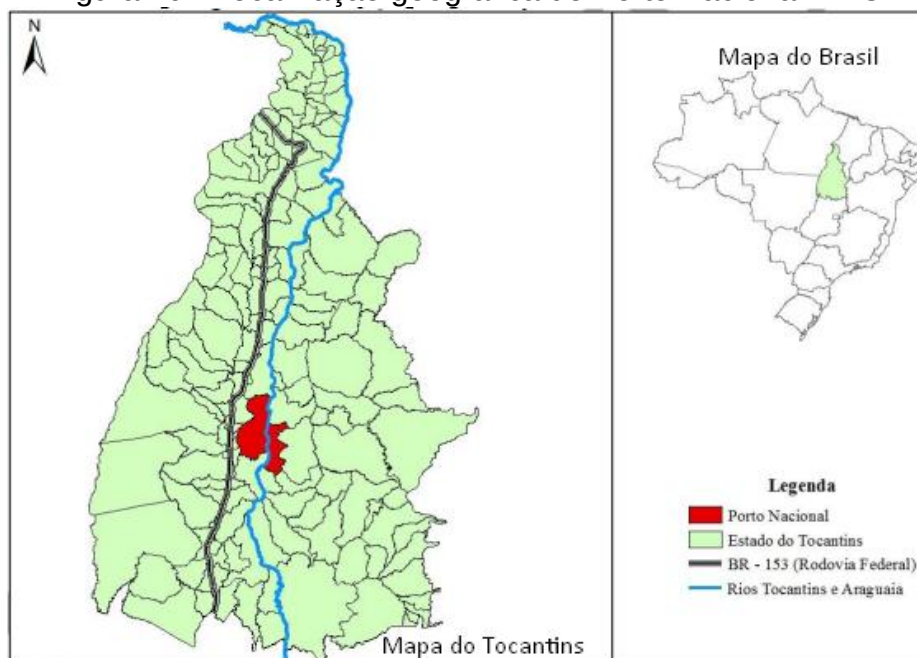
3.2 Objeto de estudo

A pesquisa foi realizada em Porto Nacional – TO, junto ao aterro sanitário do município, de modo a identificar a viabilidade da geração de energia elétrica através do biogás gerado pelo aterro do município.

A cidade de Porto Nacional localiza-se no centro do estado do Tocantins, conforme verificado na Figura 10, a cerca de 64km da capital do estado, Palmas. O município possui uma área extensa de 4.449,917 km². Além da sede municipal, Porto

Nacional também é composta por alguns distritos e conjuntos populacionais, entre eles: Luzimangues e Escola Brasil (Prefeitura de Porto Nacional – TO, 2018).

Figura 10 - Localização geográfica de Porto Nacional – TO.



Fonte: Prefeitura de Porto Nacional – TO (2018).

Conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2024), a população no último censo, realizado em 2022 é de 64.418 pessoas, com uma densidade demográfica de 14,53 hab/km², e para 2024 a população é estimada em 68.555 pessoas.

Dados do Censo 2022 apontam que em Porto Nacional cerca de 91,48% dos resíduos sólidos urbanos são coletados, havendo outras formas de destino, como queima ou enterrado na propriedade (Municípios e Saneamento, 2024).

Além disso, dados do SNIS apontam que 95,3% da população municipal é atendida por meio da coleta de resíduos domiciliares, ficando acima do percentual do estado com 85,79% e acima da média do país, com 90,4%. E ao total, a média dos resíduos coletados no município é de 0,89kg/hab/dia, ficando abaixo da média estadual com 1,1 kg/hab/dia e abaixo da média nacional com 1 kg.hab/dia (Municípios e Saneamento, 2024).

No ano de 2018, a Prefeitura de Porto Nacional contratou uma empresa para implantar e gerir um aterro sanitário no município, iniciando as atividades no ano de 2019. O aterro foi construído em uma área plana utilizando o método de trincheiras,

com valas específicas para resíduos domiciliares, comerciais, inertes e resíduos de unidades de saúde. A drenagem do chorume é feita por canaletas horizontais escavadas no solo, no formato "espinha de peixe", conduzindo o líquido por gravidade até um poço de captação, de onde é enviado para tratamento (Marinho; Quixabeira, 2023).

Dados do site da própria empresa responsável pelo aterro sanitário de Porto Nacional – TO, a Base Fortins (2019), demonstram que o aterro possui uma capacidade total de projeto de 30 anos de 1.709.610 toneladas, capacidade de pirâmide invertida de 3.014.550 toneladas, capacidade total expandida de 4.724.160 toneladas, e 500.000 toneladas para lixo hospitalar.

Esse aterro localiza-se na Rodovia TO-050, sentido Porto Nacional a Palmas, no km 45, lado direito, conforme dados da Base Fortins (2019) e visualizado nas Figura 11 e 12:

Figura 11 - Localização do aterro sanitário de Porto Nacional - TO.



Fonte: Base Fortins (2019).

Figura 12 - Aterro sanitário de Porto Nacional - TO.



Fonte: Base Fortins (2019).

3.3 Quantificação e qualificação do biogás do aterro sanitário de Porto Nacional - TO

Há diversos métodos para estimar a geração de biogás em aterros sanitários e a energia obtida pela combustão do metano. Esses métodos geralmente envolvem o uso de equações matemáticas, sendo essencial considerar critérios específicos ao aplicar os programas para garantir resultados confiáveis. Esses dados são fundamentais para analisar tanto o potencial de emissões de gases de efeito estufa quanto a viabilidade de iniciativas voltadas ao aproveitamento do biogás (Piñas *et al.*, 2016).

Para avaliar a possibilidade e a eficácia de utilizar o biogás gerado a partir dos resíduos orgânicos depositados no aterro sanitário de Porto Nacional – TO, como uma fonte viável para a produção de energia elétrica, o presente estudo se baseia na metodologia adotada por Andrade (2022), em seu artigo intitulado “Análise da viabilidade econômica para geração de energia elétrica através do uso do biogás gerado em aterro sanitário no estado da Paraíba”, utilizando o Software Biogás da Cetesb para quantificar a geração de biogás.

