



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

SANDRA MARIA BORGES COSTA ALVES

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOENERGIA A PARTIR DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO ATERRO SANITÁRIO DE TERESINA – PI

TERESINA

2025

SANDRA MARIA BORGES COSTA ALVES

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOENERGIA A PARTIR DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO ATERRO SANITÁRIO DE TERESINA – PI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Linha de pesquisa: Tecnologias Ambientais.
Área de concentração: Processamento e caracterização de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Gilvan Moreira da Paz
Coorientador: Prof. Dr. Reinaldo F. Cavalcante

TERESINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Alves, Sandra Maria Borges Costa

A472p Potencial de geração de bioenergia a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares do aterro sanitário de Teresina - Pi / Sandra Maria Borges Costa Alves. - 2025.
104 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Gilvan Moreira da Paz.

Coorientador : Prof Dr. Reinaldo F. Cavalcante.

1. Aterro sanitário. 2. Biogás. 3. Bioenergia. 4. Créditos de carbono. I. Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

SANDRA MARIA BORGES COSTA ALVES

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOENERGIA A PARTIR DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO ATERRO SANITÁRIO DE TERESINA – PI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 05/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gilvan Moreira da Paz (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Dedico este trabalho a DEUS, base da minha vida, razão de minha existência, explicação de toda a minha jornada, por me conceder saúde, sabedoria, resiliência e fé nos momentos mais difíceis. Sem DEUS nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, imensamente, à minha mãe, Francisca Borges Costa, mulher sábia, trabalhadora, determinada que, mesmo não tendo tido a oportunidade de acesso à escola, aprendeu a ler, escrever e efetuar as quatro operações básicas da Matemática brilhantemente, de quem herdei o amor pelas disciplinas exatas. Gratidão sempre a essa mulher de grandes valores. Ao meu pai, *in memória*, Francisco das Chagas Costa, meu maior admirador, homem do campo, trabalhador, que proporcionou aos filhos o que mais desejou na sua vida, o conhecimento. Homem de grande senso de justiça, bondoso, de quem herdei a inquietude perante as injustiças sociais, o dom da partilha. A esses guerreiros, dedico todas as minhas vitórias, pois toda minha caminhada escolar foi por eles, para eles e toda a minha família, que amo imensamente.

Aos meus irmãos, familiares e amigos pelo carinho, apoio, incentivo e por sempre acreditar e torcer por mim.

Ao meu esposo, Flávio Silva Alves, pela compreensão e companheirismo durante essa jornada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí- IFPI, pela oportunidade e disponibilidade da estrutura física.

Ao seleto corpo docente e Doutores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI, Campus Centro, sobretudo, ao meu orientador, professor Dr. Gilvan Moreira da Paz, pelos direcionamentos, conhecimento, confiança e por todo o incentivo e disponibilidade para a realização deste projeto. Ao professor Dr. Roberto Arruda Lima Soares pelo conhecimento, credibilidade e incentivo dados à minha pesquisa, e à professora Dra. Deuzuíta dos Santos Freitas Viana pelas sábias palavras de apoio frente às dificuldades pelas quais passei durante esta jornada do mestrado.

Ao meu coorientador, professor do Instituto Federal do Ceará – IFCE, Campus Quixadá, Dr. Reinaldo Fontes Cavalcante, pelos direcionamentos, ensinamentos, credibilidade e colaboração na idealização deste projeto.

À Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Habitação – SEMDUH, em particular ao secretário James Guerra pela autorização de minha visita ao aterro, e acesso aos relatórios dos dados gravimétricos do Aterro Municipal de Teresina-PI, base deste estudo, e também, ao engenheiro civil da Prefeitura Municipal de Teresina,

lotado na SEMDUH, José Robespierre de Carvalho Leite, e Ana Kelle Araújo Oliveira, engenheira operacional da LITUCERA, pela receptividade e disponibilidade para esclarecimentos e informações operacionais sobre o aterro.

Por fim, agradeço aos amigos do mestrado pelas trocas de conhecimentos, de experiências e desabafos diante das dificuldades enfrentadas, que colaboraram, direta e indiretamente, para a concretização deste projeto.

“Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”.

Antoine Laurent Lavoisier

RESUMO

Os aterros sanitários são potenciais geradores de biogás que podem ser utilizados para fins energéticos, representando uma alternativa viável, sustentável, visto que, o seu uso permite a geração de energia limpa e colabora para o equilíbrio ambiental no mundo. Este trabalho visa estimar o potencial de geração de bioenergia a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares (RSD) do Aterro Sanitário Municipal de Teresina (PI), tomando como base para estudo os dados gravimétricos desses resíduos, disponibilizados pela Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEMDUH). Para o estudo populacional, foram aplicados quatro métodos matemáticos: aritmético, geométrico, logístico e de taxa decrescente de crescimento. Entre os métodos analisados, o logístico apresentou maior compatibilidade com os dados do IBGE, estimando uma população de saturação de 917.475 habitantes por volta de 2040, sendo, portanto, adotado para subsidiar as projeções de geração de resíduos domiciliares do município. A média anual de geração de resíduos sólidos domiciliares (RSD), no período de 2020 a 2040, foi estimada em 195.364 toneladas, resultando em um volume acumulado de 4.102.645 toneladas até o ano de 2040. Para o cálculo da geração de metano a partir do volume de resíduos projetados, utilizou-se a metodologia estabelecida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A geração anual máxima de metano estimada para o aterro, no período de 2021 a 2050, está prevista para 2031, ano subsequente ao encerramento de suas atividades, com 8.194.909 m³ de CH₄, dos quais 5.736.436 m³ de CH₄ representa a fração efetivamente coletada. A menor projeção anual de metano captado corresponde ao ano de 2021, com 649.317 m³ de CH₄. No que se refere à conversão energética, estima-se que a potência máxima seja alcançada em 2031, com 3,26 MW, sendo 0,91 MW a parcela disponível para a geração de energia elétrica, resultando em uma produção anual de 6.260 MWh. Por outro lado, a menor potência disponível está projetada para o ano de 2021, correspondendo a 0,1 MW, o que implica uma geração anual de 709 MWh. A geração mensal varia de 59 MWh, em 2021, a 522 MWh, em 2031, quantidade suficiente para atender à demanda energética mensal do próprio aterro, que é de 12 MWh. Os títulos de créditos de carbono gerados de 2021 a 2050 por meio do aproveitamento energético totalizaram 4.440 toneladas de CO₂, enquanto aqueles provenientes da simples queima do gás, no mesmo período, somaram 795.511 toneladas de CO₂. Embora em menor quantidade, os títulos créditos de carbono provenientes do aproveitamento energético, além de maior valor econômico e ambiental, apresentam a vantagem de suprir a demanda de energia elétrica do aterro. Portanto, a pesquisa evidencia o potencial energético dos resíduos sólidos domiciliares do aterro sanitário de Teresina (PI) para a geração de energia elétrica, contribuindo para a promoção de soluções sustentáveis na agenda climática brasileira. Contudo, faz-se necessária a avaliação da viabilidade econômica e ambiental da implantação de sistemas de aproveitamento do biogás para essa finalidade.

Palavras-chave: aterro sanitário; biogás; bioenergia; créditos de carbono.

ABSTRACT

Sanitary landfills are potential generators of biogas that can be used for energy purposes. They represent a viable, sustainable alternative, as their use allows for the generation of clean energy and contributes to global environmental balance. This study aims to estimate the potential for bioenergy generation from the organic fraction of household solid waste (HSW) from the Teresina Municipal Sanitary Landfill (Piauí), using gravimetric data from this waste, provided by the Municipal Secretariat of Urban Development and Housing (SEMDUH). Four mathematical methods were applied to the population study: arithmetic, geometric, logistic, and decreasing growth rate. Among the methods analyzed, the logistic method showed the greatest compatibility with IBGE data, estimating a saturation population of 917,475 inhabitants by 2040. Therefore, it was adopted to support projections for household waste generation in the municipality. The average annual generation of household solid waste (HSW) from 2020 to 2040 was estimated at 195,364 tons, resulting in a cumulative volume of 4,102,645 tons by 2040. The methodology established by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) was used to calculate methane generation based on the projected waste volume. The maximum annual methane generation estimated for the landfill from 2021 to 2050 is projected for 2031, the year after its closure, with 8,194,909 m³ of CH₄, of which 5,736,436 m³ of CH₄ represents the fraction actually collected. The lowest annual projection of methane captured corresponds to 2021, with 649,317 m³ of CH₄. Regarding energy conversion, maximum power is estimated to be reached in 2031, at 3.26 MW, with 0.91 MW being available for electricity generation, resulting in an annual production of 6,260 MWh. On the other hand, the lowest available power is projected for 2021, corresponding to 0.1 MW, implying an annual generation of 709 MWh. Monthly generation ranges from 59 MWh in 2021 to 522 MWh in 2031, sufficient to meet the landfill's own monthly energy demand of 12 MWh. Carbon credits generated from 2021 to 2050 through energy recovery totaled 4,440 tons of CO₂, while those from simple gas flaring, in the same period, totaled 795,511 tons of CO₂. Although in smaller quantities, carbon credits from energy recovery, in addition to their greater economic and environmental value, offer the advantage of meeting the landfill's electricity demand. Therefore, the research highlights the energy potential of household solid waste from the Teresina (PI) landfill for generating electricity, contributing to the promotion of sustainable solutions in the Brazilian climate agenda. However, it is necessary to assess the economic and environmental feasibility of implementing biogas recovery systems for this purpose.

Keywords: landfill; biogas; bioenergy; Carbon credits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico da evolução populacional de Teresina (Censo IBGE)	24
Figura 2 – Gráfico da participação de geração RSU no Brasil por regiões em 2022 ..	28
Figura 3 – Gráfico da geração anual de RS em Teresina (PI) de 2019 a 2023.....	29
Figura 4 – Gráfico do Índice de cobertura de coleta de RSU no Brasil e regiões (%) (2022).	30
Figura 5 – Ilustração de um aterro sanitário com as principais partes constituintes..	33
Figura 6 – Gráfico da composição do gás (% em volume) nas respectivas fases.....	41
Figura 7 – Diagrama de alternativas de aproveitamento de biogás.....	47
Figura 8 – Gráfico do aproveitamento energético de biogás de aterro até 2040	48
Figura 9 – Gráfico da matriz elétrica brasileira (participação por fonte)	49
Figura 10 – Gráfico da matriz energética piauiense	50
Figura 11 – Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa	56
Figura 12 – Mapa de localização do Aterro Municipal de Teresina-PI	57
Figura 13 – Mapa da área localização do Aterro Municipal de Teresina-PI	58
Figura 14 – Gráfico da composição gravimétrica em base úmida para Teresina.....	60
Figura 15 – Gráfico do percentual dos RSD de Teresina em categorias segundo sua destinação final	61
Figura 16 – Gráfico da composição gravimétrica em base úmida para Teresina.....	60
Figura 17 – Gráfico do percentual dos RSD de Teresina em categorias segundo sua destinação final	61
Figura 18 – Gráfico das Projeções e ajustes das funções de crescimento da popula- ção de Teresina (PI).....	75
Figura 19 – Gráfico da projeção populacional Teresina-PI (método logístico)	77
Figura 20 – Gráfico da estimativa da quantidade acumulada de RSD de Teresina (PI) (t/ano)	78
Figura 21 – Gráfico da estimativa da geração RSD de Teresina (PI) por categoria..	79
Figura 22 – Gráfico da estimativa de emissões de gases do aterro sanitário de Tere- sina-PI	80
Figura 23 – Gráfico da estimativa de geração de metano	82
Figura 24 – Gráfico da potência e energia elétrica estimadas para o aterro	84
Figura 25 – Gráfico da geração dos créditos de carbono por meio da queima do gás	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Disposição final de RSU no Brasil e regiões, por tipo de destinação (t/ano)	31
Tabela 2 – Localização de PEVS na cidade de Teresina.....	35
Tabela 3 – Participação das Fontes Energéticas Renováveis na Geração de Energia Elétrica no Piauí (%).....	37
Tabela 4 – Teores de carbono orgânico degradável para cada componente do lixo do aterro sanitário de Teresina.....	62
Tabela 5 – Fator de correção de metano (FCM) recomendado pelo IPCC	63
Tabela 6 – Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo	69
Tabela 7 – Valores de k pelo IPCC	71
Tabela 8 – Comparativo entre a projeção de CH ₄ em Diadema (SP) e Teresina (PI)	83
Tabela 9 – Comparativo entre a geração de potência e energia em Diadema (SP) e Teresina (PI).....	85

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 01 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem	26
Quadro 02 – Duração de cada fase na decomposição de resíduos.....	42
Quadro 03 – Fatores que influenciam a geração de biogás nos aterros	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	Aterro Sanitário Municipal de Teresina
CBIE	Congresso Brasileiro de Informação na Educação
CC	Créditos de Carbono
CEPRO	Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais e Planejamento Participativo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
COD	Carbono Orgânico Degradável
COD _f	Fração do Carbono Orgânico Degradável Dissociada
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CVM	Comissão de Valores Mobiliários
DBO	Demandas Bioquímicas
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Envioronmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FCM	Fator de Correção de Metano

FME	Fator de Emissão Médio
FOD	First Order Decay
FORSU	Fração Orgânica do Resíduos Sólidos Urbanos
GBQ	Gás Bioquímico
GCH ₄	Geração Total de Metano
GEE	Gases de Efeito Estufa
GPS	Gerenciamento dos Resíduos Sólidos
GRS	Gerenciamento dos Resíduos Sólidos
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICLEI	Governos Locais para a Sustentabilidade
IFPI	Instituto Federal do Piauí
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LandGEM	Landfill Gas Emissions Model
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
N	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira
NDCs	Mecanismo de Contribuições Nacionalmente Determinadas
NH ₃	Amônia

O ₂	Oxigênio
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEV	Pontos de Entrega Voluntária
PET	Polietileno Tereftalato
PI	Piauí
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PROPIDEL	Programa de Incentivo ao Desenvolvimento de Energias Limpas
PS	Poliestireno
PTM	Prefeitura Municipal de Teresina
PVC	Policloreto de Vinila
RCE	Redução Certificada de Emissão
RIDE	Rede Integrada de Desenvolvimento da Grande Teresina
RSD	Resíduos Sólidos Domiciliares
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SAAD	Superintendência das Ações Administrativas Descentralizadas
SEMDUH	Secretária de Desenvolvimento Urbano e Habitação
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SMA-SP	Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo

UFPI Universidade Federal do Piauí

USEPA United States Environmental Agency Protection

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
§	Seção
J	Joule
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt hora
m ²	Metros quadrado
m ³	Metro cúbico
MW	Megawatt
s	Segundo
hab.	Habitantes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS.....	21
1.1.1	Geral.....	22
1.1.2	Específicos.....	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	CRESCIMENTO POPULACIONAL NO BRASIL	23
2.1.1	Crescimento Populacional de Teresina (PI)	23
2.2	RESÍDUOS SÓLIDOS	25
2.2.1	Conceito e classificação	25
2.2.2	Geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil	27
2.3	GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL	29
2.3.1	Coleta e disposição final dos resíduos sólidos urbanos	30
2.3.2	Aterros sanitários	31
2.3.3	Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos	33
2.3.4	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Teresina (PI)	34
2.3.5	Cidade de Teresina e suas características voltadas para o aumento da oferta de energia limpa.....	36
2.4	BIOGÁS	38
2.4.1	Biogás de resíduos sólidos de aterro sanitário	39
2.4.2	Fatores que influenciam a formação do biogás	42
2.4.3	Modelos de previsão de geração de Biogás de Aterro Sanitário	43
2.4.4	Potencial energético do biogás de aterros sanitários	46
2.5	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O MERCADO DO CARBONO	50
2.5.1	A importância do crédito de carbono	51
2.5.2	Protocolo de Quioto e Projetos de Desenvolvimento Limpo (MDL).....	53
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	55
3.1	FLUXOGRAMA DA PESQUISA	56
3.1.1	Localização e caracterização da área de estudo	56
3.1.2	Visita ao Aterro Sanitário Municipal de Teresina (PI)	58
3.2	LEVANTAMENTO DE DADOS GRAVIMÉTRICOS DO ATERRO	59
3.2.1	Composição gravimétrica em base úmida para Teresina	59

3.3	ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO POPULACIONAL	62
3.3.1	Modelo Linear ou Aritmético	62
3.3.2	Modelo Geométrico	63
3.3.3	Modelo Logístico	64
3.3.4	Modelo de Taxa decrescente de crescimento	65
3.3.5	R quadrado (R^2).....	66
3.4	ESTIMATIVA DO VOLUME DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES	66
3.4.1	Geração per capita	66
3.4.2	Geração diária.....	66
3.5	ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DO BIOGÁS.....	67
3.5.1	Estimativa da Geração de Metano.....	67
3.5.2	Potencial de geração de Metano	68
3.5.3	Carbono Orgânico Degradável	69
3.5.4	Fração de Carbono Orgânico Degradável	70
3.5.5	Projeção energética do biogás no aterro	71
3.6	GERAÇÃO DE CRÉDITO DE CARBONO.....	73
3.6.1	Geração de créditos de carbono por meio da queima do biogás	73
3.5.2	Geração de créditos de carbono por meio do aproveitamento energético do biogás.....	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1	ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO POPULACIONAL	75
4.2	ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DOMICILIARES (RSD) DE TERESINA-PI	77
4.2.1	Estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares de Teresina-PI por categorias.....	78
4.3	ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO	80
4.3.1	Estimativa de emissões de gases do aterro sanitário de Teresina-PI	80
4.3.2	Estimativa da geração de metano do aterro sanitário de Teresina-PI	81
4.3.3	Projeção energética no aterro sanitário.....	83
4.3.4	Geração de crédito de carbono	86
5	CONCLUSÕES	88
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional colaborou para que houvesse, como consequência, um crescimento significativo do consumo, gerando como resultado uma quantidade expressiva de resíduos sólidos. Esse fenômeno ganhou destaque de forma mundial por ser uma preocupação considerável que afeta o meio ambiente, trazendo à tona variadas discussões sobre a questão ambiental no âmbito mundial (Friede, 2021).

Dessa maneira, o crescimento populacional tem sido acompanhado por um aumento significativo na geração de resíduos sólidos, que tem levado a um desafio crescente no que diz respeito ao descarte adequado desses materiais. O descarte inadequado dos resíduos sólidos traz consigo uma série de consequências ambientais, sociais e econômicas que requerem atenção e soluções eficazes (ABRELPE, 2022). Nesse contexto, pode-se afirmar que no Brasil existem três formas de disposição final de resíduos: lixão a céu aberto, aterro controlado e aterro sanitário. Destes, apenas o aterro sanitário representa uma infraestrutura projetada para a disposição final adequada de resíduos sólidos (Lenzi; Massi; Santana, 2024).

Segundo as resoluções CONAMA (nº 237/1997, nº 01/1986 e nº 404/2008), a implantação de aterros sanitários destinados ao manejo de resíduos sólidos urbanos deve ser precedida de licenciamento ambiental emitido pelo órgão ambiental competente, em conformidade com a legislação vigente. É fundamental respeitar as condições mínimas exigíveis para projeto e operação de aterros de resíduos perigosos fixadas pelas normas técnicas pertinentes, como a NBR 10157:1987 (aterros resíduos perigosos) e a NBR 13896:1997 (aterros de resíduos não perigosos) (ABNT, 1987/1997).

Os aterros sanitários se apresentam como potenciais geradores de biogás (Sousa, 2022). No entanto estes representam alta toxicidade para a atmosfera em decorrência da quantidade de metano (CH_4) que é gerado, que por sua vez possui o potencial de aquecimento global de 21 vezes maior que o dióxido de carbono (CO_2), contribuindo para o agravamento do efeito estufa, necessitando, portanto, de um melhor aproveitamento energético com base na quantidade de gases que são liberados oriundos do descarte inadequado de resíduos sólidos (IPCC, 2006).

O aproveitamento energético do biogás é essencial, pois se apresenta como uma alternativa viável e sustentável que demanda maior exploração no Brasil. Seu uso possibilita a geração de energia elétrica, contribuindo significativamente para o

equilíbrio ambiental global. Além disso, o biogás é uma forma eficiente e sustentável de produzir energia, pois utiliza resíduos orgânicos que, de outra forma, poderiam causar impactos negativos ao meio ambiente. (Passaglia; Santos, 2023).

O Piauí tem se consolidado como um dos principais polos energéticos do Brasil, com destaque para as fontes solar e eólica, impulsionado por políticas públicas, investimentos estratégicos e de iniciativas. Durante a *Brazil Energy Conference*, apresentado em 2025 na cidade de Teresina, a Secretaria do Planejamento (SEPLAN) apresentou o “Mapa Geoelétrico do Piauí”, destacando áreas estratégicas para geração de energia renovável. A iniciativa reforça o papel do estado na construção de uma matriz energética sustentável. Além dessas fontes renováveis tradicionais, o estado também apresenta potencial energético a partir de aterros sanitários, com destaque para a geração de biogás, que pode ser convertido em energia elétrica, térmica ou biometano, ampliando a diversidade e sustentabilidade da matriz energética piauiense (Piauí, 2025).

De acordo com Silva (2023), foram coletados na zona urbana do Município de Teresina em 2018, o total de 206.897,64 toneladas de resíduos Sólidos Domiciliares (RSD), resultando em uma média mensal de 17.241,47 toneladas. No agregado com os demais Resíduos Sólidos Urbanos, estes valores alcançam 436.853,58 toneladas e 36.404,47 toneladas por mês (Teresina, 2021). Esses dados reforçam o significativo potencial de aproveitamento energético dos gases provenientes do aterro sanitário de Teresina, os quais podem ser convertidos em eletricidade ou calor, contribuindo para a sustentabilidade da matriz energética no estado do Piauí (Silva, 2024).

Diante desse cenário, esta pesquisa ganha relevância social e ambiental ao abordar o potencial de aproveitamento energético dos resíduos sólidos domiciliares do Aterro Sanitário Municipal de Teresina, contribuindo para a agenda climática brasileira. O estudo propõe uma alternativa viável de geração de energia elétrica a partir da fração orgânica dos resíduos domiciliares, utilizando o modelo do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), metodologia reconhecida internacionalmente por sua credibilidade, baseada em rigor científico e participação de especialistas multidisciplinares. Espera-se que o grande volume de resíduos sólidos domiciliares gerados em Teresina, possa ser aproveitado para a produção de bioenergia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Estimar o potencial de geração de bioenergia a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares depositados no Aterro Sanitário Municipal de Teresina (PI), utilizando como base metodológica as diretrizes do Painel intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

1.1.2 Específicos

- Analisar a gravimetria dos resíduos sólidos domiciliares do aterro municipal de Teresina (PI);
- Avaliar o crescimento populacional de Teresina (PI), utilizando quatro métodos matemáticos: aritmético, geométrico, logístico e método com taxa decrescente de crescimento;
- Estimar a geração de resíduos sólidos domiciliares de Teresina (PI) em relação ao crescimento populacional;
- Calcular a estimativa de geração de metano dos resíduos sólidos domiciliares do aterro municipal de Teresina (PI), utilizando um modelo de cinética de primeira ordem (IPCC, 2000; 2006);
- Determinar o potencial energético dos resíduos sólidos domiciliares no município de Teresina (PI).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CRESCIMENTO POPULACIONAL NO BRASIL

No Brasil, entre 2000 e 2010, o aumento populacional revela disparidades notáveis entre as diferentes Unidades da Federação. A taxa média geométrica apresentou um crescimento anual de 1,17%, porém, quando é realizada uma análise individual dos estados, surgem variantes significativas, por exemplo os estados do Amapá e Roraima destacam-se com 3,45% e 3,34%, respectivamente. Possivelmente, esses dados estão relacionados a fatores como migração, políticas públicas específicas ou características socioeconômicas distintas. Em contrapartida, Rio Grande do Sul e Bahia apresentam as menores taxas médias de crescimento anual, registrando 0,49% e 0,69%, respectivamente. Esse comportamento de desaceleração demográfica pode estar associado ao envelhecimento da população, migração para outras regiões ou mudanças econômicas, além das características socioeconômicas e culturais presentes em cada estado (Tavares; Neto, 2020).

De acordo com o novo Censo de 2022, a população brasileira chegou a 203.062.512 habitantes em 1º de agosto de 2022. Em relação ao Censo de 2010, que foi de 190.755.799, podemos notar que a população cresceu 6,5% entre os anos de 2010 até 2022, e esse aumento percentual representa 12.306.713 milhões de pessoas.

2.1.1 Crescimento Populacional de Teresina-PI

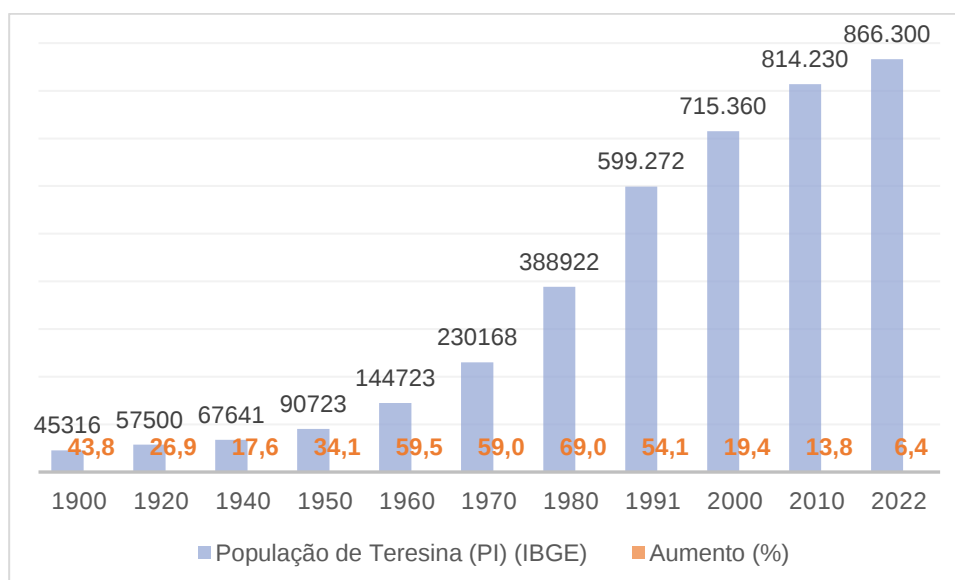
De acordo com Cruz, Espindola e Carneiro (2016), entre os anos de 1970 e 1991, Teresina experimentou um notável aumento em sua população, com uma taxa média de crescimento anual de 5,50%. Essa expansão demográfica é claramente evidenciada pela análise dos Censos Demográficos do IBGE entre 1980 e 2010. Em 1980, a população da cidade não atingia os 400.000 habitantes, mas em 2010, esse número cresceu substancialmente, chegando a 814.230 habitantes. Desde então, Teresina tornou-se um ponto central para os processos migratórios na região.

