

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**VIABILIDADE FINANCEIRA DE PROJETOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERROS SANITÁRIOS NO ESTADO DE
SÃO PAULO**

Gláucia Veloso Rocha

Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

GLÁUCIA VELOSO ROCHA

VIABILIDADE FINANCEIRA DE PROJETOS DE GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO EM
ATERROS SANITÁRIOS NO ESTADO DE SÃO PAULO

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.

Rio Claro - SP

2023

R672v	Rocha, Gláucia Veloso Viabilidade financeira de projetos de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em aterros sanitários no Estado de São Paulo / Gláucia Veloso Rocha. -- Rio Claro, 2023 97 f. : il., tabs. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Marcus Cesar Avezum Alves de Castro 1. Mercado de Energia Elétrica. 2. Energias Renováveis. 3. Geração Distribuída. 4. Redução de Emissão de Metano. 5. Aquecimento Global. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

GLÁUCIA VELOSO ROCHA

VIABILIDADE FINANCEIRA DE PROJETOS DE GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO EM
ATERROS SANITÁRIOS NO ESTADO DE SÃO PAULO

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro (orientador)

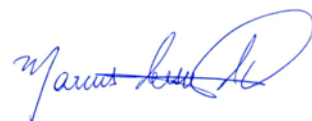
Prof. Dr. Nelson Callegari Júnior

Prof. Dr. Valdir Schalch

Rio Claro, 26 de Junho de 2023.



Assinatura da aluna



Assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, Laura Ramos Veloso Rocha e Francisco das Chagas Rocha, que sempre foram meu alicerce, meu ponto de apoio e amor e minhas maiores inspirações. Obrigada por acreditarem no meu potencial e por me ensinarem, todos os dias, a ser forte, lutar pelos meus sonhos e ter fé.

Agradeço ao professor Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro pela confiança, suporte e pela preciosa troca de conhecimentos, ideias e vivências. Foi enriquecedor elaborar esse trabalho com o seu apoio e orientação.

Também agradeço, de modo abrangente, à UNESP, aos professores que participaram da minha formação e aos demais colaboradores do Instituto.

Agradeço à ZEG, empresa na qual tive a oportunidade de ser estagiária e onde trabalho atualmente, por mostrar que a transformação de resíduos em energia já deixou de ser sonho, sendo atualmente um mercado viável e de grande valor econômico e ambiental.

Agradeço aos meus colegas de sala, que se tornaram meus amigos de vida. Tenho certeza de que essa jornada foi muito melhor pois pude compartilhá-la com pessoas incríveis.

Por fim, agradeço à República Patins, que foi o meu lar durante os primeiros anos de faculdade e se tornou minha família. Obrigada por terem me recebido tão bem, por tudo que me ensinaram e por todos os momentos que vivemos juntas.

Desejo que todos aqui citados, bem como aqueles não citados, mas que estão ou estiveram presentes em algum momento desta jornada, saibam da importante contribuição que tiveram na minha formação. Espero que eu possa retribuir, à altura, todo o suporte e confiança em mim depositada.