A metodologia deste estudo está estruturada em três etapas principais: coleta dos dados (obtenção das variáveis), tratamento dos dados e avaliação das variáveis, conforme detalhado a seguir.

3.3.1 Coleta dos dados (obtenção das variáveis)

Os dados utilizados para a estimativa da geração de biogás no aterro sanitário foram obtidos a partir de fontes secundárias oficiais, incluindo:

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – para informações sobre a população atual e taxa de crescimento populacional.
- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) – para dados sobre a taxa de coleta de resíduos sólidos domiciliares.
- Relatórios e registros do município e do aterro sanitário de Porto Nacional – TO – para informações sobre o fluxo de resíduos sólidos, ano de início das operações e previsão de encerramento do aterro.

Nenhuma análise laboratorial direta do biogás foi realizada. Os dados referentes à geração de metano (L_0), constante de decaimento (k) e eficiência de coleta de gases foram adotados a partir de valores médios presentes na literatura científica e na metodologia proposta por Andrade (2022).

3.3.2 Tratamento dos dados

Para estimar a geração de biogás no aterro sanitário, é necessário estabelecer os dados referentes à constante de decaimento (k), o fluxo de resíduos (R_x), e o potencial de geração de biogás (L_0), para estimar a vazão de metano (Q_x) (Andrade, 2022).

3.3.2.1 Constante de decaimento (k)

Conforme Santos, Romanel e Elk (2016), o parâmetro k indica o intervalo de tempo necessário para a geração de metano a partir da decomposição dos resíduos depositados. Esse processo pode ser influenciado por fatores como o teor de umidade

do aterro, a temperatura, o potencial de oxidação, o pH, além da densidade e da granulometria dos resíduos.

Em conformidade com Andrade (2022), a constante k possui uma relação direta com a taxa de precipitação anual da região onde o aterro está localizado, bem como com o potencial de degradação dos materiais depositados. O valor de K pode ser determinado a partir dos dados na Tabela 2:

Tabela 2 - Determinação da constante k conforme a precipitação anual.			
Precipitação anual (mm)	Faixa de valores (k)		
	Degradabilidade do resíduo		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
<250	0,01	0,02	0,03
<250 - <500	0,01	0,03	0,05
>500 - <1000	0,02	0,05	0,08
>1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: ESMAP (2004) apud Andrade (2022).

3.3.2.2 Potencial de geração de metano (L_0)

O potencial de geração de biogás (L_0) depende da proporção de matéria orgânica presente nos resíduos. Esse valor pode variar de 0,001 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg}$, em resíduos com baixa quantidade de matéria orgânica, até 0,312 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg}$, em resíduos altamente orgânicos (Siqueira, 2018).

O valor de L_0 a ser adotado será o de 0,12 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg}$, correspondente a RSU com cerca de 35% de matéria orgânica em sua composição gravimétrica, seguindo o mesmo adotado por Andrade (2022) e Siqueira (2018).

3.3.2.3 Estimativa do Fluxo de Resíduos (R_x)

Conforme Andrade (2022), para calcular a estimativa do fluxo de resíduos (R_x), é necessário informar a taxa de crescimento populacional, a população atual, a taxa de geração de resíduos, a taxa de coleta, o ano de início das operações do aterro e a previsão para seu encerramento. O fluxo é determinado utilizando a Estimativa do Fluxo de Resíduos apresentada na Equação 1.

$$Rx = Pop_x * T_{RSD} * T_{coleta} \quad [1]$$

Onde:

R_x = Fluxo de resíduos no ano x (t/ano);

Pop_x = População atendida pelo aterro no ano x (habitantes);

T_{RSD} = Taxa de geração de resíduos ($T_{RSD}/hab.ano$);

T_{coleta} = Taxa de coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares (%).

Esses dados foram obtidos conforme as informações disponibilizadas pelo IBGE através do Censo, bem como por meio de dados do próprio município e aterro sanitário.

3.3.2.4 *Projeção Populacional*

Esse é um dado referente ao cálculo do que se projeta para a população para os próximos anos. Considera-se as informações oficiais da população de Porto Nacional – TO nos anos anteriores, e calcula-se a projeção para cada ano conforme a fórmula descrita por Preston, Heuveline e Guillot (2001), em seu livro *Demography: Measuring and Modeling Population Processes*, com uma metodologia validada e aceita por órgãos internacionais, como a ONU, para dados discretos ano a ano, conforme a projeção populacional dada pela Equação 2.

$$P_{(x)} = P_0 * (1 + r)^n \quad [2]$$

Onde:

P_x : População estimada no ano x (ano futuro que você quer calcular).

P_0 : População no ano base (ano inicial da projeção).

r : Taxa média de crescimento populacional anual;

n : Número de anos entre o ano base e o ano que você quer estimar (ano-alvo menos ano-base).

3.3.2.5 Taxa de crescimento populacional

Essa taxa é um dado importante para calcular a quantidade de resíduos que o aterro receberá nos anos futuros. Para tanto, será utilizado o método geométrico para as projeções de crescimento populacional, por meio da Equação 3:

$$r = \left[\left(\sqrt[n]{\frac{P_t}{P_0}} \right) - 1 \right] * 100 \quad [3]$$

Onde:

r = Taxa de crescimento populacional (%);

P_t = População final;

P₀ = População inicial;

N = número de anos no período.

No que se refere ao número de anos, será considerado o período de operação do aterro conforme a concessão para a atual empresa responsável.

3.3.2.6 Taxa de coleta e de geração de resíduos

Essa taxa foi identificada através dos dados fornecidos pelo IBGE e pelo Diagnostico Temático de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). A determinação do valor por habitantes será feita por meio da divisão da quantidade de resíduos conforme a população atendida.

3.3.2.7 Determinação da estimativa de geração de biogás

A Determinação da Estimativa de Geração de Biogás é calculada por meio da Equação 4:

$$Q_x = K * L_0 * (R_x * e^{-k(x-T)}) \quad [4]$$

Onde:

Q_x : vazão de metano gerado no ano pelo RSU depositado no aterro no ano T (m^3CH_4/ano);

k : Constante de decaimento;

R_x : fluxo de resíduos no ano x (Kg_{RSU});

L_0 : potencial de geração de metano ($m^3_{biogás}/Kg_{RSU}$);

T : ano de deposição do resíduo;

X = ano atual.