O processo de crescimento populacional do município de Teresina teve início nos anos 50 e intensificou-se nas décadas seguintes, apoiado pela localização e pelos investimentos públicos em infraestrutura que ocorreram no mesmo período (IBGE, 2010).

O *boom* populacional de Teresina ocorreu principalmente a partir da década de 50, período das grandes rodovias no Piauí. Em quase 60 anos, a capital saiu dos 90 mil para quase 900.000 habitantes atuais. Tal fato é uma das marcas da centralização dos serviços do estado na capital, que levou à multiplicação das vilas e favelas na periferia do município. Uma das curiosidades relacionadas a esse período é que Teresina possui hoje a segunda maior favela originada a partir de uma invasão de terras em toda a América Latina, a Vila irmã Dulce, local onde somente 8% da população local tem acesso à água potável e 90% sobrevive com meio salário mínimo por mês (IBGE, 2010).

Segundo o Censo do IBGE (2022), a população do estado do Piauí é de 3.269.200 habitantes, o que representa um aumento de 4,81% quando comparado ao censo anterior. Já a população da cidade de Teresina (PI) chegou a 866.300 pessoas, o que representa um aumento de 6,39% em comparação com o censo de 2010. No ranking de população dos municípios, Teresina está na 1ª colocação no estado, na 6ª colocação na região Nordeste e na 19ª colocação no Brasil. A Figura 1 apresenta a evolução do crescimento populacional de Teresina entre 1900 e 2022 segundo dados do IBGE (1900 a 2022).

Figura 1 - Gráfico da evolução populacional de Teresina (Censo IBGE).



Fonte: Autora, adaptado de IBGE (1900-2022).

Paralelo ao crescimento populacional, a produção dos resíduos sólidos nos centros urbanos decorre das atividades econômicas industriais, comerciais e domiciliares. Os resíduos domiciliares, em maior volume no espaço urbano, são formados

por restos sólidos gerados nas residências, apresentando materiais orgânicos e ainda componentes como embalagens plásticas, latas, vidros, entre outros. Os resíduos devem ter a sua disposição final em espaços organizados, especificamente para este fim, a partir de sua natureza e considerando a legislação pertinente, o que nem sempre ocorre (Alcântara; Iwata; Baptista, 2022).

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

2.2.1 Conceito e classificação

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), define-se resíduo sólido como resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Ainda de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), aplica-se a seguinte classificação de resíduos sólidos:

- **Classe I** – Perigosos: são aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;
- **Classe II** – Não perigosos: são considerados não perigosos, os Resíduos Não Inertes e Inertes;
- **Classe II A** – Não Inertes: São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos classe I – Perigosos – ou Classe II B – Inertes;
- **Classe II B** – Inertes: são aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10007, e submetidos a um contato estático

ou dinâmico com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização segundo a norma NBR 10006, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores nos padrões de potabilidade da água, conforme a nº 8 (Anexo H da NBR 10004), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. O Quadro 1 mostra a classificação dos resíduos sólidos quanto à origem (PNRS, 2010).

Quadro 01 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem

CLASSES	DESCRIÇÃO
Resíduos Domiciliares	Os originários de atividades domésticas em residências urbanas.
Resíduos de Limpeza Urbana	Os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.
Resíduos Sólidos Urbanos	Refere-se aos resíduos domiciliares e de limpeza urbana.
Resíduos de Estabelecimentos Comerciais	Os originários de atividades de estabelecimentos comerciais.
Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento	Os originários nessas atividades, exceto os resíduos sólidos urbanos
Resíduos Industriais	Os gerados nos processos produtivos e instalações industriais.
Resíduos de Serviços de Saúde	Os gerados nos serviços de saúde.
Resíduos da Construção Civil	Os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.
Resíduos Agrossilvopastoris	Os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades.
Resíduos de Serviços de Transportes	Os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira.
Resíduos de mineração	Os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

Fonte: PRNS (2010).

2.2.2 Geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil

De acordo com o IBGE (2022), 61% da população brasileira (124,1 milhões de pessoas) vive em concentrações urbanas. Essas concentrações urbanas podem ser formadas por um município ou por um conjunto de municípios integrados entre si, funcionando como uma única cidade. Comparando os dados do Censo 2010 com o de 2022, a população que vivia em concentrações urbanas aumentou em 9,2 milhões de pessoas, um crescimento bastante expressivo.

O fenômeno do consumismo, marcado pela busca incessante por bens de consumo e serviços, tem desempenhado um papel proeminente no acelerado crescimento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em âmbito mundial. Em uma sociedade cada vez mais influenciada por uma cultura de "comprar e descartar", a produção de resíduos tem aumentado de forma alarmante, trazendo consigo uma série de desafios ambientais, sociais e de saúde pública (Oliveira; Medeiros, 2019).

Dessa forma, a acumulação de resíduos sólidos tornou-se mais notória com o surgimento da industrialização e da urbanização. O crescimento demográfico provocou um aumento na procura por produtos e, conseqüentemente, pela extração de recursos naturais para a confecção destes. O uso desses materiais, que frequentemente não são reintegrados à natureza, resultam em resíduos sólidos dispostos de forma inadequada (Planares, 2022).

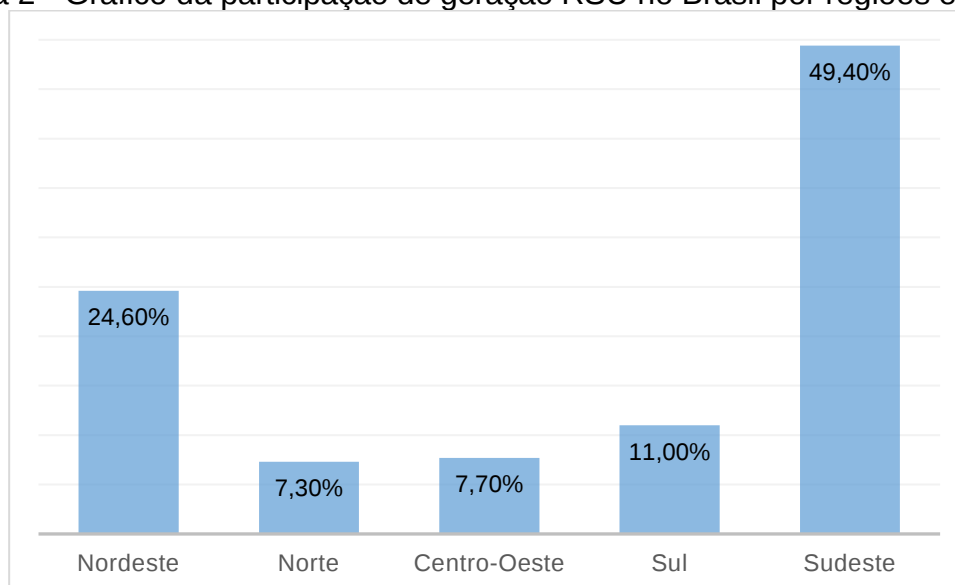
Conforme estabelecido no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2020), orquestrado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), a produção de RSU no biênio 2017-2018 alcançou o patamar de 79 milhões de toneladas, registrando um acréscimo de 1% em relação ao ano precedente. A emissão de detritos por indivíduo atingiu 1,039 kg/hab./dia, traduzindo um incremento de 0,39% comparado ao ciclo anterior.

De acordo com os dados da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2023), a geração de RSU no Brasil durante o ano de 2022 foi em média de 1,04 kg/hab./dia. Aplicando esse valor à população brasileira divulgada pelo Censo Demográfico 2022, estima-se que aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU foram geradas no país em 2022. Isso corresponde a mais de 211 mil toneladas de resíduos gerados por dia, ou cerca de 380 kg/habitante/ano. Esse resultado reflete diretamente a diminuição do poder de compra da população como um todo, decorrente do aumento das taxas de desemprego observadas nos estados, ou ainda, pode ser explicada por uma mudança nos hábitos de consumo advinda do

fim do isolamento social.

Regionalmente, o Sudeste apresenta a maior geração de RSU per capita, com cerca de 449 kg gerados por habitante em 2022. Na outra ponta encontra-se a região Sul, com uma geração anual de 284 kg de RSU por habitante. O Sudeste também é responsável pela geração de 104 mil toneladas diárias de RSU, o que representa aproximadamente 50% da geração nacional. Por outro lado, a região que menos contribui para o total nacional é a Norte, responsável pela geração de 15 mil toneladas diárias, o que equivale a 7,3% dos RSU do país. Comparando a geração de resíduos no Brasil entre 2021 e 2022, observa-se uma redução de 2% na geração de RSU per capita (ABREMA, 2023). A Figura 2 representa a participação de geração de RSU no Brasil por regiões em 2022.

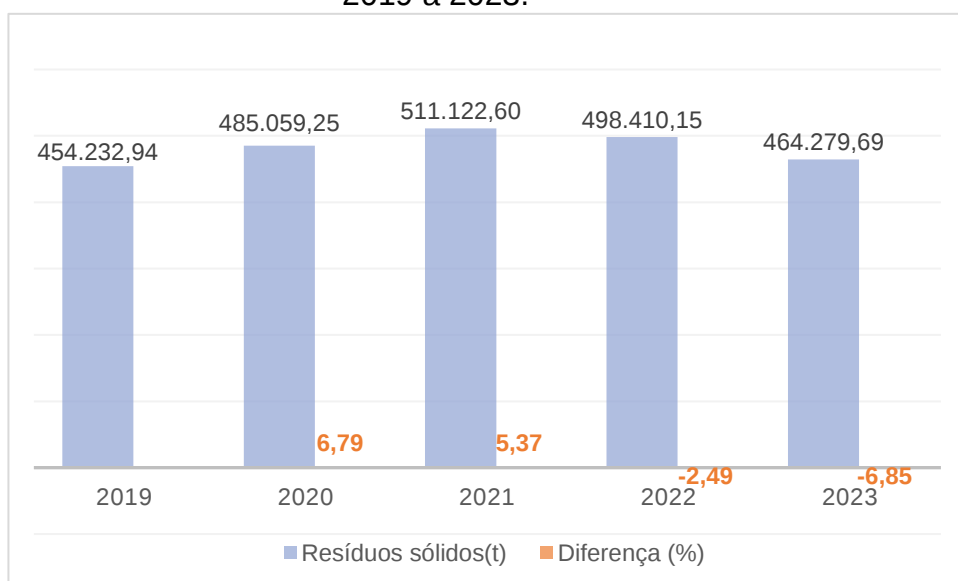
Figura 2 - Gráfico da participação de geração RSU no Brasil por regiões em 2022



Fonte: Autora, adaptado de ABREMA (2023).

De acordo com os dados da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEMDUH, 2023), Teresina foi responsável pela geração de 464.279,69 toneladas de Resíduos Sólidos (RS) no ano de 2023, apresentando uma queda de 6,85% na geração quando comparada com a geração de 2022. A média anual de RS de Teresina para o período de 2019 a 2023 é de 482.620,93 toneladas. A figura 3 mostra a geração anual de resíduos sólidos de Teresina para o período citado.

Figura 3 - Gráfico da geração anual de RS em Teresina (PI) de 2019 a 2023.



Fonte: Autora, adaptado de SEMDUH (2023).

De 2019 a 2023, Teresina gerou em média 191.692,19 toneladas de Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) por ano, e o valor médio da geração per capita de RSD da cidade durante o ano de 2022 foi de 0,60 kg/hab./dia (SEMDUH, 2023).

2.3 GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

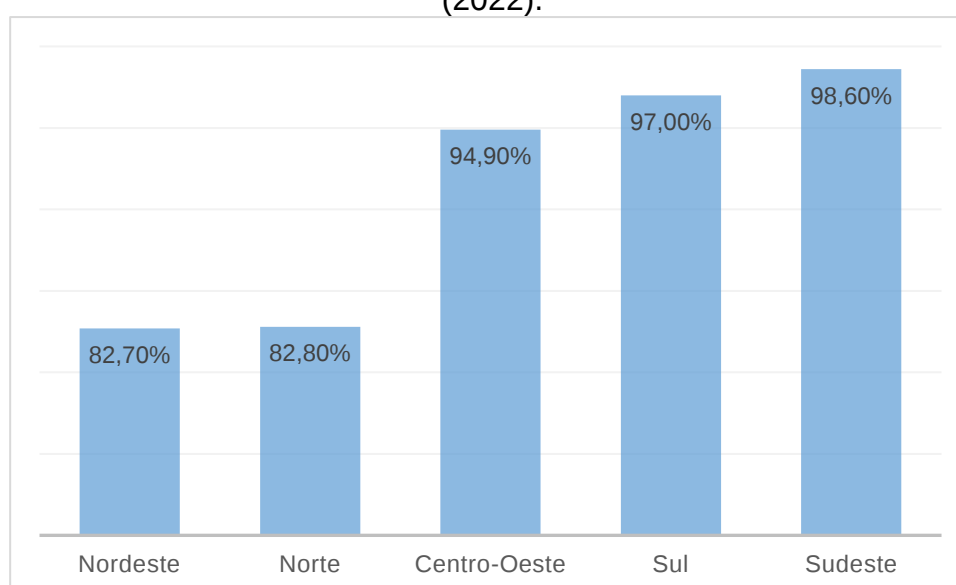
Segundo Chaves, Siman e Sena (2020) a gestão adequada dos resíduos sólidos representa um desafio de grande importância para as cidades brasileiras. Conforme as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), uma etapa essencial nesse processo de aprimoramento é a formulação do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.

Segundo Szigethy (2021) cerca de 90% das tecnologias existentes no mundo para a construção de aterros estão disponíveis no Brasil, mas os custos de implantação continuam altos para a maior parte dos municípios do país. “Do ponto de vista da engenharia, construir um aterro é algo relativamente simples, consolidado há décadas, mas falta gestão integrada das ações”, diz, apontando que a coleta seletiva de resíduos e a destinação desses materiais para reciclagem deveria envolver efetivamente os fabricantes dos produtos. “É preciso pensar nas ferramentas de gestão para diminuir a geração de resíduos e, conseqüentemente, o volume destinado aos aterros”.

2.3.1 Coleta e disposição final dos resíduos sólidos urbanos

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) determina que, após a submissão dos RSU aos tratamentos e destinações disponíveis, os resíduos restantes, ou rejeitos, devam ser enviados para uma disposição final ambientalmente adequada. Essa disposição final deve observar normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar impactos ambientais adversos. A Figura 4 apresenta o índice de cobertura de coleta dos resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2023 por regiões.

Figura 4 - Gráfico do Índice de cobertura de coleta de RSU no Brasil e regiões (%) (2022).



Fonte: Autora, adaptado de ABREMA (2023).

De acordo com ABREMA (2023), no Brasil estima-se que 61,1% dos RSU coletados em 2022 foram encaminhados para aterros sanitários, correspondendo a 43,8 milhões de toneladas de resíduos. O Sudeste e o Sul enviaram mais de 70% dos RSU coletados para aterros sanitários, apresentando índices melhores que a média nacional. Das outras regiões, todas com desempenho abaixo da média nacional, Norte e Nordeste, enviaram somente 37% dos resíduos coletados para uma destinação final ambientalmente adequada. Áreas de disposição inadequada receberam cerca de 38,9% do total de resíduos coletados em 2022 no Brasil e estão presentes em todas as regiões do país. A Tabela 1 representa as informações sobre a disposição final adequada versus inadequada dos resíduos sólidos urbanos no Brasil por regiões (t/ano e %) em 2022 segundo a ABREMA (2023).

Tabela 1 - Disposição final de RSU no Brasil e regiões, por tipo de destinação (t/ano)

REGIÃO	DISPOSIÇÃO ADEQUADA		DISPOSIÇÃO INADEQUADA	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.695.017	36,6%	2.939.546	63,4%
Nordeste	5.844.347	37,3%	9.822.541	62,7%
Centro-Oeste	2.453.280	43,6%	3.175.017	56,4%
Sudeste	27.916.327	74,3%	9.636.432	25,7%
Sul	5.903.246	71,6%	2.344.088	28,4%
Brasil	43.812.217	61,1%	27.917.624	38,9%

Fonte: Adaptado de ABREMA (2023).

A disposição final de resíduos sólidos no Brasil pode ser caracterizada de três formas: lixões; aterros controlados; e os aterros sanitários. Os lixões não possuem nenhum cuidado com o meio ambiente, os resíduos são dispostos diretamente no solo, ficando a céu aberto, atraindo insetos, animais e pessoas que procuram ali uma forma de renda ou mesmo de alimentação (Silva *et al.*, 2020). O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) informa sobre as metas de eliminação e recuperação desses espaços de recebimento de resíduos (Brasil, 2022).

Os Aterros Controlados procuram minimizar os impactos causados pelos resíduos e apresentam algumas categorias de controle para evitar a poluição, mas esses ainda continuam dispostos no solo sem tratamento ou separação, pois ainda há presença de alta contaminação, seja do ar, do solo, das águas (subterrâneas e superficiais), e suas características negativas são semelhantes às dos lixões (Silva *et al.*, 2020).

De acordo com ABREMA (2023), a instalação que se enquadra nessa definição de disposição final é o aterro sanitário, uma obra de engenharia que inclui impermeabilização de base, coleta e aproveitamento ou queima de biogás, drenagem, coleta e tratamento de chorume, além de contar com monitoramento ambiental e geotécnico da área. Lixões, aterros controlados, valas, vazadouros e áreas similares não possuem essa proteção ambiental e são considerados ambientalmente inadequados para a disposição final de resíduos.

2.3.2 Aterros sanitários

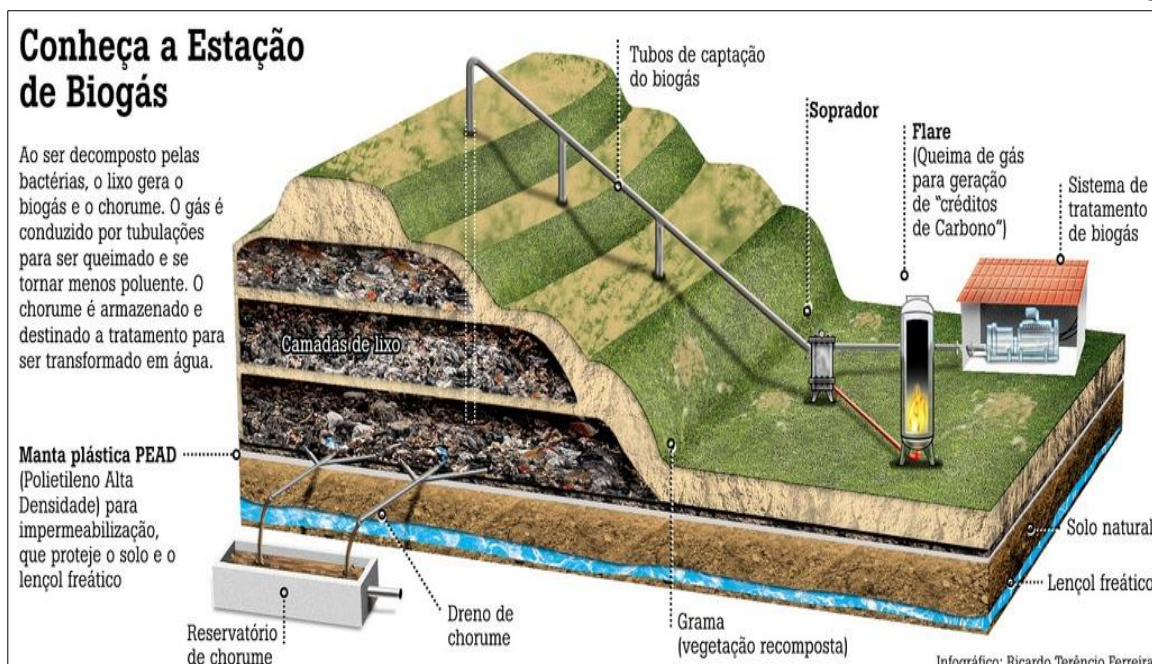
Os aterros sanitários são empreendimentos da engenharia civil, projetados com normas operacionais específicas e princípios da engenharia, incluindo sistemas de drenagem, impermeabilização, compactação, estabilidade de maciço e monitoramento ambiental, entre outros (Silva; Tagliaferro; Oliveira, 2021).

Os aterros sanitários são infraestruturas que seguem normas técnicas operacionais que protegem o ambiente de qualquer possível contaminação (ABNT, 2010). As normas técnicas aplicáveis aos aterros sanitários são:

- ABNT NBR 8419:1992 – Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (estabelece diretrizes para o projeto, localização e operação de aterros sanitários para minimizar impactos ambientais);
- ABNT NBR 13896:1997 – Critérios para Projeto, Implantação e Operação de Aterros de Resíduos Não Perigosos (há um foco na proteção ambiental e na segurança dos aterros para resíduos não perigosos);
- ABNT NBR 10004:2004 – Classificação dos Resíduos Sólidos (define a classificação dos resíduos quanto aos riscos ambientais e à saúde, essencial para determinar o tipo de aterro adequado para cada resíduo).
- ABNT NBR 10157:1987 – Aterros de Resíduos Perigosos (fixa critérios de segurança e operação para aterros que recebem resíduos perigosos, com foco na proteção de águas subterrâneas).
- ABNT NBR 12988:1993 – Determinação da Permeabilidade de Solos (essencial para avaliar a capacidade de impermeabilização dos solos utilizados nos aterros).

Aterro Sanitário é o local apropriado para o recebimento dos resíduos, uma vez que utiliza técnicas de impermeabilização do solo, compactação e cobertura diária, coleta e tratamento de gases, pois a concentração de resíduos gera gases tóxicos ao Meio Ambiente, bem como tratamento do chorume, líquido proveniente da decomposição da matéria orgânica misturada à água, entre outros procedimentos técnico-operacionais responsáveis por proteger o Meio Ambiente (ABNT, 1992). Na Figura 5 é apresentado o esquema de um aterro sanitário com as principais partes constituintes como orientam as normas da ABNT.

Figura 5 - Ilustração de um aterro sanitário com as principais partes constituintes.



Fonte: Vertown (2018).

2.3.3 Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos

Sancionada em agosto de 2010, registrando um marco regulatório para os resíduos sólidos após 19 anos de discussão, a Lei nº 12.305/2010, Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos (PNRS), trata da responsabilidade compartilhada com os geradores de resíduos na logística reversa, na qual se inclui a destinação que envolve o ambiente adequado para os rejeitos (Brasil, 2010).

Passados 14 anos da promulgação da PNRS, o Brasil ainda apresenta dificuldades na aplicação consistente da lei. Até 2021, 55,35% dos municípios brasileiros ainda não possuíam seus respectivos Planos de Gestão de Resíduos Sólidos (SI-NIR, 2023).

Em 2022 ocorreu a edição do Decreto nº 10.936/2022 com nova regulamentação para a PNRS e o Decreto nº 11.043/2022, que instituiu o Plano Nacional de Resíduos Sólido - PLANARES, cujas metas, com início em 2024 e fim de 2040, são: eliminação de lixões e aterros controlados até 2024; recuperação da fração orgânica por meio de sistemas de tratamento biológico; recuperação da fração seca dos recicláveis por processos de reciclagem e recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico (ABRELPE, 2022).

2.3.4 Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Teresina (PI)

O município de Teresina, capital do estado do Piauí, está localizado na mesorregião centro-norte, a 366 quilômetros do litoral, constituindo uma faixa de transição entre o semiárido nordestino e a região amazônica (Carcará; Silva; Moita Neto, 2019). O plano implantado pela cidade de Teresina possui como objetivo promover ações que possam colaborar com a preservação do meio ambiente e melhoria da qualidade de vida de toda a população da cidade (PMGIRS, 2018).

O município de Teresina conta com a coleta convencional dos resíduos, diariamente ou em dias alternados em seus diferentes bairros, abrangendo mais de 800.000 habitantes. Com o intuito de segregar os resíduos sólidos, a prefeitura de Teresina instituiu no município a coleta “porta-a-porta” em que são recolhidos resíduos recicláveis domiciliares e de empresas públicas e privadas, e criou os “Pontos de Entrega Voluntárias” que está instalada em alguns locais da cidade (GOMES *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2023). De acordo com a SEMDUH (20223), no ano de 2019 foram coletadas 1 mil toneladas de recicláveis em Teresina, havendo uma progressão em relação ao ano de 2018 que obteve 829 toneladas. Uma alternativa para a redução dos resíduos dispostos em lugares inadequados são os pontos de coletas seletivas existentes em Teresina. São 21 pontos de coleta espalhados na cidade conforme o site da Prefeitura em notícia veiculada em junho de 2022 (Teresina, 2022). São 21 pontos de Entrega Voluntária (PEV), com a finalidade de recolher resíduos que apresentam possibilidade de reciclagem ou reutilização. A Tabela 2 mostra a localização dos PEVs na cidade de Teresina.

Tabela 2 – Localização dos PEVs na cidade de Teresina (PI).

PEVS	REGIÃO	ENDEREÇO
------	--------	----------

PEV 1 Hiper Carvalho	Zona Norte	BR 343, Hiper Carvalho - Beira Rio
PEV 2 Praça Av. N. S. de Fátima	Zona Sul	Av. Nossa Senhora de Fátima, Igreja de Fátima
PEV 3 Morada do Sol	Zona Norte	Av. Dom Severino com Rua Jaime da Silveira - Morada do Sol
PEV 4 Mocambinho	Zona Norte	Praça da Telemar - Mocambinho
PEV 5 Praça da Vermelha	Centro	Praça da Vermelha, ao lado da Igreja N. S. de Lourdes - Vermelha
PEV 6 Bela Vista	Zona Sul	Praça da Igreja Católica do Bela Vista - Bela Vista
PEV 7 Encontro dos Rios	Zona Leste	Parque Encontro dos Rios - Poti Velho
PEV 8 Marechal Castelo Branco	Centro	Av. Marechal Castelo Branco - Ilhotas
PEV 9 Carvalho Supermercado	Zona Sul	Av. Barão de Gurguéia - Tabuleta
PEV 10 Praça das Violetas	Zona Leste	Avenida Dom Severino com Av. Homero Castelo Branco - Ininga
PEV 11 Praça do TER	Centro	Praça Edgar Nogueira, em frente ao TER - Cabral
PEV 12 Lagoas do Norte	Zona Norte	Av. Boa Esperança Pq. Lagoas do Norte - São Joaquim
PEV 13 Ponte Estaiada	Zona Leste	Av. Raul Lopes, próximo ao estacionamento da Ponte Estaiada - Fátima
PEV 14 Nações Unidas	Zona Sul	Praça Honorato Julião - Nossa Senhora das Graças
PEV 15 Praça do Saci	Zona Sudeste	Praça da Igreja Católica do Saci
PEV 16 I Praça Cultural do Dirceu I	Zona Sul	Av. José Francisco de Almeida Neto, próximo a Associação de Tecelagem Itararé
PEV 17 Praça N. S. da Imaculada Conceição	Centro	Praça Nossa Senhora da Imaculada Conceição - Morada Nova
PEV 18 Praça do Marquês	Centro	Rua Des. Pires de Castro, em frente ao clube do Marquês - Marquês
PEV 19 Praça da Igreja S. J. XXIII e São João Batista	Zona Leste	Rua Salomão Said, próximo ao Eldorado Club - São João
PEV 20 UFPI	Zona Leste	Estacionamento da Biblioteca, Campus Petrônio - Ininga
PEV 21 Estação Cidadania - Esporte	Zona Leste	Rua Dr. Sanatíel Vaz - Vale do Gavião

Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* (2023).