3.3.3 Avaliação das variáveis

A avaliação dos resultados foi realizada com base nos parâmetros estabelecidos por Andrade (2022), visando determinar a viabilidade da produção de energia elétrica a partir do biogás gerado. Os cálculos principais incluem:

3.3.3.1 Determinação da potência disponível

Conforme dados de Andrade (2022), seguindo o proposto pela CETESB, o cálculo da Determinação da Potência Disponível é apresentado na Equação 5:

$$P_x = \frac{Q_x * P_c (metano)}{31.536.000} * E_c * \frac{k}{1000} \quad [5]$$

Onde:

P_x : Potência disponível a cada ano (kW);

Q_x : Vazão de metano a cada ano (m^3CH_4/ano);

$P_c(metano)$: Poder calorífico do metano (J/m^3CH_4) = $35,53.10^6 J.m^{-3}$;

E_c : Eficiência de coleta de gases;

31.536.000: quantidade de segundos existentes em um ano;

O fator 1000 converte de watts para kilowatts ($1 kW = 1000 W$).

3.3.3.2 Determinação da energia disponível e estimativa de uso

Em função da disponibilidade de gás, pode-se determinar a energia disponível, utilizando, ainda, a potência disponível calculada anteriormente. Para tanto, será utilizado a Determinação da Energia Disponível, apresentada na Equação 6:

$$E_{\text{disponível}} = P_x * \frac{1}{365 * 24} \quad [6]$$

Onde:

P_x : Potência disponível (m^3CH_4);

365 corresponde a quantidade de dias no ano;

24 corresponde a quantidade de horas por dia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para definição dos dados da pesquisa, coletou-se informações diretamente com a empresa Base Fortins Ambiental, responsável pelo aterro sanitário de Porto Nacional. Além disso, coletou-se informações referente ao município junto aos dados da prefeitura, IBGE e outros portais. Para a identificação da geração de biogás, é necessário fazer o levantamento de todas as informações.

4.1 Constante de decaimento (k)

Segundo a Prefeitura de Porto Nacional (2014), por meio do Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, a média anual de precipitação pluviométrica no município é de cerca de 1.700 mm. Mais de 80% desse volume ocorre entre os meses de outubro e abril, período caracterizado por chuvas intensas com elevado potencial erosivo. Entre maio e setembro, os índices pluviométricos são significativamente menores, configurando um regime de chuvas concentrado e um período de estiagem no restante do ano, quando se observa redução acentuada na vazão dos cursos d'água, sem que estes cheguem a secar totalmente.

Em relação à degradabilidade dos resíduos, o aterro sanitário não forneceu dados específicos. No entanto, indicou-se a presença de grande quantidade de resíduos orgânicos de mais fácil degradação. Considerando também resíduos de uso comum com menor potencial de degradação, para os fins desta pesquisa, adotou-se que os resíduos são moderadamente degradáveis, utilizando-se um valor médio, inclusive para o parâmetro L_0 .

Nesse sentido, considerando o exposto na Tabela 2, adotou-se para a presente pesquisa um valor de $K = 0,06$.

4.2 Potencial de geração de metano (L_0)

Conforme mencionado anteriormente, o valor de L_0 adotado na presente pesquisa é de $0,12 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg}$, correspondente a RSU com cerca de 35% de matéria orgânica em sua composição gravimétrica, seguindo o mesmo adotado por Andrade (2022) e Siqueira (2018).

4.3 Taxa de crescimento populacional

Para a operação do aterro sanitário, considera-se um período de 30 anos, conforme concessão da empresa, iniciando em 2019. No entanto, para fins de cálculo de forma fidedigna, será considerado os dados oficiais do IBGE, que apresentam os dados de Porto Nacional em 2010 (49.143) e 2022 (64.418), onde a taxa de crescimento populacional será considerada a mesma até o ano de 2030.

A partir dos dados, pode-se calcular a taxa de crescimento populacional, por meio da Equação 3 anteriormente citada, considerando: $n = 12$; $P_t = 64.418$; $P_0 = 49.413$. Aplicando na equação, encontra-se $r = 0,2274$, ou seja, a taxa de crescimento anual é de 2,27% ao ano.

4.4 População para o período analisado

No que se refere aos dados de Porto Nacional, o IBGE dispõe de informações oficiais de 2010 e 2022, os outros anos são apenas uma estimativa. Nesse sentido, considerou-se uma taxa de crescimento populacional linear para todos os anos, de 2,27%. Sabe-se que ao longo dos anos pode haver taxas diferentes, no entanto optou-se por seguir de 2023 a 2049 com a mesma taxa, de modo a calcular a quantidade de habitantes.

Utilizou-se a Equação 2, anteriormente apresentada, fazendo o cálculo ano a ano, considerando a projeção atual referente ao ano anterior, ou seja, 2024 considerou 2023, 2025 considerou o número encontrado para 2024, e assim sucessivamente.

A equação foi lançada no software Excel, para um cálculo mais preciso, identificando-se a população conforme apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 – Estimativa da população por ano.

ANO	POPULAÇÃO
2022	64418
2023	65880
2024	67375
2025	68905
2026	70469

2027	72069
2028	73704
2029	75378
2030	77089
2031	78839
2032	80628
2033	82458
2034	84330
2035	86245
2036	88202
2037	90205
2038	92252
2039	94346
2040	96488
2041	98678
2042	100918
2043	103209
2044	105552
2045	107948
2046	110399
2047	112905
2048	115468
2049	118089

Fonte: Autores (2025).

4.5 Estimativa do Fluxo de Resíduos (Rx)

De acordo com o último senso divulgado, no ano de 2022 a população de Porto Nacional é de 64.418 pessoas. Densidade demográfica 2022 de 14,53 habitante por quilômetro quadrado (IBGE, 2024). Embora o IBGE apresente a estimativa da população de 2023, esta foi calculada, para padronização dos dados de todos os anos, onde definiu-se 65.880 pessoas para o ano de 2023.

O aterro sanitário de Porto Nacional ofereceu informações referente à geração de resíduos no ano de 2023. Assim, o IBGE não fornece dados específicos de 2023. No entanto, é possível calcular a partir dos dados oficiais oferecidos.

De acordo com dados fornecidos pelo aterro, no ano de 2023 houve a geração de 24.924.020kg, ou 24.924,02 toneladas.

Assim, considerando uma população de 65.880 pessoas, a taxa de geração de resíduos é de 0,3783 toneladas ao ano por habitante. Além disso, dados do SNIS apontam que 95,3% da população municipal é atendida por meio da coleta de resíduos domiciliares (Municípios e Saneamento, 2024).

Através dos dados, pode-se calcular a Estimativa do Fluxo de Resíduos de acordo com a Equação 1, onde encontra-se $R_x = 23.751$ toneladas/ano. Ao transformar para kg, $R_x = 23.751.155.06\text{kg}$

Seguido essa mesma metodologia, calculou-se R_x para todos os anos da presente pesquisa, considerando sua importância para determinação da geração de biogás ano a ano. Para tal, utilizou-se o software Excel, simplificando e automatizando os cálculos, conforme apresentado na Tabela 4:

Tabela 4 - Estimativa do Fluxo de Resíduos 2022 a 2049.

Taxa de Geração de Resíduos		0.3783
% de coleta de resíduos		95.30%
ANO	População	RX (kg)
2022	64418	23223970.92
2023	65880	23751155.06
2024	67375	24290306.28
2025	68905	24841696.23
2026	70469	25405602.73
2027	72069	25982309.92
2028	73704	26572108.35
2029	75378	27175295.21
2030	77089	27792174.41
2031	78839	28423056.77
2032	80628	29068260.16
2033	82458	29728109.67
2034	84330	30402937.76
2035	86245	31093084.44
2036	88202	31798897.46
2037	90205	32520732.43

2038	92252	33258953.06
2039	94346	34013931.29
2040	96488	34786047.53
2041	98678	35575690.81
2042	100918	36383258.99
2043	103209	37209158.97
2044	105552	38053806.88
2045	107948	38917628.3
2046	110399	39801058.46
2047	112905	40704542.49
2048	115468	41628535.6
2049	118089	42573503.36

Fonte: Autores (2025).

4.6 Determinação da estimativa de geração de biogás

Anteriormente determinou-se a constante de decaimento (k) = 0,06; a estimativa do fluxo de resíduos 2023 (R_x) = 23.751.155,06 kg; e o potencial de geração de biogás (L_0) = 0,12 m³CH₄/kg. Através desses dados, pode-se realizar a Determinação da Estimativa de Geração de Biogás por meio da Equação 4.

No que se refere às variáveis x e t , são definidas de acordo com o ano que está calculado. Para o ano de 2023, x e t também são 2023, considerando não haver nenhum ano anterior. A variável x sempre refere-se ao ano em que está calculando. Assim, $x-t = 0$, logo considera-se $e^0 = 1$.

Substituindo todos os dados na Equação 4, encontra-se $Q_{2023} = 171008,3$ m³CH₄/ano.

Para os anos seguintes, deve-se sempre levar em consideração o ano anterior. Assim, para o ano de 2024, utiliza-se a fórmula para encontrar os dados de 2024, onde $x = t = 2024$, e utiliza-se a mesma fórmula para considerar o cumulativo de 2023, onde $x = 2024$ e $t = 2023$, ao encontrar os dois valores, estes são somados para identificar o valor final.

Considera-se:

Para 2023: $x - t = 1$

Para 2023: $x - t = 0$

Sendo, portanto:

$$Q_{2024} = (0,06 \times 0,12 \times 23.751.155,06 \times e^{-k \cdot 1}) + (0,06 \times 0,12 \times 24290306,28 \times e^{-k \cdot 0})$$

$$Q_{2023} = 335939,773 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$$

Nesse sentido, pode-se fazer um cálculo ano a ano, até 2049, conforme a Tabela 5, utilizando o software Excel para aplicação das fórmulas:

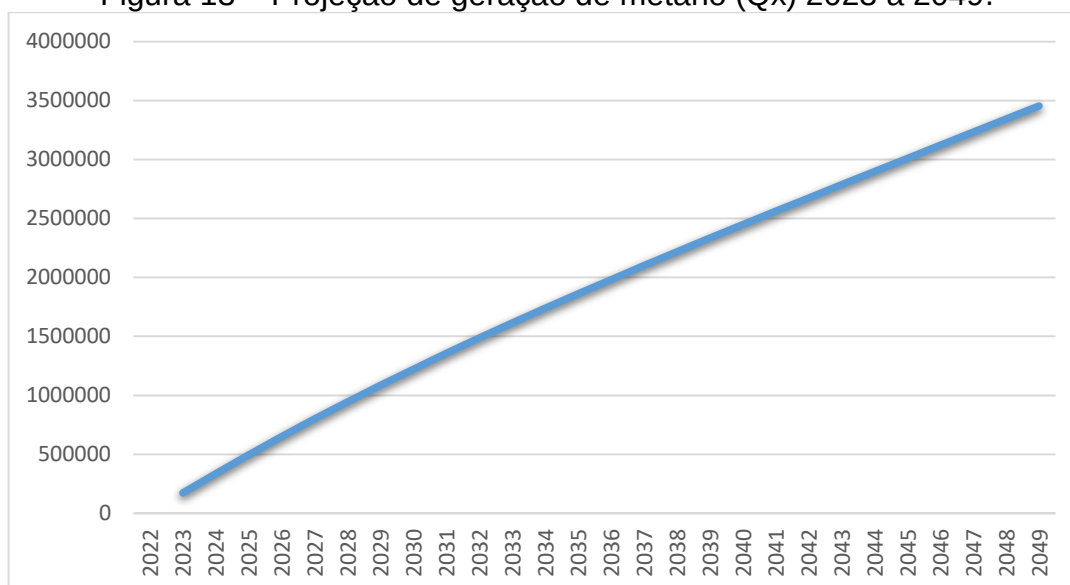
Tabela 5 - Estimativa da geração de biogás (Qx) ano a ano.			
Constante de decaimento (k)			0,06
Potencial de geração de biogás (L ₀)			0,12 m ³ CH ₄ /kg
ANO	População	R _x	Q _x TOTAL
2023	64418	23751155.06	171008.316
2024	65880	24290306.28	335939.773
2025	67375	24841696.23	495236.376
2026	68905	25405602.73	649316.394
2027	70469	25982309.92	798575.783
2028	72069	26572108.35	943389.53
2029	73704	27175295.21	1084112.93
2030	75378	27792174.41	1221082.76
2031	77089	28423056.77	1354618.44
2032	78839	29068260.16	1485023.08
2033	80628	29728109.67	1612584.46
2034	82458	30402937.76	1737576
2035	84330	31093084.44	1860257.66
2036	86245	31798897.46	1980876.75
2037	88202	32520732.43	2099668.74
2038	90205	33258953.06	2216858.02
2039	92252	34013931.29	2332658.56
2040	94346	34786047.53	2447274.64
2041	96488	35575690.81	2560901.44
2042	98678	36383258.99	2673725.61
2043	100918	37209158.97	2785925.9
2044	103209	38053806.88	2897673.61
2045	105552	38917628.3	3009133.16
2046	107948	39801058.46	3120462.51