A participação da população no processo de coleta seletiva dependerá das informações sobre a existência desses pontos. Também ainda há pouco conhecimento sobre os PEVs que para receber resíduos exige a separação para depositá-los nos contêineres situados em alguns postos em Teresina identificados pela cor e tipo de material específico, a saber: vermelho – plástico; verde – vidro; azul – papel; amarelo – metais (Alcântara, 2022).

Portanto, Teresina desempenha um papel relevante ao buscar atingir as metas e seguir o cronograma do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos (PMGIRS). Ao fazê-lo, não apenas cumpre suas responsabilidades ambientais e legais, mas também promove um modelo de desenvolvimento urbano que valoriza a qualidade de vida, a saúde pública, a economia local e a preservação do meio ambiente. Isso demonstra que o compromisso com a sustentabilidade se reflete em ações concretas e transformadoras (Brasil, 2018).

2.3.5 Cidade de Teresina e suas características voltadas para o aumento da oferta de energia limpa

Nas últimas décadas, a busca e o desenvolvimento por fontes de energia renováveis foram impulsionados no mundo devido à preocupação constante com as mudanças climáticas por conta da dependência de combustíveis fósseis no cenário mundial. Nesse contexto, o Brasil se comprometeu com a Convenção das Nações Unidas para Combates às Mudanças Climáticas, estabelecendo uma meta de reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 38% até 2030, tomando como referência o nível de 2005. Para alcançar esse objetivo, o país planeja implementar uma série de medidas, políticas e normativas, visando aumentar a participação de bioenergia na matriz energética, expandir a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis como biomassa, energia solar e eólica, além de reduzir o desmatamento e as emissões provenientes do setor agropecuário (Brito; Santos Junior; Almeida, 2023).

Diante desse cenário, o estado do Piauí, localizado na região nordeste, apresenta características que o destacam como a grande riqueza de recursos naturais e uma vasta biodiversidade, combinadas com o grande desenvolvimento em atividades relacionadas à agricultura e à pecuária, conforme registrado pelo Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Apesar disso, a biomassa apresenta pouca influência na matriz energética piauiense, uma vez que a maior parte da capacidade instalada no estado provém de outras fontes e o estado ainda não dispõe de energia gerada por biogás proveniente de aterros sanitários. De acordo com o banco de dados do Sistema de Informações de Geração da (ANEEL), o Piauí se destaca pela geração de fontes como: hidráulica, eólica, solar,

termoelétrica, bagaço de cana e óleo diesel, onde 77% corresponde à geração através de energia eólica, 17% energia solar, 5% energia hidráulica, e termelétricas, bagaço de cana e óleo diesel representam 1% (Brito; Santos Júnior; Almeida, 2023).

A diversificação da matriz energética no estado do Piauí, que teve como ponto de inflexão o Programa de Incentivo ao Desenvolvimento de Energias Limpas – PROPIDEL (Piauí, 2016) — instituído por meio da Lei Estadual nº 6.901/2016 — vem se implementando paulatinamente, com a utilização dos sistemas fotovoltaico (PV) e eólico e, para sua organização e efetividade, deve respeitar um planejamento energético estratégico, que advém de diretrizes federais do Ministério de Minas e Energia, com adequação às contingências locais.

A Tabela 3 demonstra a participação percentual das fontes energéticas renováveis na geração de energia elétrica no Piauí em 2023, elaborada a partir dos dados obtidos da Empresa de Pesquisa Energética em 2023 (CEPRO, 2023).

Tabela 3 - Participação das Fontes Energéticas Renováveis na Geração de Energia Elétrica no Piauí (%).

Ano	Eólica	Solar	Biomassa	Hidrelétrica	Total de Energia Renovável Gerada
2011	6,59	-	3,97	89,4	99,96
2012	9,86	-	3,71	79,13	92,70
2013	8,68	-	4,02	72,44	85,14
2014	28,18	-	2,99	58,89	90,06
2015	62,19	-	2	34,75	98,94
2016	86,56	-	0,78	12,63	99,97
2017	87,08	3,36	0,53	9,00	99,97
2018	80,98	9,59	0,83	8,58	99,98
2019	83,98	8,94	0,77	6,70	99,99
2020	77,75	15,03	0,75	6,46	99,99
2021	77,43	17,18	0,47	4,91	99,99
2022	75,52	19,94	0,35	4,18	99,99

Fonte: EPE (2023). Elaboração: Superintendência CEPRO (2023).

Os dados apresentados na Tabela 3 evidenciam um expressivo crescimento da participação das fontes de energia renovável não convencional na matriz energética do estado do Piauí ao longo da série histórica apresentada. A energia eólica, por exemplo, aumentou de 6,59% no início da série para 87,08% em 2017. A energia solar também registrou um crescimento notável, passando de 3,36% em 2017 para 19,94% em 2022, representando um aumento de 16,58 pontos percentuais. Em contrapartida, a participação da energia proveniente da biomassa apresentou redução de 3,97%, no início da série, para apenas 0,35% em 2022, possivelmente devido ao avanço das fontes eólica e solar. A energia proveniente da Usina Hidrelétrica de Boa

Esperança, localizada em Guadalupe-PI, que respondeu por 89,40% da produção de energia elétrica em 2011, teve sua participação reduzida para 4,18% em 2022. Portanto, pode-se inferir a partir dos dados apresentados, que 95,81% da eletricidade produzida no Estado, em 2022, é proveniente de fontes de energia renovável não convencional, enquanto 4,18% é gerada a partir de fontes renováveis convencionais (CEPRO, 2023).

2.4 BIOGÁS

A descoberta do biogás remonta a 1667, quando Thomas Shirley, durante uma visita a um pântano no Reino Unido, percebeu que a decomposição da matéria orgânica resultava na formação de um gás. Contudo, apenas em 1776, Alessandro Volta identificou a presença de metano em sua composição. No século XX, o período pós-guerra foi marcado por uma considerável crise financeira e energética na Europa, criando um cenário propício para investimentos em pesquisas relacionadas a fontes alternativas de energia. Dessa conjuntura, surgiram investimentos na área de biocombustíveis, consolidando-os como referências técnicas na produção de biogás e biometano (Carvalho; Lyra e Costa, 2019).

Conforme a NBR 8419 (1992), gás bioquímico (GBQ), gás de aterro ou biogás, é definido como “mistura de gases gerados pela ação biológica na matéria orgânica em condições anaeróbias, composta essencialmente por dióxido de carbono e metano em composições variáveis”.

O gás de aterro, ou biogás, resulta da digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos depositados nos aterros sanitários. O processo de formação do gás de aterro, compreende uma sequência de reações químicas e biológicas complexas que levam à formação de CH₄ (40-65%) e CO₂ (35-55%) com pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio (H₂S, 0,1-3%), umidade, e outros vestígios de contaminantes dependendo da matéria-prima (Kapoor *et al.*, 2020)

Também considerado como um biocombustível, o biogás apresenta-se como eficiente no momento que gera energia tanto quanto outras fontes, apresentando características renováveis, preservando outras fontes, principalmente as fósseis (Nepomoceno; Pontarolo, 2022).

As fontes de produção do biogás são diversificadas e se referem principalmente aos diferentes tipos de matéria orgânica que podem ser usados no processo

de digestão anaeróbia. A decomposição anaeróbica ocorre quando a matéria orgânica é decomposta na ausência de oxigênio por bactérias, liberando o biogás como produto. A Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU) é caracterizada por conter resíduos orgânicos domiciliares, considerada facilmente degradável por ser constituída de restos de alimentos, podas e outros putrescíveis (Lima, 2016; Zago; Barros, 2019).

O biogás pode ser produzido a partir de diferentes tipos de matérias primas, dentre as quais destacam-se os resíduos alimentares, resíduos agrícolas, estrume animal, resíduos de aves, resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais, resíduos florestais, microalgas e culturas energéticas (Zabed *et al.*, 2020).

Segundo Freitas *et al.* (2019), a tecnologia de produção do biogás não recebeu a importância merecida durante muito tempo (1970-2010), tornando essa alternativa energética ainda principiante no Brasil. E somente a partir de 2010 o biogás começou a ser utilizado na geração de energia, passando a ser considerado um ativo energético e não mais um passivo ambiental.

A produção do biogás, por exemplo, figura dentre as tecnologias alternativas de geração de energia: esse biocombustível é considerado um recurso, que além de gerar eletricidade, calor e energia, também proporciona uma contribuição ecológica (Giwa *et al.* 2020). O biogás é uma fonte de energia ambientalmente vantajosa capaz de gerar energia limpa através da decomposição de substratos orgânicos que emitiriam compostos tóxicos, como o metano, prejudiciais ao meio ambiente (CBIE, 2020).

2.4.1 Biogás de resíduos sólidos de aterro sanitário

A gestão de resíduos sólidos é um desafio global que envolve a busca por soluções sustentáveis e eficientes para minimizar o impacto ambiental e aproveitar recursos valiosos. Neste contexto, a recuperação e aproveitamento do biogás gerado nos aterros sanitários representam uma alternativa que está totalmente alinhada com a necessidade de integração entre as pautas ambientais e energéticas, uma vez que se trata de uma fonte de energia com grandes benefícios ambientais, como a redução de fugas dos GEE e a maximização do índice de conversão do metano, contabilizado no cálculo para emissão de crédito de carbono, além de reduzir a necessidade de combustíveis fósseis, que poderia ser utilizado para ofertar a

mesma quantidade de energia que o biogás (Santos, 2022).

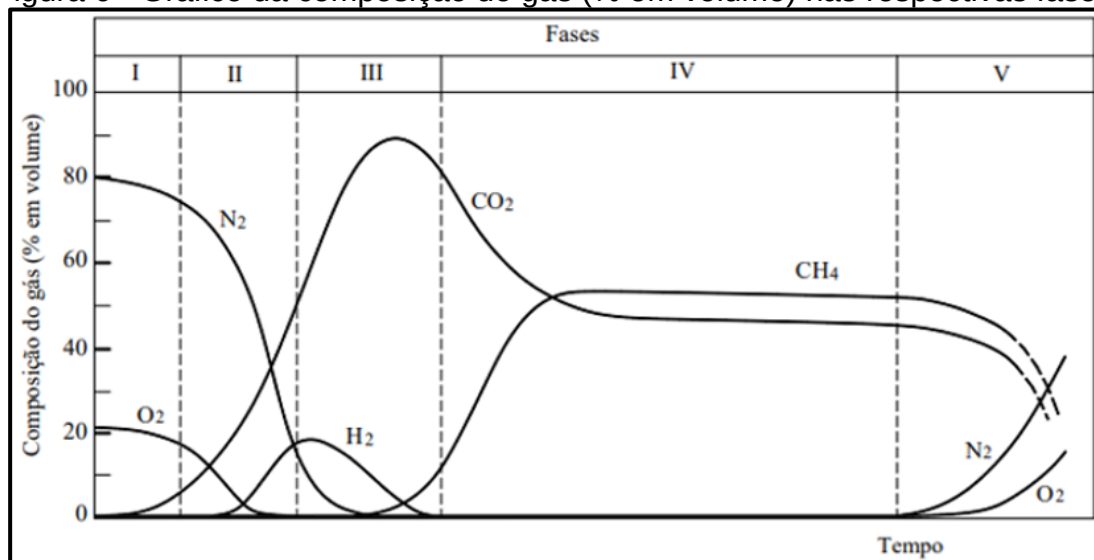
O relatório emitido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, Climate Change and Land (Mudanças Climáticas e Terra), sobre o aquecimento global, citou que atualmente 25-30% do total de alimentos produzidos no mundo é perdido ou desperdiçado e que durante os anos de 2010-2016 somente a perda e o desperdício global de alimentos contribuíram com 8-10% do total de emissões antrópicas de gases de efeito estufa (IPCC, 2019).

A composição do biogás torna-o uma fonte promissora de energia, capaz de reduzir os impactos ambientais associados a aterros sanitários e contribuir para a produção sustentável de eletricidade ou calor. No entanto, embora a utilização de aterros sanitários energéticos corrobore com a sustentabilidade ambiental e contribua para avançar na agenda climática mundial, ainda há um grande desperdício do potencial energético proveniente dos RSU. Sob essa ótica, é imprescindível destacar que, a partir dos dados supracitados, menos de 10% dos resíduos dispostos em aterros sanitários no Brasil apresentam uma destinação para fins energéticos, o que torna a fonte proveniente de resíduos sólidos urbanos na matriz energética bastante incipiente (ABRELPE, 2022).

De acordo com Rocha (2022), um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado como um reator biológico onde as principais entradas são os resíduos e a água e as principais saídas são os gases e o chorume. A decomposição da matéria orgânica ocorre por dois processos, o primeiro processo é de decomposição aeróbia e ocorre normalmente no período de deposição do resíduo. Após este período, a redução do O_2 presente nos resíduos dá origem ao processo de decomposição anaeróbia.

De acordo com Tchobanoglous e Kreith (2002, p. 678-680), a digestão anaeróbia dos resíduos sólidos em Aterros acontece em uma sequência de até cinco fases. Essas fases são ilustradas abaixo conforme a Figura 6 e descritas logo a seguir.

Figura 6 - Gráfico da composição do gás (% em volume) nas respectivas fases.



Fonte: Guerreiro (2020)

- **Fase I:** Ajuste inicial. Fase em que os resíduos são depositados no aterro e sua fração biodegradável sofre a decomposição biológica em condições aeróbias devido à quantidade de ar que é enterrado juntamente com o resíduo.
- **Fase II:** Transição. Fase em que decrescem os níveis de oxigênio e começa a fase anaeróbia. Nesta fase o pH do chorume começa a cair devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de CO₂ dentro do aterro.
- **Fase III:** Ácida. Fase que antecede a formação de metano, em que as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e pequenas quantidades de gás hidrogênio. As demandas bioquímicas (DBO) e química de oxigênio (DQO) e a condutividade do chorume aumentam significativamente durante esta fase devido à dissolução de ácidos orgânicos no chorume. O pH do chorume, se este é formado, é muito baixo (4 – 5), devido à presença de ácidos orgânicos e pelas elevadas concentrações de CO₂ dentro do aterro.
- **Fase IV:** Metanogênica: Nesta fase de fermentação do metano predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH₄ e CO₂. A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH do chorume nesta fase ascenderá a valores na faixa de 6,8 a 8,0.

- **Fase V: Maturação.** Esta fase ocorre após grande quantidade do material ter sido biodegradado e convertido em CH_4 e CO_2 durante a fase metanogênica. Como a umidade continua migrando pela massa de lixo, porções de material biodegradável até então não disponíveis acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Dependendo das medidas no fechamento do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no gás do aterro.

A duração de cada etapa pode variar, dependendo da quantidade de nutrientes, da quantidade de água presente na massa de resíduos e principalmente da compactação dada à camada de resíduos. Segundo Augenstein e Pacey (1991), a duração de cada etapa está descrita no Quadro 2.

Quadro 2 – Duração de cada fase na decomposição de resíduos.

FASES	INTERVALO DE DURAÇÃO DAS FASES
I - Ajuste inicial	Algumas horas a 1 semana
II - Transição	1 mês a 6 meses
III - Ácida	3 meses a 3 anos
IV - Metanogênica	De 8 anos a 40 anos
V - Maturação	1 ano a mais de 40 anos

Fonte: Augenstein e Pacey (1991).

2.4.2 Fatores que influenciam a formação do biogás

A geração do biogás em aterros sanitários é afetada por diversas variáveis, entre as quais podem ser citadas: a natureza dos resíduos, umidade presente, estado físico (tamanho das partículas), pH, temperatura, nutrientes, taxa de oxigenação, idade do resíduo. Estes fatores são os responsáveis pelo desenvolvimento do processo de digestão anaeróbia de substratos orgânicos (Bidone; Povinelle, 1999; Brito Filho, 2005; Alcântara, 2007; Fu *et al.*, 2021; Boarati; Castro, 2023). No Quadro 3 são apresentados os fatores que influenciam a taxa de geração de biogás, com base em dados compilados da literatura.

Quadro 3 - Fatores que influenciam a geração de biogás nos aterros.

FATOR	DESCRIÇÃO E CORRELAÇÃO
Composição dos resíduos	Quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de CH ₄ .
Tamanho das partículas	Quanto menor o tamanho das partículas em decomposição, maior a taxa de produção de biogás, devido a maior área de contato superficial para as reações químicas de decomposição, favorecendo sua velocidade.
Idade dos resíduos	Resíduos mais recentes elevam a possibilidade de produção de gás, sendo que os resíduos mais antigos já passaram pelos estágios de decomposição, estando, portanto, estabilizados.
pH	A faixa ideal de pH é em torno de 6,7 a 7,5, cujo intervalo é mais adequado para bactérias anaeróbicas.
Temperatura	As bactérias termofílicas favorecem a taxa de produção de gás e a temperatura ótima é entre 45°C e 65°C, mas a maior parte dos aterros ocorre na faixa das bactérias mesofílicas, cuja faixa ótima é entre 30°C e 35°C.
Ambiente anaeróbio	A produção de CH ₄ é otimizada quando a matéria orgânica sofre decomposição em ambiente sem O ₂ , portanto, é importante a cobertura dos resíduos com solo argiloso, de modo a criar condições anaeróbicas nas camadas inferiores.
Umidade	A umidade é essencial à vida das bactérias decompositoras. Uma umidade alta (60 a 90 %) pode aumentar a geração dos gases.
Disponibilidade de nutrientes	Cada espécie de microrganismo envolvido na decomposição anaeróbia tem sua necessidade própria de vitaminas, micro e macro nutrientes para a estabilidade do processo de produção de biogás.

Fonte: Freire (2018); Ikeda (2018); Santos (2021).

2.4.3 Modelos de previsão de geração de Biogás de Aterro Sanitário

A escolha entre modelos de diferentes ordens na previsão da produção de gás em aterros sanitários é determinada pelas necessidades específicas e pela complexidade do cenário em questão (Majdinasab; Zhang; Yuan, 2017; Santos *et al.*, 2021). Modelos de ordem zero, que simplificam a taxa de geração de gás como constante no tempo, mostraram-se não confiáveis devido a erros relativamente altos em seus resultados. Por outro lado, a utilização de modelos de ordem superior, como os de segunda ordem, torna o procedimento de modelagem substancialmente mais complicado, e o acréscimo de precisão é insuficiente para justificar sua aplicação (Santos *et al.*, 2021). Portanto, o modelo de primeira ordem é o mais amplamente aplicado para estimar a produção de metano ao longo da vida de um aterro (Fallahizadeh *et al.*, 2019; Zavarise *et al.*, 2021).

Entre os modelos de cinética de primeira ordem, que preveem a emissão de metano, decrescente e exponencial ao longo do tempo, contido no biogás gerado por meio da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos RSU, estão: modelo IPCC de decaimento de primeira ordem (IPCC FOD); o modelo de gases de aterro

Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos e o modelo Biogás desenvolvido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), entre outros (Dornela, Nmod *et al*, 2021).

- **Modelo IPCC**

A modelo IPCC (em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), FOD (*First Order Decay*, decaimento de primeira ordem, em português) é uma metodologia para estimar as emissões de CH₄ em aterros que considera que o componente orgânico degradável (carbono orgânico degradável, DOC) na massa de resíduos decai lentamente ao longo do tempo, produzindo o CH₄ e o CO₂. Caso as condições sejam constantes, a taxa de produção de CH₄ depende apenas da quantidade de carbono restante nos resíduos. Consequentemente, as emissões de CH₄ de resíduos no aterro sanitário são mais altas nos primeiros anos após a deposição e depois diminuem gradualmente à medida que o carbono degradável é consumido pelas bactérias responsáveis pela decomposição (IPCC, 2006).

As vantagens do modelo FOD do IPCC são que ele estima valores similares aos encontrados na literatura, inclusive, por considerar a composição gravimétrica de resíduos, a aplicação dele é de baixo custo e permite a observação rápida de resultados. Além disso, ele é um modelo eficiente e é utilizado para o desenvolvimento de inventários de emissão, o que reduz as estimativas de geração de biogás de aterro (Dornela, Nmod *et al.*, 2021).

- **Modelo LandGEM**

O modelo LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*) trata-se de um *Software* desenvolvido em 2005 pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos da América (*United States Environmental Agency Protection* – USEPA). Este programa é uma extensão do Microsoft Excel, isto é, uma ferramenta automatizada, e é o mais utilizado nos Estados Unidos. Inclusive, possui um manual do usuário e um livro guia para o desenvolvimento de projetos de energia de gás de aterro (USEPA, 2023; Alexander, Burklin e Singleton, 2005).

O programa utiliza equações com taxa de decaimento de primeira ordem para calcular as estimativas de geração de metano e outros gases nos aterros sanitários,

permitindo assim, estimar o volume que será gerado em um determinado tempo (Dornela, Nmod *et al.*, 2021).

Este modelo, emprega parâmetros específicos, como a composição dos resíduos depositados no aterro e as condições ambientais locais, para calcular a quantidade de biogás gerado ao longo do tempo. Sua metodologia abrange fatores como a taxa de degradação dos resíduos orgânicos e as características do aterro, proporcionando uma previsão mais precisa da produção de biogás (Moraes; Bezerra; Rêgo, 2022).

- **Modelo CETESB**

A atuação da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) configura-se como um modelo exemplar no contexto brasileiro de gestão ambiental e desenvolvimento sustentável. O modelo adotado pela instituição abrange diversos setores, incluindo o monitoramento da qualidade do ar, da água e do solo, o licenciamento ambiental, a gestão de resíduos sólidos e perigosos, bem como a atuação em situações emergenciais relacionadas ao meio ambiente. O compromisso da CETESB é essencial para a promoção de práticas sustentáveis e para a garantia do cumprimento das normas e regulamentações ambientais. (PINÃS *et al.*, 2016).

A atuação da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) configura-se como um modelo exemplar no contexto brasileiro de gestão ambiental e desenvolvimento sustentável. O modelo adotado pela instituição abrange diversos setores, incluindo o monitoramento da qualidade do ar, da água e do solo, o licenciamento ambiental, a gestão de resíduos sólidos e perigosos, bem como a atuação em situações emergenciais relacionadas ao meio ambiente. O compromisso da CETESB é essencial para a promoção de práticas sustentáveis e para a garantia do cumprimento das normas e regulamentações ambientais. Modelo desenvolvido no Brasil, o *software* Biogás, geração e uso energético – aterros, versão 1.0, é um dos produtos de um convênio firmado entre a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA-SP) e o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), cujo objetivo foi elaborar manuais para a orientação do uso energético de biogás, publicados no Diário Oficial da União em 2001, e fomento da formação de centros para o desenvolvimento dessa atividade no país. O programa contempla aspectos das etapas de elaboração destes projetos até a sua implantação, e emprega a linguagem de computação Visual Basic que está

disponível para consulta no site da CETESB, juntamente com o CD-ROM, um manual do usuário e o software (CETESB, 2006).

Independente da ferramenta escolhida, a modelagem precisa da geração de metano em um aterro sanitário constitui um desafio, em razão das incertezas relacionadas aos fatores que a influenciam e às suas variações. Entre os elementos a serem definidos, destacam-se os parâmetros k (constante de decaimento) e L_0 (potencial de geração de metano) como as principais fontes de incerteza. Para auxiliar nesse processo, existem tabelas onde há sugestão de valores de referência conforme o clima, temperatura, umidade local e dos resíduos, entre outros que ajudam na hora de minimizar os erros (Majdinasab; Zhang; Yuan, 2017).

2.4.4 Potencial energético do biogás de aterros sanitários

A produção de energia elétrica a partir do biogás extraído em aterros sanitários está se tornando uma prática cada vez mais importante no contexto da transição para fontes de energia renováveis e sustentáveis em todo o mundo (Fernandes *et al.*, 2022).

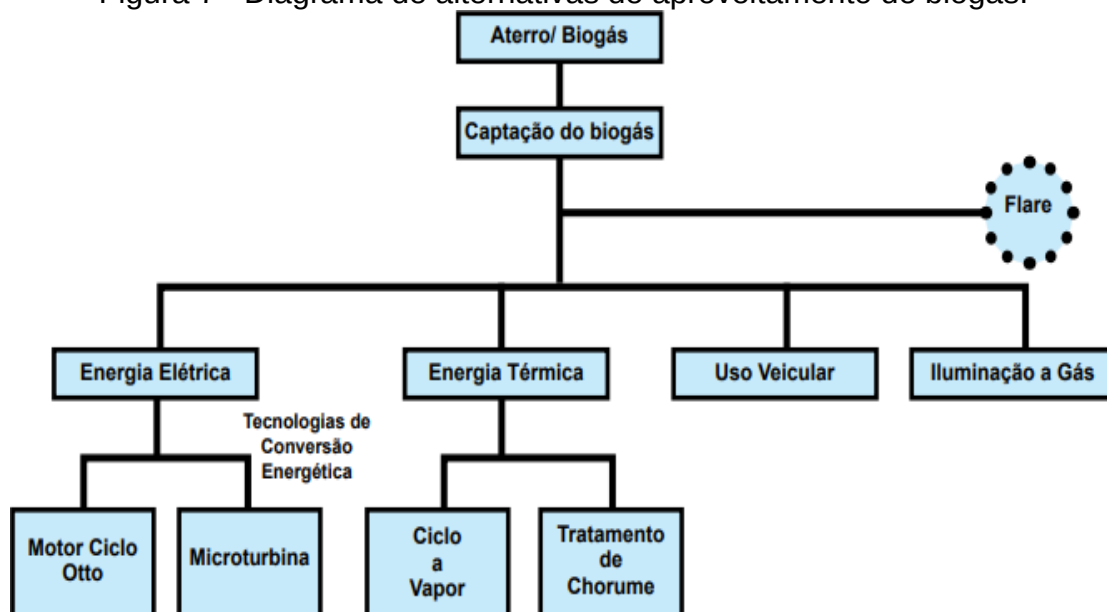
Os aterros sanitários vêm liderando o crescimento do setor de biogás do Brasil. Para a implantação dos projetos será necessário investimento e incentivo de políticas públicas específicas para o uso energético do biogás na produção de energia elétrica (Fernandes; Mariani, 2019).