2047	110399	40704542.49	3231813.63
2048	112905	41628535.6	3343332.91
2049	115468	42573503.36	3455161.58

Fonte: Autores (2025).

O gráfico referente à projeção de geração de metano entre 2023 e 2049 é apresentado na Figura 13:

Figura 13 – Projeção de geração de metano (Qx) 2023 a 2049.



Fonte: Autores (2025).

O que se observa na Figura 13 é que geração de biogás (Qx) ao longo dos anos apresenta uma tendência crescente, resultado da interação entre o aumento da população, a consequente elevação do fluxo de resíduos (Rx) e a dinâmica de decomposição controlada pela constante de decaimento (k).

É possível identificar que o aumento populacional implica em uma maior produção de resíduos sólidos urbanos, refletido no crescimento anual do Rx. Com mais matéria orgânica disponível nos aterros, a quantidade de biogás potencialmente gerada também aumenta. Esse efeito é cumulativo, pois cada lote de resíduos continua liberando metano por vários anos após a deposição. Além disso, os resultados são lineares, visto que se considerou um aumento populacional linear, com a mesma taxa, assim consequentemente a quantidade de resíduos geradas também é linear.

A constante de decaimento k , embora fixa para todos os anos, onde utilizou-se 0,06, determina a taxa na qual os resíduos se decompõem e liberam biogás. Resíduos depositados em anos anteriores continuam contribuindo para a produção anual de biogás, mas sua capacidade de geração diminui exponencialmente com o tempo. Assim, mesmo que a taxa de decomposição seja constante, o efeito cumulativo dos resíduos de anos anteriores amplifica o Q_x total anual.

4.7 Determinação da potência disponível

Para a determinação da potência disponível, considera-se o poder calorífico do metano (J/m^3CH_4) = $35,53 \cdot 10^6 J \cdot m^{-3}$. Para a eficiência da coleta de gases, considerou-se um valor de 75%. Para k , diferente dos dados anteriores, considerou-se o valor de 1, adimensional, conforme dados de Andrade (2022). No que se refere ao ano de 2023, Q_{2023} : $171008,316 m^3CH_4/ano$.

Assim, aplicando os dados Equação 5, identifica-se que a potência disponível para 2023 é de aproximadamente 144,49975kW. Para os próximos anos, o cálculo feito diretamente no Excel é apresentado na Tabela 6, junto à energia disponível.

4.8 Determinação da energia disponível e estimativa de uso

Para a Determinação da Energia Disponível, foi utilizada a Equação 6. A fórmula, ao considerar $1/365 \cdot 24$, faz um fator de conversão de tempo, que transforma a quantidade de metano de "anual" para "por hora": $m^3CH_4/ano \rightarrow m^3CH_4/hora$. Ou seja, ela considera que a produção de metano é distribuída uniformemente ao longo de todos os dias do ano e todas as horas do dia.

Considerando os dados anteriormente apresentados e aplicando-os na Equação 6, obtém-se um valor de $0,01649 m^3CH_4/h$, para o ano de 2023. Cabe transformar esse valor em kWh/dia. Conforme já mencionado, o poder calorífico do metano (J/m^3CH_4) = $35,53 \cdot 10^6 J \cdot m^{-3}$. Logo: $E_{hora} = 0,01650 \times 35,53 \cdot 10^6$

Considera-se $1kWh = 3,6 \times 10^6 J$. Assim, calcula-se a $E_{hora} = 0,01650 \times 35,53 \cdot 10^6 / 3.600.000$. Para transformar por por E_{dia} , multiplica-se por 24, onde: $E_{dia} = 0,01650 \times 35,53 \cdot 10^6 / 3.600.000 \times 24$. Logo, $E_{dia} = 3,90721 kWh/dia$

Ao utilizar os valores anteriormente adotados até 2049, é possível obter os valores apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 - Potência e energia diária disponível de metano de 2023 até 2049.

Poder calorífico do metano		$35,53.10^6 \text{ J.m}^{-3}$	
	Qx (m³CH₄/ano)	Potência Px (kW)	Energia diária (kWh/dia)
2023	171008.316	144.49975	3.90721
2024	335939.773	283.86463	7.67558
2025	495236.376	418.46814	11.31520
2026	649316.394	548.66371	14.83563
2027	798575.783	674.78590	18.24592
2028	943389.53	797.15159	21.55464
2029	1084112.93	916.06098	24.76990
2030	1221082.76	1031.79867	27.89940
2031	1354618.44	1144.63454	30.95043
2032	1485023.08	1254.82473	33.92993
2033	1612584.46	1362.61239	36.84446
2034	1737576	1468.22858	39.70028
2035	1860257.66	1571.89295	42.50332
2036	1980876.75	1673.81447	45.25923
2037	2099668.74	1774.19212	47.97340
2038	2216858.02	1873.21550	50.65095
2039	2332658.56	1971.06542	53.29677
2040	2447274.64	2067.91448	55.91553
2041	2560901.44	2163.92761	58.51168
2042	2673725.61	2259.26253	61.08950
2043	2785925.9	2354.07028	63.65306
2044	2897673.61	2448.49561	66.20628
2045	3009133.16	2542.67745	68.75291
2046	3120462.51	2636.74926	71.29658
2047	3231813.63	2730.83947	73.84074
2048	3343332.91	2825.07178	76.38874
2049	3455161.58	2919.56552	78.94381

Fonte: Autores (2025).