No período compreendido entre 2010 e 2018, o mercado mundial de biogás obteve aumento acima de 90%. Entretanto, a indústria de biogás apresenta variação significativa em diferentes locais no cenário mundial em função do tipo de sistema empregado, que depende principalmente de diferentes ambientes, bem como demanda de energia e cadeia de suprimentos. As diferentes utilizações do biogás oferecem uma solução multifuncional para gerar a energia necessária nos setores industriais e sociais (Ababades *et al.*, 2022).

Independentemente do destino final do biogás, é fundamental projetar um sistema padronizado para sua coleta, tratamento e queima. Esse sistema deve incluir poços de coleta, condução adequada, tratamento e desumidificação de gás, compressor e um flare com queima controlada para maximizar a eficiência na combustão do metano. Esses sistemas não apenas evitam a liberação de metano, um potente gás de efeito estufa, mas também possibilitam o aproveitamento do biogás como

uma fonte de energia limpa e renovável (Silva *et al.*, 2020). O Diagrama de alternativas de aproveitamento do biogás está representado pela Figura 7.

Figura 7 - Diagrama de alternativas de aproveitamento de biogás.



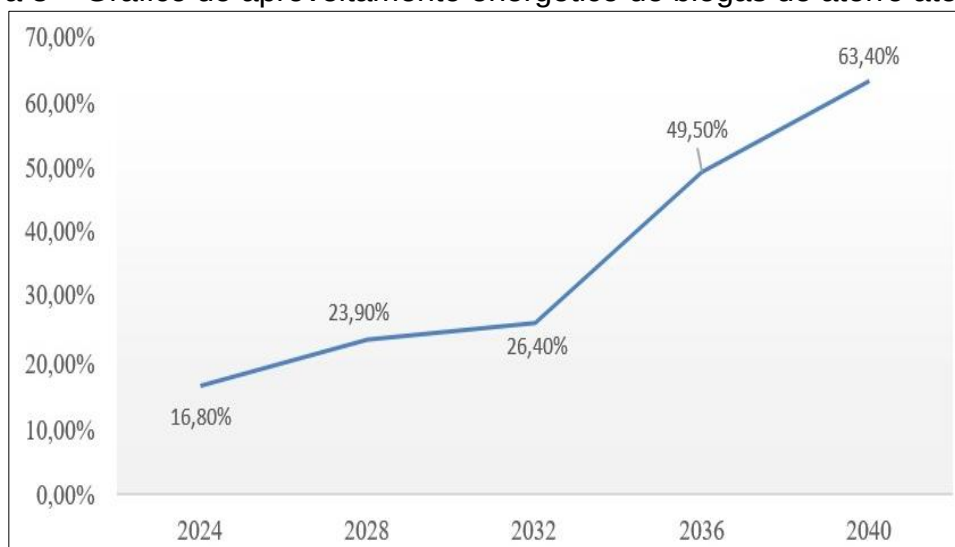
Fonte: ICLEI (2009).

O biogás é um combustível multifacetado com muitas opções de utilização. Tradicionalmente, a rota mais comum e acessível de utilização direta do biogás é em queimadores simples e iluminação. O uso de biogás como combustível em caldeiras é uma excelente opção para produção de energia térmica. É uma aplicação do biogás baseada em tecnologia convencional e viável, na qual vapor de água é obtido a partir do calor liberado na combustão do biogás, e o vapor é usado como energia térmica, em processos industriais (Kapoor *et al.*, 2020). As principais tecnologias empregadas para a conversão do biogás em energia são os motores de combustão interna, as turbinas e as microturbinas a gás (Poblete, 2019). No Brasil, o motor ciclo Otto talvez seja o mecanismo mais simples de conversão de energia presente no biogás para a geração de energia elétrica, isto em razão de seu baixo custo inicial e também pelo baixo valor de manutenção quando comparado a outros equipamentos (Souza *et al.*, 2020).

Em 2040, é esperado como meta, um percentual de aproveitamento energético de biogás em aterros sanitários superior a 60%, conforme dados apresentados na figura 2, o que equivaleria a uma potência instalada de 270 MW, “considerando que 50% do biogás gerado será aproveitado energeticamente até 2040, com o uso de tecnologias avançadas que permitam a captação de até 75% do gás” (Brasil;

MMA, 2022). Ainda segundo o Planares, há também a previsão de que, até o final do período estipulado, o aproveitamento de biogás de aterro sanitário tenha a capacidade de abastecer mais de 9 milhões de residências com eletricidade, o que segundo o IBGE corresponde a quase 3 vezes mais a quantidade de residências da cidade de São Paulo no período do censo demográfico de 2010. A Figura 8 apresenta as metas relacionadas ao aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário até o ano de 2040.

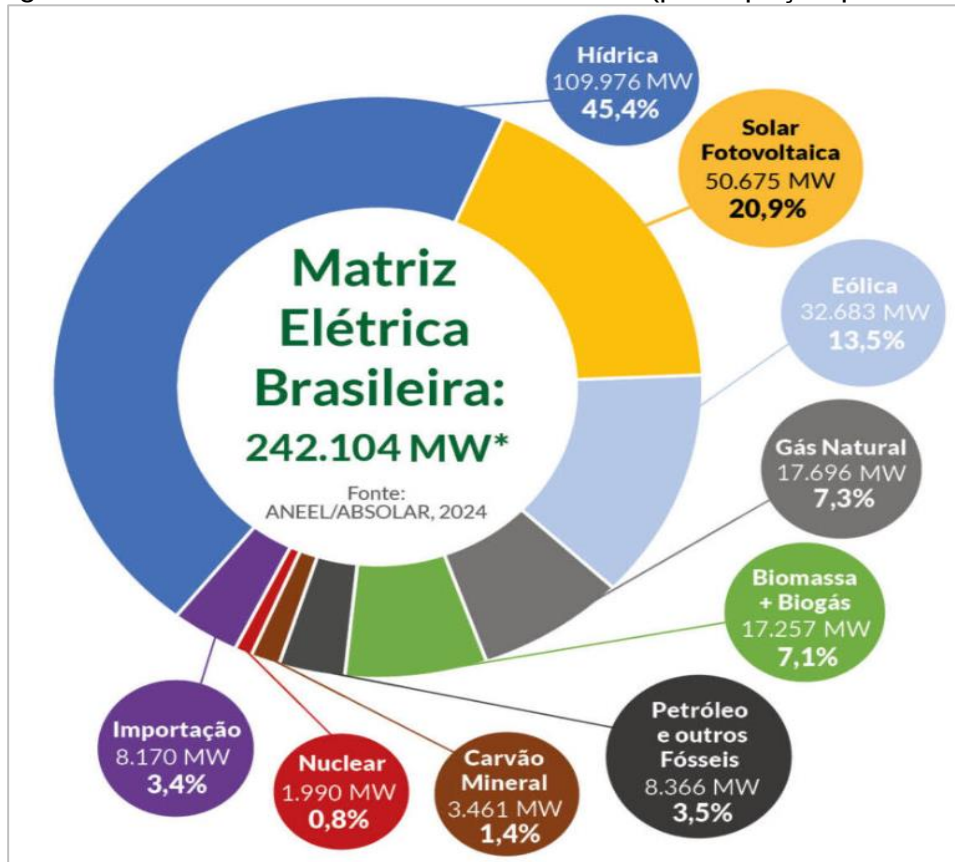
Figura 8 – Gráfico do aproveitamento energético de biogás de aterro até 2040.



Fonte: Brasil; MMA (2022).

A matriz energética representa o conjunto de fontes de energia utilizadas para movimentar os carros, preparar a comida no fogão e gerar eletricidade, já a matriz elétrica corresponde ao conjunto de fontes disponíveis para a geração de energia elétrica (Tavares, 2023). A matriz energética do Brasil difere muito da mundial, pois utiliza mais fontes renováveis que no resto do mundo. A matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável do que a energética, isso porque grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas. A energia eólica também vem crescendo bastante, contribuindo para que a nossa matriz elétrica continue sendo, em sua maior parte, renovável (EPE, 2024). A Figura 9 mostra o percentual de participação das fontes de energia na matriz elétrica brasileira em fevereiro de 2024, bem como a potência total instalada, excluindo a importação de energia, seguindo critério aplicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), que adiciona as quantidades de mini e microgeração distribuída associadas a cada tipo de fonte.

Figura 9 – Gráfico da matriz elétrica brasileira (participação por fonte).



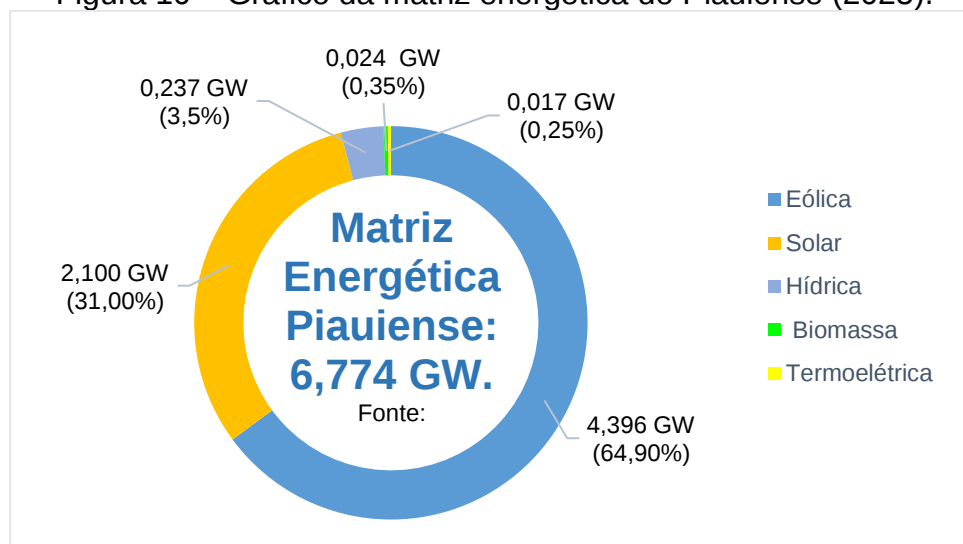
Fonte: ABSOLAR, ANEEL (2024).

O biogás está incluído na categoria de biomassa, enquanto o petróleo abrange seus derivados. Os dados apresentados são baseados em informações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2024 e no relatório da ABSOLAR de fevereiro de 2022. A relevância do biogás na matriz energética mundial e no Brasil ainda é bem pequena. O biogás de aterro sanitário possui grande potencial. Nos últimos anos, esse setor precisou se desenvolver. No Brasil, em 2010, foram gerados 66,69 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Já em 2019, o descarte aumentou para 79,06 milhões de toneladas – 18,6% a mais. Com isso, cresce não apenas a necessidade de implementar ações de melhor descarte, bem como pensar em alternativas de transformar esse sistema em algo rentável, como é o caso da geração de energia por meio do biogás (GROUP, 2021).

De maneira análoga à matriz elétrica brasileira, a matriz elétrica do estado do Piauí caracteriza-se pelo predomínio de fontes renováveis. No entanto, assim como ocorre na matriz nacional, a participação da biomassa na composição energética

piauiense é reduzida, o que evidencia que esse recurso ainda não é aproveitado em todo o seu potencial. A Figura 10 ilustra a composição da matriz energética do estado do Piauí, discriminada por fonte de geração.

Figura 10 – Gráfico da matriz energética do Piauiense (2025).



De acordo com os dados da Figura 10, até setembro de 2025, a matriz energética do Piauí alcançou 6,774 GW de capacidade instalada, estruturada majoritariamente por fontes renováveis. A geração eólica constitui a principal fonte, representando 64,9% da capacidade total, seguida solar fotovoltaica, com 31,0%. As demais fontes apresentam participação residual: hídrica (3,5%), biomassa (0,35%) e termoelétrica (0,25%). Esse cenário confirma a vocação do estado para a produção de energia limpa, resultado das condições naturais favoráveis e dos investimentos no setor. Em 2025, o estado do Piauí consolidou-se como líder nacional em energias renováveis, com 99,75% de sua matriz elétrica composta por fontes limpas, como a energia eólica e a solar centralizada. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o estado ocupa o primeiro lugar no Brasil em matriz elétrica renovável e a terceira posição em produção de energia solar centralizada (2025) e eólica (2023), firmando o seu grande potencial para liderar a transição energética e o desenvolvimento sustentável no Brasil (SEPLAN/PI, 2025).

2.5 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O MERCADO DO CARBONO

O gás metano é o que confere o potencial energético ao biogás, visto que apresenta um elevado poder calorífico, na ordem de 35.600 KJ/m³ (Gandolla *et al.*, 1997). Nesse contexto, é válido destacar que a gestão adequada de resíduos também pode contribuir para a agenda climática, apresentando um potencial considerável de redução de emissões de gases de efeito estufa (ABRELPE, 2022).

O ciclo de vida dos resíduos sólidos é composto por diversas fases, e é possível compreender que a contribuição para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) não se deve apenas à sua composição química. O processo inicia-se com a coleta de resíduos diretamente nas fontes geradoras, passa por um tratamento específico e culmina no descarte final. É durante uma etapa de tratamento que ocorre a recuperação de determinados materiais, os quais podem, posteriormente, ser reciclados ou reutilizados em atividades de aproveitamento energético (Andrade, 2022).

Em 2022, o setor de resíduos foi responsável pela emissão de 91,3 milhões de toneladas de CO₂ e, uma queda de 1% em relação ao ano anterior. No entanto, as emissões se mostraram estáveis nos últimos três anos, sempre na casa de 91 milhões de toneladas. Essa diminuição no ano passado está relacionada tanto a aspectos importantes na gestão de resíduos, como o aumento da quantidade de biogás recuperada em aterros sanitários, quanto a questões populacionais (SEEG, 2023). De acordo com o Censo de 2022 do IBGE, a população total do Brasil foi de 203 milhões de habitantes, versus 213 milhões estimados em 2021 antes do Censo. Como as emissões de resíduos estão fortemente atreladas ao tamanho da população, a mudança na contagem dos brasileiros afeta o setor.

2.5.1 A importância do crédito de carbono

O Protocolo de Quioto marcou um ponto crucial na história das políticas climáticas globais, estabelecendo metas vinculativas para redução das emissões de GEE para países industrializados e introduzindo o conceito de créditos de carbono como uma forma de mitigar essas emissões (Patel *et al.*, 2020).

O Protocolo de Quioto é baseado no princípio de realizar reduções quantitativas nas emissões de GEE, estipulando metas obrigatórias para entidades específicas. A meta global do protocolo é a redução das emissões, e para atingir esse obje-

tivo, proporciona flexibilidade quanto ao local onde essas reduções podem ser geradas. Essa flexibilidade é importante para incentivar a participação de Estados e empresas na mitigação das mudanças climáticas (Dias; Neffa; Tostes, 2020).

O mercado de carbono surge como uma das medidas mais importantes para ajudar a reduzir as emissões globais de GEE. Os créditos de carbono devem ser vistos como uma ferramenta complementar dentro de um conjunto de políticas e medidas destinadas a reduzir as emissões de GEE, incluindo políticas como a precificação do carbono, investimentos em energias renováveis e eficiência energética e a promoção de práticas agrícolas sustentáveis (Khan *et al.*, 2019; Bisinoto, 2025). Ao atribuir um valor financeiro às emissões de carbono, o mercado de carbono incentiva governos, empresas e até indivíduos a adotarem práticas mais sustentáveis e a reduzirem suas pegadas de carbono. Na busca por um futuro mais sustentável, os créditos de carbono oferecem um caminho viável para financiar tecnologias verdes e práticas agrícolas regenerativas, equilibrando o desenvolvimento econômico com a conservação ambiental. Dada a urgência de mitigar as emissões de GEE, torna-se essencial entender o funcionamento deste mecanismo, suas origens e seu impacto global (Rodrigues, 2024).

Além disso, o Mercado de Crédito de Carbono estabelece o CO₂ e os demais gases que contribuem com o efeito estufa como uma mercadoria. E assim o crédito se torna um certificado eletrônico relacionado à diminuição de emissão de gases que podem intensificar o efeito estufa. Esses créditos são denominados *commodities*, sendo por sua vez comercializados dentro do mercado financeiro. Com base nisso pode-se descrever o passo a passo da seguinte maneira: quem tem crédito por conseguir reduzir a emissão de GEE, vende seus créditos para quem não conseguiu reduzir, isto é para quem polui além do limite que é previsto pelo protocolo (Dias; Neffa; Tostes, 2020).

De acordo com Nazaré (2023), conforme o alto valor gerado em torno do mercado de carbono, o Brasil vem se preparando para fazer parte desse cenário. Por enquanto, o país opera em minimercado, mais precisamente dentro do mercado de combustíveis, pois existe um projeto em tramitação no Congresso Nacional direcionado para o mercado de carbono. Por outro lado, existe o RenovaBio, que é uma iniciativa do Ministério de Minas e Energia (MME), o qual, por sua vez, estabelece metas elaboradas de forma nacional anual de descarbonização para o setor de combustível.

2.5.2 Protocolo de Quioto e Projetos de Desenvolvimento Limpo (MDL)

Com o Acordo de Paris, houve uma evolução no cenário. O Protocolo de Quioto foi substituído por um regime mais inclusivo, no qual todos os países, independentemente do seu status de desenvolvimento, comprometeram-se a contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. O mecanismo de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) tornou-se o pilar central, permitindo que cada nação estabelecesse seus objetivos de redução de emissões de acordo com suas capacidades e circunstâncias (Heal; Kunreuther, 2017).

O Protocolo de Quioto fortaleceu os compromissos reforçados pelos países e a distribuição de medidas concretas para alcançar os principais objetivos da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). O surgimento do mercado de carbono regulamentado representou um avanço significativo, impulsionado pelo Protocolo de Quioto, que envolve três mecanismos fundamentais para o cumprimento dos compromissos climáticos da época. Dois desses mecanismos, a "Implementação Conjunta" e o "Comércio de Emissões", foram projetados para operar exclusivamente entre países desenvolvidos ou industrializados. Por outro lado, o terceiro mecanismo, denominado "Mecanismo de Desenvolvimento Limpo" (MDL), abriu espaço para a participação de países em desenvolvimento, como o Brasil (Cerqueira, 2024).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo possibilitou que os países desenvolvidos cumprissem parte de suas metas de redução de emissões ao financiar projetos sustentáveis em nações em desenvolvimento. Esses projetos geraram "Reduções Certificadas de Emissões" (RCEs), conhecidas como créditos de carbono. Além de contribuir para a mitigação de emissões de GEE, esses projetos desempenharam um papel importante na promoção do desenvolvimento sustentável, gerando benefícios econômicos, sociais e ambientais (Oliveira, 2023).

O MDL desempenha uma função crucial ao permitir que nações em desenvolvimento, incluindo o Brasil, integrem-se ativamente aos esforços globais de redução de emissões. Esse mecanismo não apenas incentiva a adoção de práticas mais sustentáveis, mas também facilita a transferência de tecnologia e conhecimento, promo-

vendo uma abordagem colaborativa na mitigação das mudanças climáticas. Ao possibilitar a participação de um espectro mais amplo de países, o Protocolo de Quioto e seus mecanismos estabelecem uma base mais inclusiva para a cooperação internacional na busca por soluções climáticas eficazes (Ferreira, 2019).

A Redução Certificada de Emissão (RCE) desempenha um papel essencial nos mecanismos de mercado voltados para combater as mudanças climáticas, sendo integralmente vinculada ao Protocolo de Quioto e ao mercado de carbono regulamentado. Esses certificados representam créditos concedidos quando uma entidade ou projeto consegue diminuir suas emissões de gases de efeito estufa abaixo de um ponto de referência predeterminado (Luedemann *et al.*, 2023).

O processo para obter RCEs envolve a implementação de projetos que resultem em uma redução líquida de emissões, seja por meio de eficiência energética, adoção de fontes renováveis ou práticas que evitem a emissão de gases prejudiciais. Tais projetos passam por uma avaliação rigorosa e são certificados por entidades especializadas para garantir que as reduções de emissões sejam tangíveis, mensuráveis e permanentes (Hauser; Fonseca, 2018; 123 ECOS, 2024).

Dessa forma, o mercado de RCEs possibilita que entidades que ultrapassam suas metas de redução comprem créditos de emissão de outras que superaram suas expectativas, criando, assim, um estímulo financeiro para a adoção de práticas mais sustentáveis e eficientes na redução efetiva de emissões de GEE. Adicionalmente, as RCEs desempenham um papel crucial no fomento da cooperação internacional para mitigar as mudanças climáticas, proporcionando um mecanismo para transferência de tecnologia e financiamento entre países desenvolvidos e em desenvolvimento (Tozato *et al.*, 2019).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi desenvolvida em Teresina, capital do estado do Piauí. A cidade possui 866.300 habitantes (IBGE, 2022). O município está localizado na Mesorregião Centro-Norte piauiense, na região Nordeste do Brasil (IBGE, 2023). A cidade faz parte de uma Rede Integrada de Desenvolvimento da Grande Teresina (RIDE). As RIDES são regiões de desenvolvimento e cooperação socioeconômica entre municípios próximos (Silva, 2020).

Teresina é caracterizada por uma geografia marcada pela presença de dois importantes rios, o Poti e o Parnaíba, que cortam a cidade e desempenham papel essencial no seu ecossistema e no abastecimento de água. A cidade apresenta clima Tropical de Savana (Aw'), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, quente e seco, com período chuvoso nos meses de dezembro a maio e seco de junho a novembro (Carvalho, 2015).

O trabalho teve como base para o estudo os dados gravimétricos dos RSD do Aterro Sanitário Municipal de Teresina (ASMT). O ASMT está sob a coordenação da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEMDUH), órgão responsável pela gestão deste empreendimento (SEMDUH, 2023).

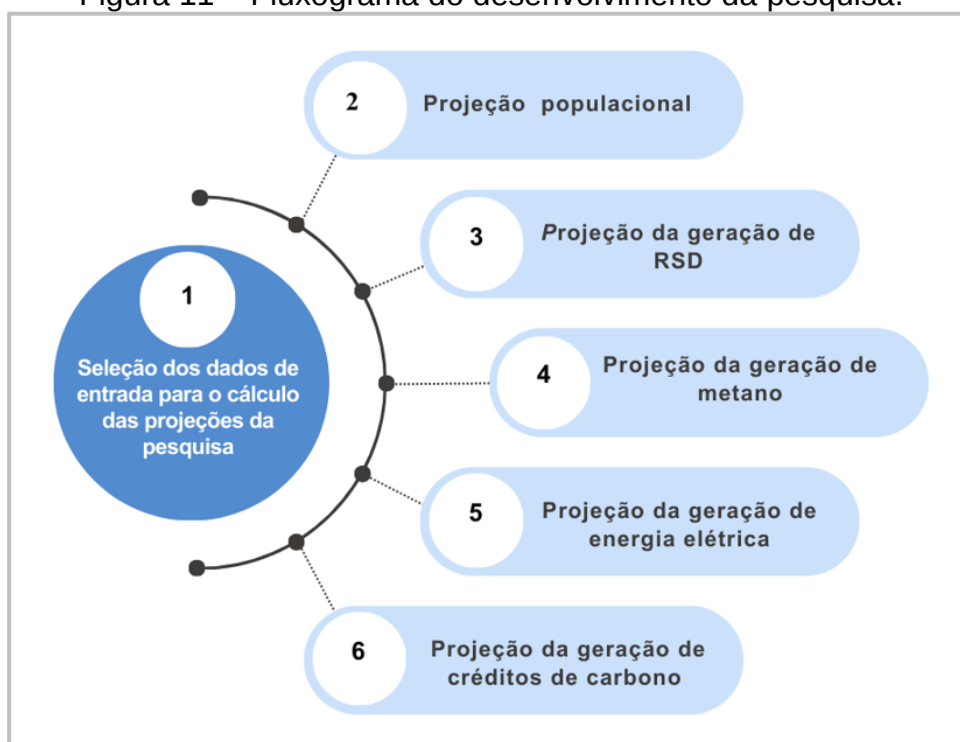
Para a viabilização deste estudo, realizou-se uma reunião na Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEMDUH), na qual foram apresentados dados referentes à construção, ao funcionamento e ao monitoramento do aterro sanitário. Em seguida, por intermédio do coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí (PPGEM/IFPI), foi encaminhado ao secretário da SEMDUH um ofício solicitando autorização para a realização de visita técnica, acompanhado da documentação exigida pela secretaria, bem como de um questionário com as informações necessárias à pesquisa. Posteriormente, a visita ao Aterro Sanitário de Teresina foi realizada com o propósito de conhecer sua estrutura física e operacional, além de verificar a disponibilidade de relatórios gravimétricos. Por fim, formalizou-se a solicitação de acesso a esses relatórios junto à SEMDUH, assim como a autorização para sua utilização no desenvolvimento desta pesquisa. Dessa forma, os dados gravimétricos do Aterro Sanitário de

Teresina (ASMT), disponibilizados pela Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEMDUH), constituíram a base para o cálculo de todas as projeções desenvolvidas no presente estudo.

3.1 FLUXOGRAMA DA PESQUISA

Após a seleção dos dados gravimétricos, foram realizados os cálculos das projeções da pesquisa: estimativa populacional, estimativa de geração de resíduos, estimativa da geração de metano e estimativa da geração de energia disponível e projeção do dióxido de carbono equivalente. As projeções realizadas para subsidiar os objetivos da pesquisa estão representadas no fluxograma ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.

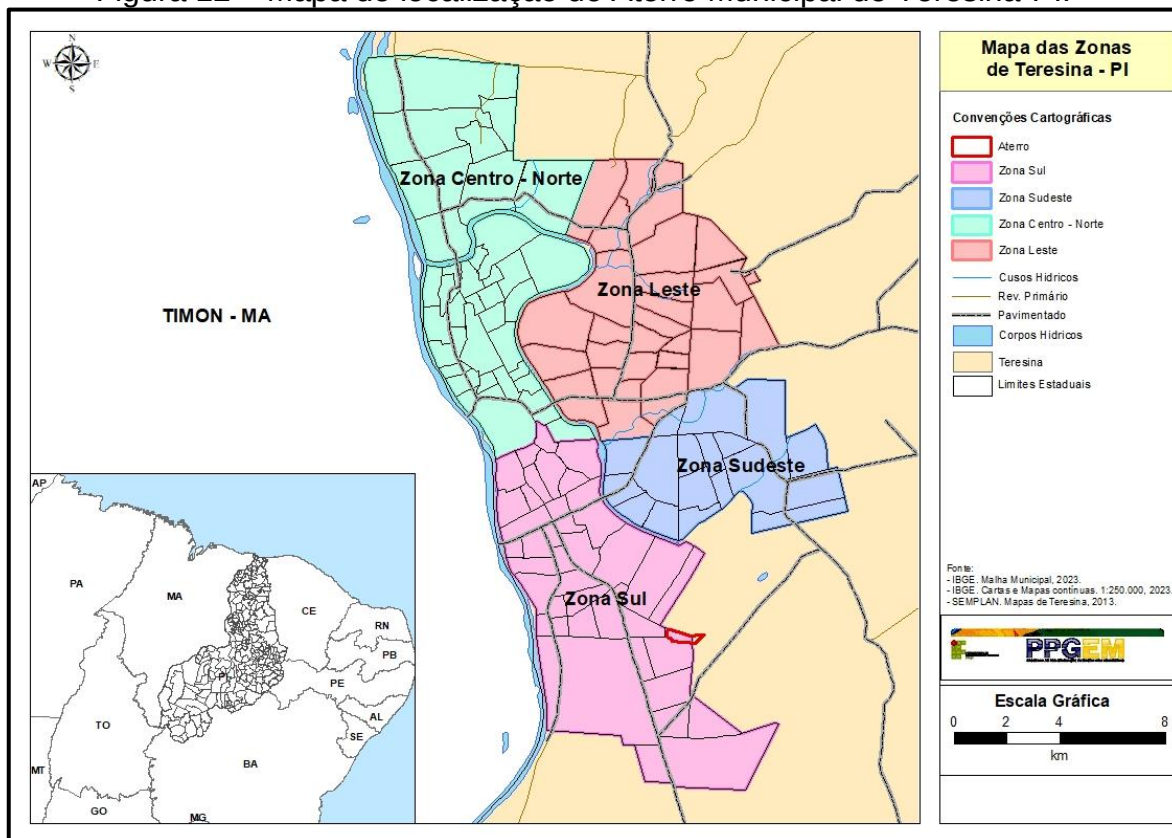


Fonte: Autora (2025).