A análise dos dados de geração de metano, potência disponível e energia diária do aterro sanitário indica um crescimento contínuo ao longo dos anos. A geração de metano (Q_x) aumenta de 171.008 m³CH₄/ano em 2023 para 3.455.161 m³CH₄/ano em 2049, refletindo a acumulação progressiva de resíduos e a decomposição contínua da matéria orgânica. Esse comportamento é esperado, sendo mais acelerado nos primeiros anos e tendendo a uma curva de crescimento mais suave à medida que a disponibilidade de material orgânico por degradar diminui.

A potência disponível (P_x) acompanha essa tendência, passando de 144,5 kW em 2023 para 2.919,6 kW em 2049, indicando que o aterro se torna progressivamente mais capaz de gerar energia elétrica a partir do biogás. Pequenas variações na eficiência do sistema ou no poder calorífico do metano poderiam alterar significativamente esses valores, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo. A energia diária disponível aumenta de 3,91 kWh/dia para 78,94 kWh/dia no mesmo período, mostrando que o aterro poderá fornecer energia suficiente para consumo local ou para venda à rede elétrica, gerando receita e possibilitando benefícios econômicos adicionais, como créditos de carbono.

Observa-se uma relação quase linear entre a potência e a energia diária, evidenciando a eficiência da conversão do metano em energia elétrica. A tendência de crescimento constante sugere que o aterro ainda não atingiu o pico de produção de biogás, mas futuramente a taxa de aumento deve se estabilizar. Além dos benefícios energéticos, o aproveitamento do biogás reduz a emissão de metano para a atmosfera, contribuindo para a mitigação de impactos climáticos.

Esses resultados indicam que investimentos em captura e utilização de biogás são tecnicamente viáveis e economicamente interessantes, sobretudo nos anos de maior produção, e reforçam a importância de políticas de incentivo e programas de crédito de carbono para potencializar a sustentabilidade do sistema.

Assim, obtêm-se os seguintes dados, conforme a Tabela 7.

No que se refere ao retorno financeiro referente a esse projeto, pode-se calcular a partir da consideração de um preço médio da energia elétrica de R\$ 1,1/kWh (aproximadamente na região), operando 365 dias por ano. Cabe ressaltar que a energia calculada anteriormente é apresentada em hora por dia, devendo ser multiplicada por 24 horas, considerando uma operação durante todas as horas do dia.

Tabela 7 - Retorno financeiro ao longo dos anos da geração de energia.

ANO	RETORNO FINANCEIRO	
2023	R\$	34,227.17
2024	R\$	67,238.07
2025	R\$	99,121.15
2026	R\$	129,960.14
2027	R\$	159,834.29
2028	R\$	188,818.64
2029	R\$	216,984.31
2030	R\$	244,398.71
2031	R\$	271,125.77
2032	R\$	297,226.15
2033	R\$	322,757.46
2034	R\$	347,774.41
2035	R\$	372,329.04
2036	R\$	396,470.85
2037	R\$	420,246.97
2038	R\$	443,702.31
2039	R\$	466,879.70
2040	R\$	489,820.01
2041	R\$	512,562.32
2042	R\$	535,143.99
2043	R\$	557,600.78
2044	R\$	579,966.99
2045	R\$	602,275.53
2046	R\$	624,558.01
2047	R\$	646,844.84
2048	R\$	669,165.34
2049	R\$	691,547.75

Fonte: Autores (2025).

Ao total, o retorno financeiro projetado para o período de 26 anos é de R\$ 10.388.580,72. Embora se trate de um período longo, o valor pode ser considerado

relativamente baixo se comparado a outros projetos de geração de energia, mas é importante analisar o contexto econômico e operacional para avaliar sua viabilidade real.

Considerando os custos de instalação e manutenção, Andrade (2022) aponta que, em Natal-RN, para um período de 14 anos (2022–2035), os custos foram de R\$ 933.924,83. Aplicando uma proporção para Porto Nacional no período de 26 anos, o valor estimado seria de R\$ 1.801.659,67. Esse cálculo sugere que, em projetos de menor escala ou com operação simplificada, os custos são significativamente inferiores ao faturamento, resultando em lucro líquido positivo.

Por outro lado, Gonçalves (2021) apresenta uma análise mais abrangente, considerando Palmas–TO, região próxima a Porto Nacional. O estudo inclui custos anuais com peças, manutenção e mão de obra, totalizando R\$ 70.980,00/ano, além de despesas com painel, grupo gerador, tratamento de biogás, start-up e geração distribuída, chegando a R\$ 7.327.850,00 para 10 anos. Projetando proporcionalmente para 26 anos, os custos totais superariam o retorno financeiro estimado, indicando que a geração de biogás poderia se tornar economicamente inviável quando se consideram todos os componentes do investimento.

No entanto, essa análise não considera fatores que podem melhorar a viabilidade do projeto. Incentivos governamentais, como programas de apoio a energias renováveis e linhas de crédito específicas, podem reduzir significativamente os custos de instalação e operação. Além disso, a geração de biogás pode ser elegível para créditos de carbono, oferecendo uma fonte adicional de receita e tornando o projeto mais atrativo do ponto de vista econômico e ambiental.

Outro ponto relevante é que, apesar da energia gerada ser relativamente baixa comparada ao consumo residencial médio, a valorização ambiental e a contribuição para a sustentabilidade local são benefícios indiretos que fortalecem o argumento para implementação do projeto. A integração com políticas públicas de resíduos sólidos e a possibilidade de venda de energia elétrica em sistemas de microgeração ou geração distribuída podem aumentar o retorno financeiro, mesmo quando a produção é limitada.

Portanto, a viabilidade financeira do projeto depende não apenas da produção de biogás e dos custos operacionais, mas também da incorporação de incentivos econômicos, benefícios ambientais e estratégias de comercialização de energia e créditos de carbono. Projetos que consideram apenas operação básica mostram

potencial de lucro líquido, enquanto projetos que exigem investimento completo em infraestrutura e operação complexa podem se tornar inviáveis sem o apoio de políticas públicas ou mecanismos de incentivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou um aumento anual de metano, biogás e energia, resultado da entrada contínua de resíduos sólidos urbanos e da ação microbiana sobre a fração orgânica do lixo. O faturamento médio estimado para todo o período foi de R\$ 10.388.580,72, indicando viabilidade econômica em cenários de operação simplificada.

Por outro lado, ao incluir custos completos de implantação e operação, como aquisição de equipamentos, grupos geradores, tratamento de biogás e mão de obra especializada, o retorno pode ser reduzido a ponto de comprometer a viabilidade financeira. Isso evidencia que o sucesso econômico depende do porte do aterro, da complexidade do sistema e da gestão operacional.

Todos os cálculos foram realizados manualmente, seguindo metodologia adotada em estudo prévio. Essa abordagem garante comparabilidade, mas resultados diferentes podem ser obtidos com o uso de softwares especializados, que incorporam variáveis adicionais e modelos mais detalhados.

O trabalho apresenta limitações, como o uso de médias e modelos simplificados, sem considerar integralmente variações sazonais, perdas de gás, eficiência real do sistema e heterogeneidade do resíduo, fatores que podem impactar significativamente os resultados.

A viabilidade pode ser potencializada por incentivos governamentais, linhas de financiamento específicas e remuneração por créditos de carbono, reduzindo custos e aumentando o retorno. Conclui-se que, embora o aproveitamento do biogás seja promissor em determinadas condições, decisões de investimento devem ser baseadas em análises completas de custos, modelagens mais precisas e integração com políticas públicas de incentivo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. I. J. **Potencial de produção de biogás e energia elétrica a partir da remoção da matéria orgânica oriundo de tratamento de esgotamento sanitário na ETE Norte**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

ALTOÉ, L.; *et al.* Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. *Estudos Avançados*, v. 31, n. 89, p. 285-297, 2017.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, 2000.

ANDRADE, A. B. B. **Análise da viabilidade econômica para geração de energia elétrica através do uso de biogás gerado em aterro sanitário no estado da Paraíba**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15849. **Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004. **Resíduos sólidos**. Classificação. São Paulo: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE - ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. 2023.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – BEN. **Relatório Síntese**. 2024.

BARROS, T. F. **Geração de energia elétrica com biogás gerado em aterro sanitário**. Estudo de viabilidade técnico-econômico. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BASE FORTINS. **Apresentação: a Base Fortins Soluções Ambientais LTDA**. 2019. Disponível em: <<http://www.basefortins.com.br/>>. Acesso em 18 dez 2024.

BELLO, P. F. S.; COELHO, S. L. Captação de biogás em aterro sanitário para reutilização sustentável. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação – REASE*, vol. 8, n. 6, p. 1342-1354, 2022.

BIASI, C. A. F.; *et al.* **Energias renováveis na área rural da região sul do Brasil**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2018.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Presidência da República Casa Civil: Brasília, 2010.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Campus, 2013.

CARVALHO, M. M. C. **Análise ambiental do aterro sanitário do município de Anápolis Estado de Goiás**. Dissertação de Mestrado em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente, Unievangélica, 129 p., Anápolis – GO, 2011.

CARVALHO, R. Q.; *et al.* **Oportunidades enterradas: geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos**. Edufes, 1ª edição, 2019.

CARESANA, F.; *et al.* Energy production from landfill biogas: An italian case. *Biomass And Bioenergy*, Italy, v. 35, n. 10, p.4331-4339, out. 2011.

CENBIO. **Determinação do potencial de biogás a ser produzido e do potencial de eletricidade a ser gerado**. Relatório de atividades. São Paulo, 2006.

COELHO, S. T.; *et al.* A conversão da fonte renovável biogás em energia. In: **Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**. Congresso Brasileiro. Brasília: Cbpe, 2006.

COELHO, S. T.; *et al.* **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo, IEE-USP, 2018.

CONDER – COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO DA BAHIA. **Manual de Operação de Aterros Sanitários**. Bahia, 2010. Disponível em: <https://cooperativadereciclagem.files.wordpress.com/2010/06/manual_aterro_sanitario.pdf>. Acesso em 17 set. 2024.

COSTA, D. F. **Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização**. Monografia, Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

COSTA, S.; BARROS, S. L.; FALCÃO, V. A utilização energética do biogás produzido em aterros sanitários. *Anuário Acadêmico-científico da UniAraguaia*, p. 326-332, 2014.

CUNHA, M. E. G. **Análise do Setor Ambiental no Aproveitamento Energético de Resíduos: Um estudo de caso do município de Campinas. 2002**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C.J.P.; ROSSI, M. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. *Anais eletrônicos*, 2002.

DUDEK, J.; *et al.* **landfill gas energy technologies**. Cracóvia, 2010. 90 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **NT-019/2018-r0**. 2018.

EPA. Environmental Protection Agency. *LFG energy project development handbook*. Wahsington, 2010.

FEITOSA, S. A.; *et al.* Análise da produção e aproveitamento energético do biogás no aterro sanitário da cidade de porto velho-Ro. In: International conference on engineering and tecnology education, 2010, Ilhéus, Brazil. *Anais...* 2010,

FELCA, A. T. A.; *et al.* Estimativa do potencial energético de um aterro sanitário por meio de duas metodologias. *XII Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas*, Minas Gerais, 2015.

FERNANDES, D. A. **A importância da implantação do aterro sanitário na cidade de Iraí de Minas – MG**. Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2019.