3.1.1 Localização e caracterização da área de estudo

De acordo com os dados da SEMDUH (2023), Teresina encontra-se dividida em quatro zonas: Centro-Norte, Leste, Sudeste e Sul, estando o aterro localizado na zona sul como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Mapa de localização do Aterro Municipal de Teresina-PI.

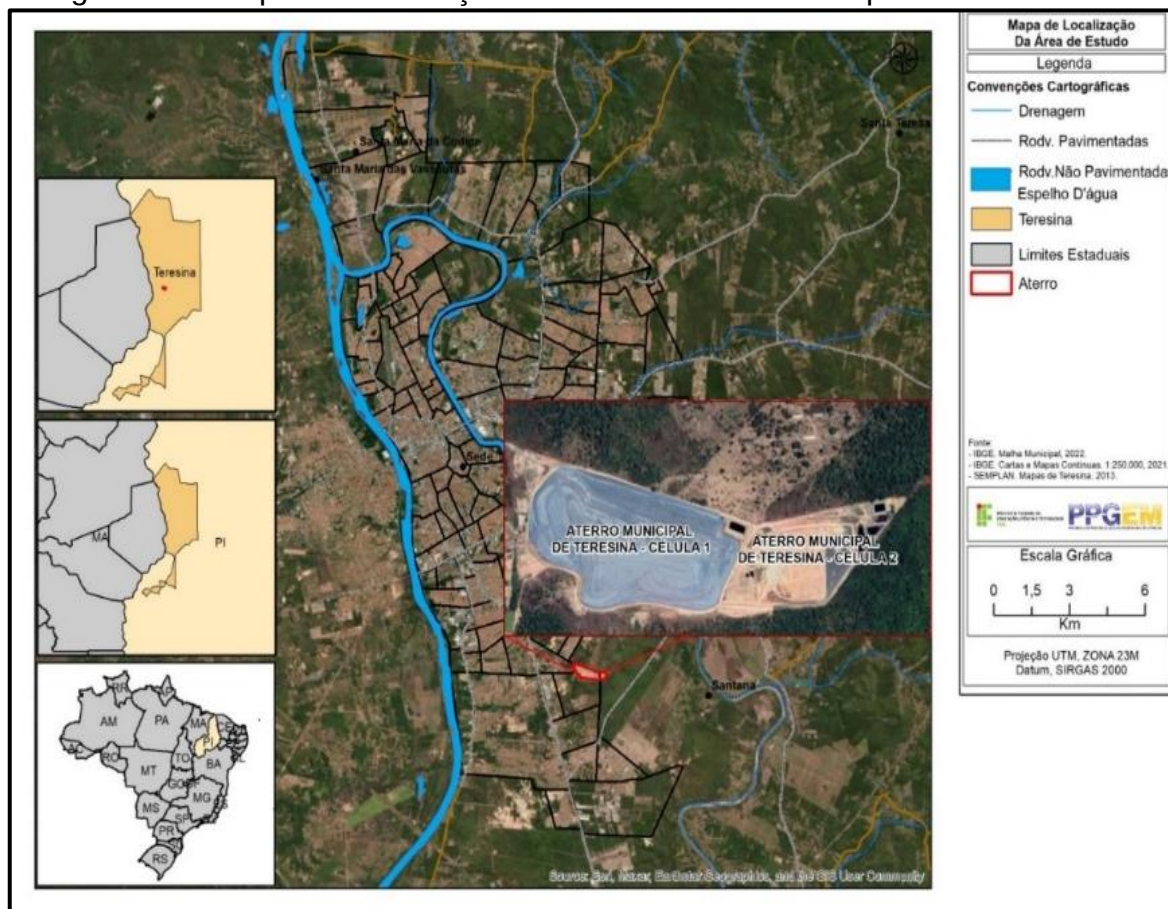


Fonte: Adaptado de SEMDUH, 2023.

O Aterro Sanitário Municipal de Teresina (ASMT) está localizado no Km 7 - BR 316, no bairro Santo Antônio, zona sul da capital Piauiense, sob a responsabilidade da Superintendência das Ações Administrativas Descentralizadas (SAAD) Sul, da prefeitura de Teresina (Teresina, 2021). A Figura 5 mostra a localização do aterro de Teresina.

De acordo com o relatório de Estudos Engenharia Logística e Afins da Prefeitura Municipal de Teresina (PMT) para 2021, o Aterro Sanitário Municipal de Teresina possui uma área de 48,59 hectares, sendo dividido da seguinte maneira: 33,31 hectares de aterro controlado e 15,28 hectares de aterro sanitário em construção (Teresina, 2021a). A Figura 13 mostra a localização da área do aterro municipal de Teresina.

Figura 13 – Mapa de localização da área do Aterro Municipal de Teresina-PI.



Fonte: Adaptado de SEMDUH (2023).

3.1.2 Visita ao Aterro Sanitário Municipal de Teresina-PI

A visita técnica ao aterro foi realizada em 26 de julho de 2023 e inspecionada por uma engenheira operacional da LITUCERA e uma engenheira assessora especial da SEMDUH. Durante a visita, foi observado que o espaço onde se encontra o aterro sanitário municipal de Teresina (ASMT) está dividido da seguinte maneira:

- Célula 1: Corresponde ao Aterro controlado. Esta célula encontra-se em processo de desativação, recebendo diariamente resíduos de poda e capina para sua reconformação, possui 12 km de drenagem de chorume, 116 poços de drenagem de gás, e não terá a sua desativação total de imediato, o processo ocorrerá de forma gradual e sua área será posteriormente recuperada (SEMDUH, 2023).

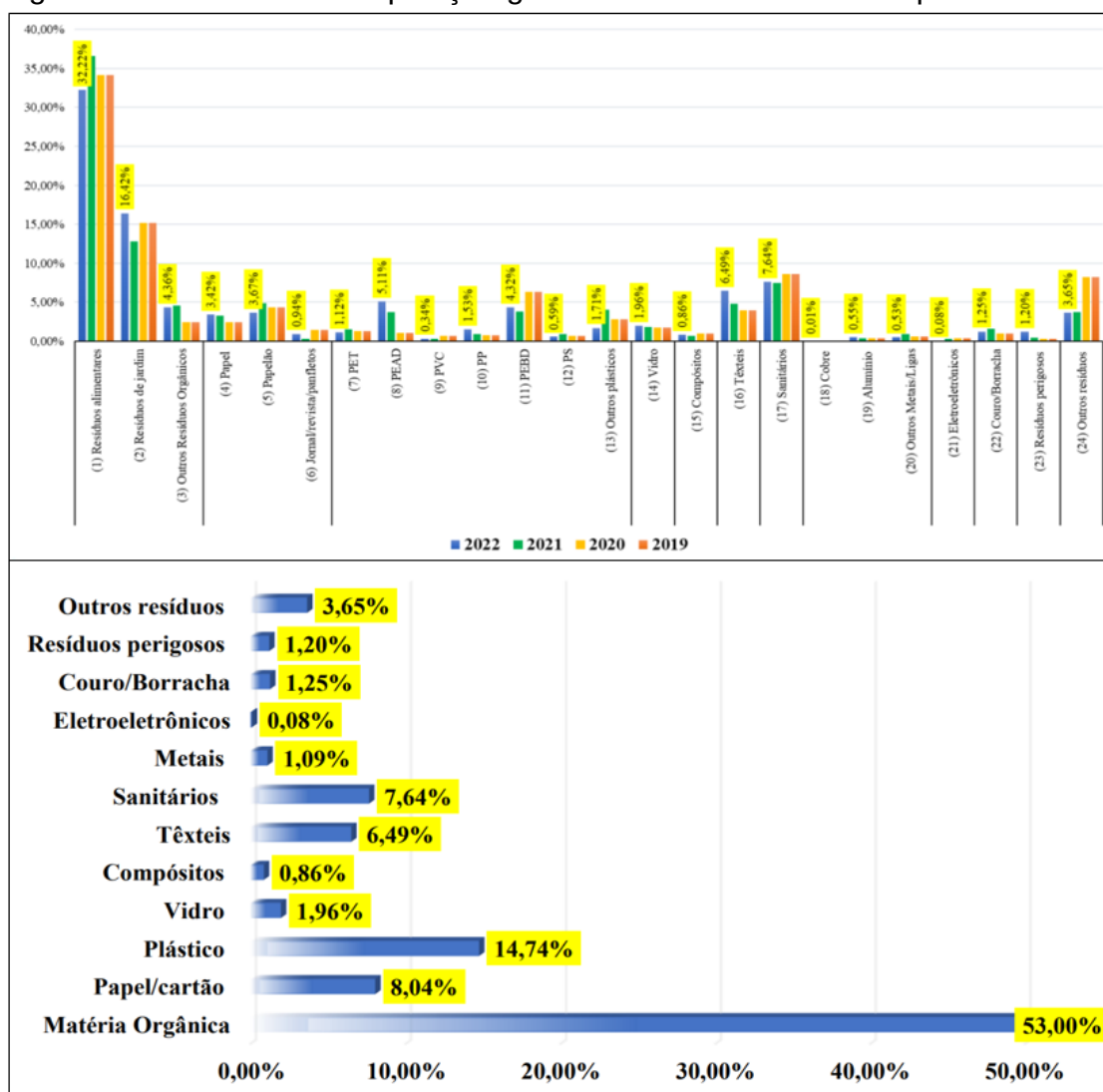
- Célula 2: Encontra-se o aterro sanitário em operação. Nesta célula, há uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), com uma lagoa impermeabilizada onde são direcionados os efluentes das células, assim como um tanque que recebe o efluente após o tratamento. A ETE do aterro possui um tanque de aeração, cuja funcionalidade consiste num tratamento com a presença de oxigênio e de microrganismos originários do próprio tanque que decompõe a matéria orgânica ali presente, formando flocos (Rocha, 2020).

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS GRAVIMÉTRICOS DO ATERRO

3.2.1 Composição gravimétrica em base úmida para Teresina

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos consiste na característica física dos resíduos que traduz o percentual de cada material em relação ao peso total da amostra de lixo analisada. A sua composição mais simplista indica papel/papelão, plástico, vidros, metais, matéria orgânica e outros. A classificação da análise gravimétrica realizada pela SEMDUH traz doze categorias e vinte e quatro subcategorias de frações de resíduos, que é composto por: matéria orgânica (alimento, jardinagem e outros), papel/cartão (papel, papelão, jornal, revista e panfleto), plástico (PET, PEAD, PVC, PP, PEBD, PS e outros), vidro, compósitos, têxtil, aparelhos sanitários, metais (cobre, alumínio e outros metais/ligas), eletroeletrônicos, couro, borracha, resíduos perigosos e outros tipos de resíduos (SOUZA, 2018). A Figura 16 apresenta os dados gravimétricos em base úmida para Teresina em 2023, de acordo com informações obtidas de SEMDUH (2023).

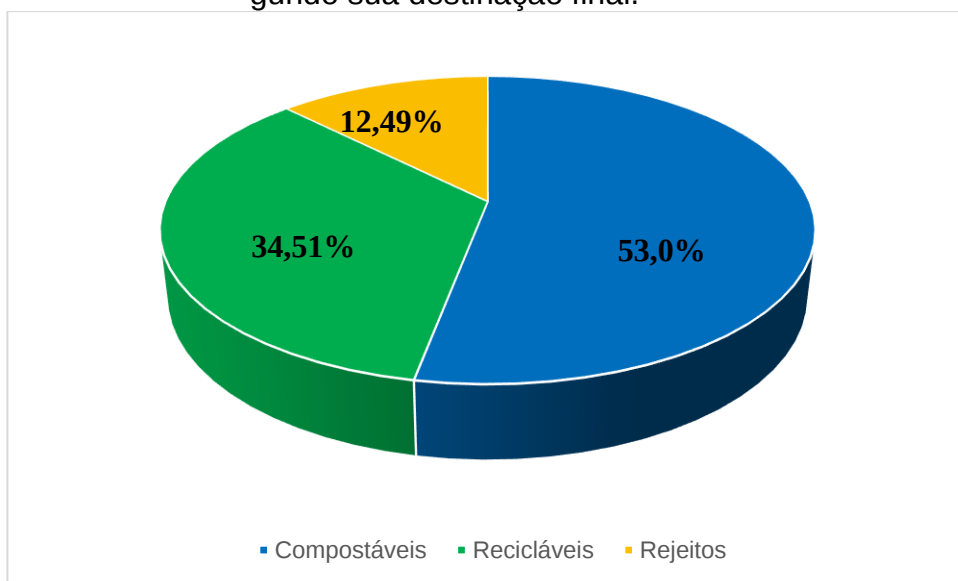
Figura 16 – Gráfico da composição gravimétrica em base úmida para Teresina.



Fonte: SEMDUH (2023).

Baseado nos dados da Figura 16, foi realizado o levantamento do percentual dos RSD em categorias, segundo sua destinação final: compostáveis, recicláveis e rejeitos, como mostra a Figura 17. Esse agrupamento teve como finalidade o cálculo das projeções desses resíduos para o período considerado (2020 a 2040).

Figura 17 – Gráfico do percentual dos RSD de Teresina em categorias segundo sua destinação final.



Fonte: Adaptado de SEMDUH (2023).

Os resíduos sólidos domiciliares de Teresina são discriminados da seguinte forma:

- Compostáveis: matéria orgânica (restos alimentares, resíduos de jardim e outros resíduos orgânicos);
- Recicláveis: papel/cartão, plástico, vidro, couro/borracha, têxtil, metais e eletroeletrônicos, compósitos;
- Rejeitos: resíduos perigosos, resíduos sanitários, outros resíduos.

Em seguida, foram coletados os percentuais dos materiais, que são objeto de estudo deste trabalho, oriundos dos resíduos sólidos urbanos: restos de alimentos, resíduos orgânicos, resíduos de parques, jardins, papel, papelão e têxtil. A Tabela 4 apresenta os dados de entrada usados nesta pesquisa para o cálculo do parâmetro COD (ver equação 19): composição do resíduo e potencial de produção de carbono que cada componente apresenta.

Tabela 4 – Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do lixo do aterro sanitário de Teresina.

MATERIAIS	PORCENTAGEM DE COD (%)
Restos alimentares	32,22
Outros resíduos orgânicos	4,36
Resíduos de parques e jardins	16,42
Papel e Papelão	8,04
Têxteis	6,49
Madeira	2,00

Fonte: Autora, adaptado de SEMDUH (2023).

3.3 ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO POPULACIONAL

Os estudos realizados para a estimativa populacional do município de Teresina-PI se deram a partir dos dados censitários disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), dos anos de 2000 e 2010, como uma projeção para o ano 2020, levantados para o município, tomando como base um cenário futuro para 20 anos, de 2020 a 2040. Para a projeção foram utilizados quatro métodos dentre os recomendados pela literatura técnica: projeção aritmética, projeção geométrica, crescimento logístico e taxa decrescente de crescimento. Destes, dois métodos, o logístico e decrescente, requerem, entre outros critérios, a informação de três populações referentes a três períodos distintos equidistantes no tempo para a aplicação do modelo matemático. Dessa forma, não foi possível utilizar o censo de 2022 para o estudo, mas uma projeção de Teresina para o ano de 2020 realizada pelo IBGE (IBGE, 2020). Para a estimativa, foram utilizados os cálculos dos métodos a seguir, de acordo com a literatura citada pelo autor Von Sperling (2014).

3.3.1 Modelo Linear ou Aritmético

O modelo de crescimento Linear considera constante o aumento ou redução da população ao longo do tempo. Nessa abordagem, a variação na quantidade de indivíduos é proporcional ao tempo, resultando em uma linha reta quando representada graficamente.

A estimativa desse método foi obtida a partir das Equações 1, 2 e 3:

$$P_t = P_0 + k_a * (t - t_0) \quad (\text{Equação 1})$$

$$k_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0} \quad (\text{Equação 2})$$

$$\frac{dP}{dT} = k_a \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

- dP/dT = taxa de crescimento da população em função do tempo (hab./ano);
- P_t = População no ano “t” (hab.);
- P_0 = População no ano t_0 (ano anterior) (hab.);
- P_2 = População no ano t_2 (ano atual) (hab.);
- K_a = Coeficiente de crescimento aritmético;
- t_0 = Ano anterior ou primeiro ano;
- t_2 = Ano atual ou último ano;
- t = Tempo a ser estimado.

3.3.2 Modelo Geométrico

O método Geométrico considera que o crescimento populacional obedece a uma relação matemática do tipo geométrica. Logo, para estimar a taxa de crescimento e a população, foram utilizadas as Equações 4, 5 e 6.

$$P_t = P_0 * e^{K_g * (t - t_0)} \quad (\text{Equação 4})$$

$$K_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t_2 - t_0} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\frac{dP}{dT} = K_g * P \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

- dP/dT = taxa de crescimento da população em função do tempo (hab./ano);
- P_t = População no ano “t” (hab.);
- P_0 = População no ano t_0 (ano anterior) (hab.);
- P_2 = População no ano t_2 (ano atual);

- K_g = Coeficiente de crescimento geométrico;
- t_0 = Ano anterior ou primeiro ano;
- t_2 = Ano atual ou último ano;
- e = Constante de Euler;
- $\ln$ = Logaritmo natural.

3.3.3 Modelo Logístico

Reconhecendo que o crescimento ilimitado não é sustentável a longo prazo, o modelo logístico incorpora um fator de saturação, representado pela capacidade de carga do ambiente. Inicialmente, o crescimento é exponencial, refletindo condições ideais de recursos disponíveis. Contudo, à medida que a população se aproxima da capacidade máxima de suporte do ambiente, o crescimento desacelera gradualmente até alcançar um ponto de equilíbrio, onde a taxa de natalidade iguala a taxa de mortalidade. Para os cálculos, utilizamos as equações 7, 8, 9, 10 e 11.

$$P_t = \frac{P_s}{1 + e^{-K_l \cdot (t - t_0)}} \quad (\text{Equação 7})$$

$$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2} \quad (\text{Equação 8})$$

$$C = \frac{(P_s - P_0)}{P_0} \quad (\text{Equação 9})$$

$$K_l = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \left[\frac{P_0 \cdot (P_s - P_1)}{P_1 \cdot (P_s - P_0)} \right] \quad (\text{Equação 10})$$

$$\frac{dP}{dT} = K_l \cdot P \cdot \left[\frac{(P_s - P)}{P_s} \right] \quad (\text{Equação 11})$$

Em que:

- dP/dT = taxa de crescimento da população em função do tempo (hab./ano);
- P_t = População no ano “t” (hab.);
- P_0 = População no ano t_0 (ano mais antigo) (hab.);
- P_1 = População no ano t_0 (ano intermediário) (hab.);
- P_2 = População no ano t_2 (ano atual) (hab.);
- P_s = População de saturação;

- C e KI = Coeficientes de crescimento logístico;
- t_0 = Ano mais antigo ou primeiro ano;
- t_2 = Ano atual ou último ano.

Nesse método, os parâmetros podem ser estimados por regressão não linear, desde que os dados observados sejam equidistantes no tempo e que: $P_0 < P_1 < P_2$ e $P_0 * P_2 < P_1^2$.

3.3.4 Modelo de Taxa decrescente de crescimento

O método de taxa decrescente de crescimento considera que à medida que a população cresce a taxa de crescimento diminui ao longo do tempo, tendendo a uma população de saturação que respeita a capacidade de suporte do meio ambiente. Desta forma, para estimar a população por esse modelo utilizou-se das Equações 12, 13, 14 e 15.

$$P_t = P_0 + (P_s - P_0) * [1 - e^{-k_d * (t - t_0)}] \quad (\text{Equação 12})$$

$$P_s = \frac{2P_0 * P_1 * P_2 - P_1^2 * (P_0 + P_2)}{P_0 * P_2 - P_1^2} \quad (\text{Equação 13})$$

$$K_d = \frac{-\ln \left[\frac{(P_s - P_2)}{(P_s - P_0)} \right]}{t_2 - t_0} \quad (\text{Equação 14})$$

$$\frac{dP}{dT} = k_d * (P_s - P) \quad (\text{Equação 15})$$

Em que:

dP/dT = taxa de crescimento da população em função do tempo (hab./ano);

P_t = População no ano "t" (hab.);

P_0 = População no ano t_0 (ano mais antigo) (hab.);

P_1 = População no ano t_0 (ano intermediário) (hab.);

P_2 = População no ano t_2 (ano atual) (hab.);

P_s = População de saturação (hab.);

K_d = Coeficiente de taxa decrescente de crescimento;

t_0 = Ano mais antigo ou primeiro ano;

t_2 = Ano atual ou último ano;

e = Constante de Euler;

$\ln$ = Logaritmo natural.

3.3.5 R quadrado (R^2)

O ajuste para um determinado modelo será o melhor quando a soma dos quadrados dos erros for a mínima possível. A ferramenta Solver, do Excel, efetua a busca dos valores ótimos dos coeficientes do modelo, de forma a encontrar o mínimo da soma dos quadrados dos erros. O objetivo é se obter o menor erro (ou resíduo) possível, onde o erro é a diferença entre a população observada (censo) e a estimada pelo modelo (Microsoft, 2024).

3.4 ESTIMATIVA DO VOLUME DE RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS

3.4.1 Geração per capita

Para a obtenção da geração per capita de resíduos sólidos domiciliares dos setores de coleta selecionados, expresso em kg/hab/dia, foi calculado o quociente entre a geração total (kg/dia) e a população atendida por cada setor de coleta selecionado, e o valor médio considerado para a taxa de geração per capita de resíduos domiciliares do município de Teresina-PI, informado pela SEMDUH foi de 0,60 kg/hab./dia (SEMDUH, 2023).

3.4.2 Geração diária

Através dos dados dos relatórios do Aterro Sanitário Municipal de Teresina-PI, fornecidos pela (SEMDUH, 2023), foi estimada a geração total de resíduos sólidos domiciliares de Teresina para um intervalo de 20 anos. Para a projeção foi considerada a taxa de geração per capita de RSD de Teresina-PI, a população estimada para município, com base nos dados do IBGE (2022), e o índice de cobertura de coleta, considerando que 100% da população é assistida pelo serviço de limpeza pública e manejo dos RSD, segundo informa o PMGRS (2018) do município. A quantidade de resíduos foi estimada segundo a equação 16.

$$Mr = P * Gp * C$$

(Equação 16)

Em que:

- Mr = Massa de resíduos (kg/dia);
- P = População do município (hab.);
- Gp = Geração *per capita* (kg/hab./dia);
- C = Cobertura da coleta (%).

3.5 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DO BIOGÁS

Para estimar a produção de biogás gerado pela decomposição orgânica dos resíduos sólidos, foi utilizado um modelo teórico de estimativa como ferramenta de previsão do volume de metano a ser gerado pelo período considerado, desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os modelos de decaimento de primeira ordem consideram a variação anual das emissões de CH₄ com base em dois parâmetros: a constante de decaimento (k) e o potencial de geração de metano (L₀).

3.5.1 Estimativa da Geração de Metano

O método utilizado para realizar a estimativa de geração de metano dos RSD nos municípios foi o procedimento do IPCC (2000; 2006), modelo matemático de primeira ordem. Esse método permite quantificar a emissão de gás relacionando o tempo de deposição dos resíduos, as diferentes fases do processo de biodegradação, a taxa de decaimento e massa de RSU, sendo que a produção de biogás, conforme o modelo do IPCC, tem início após um ano do descarte do resíduo no aterro, refletindo o período de latência do material. A estimativa total de biogás gerado é obtida pela soma das produções anuais (Vieira; Candiani, 2021). O método considera que a geração de metano depende da quantidade de carbono orgânico degradável (COD) presente nos resíduos sólidos dispostos no aterro, ou seja, o carbono que é suscetível à decomposição bioquímica. Além da equação para cálculo da geração de metano (Equação 17), o modelo também sugere um método para o cálculo do valor do potencial de geração de metano (L₀) (Equação 18).

$$GCH_4 = \sum x[(A * k * RSU_t(x) * RSU_f(x) * L_0) * e^{-k(t-x)}] \quad \text{(Equação 17).}$$

Em que:

- GCH_4 = Geração de metano. (t de CH_4 /ano);
- $RSU_t(x)$ = Total de resíduos gerados no município no ano x (t de RSU/ano);
- $RSU_f(x)$ = Fração de resíduos depositado no aterro no ano x (100%);
- L_0 = Potencial de geração de metano (m^3/t de RSU x ano).
- A = Fator de normalização para correção da soma, equivalente a $(1 - e^{-k})/k$;
- k = Constante de decaimento (ano^{-1});
- x = ano em que os resíduos foram depositados;
- t = ano em que se está calculando a produção de biogás.

3.5.2 Potencial de geração de Metano

O potencial de geração de metano (L_0) corresponde ao total produzido por massa de RSU (m^3 de metano por tonelada de RSU). Seu valor depende da composição gravimétrica dos resíduos sólidos. É estimado com base no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e em um fator de conversão estequiométrico. Seus valores típicos podem variar entre 125 m^3 e 310 m^3 de CH_4 por tonelada de resíduo (Morais; Bezerra; Rêgo, 2022). Para o cálculo deste parâmetro foi utilizada a Equação 18.

$$L_0 = MCF * COD * COD_f * F * \frac{16}{12} \quad (\text{Equação 18})$$

Em que:

- L_0 = potencial de geração de metano do lixo (t de CH_4/t de RSU);
- MCF = Fator de correção de metano (%);
- COD = Carbono orgânico degradável (t de C/t de RSU);
- COD_f = Fração de COD dissociada (%);
- F = Fração em volume de metano no biogás (%);
- $(16/12)$ = Fator de conversão de carbono em metano (t de CH_4/t de C).

A fração de metano presente no biogás depende da composição do resíduo que, em sua maioria, gera aproximadamente 50% de CH_4 . Dessa forma, o valor recomendado para a fração de metano presente no biogás proveniente de aterro é de 0,5 (IPCC, 2000, 2006), portanto, este foi o valor adotado neste estudo. O

fator de correção de metano (MCF) depende do controle, da disposição e da gestão dada aos resíduos sólidos. Em se tratando de aterros sanitários, o valor adotado para MCF é igual a 1. Os valores para o parâmetro fator de correção do metano (MCF) são apresentados pela Tabela 5.

Tabela 5 - MCF recomendado pelo IPCC.

TIPO DE LOCAL DE DISPOSIÇÃO	FCM
Lixões (altura < 5m)	0,4
Aterro controlado e lixões (altura > 5m)	0,8
Aterro sanitário	1,0
Outros locais	0,6

Fonte: IPCC (2006, apud Salvador, 2012).

3.5.3 Carbono Orgânico Degradável

O carbono orgânico degradável (COD) é a fração acessível para a decomposição bioquímica dos resíduos, e para seu cálculo, é necessário conhecer a composição gravimétrica dos resíduos e o percentual de carbono em cada componente presente. A Tabela 6 mostra os valores recomendados pelo IPCC para os diferentes tipos de resíduos.

Tabela 6 – Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo.

CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO	COD EM MASSA (%)
Papel, papelão	40%
Resíduos de parques e jardins	17%
Restos de alimentos	15%
Têxteis	40%
Madeira	30%

Fonte: IPCC (2006).

O parâmetro COD foi obtido através da Equação 19, cujos dados de entrada são: composição do RSU e potencial de produção de carbono que cada componente apresenta (ver Tabela 6).

$$COD = (0,40 * A) + (0,17 * B) + (0,15 * C) + (0,40 * D) + (0,30 * E) \quad (\text{Equação 19})$$

Em que:

- COD= carbono orgânico degradável (t de C/t de RSU);
- A= fração de papel, papelão no RSU (% em massa);
- B= fração de resíduos de parques e jardins no RSU (% em massa);
- C= fração de restos de alimentos no RSU (% em massa);
- D= fração de têxteis no RSU (% em massa);
- E= fração de madeira no RSU (% em massa).

O IPCC recomenda um valor de 12% para o Carbono Orgânico Degradável (COD) quando não se conhece a fração dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

3.5.4 Fração de Carbono Orgânico Degradável

O parâmetro da fração de carbono orgânico degradável dissociada (COD_f), corresponde à fração de carbono orgânico disponível, a que se degrada. Parte do carbono orgânico degradável não se decompõe totalmente e permanece no aterro por longos períodos de tempo. O valor do COD_f pode ser determinado pela equação 20.

$$\text{COD}_f = (0,014 * T) + 0,28 \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:

- COD_f: fração de COD dissociada (%);
- T= Temperatura da massa de resíduo na zona anaeróbia (°C).

Na ausência de informações sobre a temperatura do aterro na zona anaeróbica, o IPCC (2006) recomenda um valor de 77% para o COD_f, valor adotado neste trabalho.

O valor da constante de decaimento (k) está relacionado ao tempo necessário para o carbono orgânico presente nos resíduos decair para metade de sua massa inicial e sua determinação depende de alguns fatores associados à composição dos resíduos e às condições do aterro, a exemplo da umidade e temperatura. Na ausência de dados ou desconhecimento sobre as características dos resíduos, necessárias à determinação do k, um valor de 0,05 é sugerido como valor padrão, conside-

rando uma meia-vida de cerca de 14 anos (IPCC, 2006). Para a efetivação dos cálculos da geração de metano nesta pesquisa foi adotado o valor de 0,05 para k. A Tabela 7 mostra os valores de k sugeridos pelo IPCC.

Tabela 7 – Valores de k recomendados pelo IPCC.

TIPO DE RESÍDUO		ZONA CLIMÁTICA							
		Clima temperado (PMA ≤ 20 °C)				Clima tropical (PMA > 20 °C)			
		Seco (<1000mm)		Úmido (≥1000mm)		Seco (<1000 mm)		Úmido (≥1000 mm)	
		Valor padrão	Intervalo	Valor padrão	Intervalo	Valor padrão	Intervalo	Valor padrão	Intervalo
Resíduo relativamente inerte	Papel/Tecido	0,04	0,03-0,05	0,06	0,05-0,07	0,045	0,04-0,06	0,07	0,06-0,085
	Madeira	0,02	0,01-0,03	0,03	0,02-0,04	0,025	0,02-0,04	0,035	0,03-0,05
Resíduo moderadamente degradável	Outros resíduos orgânicos não alimentícios	0,05	0,04-0,06	0,1	0,06-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2
Resíduo altamente degradável	Restos de comida e lodo de esgoto	0,06	0,05-0,08	0,185	0,01-0,02	0,085	0,07-0,1	0,4	0,17-0,7
Massa dos resíduos		0,02	0,04-0,06	0,09	0,08-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2

Fonte: Adaptado de IPCC (2006).

3.5.5 Projeção energética do biogás no aterro

A geração de eletricidade é realizada através da combustão do biogás em máquinas térmicas para o acionamento de geradores, responsáveis pela conversão da energia mecânica em energia elétrica. Na determinação da potência disponível, considera-se que nem toda emissão de metano pelo aterro é passível de captação e aproveitamento. De acordo com a USEPA (1998), dados documentados de aterros sanitários energéticos mostram que a eficiência percentual de coleta de gás metano varia de 60 a 85 %. Para a eficiência de coleta do biogás do aterro sanitário adotou-se 70%, valor médio de eficiência percentual do sistema de captura (Almeida; Barbosa; Mendonça, 2024). A vazão do gás coletado foi determinada pela equação 21, e para sua aplicação, inicialmente fez-se necessário a conversão da vazão de CH₄ (t/ano) gerada no aterro sanitário para metro cúbico por ano. Para isso, dividiu-se a quantidade de CH₄ pela densidade do metano equivalente a 0,717 kg·Nm⁻³ CH₄ (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Junqueira; Medeiros; Cohim, 2022).

$$QCH_4 = GCH * Ec \quad (\text{Equação 21})$$

Em que:

- GCH_4 = Vazão de metano gerado (m^3/ano);
- QCH_4 coletado = Vazão coletada de biogás (m^3/ano);
- Ec = Eficiência de coleta (%).

O cálculo da potência disponível, foi realizado por meio da equação 22, que expressa a relação entre a vazão de CH_4 coletada, seu poder calorífico interior (PCI) e a eficiência do grupo gerador (Montagner, 2021). O poder calorífico inferior do biogás (50% de CH_4) adotado foi de $17,92 \text{ MJ}/m^3 \text{ CH}_4$ (CETESB, 2006; Iannicelli, 2008; Santos, 2022). Também foi considerado um motor de combustão interna (ciclo OTTO) com eficiência total de conversão de 28%. Sua escolha se justifica pelo melhor rendimento energético e econômico em comparação com outras tecnologias empregadas na combustão, a exemplo da microturbina a gás (Almeida; Barbosa; Mendonça, 2024).

$$P = QCH_4 * PCI * \eta * T^{-1} * 10^{-3} \quad (\text{Equação 22}).$$

Em que:

- P = Potência disponível (kW)
- QCH_4 = vazão do metano coletado (m^3/ano);
- η = eficiência do motor de combustão interna (%);
- PCI = poder calorífico inferior do metano ($J/m^3 \text{ CH}_4$);
- $T = 3,1536 \times 10^7$ = constante para conversão da vazão de m^3/ano para m^3/s ;
- 10^{-3} = constante para conversão da potência de W para kW.

A conversão da potência gerada em energia elétrica é realizada considerando a liberação de uma determinada potência ao longo de um dado período e, levando em conta as paradas do sistema para manutenção de equipamentos e outros imprevistos inerentes ao funcionamento do sistema (Montagner, 2021). A energia disponível para o aterro sanitário foi calculada através da Equação 24 (IPCC, 1996), o rendimento adotado foi de 87 % (motores operando a plena carga) e o tempo de opera-

ção de 7884 horas/ano (equivalente a 90% do ano), descontando-se 10% para parada do sistema (Santos, 2022). A energia disponível por ano, foi obtida por meio da equação 23.

$$E = P * R * T * 10^{-3} \quad (\text{Equação 23})$$

Em que:

- E: quantidade de energia (MWh/ano);
- P= Potência gerada (kW);
- R= Rendimento do motor (Santos, 2022);
- T_{ano}: número total de horas em um ano (h);
- 10⁻³ = constante para conversão da potência de kW para MW.

3.6 GERAÇÃO DE CRÉDITO DE CARBONO

3.6.1 Geração de créditos de carbono por meio da queima do biogás

A estimativa de geração de crédito de carbono por meio da queima do biogás foi realizada supondo a utilização de queimadores tipo flare, com eficiência de 50%. Os queimadores flare são responsáveis pela conversão de grande parte do biogás em dióxido de carbono, reduzindo consequentemente as emissões do CH₄ (Almeida; Barbosa; Mendonça, 2024). A eficiência do sistema de coleta de biogás foi a mesma citada no item 3.7.4. Dessa forma, a quantidade de crédito de carbono gerada, por meio da captura e queima do biogás proveniente do aterro sanitário, representa a massa total de dióxido de carbono que deixou de ser emitida na atmosfera e pode ser definida pela Equação 24.

$$CC = CO_{2eq} \cdot GCH_4 \cdot 0,35 \quad (\text{Equação 24}).$$

Em que:

- CC: crédito de carbono gerado (tCO₂/ano);
- GCH₄ = Vazão de metano gerado (m³/ano);
- CO_{2eq}: dióxido de carbono equivalente do metano = 21 (tCO₂/tCH₄);

- 0,35: multiplicação das eficiências do queimador e do sistema de coleta de biogás.

3.5.2 Geração de créditos de carbono por meio do aproveitamento energético do biogás

Para a quantificação da estimativa dos créditos de Carbono provenientes da energia gerada a partir dos resíduos sólidos do aterro em estudo, foi utilizada a equação 25, que infere o total de emissões de dióxido de carbono que seriam evitadas com esse aproveitamento (Almeida; Barbosa; Mendonça, 2024). O valor do Fator de Emissão Médio para 2023 foi de 0,0385 tCO₂/MWh, disponibilizado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovações (Brasil, 2023).

$$CC = E \cdot FEM \quad (\text{Equação 25})$$

Em que:

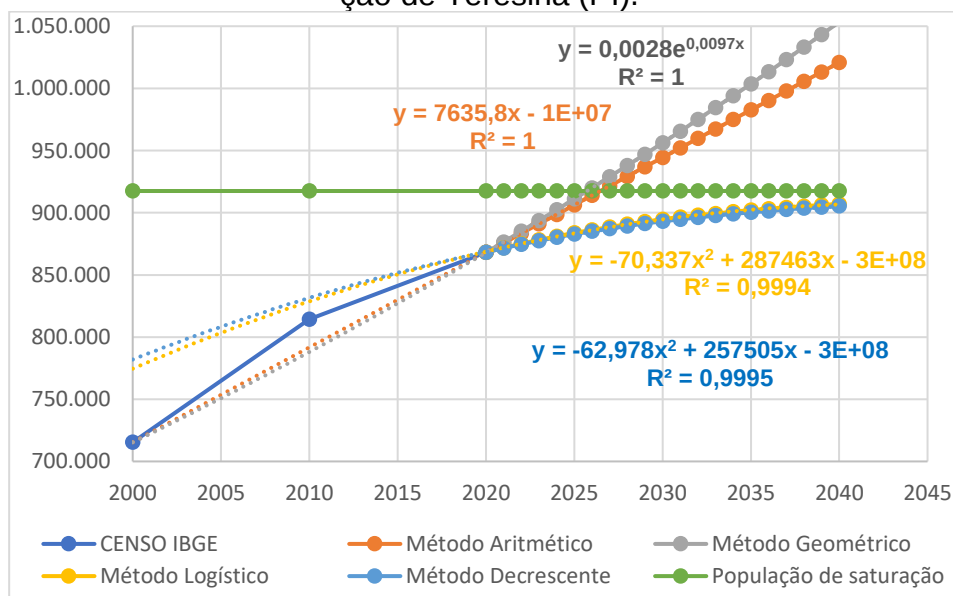
- CC= crédito de carbono gerado (tCO₂/ano);
- E: quantidade de energia (MWh/ano);
- FEM= Fator de Emissão Médio de CO₂;

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO POPULACIONAL

De acordo com Qasim (1985), os métodos mais tradicionais para estimativa populacional correspondem aos de formulação matemática: métodos Aritmético, Geométrico, Curva Logística e Taxa decrescente de crescimento. A partir dos dados do IBGE dos anos de 2000, 2010 e 2020 e das metodologias apresentadas, realizou-se as projeções populacionais para o município de Teresina para os anos que compreendem de 2020 até 2040, a fim de verificar qual taxa de crescimento apresentaria valores mais coerentes para este estudo. Para isso, os dados foram ajustados estatisticamente pelo método dos mínimos quadrados (exponencial, polinomial de ordem 2 e linear), gerando-se as equações das curvas de crescimento e calculando-se os coeficientes de correlação para verificar o ajuste. Os resultados das projeções, dos ajustes e suas respectivas equações e coeficientes de correlação estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Gráfico das Projeções e ajustes das funções de crescimento da população de Teresina (PI).



Fonte: Autora (2024).

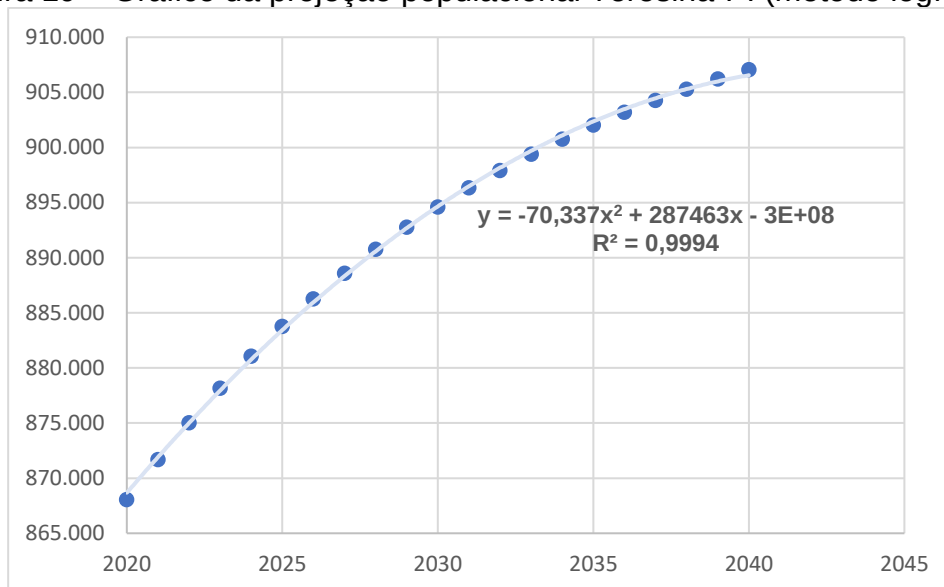
Observou-se que a regressão polinomial de ordem 2 se assemelha ao crescimento apresentado pela curva logística e pelo modelo de taxa decrescente, assim como a tendência de regressão exponencial se aproxima do método de crescimento geométrico e a linear da projeção aritmética.

A análise dos gráficos mostrou que os métodos decrescente e logístico apresentaram projeções populacionais bastante próximas, com estimativas de 905.401 habitantes para o método decrescente e 907.078 habitantes para o modelo logístico no ano de 2040. Em contrapartida, os métodos aritméticos e geométricos projetaram valores mais elevados, estimando 1.020.790 habitantes pelo método aritmético e 1.053.392 habitantes pelo geométrico no mesmo período.

Em se tratando de modelo matemático, a escolha do método que melhor representa o crescimento populacional estimado geralmente é feita em função dos melhores ajustes, frente às populações dos Censos realizados pelo IBGE. Os melhores ajustes são demonstrados por meio de parâmetros de dispersão, como a soma dos quadrados dos erros e o coeficiente de determinação R^2 que representa o percentual da variância dos dados que é explicado pelo modelo (Júnior, 2021). Os resultados variam de 0 a 1, e também podem ser expressos em termos percentuais, variando entre 0% e 100%. Quanto maior é o valor de R^2 , mais explicativo é o modelo em relação aos dados previstos (da Costa, *et al.*, 2022).

Os valores do R^2 apresentados pelos modelos Aritmético, Geométrico, Logístico e Decrescente foram, respectivamente, 1, 1, 0,9994 e 0,9995. Portanto, todos apresentaram um bom ajuste frente aos dados censitários (2000, 2010) e da projeção para 2020, pois encontram-se próximos de 1. Entretanto, o método adotado para estimar a geração de resíduos no período considerado, foi o de Curva Logística por proporcionar resultados mais próximos dos últimos dados censitários no Brasil que têm indicado uma tendência geral (naturalmente que com exceções localizadas) de redução nas taxas anuais de crescimento populacional. De acordo com Silva *et al.* (2023), o modelo logístico apresenta resultados mais promissores, uma vez que suas estimativas populacionais se aproximam mais da realidade dos últimos censos do IBGE. A Figura 19 apresenta a projeção populacional de Teresina, simulada pelo método logístico.

Figura 19 – Gráfico da projeção populacional Teresina-PI (método logístico).



Fonte: Autora (2024).

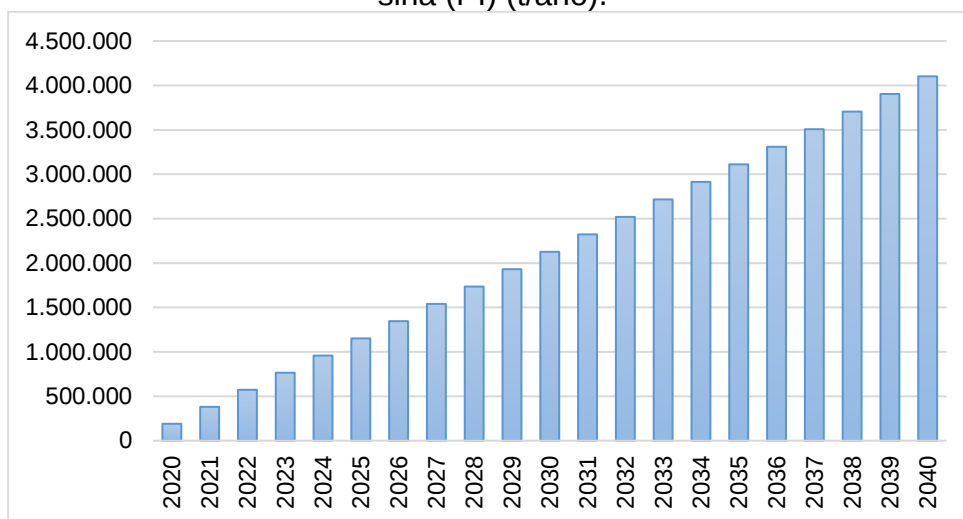
De acordo com os resultados dos cálculos baseados no modelo Logístico, a população projetada para Teresina em 2040 foi de 907.078 habitantes e deve convergir para a população de saturação em torno de 917.475 habitantes após este período.

De acordo com as primeiras projeções de população do IBGE, com dados do censo demográfico de 2022, divulgadas em 22 de agosto de 2024, a população do país vai parar de crescer em 2041, quando chegará a 220.425.299 habitantes. Esse estudo demográfico também mostrou que, do ano 2000 para 2023, a taxa de fecundidade caiu de 2,32 para 1,57 filho por mulher, e deve recuar até 1,44 em 2040, quando atingirá seu ponto mais baixo. Em contrapartida, a idade média da população brasileira atingiu 35,5 anos em 2023 e deve subir para 48,4 anos em 2070 (Bello, 2024). Diante disso, foi possível verificar que a projeção populacional por meio da curva logística, corrobora com o estudo realizado pelo IBGE no ano de 2024.

4.2 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES (RSD) DE TERESINA (PI)

A Figura 20 apresenta o resultado da projeção de geração de resíduos sólidos domiciliares de Teresina de 2020 a 2040, enfatizando a quantidade de RSD gerados e o acumulado até 2040.

Figura 20 – Gráfico da estimativa da quantidade acumulada de RSD de Teresina (PI) (t/ano).



Fonte: Autora (2024).

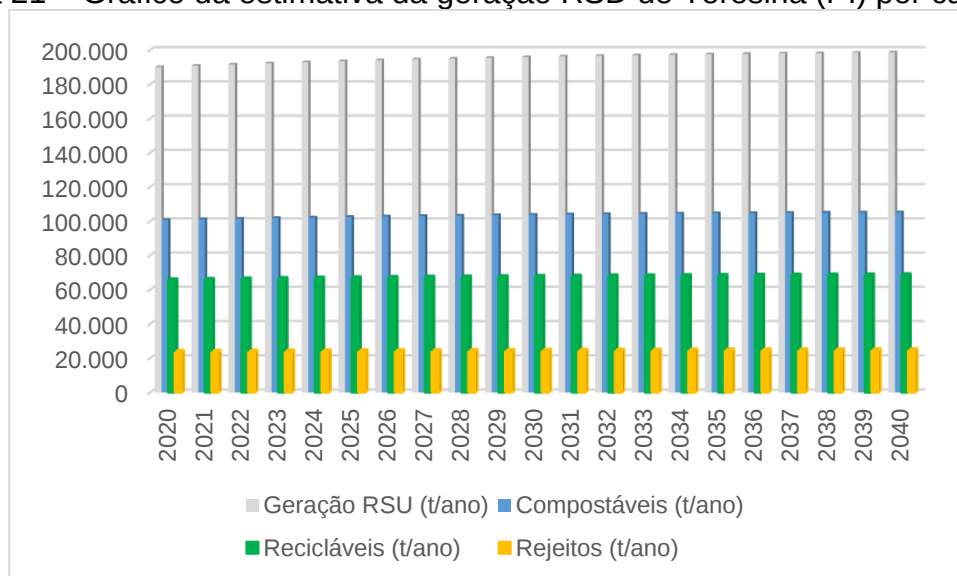
A partir do gráfico figura 20, pode-se observar uma estimativa acumulada de 4.102.645 toneladas de resíduos até o ano de 2040 e uma média anual de 195.364 toneladas de RSD para o período considerado, representando um grande desafio para a gestão adequada destes.

É válido destacar que o Brasil é um país amplamente dependente de usinas hidrelétricas, uma vez que a principal fonte na matriz elétrica do país é a hidráulica fazendo, também, com que haja uma dependência de chuvas para que, com isso, possa se ter uma elevada produção no setor (EPE, 2022). Nesse sentido, os aterros sanitários apresentam-se como uma alternativa promissora de fonte de energia renovável para a geração de energia elétrica no país através do uso do biogás, proveniente da decomposição de material orgânico, a partir do trabalho de microrganismos (bactérias) que convertem esse material em gases e em um percentual energético. O seu uso diminui a possibilidade de emissão de dois gases do efeito estufa: o metano e o dióxido de carbono (Dantas; Chaves; Pires, 2021).

4.2.1 Estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares de Teresina (PI) por categorias

A geração de RSD em Teresina de 2020 até 2040 é crescente como foi visto no gráfico 20, contudo, dentro desse universo de resíduos, nem todos são aproveitados para fins energéticos. A Figura 21 representa a estimativa quantitativa dos RSD de Teresina (PI) das categorias orgânicos, recicláveis e rejeitos em relação ao total de resíduos gerados para o período compreendido de 2020 a 2040.

Figura 21 – Gráfico da estimativa da geração RSD de Teresina (PI) por categoria.



Fonte: Autora (2024).

No período de 2020 a 2040, os resíduos compostáveis (orgânicos), recicláveis e rejeitos apresentaram, respectivamente, uma média anual de 103.543, 67.420 e 24.401 toneladas. Esses resíduos correspondem aos percentuais de 53% de matéria orgânica (restos alimentares, resíduos de jardim e outros resíduos orgânicos), 34,51% de recicláveis secos (papel/cartão, plástico, vidro, couro/borracha, têxtil, metais e eletroeletrônicos, compósitos) e 12,49% de rejeitos (resíduos perigosos, resíduos sanitários, outros resíduos). Portanto, os orgânicos representam o maior percentual da composição do RSD do aterro sanitário de Teresina, tornando-o um potencial gerador biogás.

A fração orgânica desempenha um papel predominante em comparação com outras categorias de resíduos (Brasil 2022; Medeiros 2023). O Brasil gera um volume expressivo de RSU (em torno de 219 mil t/dia) e elevada porcentagem de matéria orgânica (52%) (Nascimento et al., 2019). Segundo Melo (2022), os resíduos gerados nos domicílios brasileiros consistem em três partes principais: 50% de matéria orgânica (como restos de alimentos, folhas, poda, etc.), 28% de recicláveis secos (incluindo plástico, papel, papelão, vidro e metal) e 22% de rejeitos ou "outros". Esses dados corroboram os percentuais gravimétricos observados no município de Teresina.

A diversidade na constituição dos resíduos sólidos urbanos no Brasil representa um desafio considerável quanto à necessidade da promoção de sua disposição final adequada (Marchi; Gonçalves, 2020). Essa complexidade destaca a importância de abordagens flexíveis e adaptáveis para a gestão de resíduos, considerando

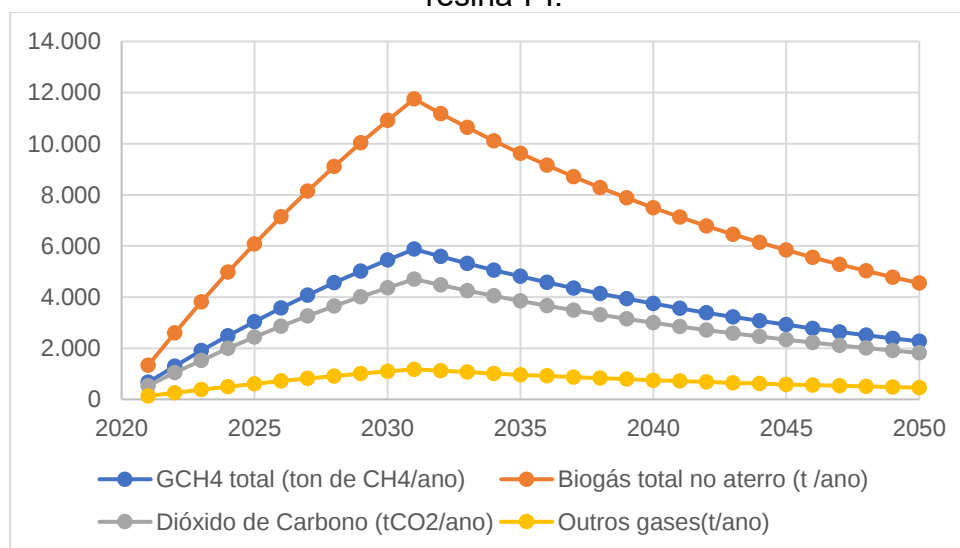
as variáveis dinâmicas que moldam a composição dos resíduos ao longo do tempo. O monitoramento contínuo e a avaliação de fatores contextuais são cruciais para desenvolver políticas eficazes e sustentáveis na gestão de resíduos sólidos urbanos no país (Zago; Barros, 2019).