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. *Eng. Sanit. Ambient.*, vol. 27, n. 1, p. 67-77, 2022.

FIGUEIREDO, V. J. N. **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás: estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 90 f., 2007.

GARCILASSO, V. P. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: Estudo de caso em São Paulo**. USP. São Paulo, 2010.

GONÇALVES, M. G. **Viabilidade de utilizar o biogás proveniente do aterro sanitário de Palmas para gerar energia elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Elétrica, Instituto Federal do Tocantins, Palmas – TO, 2021.

GOOGLE MAPS. **Base Fortins Soluções Ambientais**. 2024. Disponível em: <<https://goo.gl/maps/gcBaynr7SHvr93Vk6>>. Acesso em 05 nov. 2024.

IBGE. **Porto Nacional**. 2024. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/porto-nacional>>. Acesso em 05 nov. 2024.

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe. **Manual para aproveitamento do biogás**. Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, v. 1 - aterros sanitários, 2009

JARDIM, C. A. M. **Valorização Econômica do Biogás: Geração Elétrica vs. Produção de Biometano para Injeção na Rede**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Instituto Politécnico Setubal, 2013.

JENNE, C.A.; CATTEL, R. K. Structural change and energy efficiency in industry. *Energy Economics*. *Elsevier*, Vol. 5.2, pp. 114-123. Reino Unido, 1983.

MAIA, R. C. L. **Estudo de viabilidade econômica e financeira para geração de energia a partir do biogás em aterro sanitário.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MARINHO, M. K. S.; QUIXABEIRA, D. Análise ambiental da operação do aterro sanitário de Porto Nacional (TO). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 14, n. 3, p. 110-120, 2023.

MARQUES, S. M.; *et al.* **Study of the production and use of biogas generated in the Landfill of Palmas - TO** - 8th Inter-American Congress of Solid Waste, Asunción, PY - 2019.

MARQUES, M. S. **Qualidade ambiental e estudo da produção e aproveitamento energético do biogás produzido pelo aterro sanitário de Palmas – TO.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas – TO, 2019.

MARQUES, M. S.; *et al.* **Avaliação Área de Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Rio Verde – GO.** 10º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental SQA/ABES-RS, Porto Alegre - RS, 2016.

MELO, C. B. **Viabilidade técnica e econômica de uma unidade geradora de energia elétrica a partir do biogás proveniente de dejetos suínos de pequenos produtores rurais da região do oeste do paraná:** produção centralizada x produção descentralizada de biogás. Dissertação de Mestrado, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Foz do Iguaçu, 2023.

MELO, R. A.; GRASSI, R. **Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário do município de Francisco Beltrão – PR.** Monografia (Trabalho Final de Curso) do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2014.

MONTAGNA, T. B. **Biogás produzido em aterro sanitário como fonte de energia.** Monografia – União de Ensino do Sudoeste do Paraná, Paraná, 2013.

MUNICÍPIOS E SANEAMENTO. **Porto nacional (TO).** 2024. Disponível em: <<https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/to/porto-nacional>>. Acesso em 10 out. 2024.

NETA, M. A. V. **Manejo de resíduos sólidos.** Atlas de Saneamento, IBGE, 2011.

PAES, V. A. P. **Avaliação do aproveitamento energético do biogás produzido em um sistema piloto de digestão anaeróbia de lodo.** Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 79 p., Florianópolis, 2013.

PIÑAS, J. A. V.; *et al.* Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). *Revista Brasil. Est. Pop.*, Rio de Janeiro, v. 33, n. 1, p. 175-188, 2016.

PRAÇA, F. S. G. Metodologia da Pesquisa Científica: Organização estrutural e os desafios para redigir o trabalho de conclusão. *Revista Eletrônica "Diálogos Acadêmicos"*, nº 1, p. 72-87, 2015.

PREFEITURA DE PORTO NACIONAL. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos de Porto Nacional – TO**. 2014.

PREFEITURA DE PORTO NACIONAL. **Plano Municipal de Água e Esgoto de Porto Nacional – TO**. PMAE/PN-TO Revisão 2018. Porto Nacional, 2018.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho científico**. Universidade Feevale, 2ª edição, Novo Hamburgo/RS, 2013.

SANTOS, I. F.; BARROS, R. M.; LÚCIO, G. Uma avaliação energética, econômica e ambiental das opções de aproveitamento energético do biogás de um aterro sanitário no Brasil. *Tecnol. Ambient*, v. 19, p. 1344-1356, 2015.

SANTOS, M. M.; ROMANEL, C.; ELK, A. G. H. P. V. Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 22, p. 1151-1162, 2017.

SANTOS, R. B.; LIMA, A. K. C. Análise comparativa do biogás: processo em biodigestores e de aterros sanitários. *Revista eletrônica de energia*, Universidade Salvador, vol. 6, n. 1, p. 48-57, 2016.

SILVA, C. O. **Sustentabilidade da biomassa dos resíduos sólidos de aterro sanitário para geração de biogás**. Tese de Pós-graduação, Universidade do Vale do Taquari, 2020.

SILVA, W. O. B. **Aterros sanitários e os resíduos sólidos**. Trabalho de Conclusão de Curso de Direito, Fundação Educacional do Município de Assis, 46 p., Assis – SP, 2020.

SIQUEIRA, M. **Análise de viabilidade técnica-financeira para aproveitamento energético de biogás proveniente de aterro sanitário. Um estudo de caso: um aterro sanitário no estado de São Paulo**. Monografia de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, Universidade de São Paulo, 58f., São Paulo – SP, 2018.

SUN, Q.; LI, H.; YAN, J.; LIU, L.; YU, Z.; YU, X. Selection of appropriate biogas upgrading technology – review of gas cleaning, upgrading and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 521 – 532, 2015.

VERKUIJL, C. **Aligning fossil fuel production with the Paris Agreement**. Seattle: Stockholm Environment Institute, 2018.

VIEIRA, G.E.G.; *et al.* Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão. *Revista Liberato* (Novo Hamburgo), vol. 16, p. 101-220, 2015.