4.3 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO

4.3.1 Estimativa de emissões de gases do aterro sanitário de Teresina (PI)

A Figura 22, mostra a estimativa das emissões anuais de gases CH_4 (50%), CO_2 (40%) e outros gases (10%), em tonelada por ano, presentes no biogás do aterro sanitário de Teresina-PI, estimado para os anos de 2021 a 2050.

Figura 22 – Gráfico da estimativa de emissões de gases do aterro sanitário de Teresina-PI.



Fonte: Autora (2024).

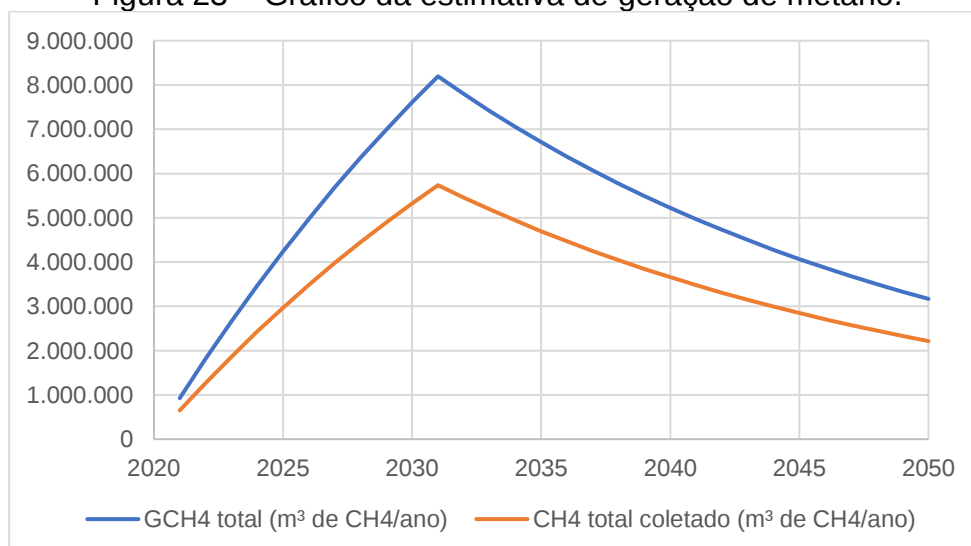
No gráfico da Figura 22, observa-se um aumento das emissões no aterro sanitário, com os valores máximos de gases registrados no ano de 2031, período posterior ao fechamento da célula, quando os resíduos confinados para degradação atingem seu volume máximo, resultando no pico de produção. Nesse período, a parcela correspondente a 40% dióxido de carbono (CO_2) seria de 4.701 t/ano, a de metano (CH_4), 5.876 t/ano, e de outros gases, de 1.175 t/ano. Essas proporções convergem com a literatura, pois os gases predominantes na composição do biogás são o metano e o dióxido de carbono (Melo, 2022).

O metano é um gás de efeito estufa com elevado potencial de aquecimento global, sendo consideravelmente mais potente que o dióxido de carbono. Além disso, possui alto poder calorífico, o que viabiliza sua utilização como combustível em processos de combustão interna e na geração de eletricidade. Nesse contexto, é importante destacar que o setor de resíduos sólidos contribui significativamente para os impactos ambientais, respondendo por aproximadamente 4% das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Diante disso, torna-se essencial a adoção de uma destinação final ambientalmente adequada para os resíduos, bem como o aproveitamento energético dos gases gerados em aterros sanitários (Freitas, 2024).

4.3.2 Estimativa da geração de metano do aterro sanitário de Teresina (PI)

O gráfico da figura 23 representa a geração total de metano (GCH_4) e o metano coletado (CH_4) no aterro municipal de Teresina (PI), estimada pela metodologia (IPCC, 2006) para o período de 2020 a 2050, sendo 2020, o ano de início da operação e 2030, o ano de encerramento. Ele reflete um comportamento típico de aterros sanitários: aumento na geração de metano até um pico e declínio gradual após o encerramento da célula, devido ao esgotamento da matéria orgânica biodegradável (IPCC, 2006).

Figura 23 – Gráfico da estimativa de geração de metano.



Fonte: Autora (2024).

Conforme ilustrado no gráfico da figura 23, a geração máxima de metano ocorrerá em 2031, um ano após o encerramento do aterro, atingindo 8.194.909 m³

de CH₄ por ano, dos quais 5.736.436 m³ por ano serão efetivamente coletados, considerando um potencial de geração de metano (L0) de 105,17 m³ de CH₄ por tonelada de RSD. A menor quantidade coletada foi registrada em 2021, estimada em 649.317 m³ de CH₄ por ano. A partir de 2031, observa-se um declínio exponencial na geração de metano.

A curva que apresenta crescimento é a vazão de metano gerada durante o período de aporte de resíduos no aterro, enquanto a que decresce é aquela gerada durante a produção residual (Fernandes *et al.*, 2022). Essa curva converge com estudos semelhantes sobre a análise do potencial de aproveitamento energético de biogás oriundo de aterro sanitário realizados por Melo (2022) e Santos (2022).

Em um estudo realizado por Vieira e Candiani (2021), com o objetivo de estimar o potencial energético dos municípios da Região do ABC Paulista a partir dos resíduos sólidos urbanos (RSU) dispostos em aterros sanitários, utilizando o modelo matemático do IPCC para a previsão da geração de metano, verificou-se que, entre os municípios analisados, a cidade de Diadema projetou para o ano de 2047 um total de 21.574.544,11 m³ de CH₄ a partir de 209.323 toneladas de RSU, sendo coletados 10.787.272,06 m³ de CH₄. O potencial de geração de metano para o município de Diadema foi estimado em 118,20 m³ de CH₄ por tonelada de RSU. Na Tabela 8 está representado o comparativo entre a projeção de metano para os municípios de Diadema (SP) e Teresina (PI).

Tabela 8 - Comparativo entre a projeção de CH₄ em Diadema (SP) e Teresina (PI).

Dados	Diadema (SP) * (Vieira, Candiani, 2021)	Teresina (PI) (Sandra, 2025)
Metodologia	IPCC	IPCC
População (hab.)	521.352,00	896.345,00
Geração per capita (kg/hab.*dia)	1,10	0,60
Resíduos gerados (t RSU/ano)	209.323,00	196.300,00
Potencial de geração de metano (m ³ CH ₄ /t RSU)	118,20	105,17
Constante de decaimento (k)	0,20	0,05
Metano gerado (m ³ CH ₄ /ano)	21.574.544,11	8.194.909,00
Eficiência de coleta (m ³ de CH ₄ /ano)	0,50	0,70
Metano coletado (m ³ CH ₄ /ano)	10.787.272,06	5.736.436,00

Fonte: Autora (2024).

*Dados do artigo

Com base na Tabela 8, verifica-se que, embora Diadema apresente população inferior, sua taxa de geração per capita é mais elevada, resultando em um volume total de resíduos superior ao estimado para a capital piauiense. A vazão de metano projetada para o município é aproximadamente 2,63 vezes maior, atribuída, sobretudo, à composição dos resíduos e ao elevado potencial de geração. No entanto, ao se considerar o volume efetivamente coletado, essa relação reduz-se para cerca de 1,88, em função da maior eficiência de coleta observada em Teresina.

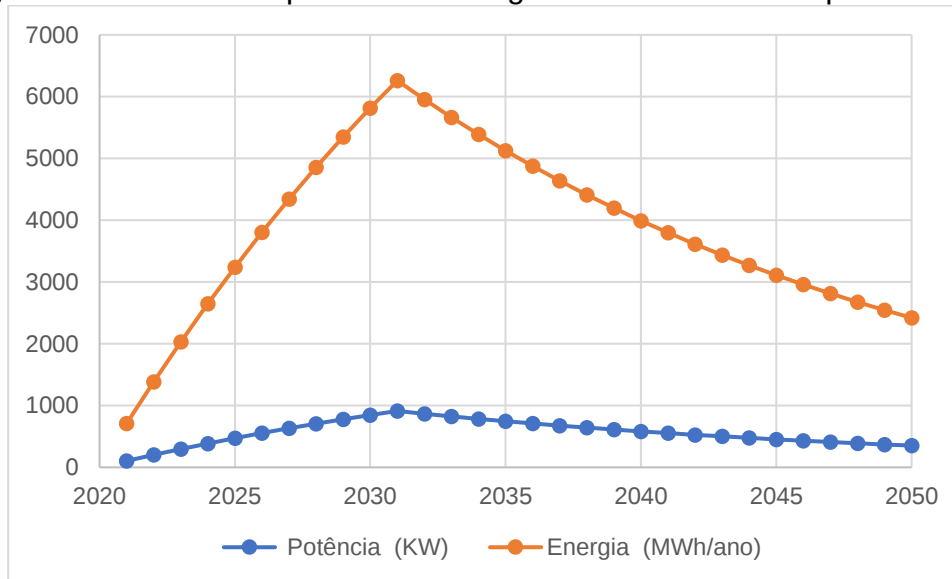
De acordo com o relatório do IPCC (2007), embora a metodologia de decaimento seja padronizada, as estimativas de emissões de CH_4 em aterros sanitários variam significativamente devido à influência de fatores como temperatura, umidade e composição dos resíduos sobre os parâmetros do modelo (k e L_0), dificultando a comparação entre resultados, mesmo quando os volumes de resíduos são semelhantes.

Ademais, destaca-se a importância da manutenção de sistemas de monitoramento e controle das emissões gasosas e da geração de lixiviados no período pós-encerramento, medida essencial para a gestão ambiental e econômica do aterro sanitário. Na pesquisa sobre a análise do monitoramento e cuidados no período pós-fechamento de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos no Estado do Rio de Janeiro, Motta *et al.* (2020) reforçam que, mesmo após o encerramento de suas atividades, os aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) e seu entorno devem ser monitorados para evitar a contaminação do meio ambiente e o risco à saúde pública.

4.3.3 Projeção energética no aterro sanitário

Para estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás captado do aterro sanitário neste estudo, foi considerado um gerador elétrico acoplado a um motor ciclo Otto. Tal consideração foi adotada em diversos estudos de previsão energética em aterros sanitários por ser uma tecnologia mais difundida na área estudada (Freitas *et al.*, 2022; Fernandes *et al.*, 2022; Gomes, 2021). A Figura 24 representa a potência disponível a partir do metano estimado de 2020 a 2050 e a energia elétrica projetada por meio dessa potência.

Figura 24 – Gráfico da potência e energia elétrica estimadas para o aterro.



Fonte: Autora (2024).

O cálculo da potência elétrica considera variáveis como a vazão anual estimada de gás metano gerado, o poder calorífico inferior (PCI) do metano, a eficiência de captação do biogás e o rendimento da tecnologia de conversão empregada. Conforme ilustrado na Figura 24, a vazão máxima de metano coletado no aterro sanitário, no período de 2021 a 2050, corresponde a uma potência total de 3,26 MW, sendo 0,91 MW o valor máximo gerado, disponível para conversão em energia elétrica. O menor valor estimado de potência gerada para esse fim é de 0,10 MW, no ano de 2021.

A geração de energia elétrica, por sua vez, considerando-se 10% do tempo para parada do sistema, varia de aproximadamente 709 MWh/ano, em 2021, até 6.260 MWh/ano em 2031, quando se observa o pico de produção. No que se refere à geração mensal, os valores oscilam entre 59 MWh, em 2021, e 522 MWh, em 2031. Já a produção diária situa-se entre 1,94 MWh (valor mínimo) e 17,15 MWh (valor máximo) ao longo do período analisado.

Em um estudo recente sobre a geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil, Fernandes *et al.* (2022) afirma que as curvas de energia por potência aumentaram gradativamente até atingir um pico, que caracteriza a potência ótima, de máxima produção energética, a qual será a potência instalada no empreendimento, o que corrobora com a análise realizada nessa pesquisa.

De acordo com o estudo realizado por Vieira e Candiani (2021), Diadema apresentou um volume anual de metano gerado de aproximadamente 21.574.544,11

m³, resultando em um potencial energético de 4,26 MW e uma geração de energia de 88,95 MWh/dia. Esses valores foram obtidos com base em uma eficiência de coleta de 50%, PCI de 8.500 kcal/m³ de CH₄, rendimento do motor de 35% e eficiência de conversão de 87%.

A análise comparativa entre os municípios de Diadema (SP) e Teresina (PI), apresentada na Tabela 9, evidencia diferenças significativas nos volumes de metano gerado, bem como na potência e na energia elétrica estimadas a partir da conversão do biogás captado nos respectivos aterros sanitários. Essa comparação fundamenta-se em parâmetros técnicos distintos, como eficiência de coleta, poder calorífico inferior (PCI), eficiência do motor de combustão interna e rendimento do motor.

Tabela 9 - Comparativo entre a geração de potência e energia em Diadema (SP) e Teresina (PI).

Autor/Município e parâmetros utilizados	Volume de Metano (m ³ CH ₄ /ano)	Potência disponível (MW)	Energia gerada (MWh/dia)
Vieira; Candiani (2021) – Diadema (SP) * (Ec=50%; PCI=8.500 Kcal/m ³ CH ₄ ; n=35%; R=87%)	21.574.544,11	4,26	88,95
Planilha – Sandra (2025) - Teresina (PI) (Ec=70%; PCI=17,92 MJ/m ³ CH ₄ ; n=28%; R=87%)	8.194.908,64	0,91	19,06
Planilha – Sandra (2025) - Teresina (PI) (Ec=70%; PCI=35,56 MJ/m ³ CH ₄ ; n=28%; R=87%)	8.194.908,64	1,81	37,82
Planilha – Sandra (2025) - Teresina (PI) (Ec=70%; PCI=35,56 MJ/m ³ CH ₄ ; n=35%; R=87%)	8.194.908,64	2,26	47,27
Planilha – Sandra (2025) - Diadema (SP) (Ec=50%; PCI=35,56 MJ/m ³ CH ₄ ; n=35%; R=87%)	21.574.544,11	4,26	88,89

Fonte: Autora (2025).

*Dados do artigo.

A análise da Tabela 9, em conjunto com os dados apresentados na Figura 24, mostra diferenças relevantes na potência e na energia elétrica geradas entre os municípios de Teresina (PI) e Diadema (SP), resultantes das distintas combinações de parâmetros técnicos aplicados. No caso de Teresina, considerando um volume anual máximo de metano de 8.194.908,64 m³ e eficiência de coleta de 70%, a variação do poder calorífico inferior (PCI) e do rendimento do motor de combustão interna, produz impacto direto nos resultados. No cenário com PCI de 17,92 MJ/m³, rendimento de 28% e eficiência de conversão de 87%, estima-se uma potência de 0,91 MW e geração diária de 19,06 MWh (considerando-se 24 horas por dia). Quando o PCI é elevado para 35,56 MJ/m³, mantendo-se os demais parâmetros, a potência atinge

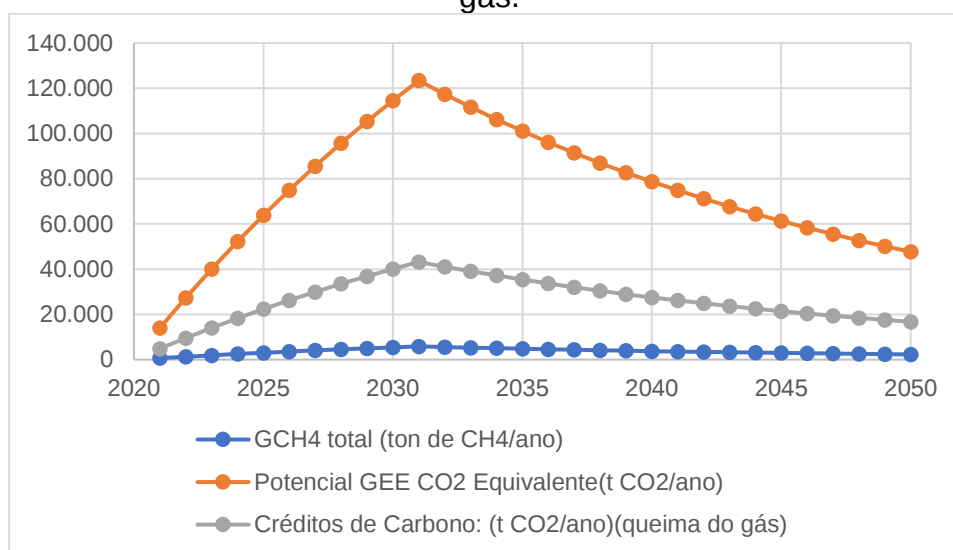
1,81 MW, com produção de 37,82 MWh/dia. Nessa mesma configuração, ao se ajustar o rendimento do motor para 35%, a potência projetada alcança 2,26 MW, correspondendo a uma geração elétrica diária de 47,27 MWh. Para fins de comparação, considerando os mesmos parâmetros adotados no estudo de Diadema — eficiência de coleta de 50%, PCI de 8.500 kcal/m³ de CH₄ (35,564 MJ/m³), rendimento do motor de 35% e eficiência de conversão de 87% — e aplicando-os na planilha construída para as projeções de Teresina, os cálculos resultaram em valores de 4,26 MW e 88,89 MWh/dia, praticamente idênticos aos 88,95 MWh/dia reportados por Vieira e Candiani (2021). A diferença de apenas 0,06 MWh/dia decorre unicamente de aproximações em casas decimais na conversão de 8.500 kcal/m³ para MJ/m³ (1 kcal = 4,184 kJ), bem como de eventuais arredondamentos intermediários nos cálculos. Essa variação é irrelevante do ponto de vista operacional, mas evidencia a sensibilidade dos resultados à precisão dos parâmetros numéricos utilizados. Esses achados validam a planilha desenvolvida para estimativas energéticas de Teresina, confirmando sua confiabilidade e a consistência metodológica ao reproduzir, com elevada precisão, os valores encontrados na literatura.

Adicionalmente, com base nos dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEMDUH, 2023), o consumo médio de energia elétrica do Aterro Sanitário Municipal de Teresina, no período de outubro de 2023 a outubro de 2024, foi de 12.010 kWh/mês. Diante disso, constata-se que a energia estimada como disponível no aterro revela-se suficiente para assegurar sua autosuficiência operacional, suprimindo integralmente a demanda mensal ao longo de todo o período analisado e, alternadamente, quando comparada ao consumo médio de energia elétrica por domicílio na região Nordeste, estimado em 131,1 kWh/mês (EPE, 2023). Essa produção média mensal seria capaz de atender aproximadamente 2.443 residências, representando uma fonte adicional de energia limpa e renovável.

4.3.4 Geração de crédito de carbono

A figura 25 mostra a estimativa dos créditos de carbono gerados para os anos de 2021 até 2050 para a cidade de Teresina por meio da queima do gás gerado no período.

Figura 25 – Gráfico da geração dos créditos de carbono por meio da queima do gás.



Fonte: Autora (2024).

Os títulos de créditos de carbono gerados pela queima do gás totalizaram 795.510,56 toneladas de CO₂ no período de 2021 a 2050, com uma média anual de 26.517,02 toneladas de CO₂/ano.

A quantificação dos créditos de carbono (CC), gerados pelo aproveitamento energético, estabelece a relação entre a energia disponível e o Fator de Emissão Médio (FEM) do dióxido de carbono. O FEM de (CO₂), que está associado à geração de energia elétrica no Brasil em 2023, foi de 0,0385 toneladas de CO₂ por Megawatt-hora (tCO₂/MWh) (Brasil, 2024). O total de créditos de carbono gerados pelo aproveitamento energético, durante o período analisado, foi de 4.439,70 toneladas de CO₂, resultando em uma média anual de 147,99 toneladas de CO₂/ano.

Considerando as duas metodologias de aproveitamento energético, observou-se uma redução considerável na geração de créditos de carbono a partir da geração de eletricidade, o que pode ser justificada pela reduzida eficiência de conversão de energia mecânica em energia elétrica, resultante da combustão do biogás. No entanto, além de representar um incremento de uma fonte renovável à matriz energética brasileira e subsidiar a demanda energética do próprio aterro, também pode resultar em retorno financeiro decorrente da venda de créditos de carbono provenientes do aproveitamento energético (Almeida; Barbosa; Mendonça, 2024).

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- Dentre os modelos utilizados para a projeção populacional, o logístico mostrou-se mais promissor, devido proximidade com o censo do IBGE;
- A maior parcela da composição dos RSD é a matéria orgânica, apontando uma capacidade de geração de bioenergia do aterro face ao volume destes resíduos recebidos anualmente.
- As emissões de gases estimadas no aterro sanitário apresentaram crescimento contínuo no período de 2021 a 2031, passando a decrescer após esse intervalo. A vazão máxima de metano ocorre em 2031, ano de fechamento da célula, representando o pico de potência a ser gerada pelo aterro. A partir desse ano, essa potência torna-se variável, com tendência de redução ao longo do tempo.
- A energia média mensal estimada no aterro seria suficiente para sua autosuficiência operacional e, alternativamente, poderia suprir cerca de 2.443 domicílios, considerando o consumo médio residencial na região Nordeste, constituindo uma fonte de energia limpa e renovável.
- Dentre as metodologias de geração de créditos de carbono avaliadas, a geração por meio da eletricidade foi significativamente inferior à geração de por meio da simples queima do gás. Embora em menor quantidade, os títulos créditos de carbono proveniente do aproveitamento energético, além de maior valor econômico e ambiental, apresenta a vantagem de suprir a demanda de energia elétrica do aterro.
- Os resíduos gerados na região apresentam potencial energético passível de aproveitamento. Contudo, faz-se necessária a análise da viabilidade econômica e ambiental da implantação de sistemas de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica no aterro sanitário de Teresina-PI.
- A ausência de dados atualizados sobre a composição física dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil e sobre a infraestrutura dos aterros sanitários inviabiliza a elaboração de estimativas teóricas mais precisas.
- Diante da relevância da temática abordada na investigação ora apresentada, sugere-se a continuidade de pesquisas futuras com o objetivos de aprofundar

estudo sobre estes dois pontos: 1) o impacto de ações de coleta seletiva, sobre o sistema de gestão de resíduos e o planejamento da infraestrutura do aterro visando melhor o aproveitamento energético; 2) a viabilidade econômica da implantação de sistemas de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica no aterro sanitário de Teresina-PI e seu impacto ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

123 ECOS. **Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) – Como funcionam.** Disponível em: <https://123ecos.com.br/docs/reducoes-certificadas-de-emissoes-rces/>. Acesso em: 20 março 2025.

ABABADES, S. *et al.* **A critical review of biogás production and usage with legislations framework across the globe.** *International Journal of Environmental Science and Techonology*. v. 19, p. 3377-3400, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03301-6>. Acesso em: 20 março 2025.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004c. 71 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.157:** Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação - Procedimento. Rio de Janeiro, 1987. 13 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13.896:** Fixa as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas. Rio de Janeiro, 1997, 12 p.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022.** São Paulo: Abrelpe, 2022. Disponível em: <https://www.abrelpe.org.br>. Acesso em: 15 set de 2023.

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama Nacional de Resíduos 2023.** São Paulo: ABREMA, 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br>. Acesso em: 20 março 2025

ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaico no Brasil e no mundo.** 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 09 jan. 2024.

ALCÂNTARA, J. R; IWATA, B. F. Análise situacional do aterro sanitário de Teresina e avaliação da eficiência do processo de compostagem. **Revista Geotemas**, v. 14, p. e02411-e02411, 2024. Disponível em: <https://periodicos.apps.uern.br/index.php/GEOTemas/article/view/5469>. Acesso em: 20 março 2025.

ALCÂNTARA, J. R; IWATA, B. F; BAPTISTA, E. M. C. Resíduos Sólidos no Bairro Morro da Esperança em Teresina Piauí: Uma Análise dos Anos 2011 e 2021. **Revista Equador**, v. 11, n. 2, p. 1-17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26694/EQUADOR.V11I2.13594>. Acesso em: 20 março 2025

ALCÂNTARA, J.; IWATA, B. F; BAPTISTA, E. M. C. Resíduos sólidos em Teresina-Piauí: entre legislação e a destinação. **Revista Brasileira de Análise e Planejamento Espacial**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 116-132, 20 abr. 2022. Instituto Federal do Piauí. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.51361/rebrape.v1i1.190>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. 366f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALEXANDER, A., BURKLIN, C. E SINGLETON, A. **Guia do Usuário do Modelo de Emissões de Gases de Aterro (LandGEM) Versão 3.02**. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. 2025. Disponível em: <http://www3.epa.gov/ttn/catc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>. Acesso em mai 2024.

ALMEIDA, M. de J.; BARBOSA, T. A.; MENDONÇA, L. C. Geração de crédito de carbono a partir de resíduos sólidos em Sergipe. **Revista Cereus**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 91-107, 10 fev. 2024. Revista Cereus. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18605/2175-7275/cereus.v16n1p91-107>. Acesso em mai 2024.

ANDRADE, F. **Tudo o que você precisa saber sobre ciclo da gestão de resíduos**. 2022. Disponível em: <https://aterraambiental.com/ciclo-da-gestao-de-residuos/>. Acesso em: 28 dez. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12988**: Líquidos livres- Verificação em amostra de resíduos. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.

AUGENSTEIN, D.; PACEY, J. Modelling landfill methane generation. **Proceedings of the Third International Landfill Symposium**, Sardenha, Italia, v. 1, p115-148, 1991.

BELLO, L. **Projeção da População População do país vai parar de crescer em 2041**. 2024. Estatísticas Sociais. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41056-populacao-do-pais-vai-parar-de-crescer-em-2041>. Acesso em: 15 nov. 2024.

BIDONE, F. R. A; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 1999. 120p.

BISINOTO, G. D. S. *et al.* Panorama global das pesquisas sobre crédito de carbono: da semente de Quioto aos ventos da COP28. **Observatório de La Economia Latinoamericana**, v. 23, n. 1, p. e8540-e8540, 2025.

BOARATI, S. R. S.; CASTRO, M. C. A. A. Análise temporal da composição do biogás em aterro sanitário de porte médio. **Natural Resources**, v.13, n.4, p.56-73, 2023. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2023.004.0004>.

BOLETIM AMBIENTAL. **Questões ambientais: uma análise sobre a energia renovável e o desmatamento no estado do Piauí** [recurso eletrônico] / Superintendência CEPRO/SEPLAN – Teresina: CEPRO/SEPLAN, 2023. 22 p. il. Color.; n. 1, v. 1. Disponível em: http://www.cepro.pi.gov.br/download/202312/CEPRO11_fe151bcbf9.pdf. Acesso em: 10 dez. 2024.

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. Resolução CONAMA 404/2008. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 12 de novembro de 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2023: ano base 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN>. Acesso em: 30 de jul. de 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 2022**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 01 abr. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 2020**. Disponível em: < https://smastr16.blob.core.windows.net/conesan/sites/253/2020/11/pnrs_2020.pdf >. Acesso em 23 set. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília**: MMA, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/plano-nacional-de-residuos-solidos>. Acesso em: 23 maio 2024.

BRASIL. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Teresina – PI. **Diário Oficial do Município – DOM**. Anexo ao DOM nº 2.271, abril, 2018.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Brasília – DF, Brasil, agosto, 2010.

BRASIL. **Resolução Conama nº 1, de 23 de janeiro de 1986**. 1. ed. v. 1, n. 4 Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745.PDF. Acesso em 2 de maio de 2025.

BRASIL. **Resolução Conama nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. 1 ed. Brasil. p. 1-9. 1997. Disponível em:

BRASIL. **Teresina figura entre as capitais que mais investiram em saneamento per capita no país. Governo do Piauí**. 2023. Disponível em: < <https://antigo.pi.gov.br/noticias/teresina-figura-entre-as-capitais-que-mais-investiram-em-saneamento-per-capita-no-pais/> >. Acesso em 19 nov 2024.

BRASIL. Decreto nº 10.936 de, de 12 de janeiro de 2022. Ementa Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/35443315/publicacao/35443916>. Acesso em: dez 2024.

BRITO, T. F. N; SANTOS JUNIOR, B. F; ALMEIDA, A. R. Potencial de complementaridade e geração de energia através da biomassa de resíduos agrícolas no Piauí. **Latin American Journal Of Energy Research**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 53-62, 28 dez. 2023.

CARCAR6º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Á, M. S. M.; SILVA, E. A.; MOITA NETO, J. M. Saneamento básico como dignidade humana: entre o mínimo existencial e a reserva do possível. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 493-500, maio 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019183905>.

CARVALHO, A. L.; LYRA, G. B.; COSTA, T. S. Estimativa de geração de biogás no aterro sanitário da bacia leiteira do Estado de Alagoas. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 37, p. 73-88, 2019.

CARVALHO, R. D. C. P. S. **Análise geo-ambiental em área de disposição de resíduos sólidos: um estudo do aterro controlado de Teresina, (PI)**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH. Programa de Pós-graduação em Geografia, Recife, 2015. 165 f.

CAVALHEIRO, E. B. R.; MACIEL, G. P. da S. **Biogás de resíduo sólido urbano como uma fonte de energia alternativa no litoral norte**. Revista Liberato, [S.L.], p. 1-10, 23 dez. 2022. Revista Liberato. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31514/rliberato.2022v23n40.p129>. Acesso em 21 fev 2024

CBIE – Centro Brasileiro de Infraestrutura. **O que são biocombustíveis?** Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/o-que-sao-biocombustiveis/>> Acesso: 15 de janeiro de 2024.

CERQUEIRA, H. G. **Políticas públicas para resíduos sólidos em áreas urbanas: alcances, limites e possibilidades práticas**. Revista Ft, [S.L.], v. 28, n. 137, p. 04-05, 19 ago. 2024. Revista ft Ltda. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.69849/revistaft/th10248191504>. Acesso em 21 fev 2024

CETESB. **Manual do usuário do programa de computador Biogás e uso energético – aterros – versão 1.0**. Secretária do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia. São Paulo: SMA: CETESB: MCT, 2006.

CHAVES, G. L. D; SIMAN, R. R.; SENA, L. G.. Ferramenta de avaliação dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: parte 1. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 167-179, jan. 2020. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-4152202020180120a>. Acesso em fev 2025.

CONSÓRCIO TERESINA AMBIENTAL (CTA). **Litucera estudo da geração e composição dos resíduos sólidos domiciliares da cidade de Teresina/PI**. Relatório Técnico Elaborado por Anderson do Nascimento Sousa . Versão final. Novembro, 2021.

CRUZ, I.C.S; ESPINDOLA, G.M.; CARNEIRO, E.L.N.C. Três décadas de expansão urbana e concentração populacional em Teresina, Piauí, Brasil. **Revista Espacios**, v.37, n.24, 2016.

COSTA, M. O. *et al.* **Projeção populacional do Município de Santa Izabel do Pará/PA-RMB**. *Nature and Conservation*, v. 15, n. 3, p. 132-145, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2022.003.0011>. Acesso em fev 2025.

DANTAS, M. J. F.; CHAVES, J. W. R.; PIRES, R. O. R. Estimativa do potencial energético proveniente do biogás gerado em aterro sanitário no Ceará. **Revista Tecnologia**, [S.L.], v. 42, n. 1, p. 1-18, 22 out. 2021. Fundação Edson Queiroz. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5020/23180730.2021.10777>. Acesso em: dez 2024.

DIAS, G.V.; NEFFA, E.; TOSTES, J. **Pagamentos por serviços ambientais, mercado de crédito de carbono e as trocas desiguais**. Essentia Editora Iffluminense, V.14, n.2, jul, dez, 2020.

DORNELA, NMOD *et al.* **Comparação de modelos de previsão de geração de metano em aterros sanitários brasileiros para o seu aproveitamento energético** (Comparison of prediction models of methane generation in Brazilian landfills for their energy use). Gramado-RS, IBEAS–Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, p. 1-9, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Capítulo 8 (Dados Estaduais) - **Balanco Energético Nacional** - Séries Históricas e Matrizes. 2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: jul. 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética Nacional 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balancoenergetica-nacional> - 2022. Acesso em: nov. 2024.

FALLAHIZADEH, S.; RAHMATINIA, M.; MOHAMMADI, Z.; VAEZZADEH, M.; TAJAMIRI, A.; SOLEIMANI, H. (2019). Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran. **MethodsX**, [online], v. 6, pp. 391–398. <<https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.013>>.

FERNANDES *et al.* Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n.1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200210>. Acesso em: dez 2024.

FERNANDES, G; MARIANI, L. O alto potencial de produção e uso do biogás a próxima fronteira da energia renovável no São Paulo, UNESP, Geociências, v. 43, n. 1, p. 47 -57, 2024 57 Brasil? **Caderno Opinião**, mar., 2019.

FERREIRA, B. O. **Estratégias operacionais para o incremento da metanização em estado sólido de resíduos orgânicos urbanos com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. 2019. 222 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

FREIRE, V. H. N. **Estimativa do potencial de produção de biogás em um aterro sanitário para aproveitamento energético**. 2018. 102p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina.

FREITAS *et al.* Study of the potential for energy use of biogas from wastewater treatment plant to a medium-sized city: a technical, economic and environmental analysis. **Waste and Biomass Valorization**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01727-8>. Acesso em: dez 2024.

FREITAS, F. F.; DE SOUZA, S. S.; FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; ALESSIO, F. J.; DE SOUZA, S. N. M.; VENTURINI, O. J.; ANDO JUNIOR, O. H. The Brazilian market of distributed biogás generation: Overview, tecnológica development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.101, p. 146-157, 2019.

FREITAS, J. K. L. **Aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários brasileiros**. [S.N], Mossoró-RN, v. 1, n. 1, p. 1-11, 23 nov. 2024.

FREITAS, J. K. L. **Aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários brasileiros**. [s.n] Mossoró-RN, v. 1, n. 1, p. 1-11, 23 nov. 2024.

FRIEDE, R. Aumento populacional e degradação ambiental: a conta que não quer fechar. **Revista Augustus**. Rio de Janeiro, v.25, n.52, nov, 2021.

FU, S; ANGELIDAKI, I; ZHANG, Y. In situ biogas upgrading by CO₂-to-CH₄ bioconversion. **Trends in Biotechnology**, v. 39, n. 4, p. 336-347, 2021.

GANDOLLA, M.; ACAIA, C.; FISCHER, C. **Formazione, captazione e sfruttamento di biogas in discariche**. In: Seminario di Aggiornamento, Collana Ambiente, v.18, C.I.P.A, Milão, Itália, 1997.

GIWA, A. S. N.; ALI I.; AHMAD M.; ASIF R. B.; GUO F. L.; LI, M.; LU. **Prospects of China's biogas: Fundamentals, challenges and considerations**. Energy Reports, v. 6, p. 2973-2987, 2020.

GOMES, A. A. L. **Estudo do potencial energético da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos da cidade de Extrema**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG, 2021.

GOMES, J. A. C.; et al. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: uma análise da coleta seletiva nos pontos de entrega voluntária em Teresina, Piauí. **Meio ambiente, sustentabilidade e agroecologia** [recurso eletrônico], v. 6. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/gerenciamento-de-residuos-solidos-urbanos-uma-analise-da-coleta-seletiva-nos-pontos-de-entrega-voluntaria-em-teresina-piaui>. Acesso em: 26 jul. 2024.

GROUP, G. **Biogás de aterro sanitário: veja os números do Brasil e do mundo. 2021**. Disponível em: <https://www.gnpw.com.br/energia-pt/biogas-de-aterro-sanitario-veja-os-numeros-do-brasil-e-do-mundo/>. Acesso em: 26 jul. 2024.

GUERREIRO, E. M. S. **Potencial de Aproveitamento Energético de Biometano Gerado em Aterros Sanitários: Estudo de Casos**. 2020. 104 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Potencial de Aproveitamento Energético de Biometano Gerado em Aterros Sanitários: Estudo de Casos, Rio de Janeiro, 2020.

GUIMARÃES, C. B.; C. A. **Brasil tem 207,8 milhões de habitantes, mostra prévia do Censo 2022**. 2022 . IBGE. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/35954-brasil-tem-207-8-milhoes-de-habitantes-mostra-previa-do-censo-2022#:~:text=O%20IBGE%20divulga%20hoje%20>. Acesso em: 14 jan. 2025.

HAUSER, P. D; FONSECA, R. T. **A Cooperação global e os desafios do desenvolvimento sustentável: resultados e lições do MDL para o desenho de novos mecanismos financeiros**. 2018.

HEAL, G.; KUNREUTHER, H. **An alternative framework for negotiating climate policies**. Climatic Change, v. 144, p. 29-39, 2017.

IANNICELLI, A. L. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. Taubaté: Universidade de Taubaté, 2008.

IBGE. **Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação Técnica de Censo Demográfico -CTD**.2022.

IBGE. **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2020/estimativa_dou_2020.pdf. Acesso em: 24 maio 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2022. Prévia da População dos Municípios com base nos dados do Censo Demográfico 2022**.Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estáticas/socias/saúde/22827censodemografico2022.html=&t=resultados>. Acesso em 17 fev. 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pi/teresina.html>.Teresina,2010. Acesso: 09 mar. 2024.

ICLEI. **Manual para Aproveitamento de Biogás**. v. 1 - Aterros Sanitários. Governos locais pela sustentabilidade, 2009.

IKEDA, D. Y. X. **Análise termodinâmica de Ciclos Rankine Orgânicos integrados amotogeradores a biogás em aterros sanitários**. 2018. 156p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de SantaCatarina.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: Edited by B. Metz et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Disponível em: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch10s10-1.html. Acesso em: 31 jul. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 5 – Waste**. Institute for Global Environmental Strategies, 2006. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/5_Waste-1.pdf. Acesso em: 2 março 2025.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change and Land - An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, 100 sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.** 2019.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds).** 2006.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. **Revised 1996 IPCC. Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories.** Volume 6 – Waste. Chapter 3: Reference Manual. United Kingdom: IPCC, 1996.

IPCC. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.** Montreal, Canada: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2000.

JUNIOR, C.O. Prevendo números: entendendo as métricas R^2 , MAE, MAPE, MSE e RMSE. **Medium.** 12 dez 2021. Disponível em: <https://medium.com/data-hackers/prevendo-n%C3%BAmeros-entend%C3%A9tricas-de-regress%C3%A3o-35545e70>. Acesso em 17 de nov. 2024.

JUNQUEIRA, H. S; MEDEIROS, D. L; COHIM, E. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Feira de Santana: demanda energética e pegada de carbono.** Engenharia Sanitária e Ambiental, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 125-139, fev. 2022. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220200358>. Acesso em: 2 março 2025.

KAPOOR, R *et al.* Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123052, 2020.

KHAN, M. K. *et al.* **Impact of globalization, economic factors and energy consumption on CO2 emissions in Pakistan.** Science of the total environment, v. 688, p. 424-436, 2019.

LENZI, A. R.; MASSI, E. H. G.; SANTANA, R. M. Avaliação da efetividade das políticas públicas que abordam a gestão de resíduos sólidos: um panorama brasileiro. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, Paraná, v. 16, n. 3, p. 1-20, 20 mar. 2024. Mensal. Brazilian Journals. <http://dx.doi.org/10.55905/cuadv16n3-090>.

LIMA, H. Q. **Determinação de parâmetros cinéticos do processo de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de Santo André – SP por meio de testes do potencial bioquímico de metano.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do ABC, São Paulo, 2016.

LUEDEMANN, G.; TOZATO, H.; COELHO, L.; FRANGETTO, F.W.; FONSECA, R. F. **Gastos federais, alavancagem de capital privado e receitas advindas da venda de reduções certificadas de emissões (RCEs) no contexto do mecanismo de desenvolvimento limpo no Brasil (2000 a 2020).** Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicada – Brasília: Rio de Janeiro: IPEA, 2023.

MAJDINASAB, A; ZHANG, Z; YUAN, Q. **Modelling of landfill gas generation: a review**. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. n. 16, p. 361-380, 2017.

MARCHI, C. M. D. F.; GONÇALVES, I. de O. **Compostagem: a importância da reutilização dos resíduos orgânicos para a sustentabilidade de uma instituição de ensino superior**. Revista Monografias Ambientais, [S.L.], v. 1, p. 1-25, 15 maio 2020. Universidad Federal de Santa Maria. Disponível em <http://dx.doi.org/10.5902/2236130841718>. Acesso em: dez 2024.

MEDEIROS, R. Determinação da composição do resíduo sólido urbano gerado em um estado. In: 6º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2023, Foz do Iguaçu. **Anais[...]**, p. 1-6, 23 maio 2023. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.iv-004>>. Acesso em 5 de set. 2024.

MELO, D. O. S. **Gerenciamento dos resíduos sólidos orgânicos domiciliares de São Carlos-SP: análise do potencial de aproveitamento energético de biogás oriundo de aterro sanitário e biometanizadores**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MICROSOFT. **Definir e resolver um problema usando o Solver**. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/definir-e-resolver-um-problema-usando-o-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>. Acesso em: 10 fevereiro 2024.

MONTAGNER, P. R. DOS S. **Avaliação do potencial de uso do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica**. Lorena, São Paulo: Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, 2021.

MORAIS, L. N.M.; BEZERRA, J.M.; RÊGO, A.T.A. Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos em Pau dos Ferros (RN). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA**. Revista Agro Amb, v.15, n.2, 2022.

MOTTA, E.; RIGHI, J.; CARVALHO, A.; LUZ, M.; LAINE, J. Análise do monitoramento e cuidados no período pós-fechamento de aterros de resíduos sólidos urbanos no estado no Rio de Janeiro. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, **Anais**. [s.l.], p. 5940-5947, 2020. ABMS. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cobramseg.20220748>. Acesso em: dez 2024.

NASCIMENTO, M. C. B. et al. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 143-155, 2019.

NAZARÉ, E. **Regulamentação dos créditos de carbono é necessário para um avanço sustentável**. 2023. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/campus-ribeiro-preto/regulamentacao-dos-creditos-de-carbono-e-necessaria-para-um-avanco-sustentavel/#~^text=Regulamenta%C3%A7%C3%A3o%20dos%20cr%C3%A9ditos%20de%20carbono%20%C3%A9%20necess%C3%A1ria%20>>. Acesso em 18 novembro 2023. Acesso em: dez 2024.

NEPOMOCENO, T. A. R.; PONTAROLO, E. L. Panorama brasileiro do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos para a geração de biogás em áreas de aterro sanitário. **International Journal of Environmental Resilience Research and Science**. ISSN 2675 3456 - v. 4, n. 2, 2022.

OLIVEIRA, B.O.S.; MEDEIROS, G.A. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos nos estados da região norte, Brasil. **Revista Valore**, Volta Redonda, v.4, n., junho, 2019.

OLIVEIRA, I. G. S. Créditos de Metano. **Revista de Ciências Jurídicas e Sociais - IURJ**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 69-85, 1 set. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.47595/cjsiurj.v4i1.140>. Acesso em: dez 2024.

PASSAGLIA, R.C.; SANTOS, C.A.F. Análise de viabilidade econômica para geração de energia elétrica a partir do Biogás no Município de Erechim (RS). 6º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. **Anais**. Foz do Iguaçu, maio, 2023. <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2023/IV-010.pdf>

PATEL, Dhiren *et al.* **Carbon credits on blockchain**. In: **2020 International Conference on Innovative Trends in Information Technology (ICITIIT)**. IEEE, 2020. p. 1-5.

PIAUÍ (Estado). **Lei Estadual n. 6.901/2016, de 28 de novembro de 2016**. Disponível em: http://servleg.al.pi.gov.br:9080/ALEPI/consultas/norma_juridica/norma_juridica_mos-trar_proc?cod_norma=4039. Acesso em: 28 de dez de 2024.

PIAUÍ. Secretaria de Estado do Planejamento – SEPLAN. **Observatório de Energias Renováveis**. Disponível em: <https://dados.seplan.pi.gov.br/observatorio/energias-renovaveis/>. Acesso em: 30 set. 2025.

PIAUÍ. Secretaria de Estado do Planejamento – SEPLAN. **Piauí é 1º lugar no Brasil em matriz elétrica renovável e 3º maior produtor de energia limpa eólica e solar centralizada**. Teresina, 6 mar. 2025. Disponível em: <https://www.seplan.pi.gov.br/piaui-e-1º-lugar-no-brasil-em-matriz-energetica-renovavel-e-3º-maior-produtor-de-energia-limpa/>. Acesso em: 5 mai. 2025.

PIAUÍ. Secretaria do Planejamento. **Seplan lançará ferramentas estratégicas e destacará potencial do PI na Brazil Energy Conference 2025**. Teresina: SEPLAN, 2025. Disponível em: <https://www.seplan.pi.gov.br/seplan-lancara-ferramentas-estrategicas-e-destacara-potencial-do-pi-na-brazil-energy-conference-2025>. Acesso em: 23 jul. 2025.

PIÑAS, J. A. V., Venturini, O. J., Lora, E. E. S., Oliveira, M. A. D., & Roalcaba, O. D. C. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de População**, , v.33, n.1, p.175-188, jan./abr. 2016. Disponível em: https://rebep.org.br/revista/article/view/817/pdf_676. Acesso em: 5 mai. 2025.

PMGIRS. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://dom.pmt.pi.gov.br/admin/upload/anexoanom2248-2303201-assinado.pdf>. 2018. Acesso em out. 2024.

PNRS. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares** [recurso eletrônico] / coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022.

POBLETE, I. B. de S. **Simulação e análise de produção e condicionamento de biogás**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA. **Gestão de resíduos sólidos: modelo de concessão trará a Teresina tratamento e destinação mais adequados para lixo**. Teresina, 16 nov. 2021. Disponível em: <https://pmt.pi.gov.br/2021/11/16/gestao-de-residuos-solidos-modelo-de-concessao-trara-a-teresina-tratamento-e-destinacao-mais-adequadas-para-lixo/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

QUASIM, S. R. Wastewater treatment plants: planning, design, and operation. **CBS College Publishing**, Estados Unidos, 1985.

QUASIM, S. R. Wastewater treatment plants: planning, design, and operation. **CBS College Publishing**, Estados Unidos, 1985.

ROCHA, M. C. V. **Microbiologia Ambiental**. 1 ed. Curitiba; Editora Intersaberes, 2020.

ROCHA, M. A. **Avaliação do potencial de geração de biogás a partir de resíduos orgânicos de um restaurante popular**. 2022. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão Sergipe, 2022.

RODRIGUES, M. S. *et al.* Coleta Seletiva e Educação Ambiental em Teresina-PI. **Anais - Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, Natal-Rn, v. 14, n. 1, p. 1-7, 7 nov. 2023. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.14.23.iii-050>. Acesso em: 23 jul. 2025.

RODRIGUES, R. **Mercado de Carbono Desvendado: primeiros passos em direção ao entendimento 1. 2024**. Disponível em: <https://planetacampo.canalrural.com.br/colunistas/merc.ado-de-carbono/>. Acesso em: 28 de dez. 2024.

SANTOS, G. H. A. *et al.* **Metodologia de previsão de potência elétrica de grupos geradores para aproveitamento do metano gerado em aterro sanitário de região com sazonalidade**. 2021.

SANTOS, G. H. A. **Metodologia de previsão de potência elétrica de grupos geradores para aproveitamento do metano gerado em aterro sanitário de região com sazonalidade**. 2021. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/229252>. Acesso em: 28 de dez. 2024.

SANTOS, K. R. A. **Modelagem do potencial de geração sustentável de bioenergia a partir de aterros sanitários**. 2022. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2022. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/12549>. Acesso em: 28 de dez. 2024.

SEEG. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2022**. 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/02/SEEG11-RELATORIO-ANALITICO.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2023.

SEMDUH. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbana e Habitação. **Questionário de Coleta de Informações (RSU)**. Disponível em: Acesso em: 4 out. 2023.

SEMPPLAN. Secretaria municipal de planejamento. **Plano Municipal De Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Teresina – PI**. Órgão de Comunicação Oficial da PMT do Município – DOM. Ano 2018 – Anexo ao DOM Nº 2.271 – 27 de abril de 2018.

SILVA, Claudionor de Oliveira *et al.* Geração quantitativa e qualitativa da emissão de biogás no aterro sanitário de Maceió. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 401-408, 5 jun. 2020. Companhia Brasileira de Produção Científica. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2020.005.0037>. Acesso em: 15 dez 2024.

SILVA, F. C. S. et al. Potencial energético do biogás gerado em aterros sanitários: estudo de caso no aterro municipal de Teresina – PI. **Anais**, 33º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, Curitiba, 2024. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anais-eletronicos/33cbesa/1019_tema_iii.pdf. Acesso em: 23 jul. 2025.

SILVA, I.O; TAGLIFERRO, E. R; OLIVEIRA, A.J. Gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares no município de Jales –SP e sua relação para com a política nacional de resíduos sólidos (PNRS). **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v.7, n.1, p.11475-11499 Jan. 2021.

SILVA, L. K. N. O panorama do manejo de resíduos sólidos urbanos de Teresina e seu potencial energético. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – CBESA, 32., 2023, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2023. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anais-eletronicos/32cbesa/1538_tema_iii.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

SILVA, L. C. A; LIMA, A. A. N. **Os modelos de crescimento populacional de Malthus e Verhulst**: estimando a população do município de Sanharó-PE até o ano 2032. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/1020>>. Acesso em: 30 jul. 2025.

SILVA, T. A. C. D. *et al.* **Avaliação da qualidade de solo de área de lixão desativado: uma revisão de literatura**. Revista Brasileira de Geografia Física v.13, n. 2, p. 630-640, 2020.

SINIR, Sistema Nacional de Informações sobre a gestão dos resíduos sólidos. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: Acesso em: 26/04/2023.

SOUSA, A.N. **Indicadores socioeconômicos, geração e composição dos resíduos sólidos domiciliares da cidade de Teresina-PI: uma contribuição para gestão municipal.** 2018. 223f. Dissertação. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32219>>. Acesso em 18 nov 2024.

SOUSA, F.C. Perspectiva na produção e no aproveitamento energético do Biogás de aterro sanitários. **Revista Estudo & Debate**, Latejado, v.29, n.4, 2022.

SOUZA, Abel Alves de *et al.* **Estudo de caso de geração distribuída com biogás no aterro municipal de Cascavel-PR.** 2020.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS (CEPRO). **Produto Interno Bruto dos Territórios do Piauí**, 2019. Disponível em: http://www.cepro.pi.gov.br/download/202206/CEPRO07_c34ded3336.pdf. Acesso em: 21 jul. 2023.

SZIGETHY, L. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos.** 2021. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Acesso em: 28 dez. 2024.

TAVARES, J.M.S.; PEREIRA NETO, C. Aspectos do crescimento populacional: estimativas e uso de indicadores socioeconômicos. **Revista Formação**, v. 27, abr. 2020.

TAVARES, L. A. Matriz elétrica brasileira e as tendências futuras. Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, [S.L.], v. 4, n. 5, p. 1-21, 5 maio 2023. RECIMA21 - **Revista Científica Multidisciplinar**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.47820/recima21.v4i5.3135>. Acesso em: 28 dez. 2024.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S. **Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues.** New York: McGrall-Hill, 1993, 949p.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of Solid Waste Management.** McGRAW- HILL, USA, 2002.

TERESINA. **Secretaria Municipal de Planejamento** – SEMPLAN. 2021. Perfil dos Bairros. Disponível em: <http://semplan.teresina.pi.gov.br>. Acesso em: 24 jul. 2024.

TERESINA. Secretaria municipal de planejamento – SEMPLAN. **Estruturação do sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Município de Teresina/PI.2021.Estudo de Engenharia, Logística e Afins.** Disponível em: <https://semplan.pmt.pi.gov.br/wp-content/uploads/sites/39/2021/05/Relatorio-de-EstudosEngenharia-Logistica-e-Afins.pdf>. Acesso em 06 de abril de 2024.

TOZATO, H. *et al.* **Abordagens metodológicas para a identificação dos gastos como mudança do clima: desafios para o Brasil.** Boletim Regional, Urbano e Ambiental. n.21, 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Emerging technologies for the management and utilization of landfill gas. **Office of Research and Development**. EPA 68-D30035. Janeiro, 1998.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Landfill Gas Energy Project Development Handbook**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook>>. Acesso em: 6 de dezembro de 2023.

VERTOWN. Gestão de Resíduos. **Como funciona o aterro sanitário?** 2018. Disponível em: <https://www.vertown.com/blog/como-funciona-o-aterro-sanitario/>. Acesso em: 01 dez. 2025.

VIEIRA, L. C.; CANDIANI, G. Potencial energético de resíduos sólidos urbanos na Região do Grande ABC Paulista. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 328-342, 16 fev. 2021. Companhia Brasileira de Produção Científica. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2021.002.0030>. Acesso em: 15 dez 2024.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Volume 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 472 p.

ZABED, H. M.; AKTER, S.; YUN, J.; ZHANG, G.; ZHANG, Y.; QI, X. Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109503, 2022.

ZAGO, V. C. P; BARROS, R. T. V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019181376.

ZAVARISE, J. P. *et al.* Emissões teóricas de biogás de aterro e seu aproveitamento energético no Brasil: um estudo bibliométrico. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 8, n. 1, p. 96-108, 2021.