RESUMO

O gás metano presente no biogás é um combustível com alto poder calorífico gerado a partir da decomposição anaeróbia de matéria orgânica. Devido ao alto acúmulo de material degradável e à ausência de oxigênio nas camadas de resíduos, aterros sanitários são ambientes com alta geração de biogás. O presente trabalho analisa a viabilidade econômica de comercialização da energia elétrica gerada a partir do metano contido no biogás de aterros sanitários, nos modelos de Minigeração Distribuída e no Mercado Livre de Energia Elétrica. Para isso, foi estimado o potencial de geração de energia elétrica a partir do metano contido no biogás em função da taxa de recebimento de resíduos, considerando o limite de 5 MW de potência instalada instituído para o Modelo de Minigeração Distribuída de acordo com a Resolução Normativa 1.052/2023 da ANEEL. Para estimativa da geração de metano e energia elétrica, a definição dos parâmetros de potencial de geração de metano em peso de resíduo (L_0) e taxa de geração de metano por ano (k), a serem utilizados no software LandGEM, foi realizada com base em dados reais de aterros localizados na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 5 (UGRHI 5 - Piracicaba, Capivari e Jundiaí) de São Paulo. Para análise econômica, foram estimados os custos de implementação e operação do projeto, além da receita potencial pela venda da energia elétrica no modelo de Geração Distribuída e no Mercado Livre. Por fim, fixando-se os valores definidos anteriormente e utilizando diferentes taxas de recebimento de resíduos por ano, foram obtidos os resultados de geração de metano e de energia elétrica, bem como os resultados financeiros do projeto em aterros sanitários. A partir dos valores de $42,355 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tonelada}$ para a geração de metano em peso de resíduo (L_0) e de $0,083/\text{ano}$ para a taxa de geração de metano por ano (k), os resultados demonstraram a viabilidade econômica de projetos de geração de energia elétrica a partir do metano contido no biogás em aterros com taxa de recebimento de resíduos a partir de 237 toneladas por dia, que tiveram Taxa Interna de Retorno (TIR) igual a 10,35%, sendo que o retorno foi maior em aterros com maior taxa de recebimento de resíduos, considerando os valores dos parâmetros de L_0 e k estimados neste trabalho. Para a comercialização no Mercado Livre, com a limitação da potência instalada em 5 MW, os projetos não apresentaram viabilidade. Desconsiderando a limitação da potência, a comercialização da energia elétrica no Mercado Livre apresentou o retorno mínimo esperado de 10,35% de TIR em aterros com taxa de recebimento de resíduos a partir de 1.025 toneladas por dia.

Palavras-chave: Mercado de Energia Elétrica, Energias Renováveis, Geração Distribuída, Redução de Emissão de Metano, Aquecimento Global.

ABSTRACT

The methane gas present in biogas is a fuel with high calorific power generated from the anaerobic decomposition of organic matter. Due to the high accumulation of degradable material and the absence of oxygen in the waste layers, landfills are places with large biogas generation. The present work analyzes the economic viability of commercialization of electric energy generated from methane contained in the biogas from landfills, in the models of Distributed Mini-generation and in the Free Market of Electric Energy. For this, the potential for generating electricity from methane contained in the biogas was estimated based on the rate of waste receipt, considering the limit of 5 MW of installed power established for the Distributed Mini-generation Model in accordance with Normative Resolution 1,052/2023 from ANEEL. To estimate the generation of methane and electricity, the definition of the parameters of potential methane generation in weight of waste (L_0) and the rate of methane generation per year (k), to be used in the LandGEM software, was based on real data from landfills located in Water Resources Management Unit 5 (UGRHI 5 - Piracicaba, Capivari and Jundiaí) in São Paulo. For economic analysis, project implementation and operation costs were estimated, as well as the potential revenue from the sale of electricity in the Distributed Generation model and in the Free Market. Finally, by fixing the previously defined values and using different waste reception rates per year, the results of methane and electricity generation were obtained, as well as the financial results of the project in landfills. Based on values of $42.355 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$ for methane generation in weight of residue (L_0) and $0.083/\text{year}$ for the methane generation rate per year (k), the results demonstrated the economic viability of generation projects of electricity from methane contained in the biogas in landfills with a waste reception rate equal to or greater than 237 tons per day, which had an Internal Rate of Return (IRR) equal to 10.35%, and the TIR was higher in landfills with higher waste reception rate, considering the values of the L_0 and k estimated in this work. For commercialization in the Free Market, with the limitation of installed capacity at 5 MW, the projects were not viable. Disregarding the power limitation, the commercialization of electric energy in the Free Market presented the minimum expected return of 10.35% of IRR in landfills with a waste reception rate equal to or greater than 1,025 tons per day.

Keywords: Electric Energy Market, Renewable Energy, Distributed Generation, Methane Emission Reduction, Global Warming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de um aterro sanitário e seus componentes.....	23
Figura 2 – Fases de Digestão de Resíduos Sólidos em Aterros Sanitários.....	25
Figura 3 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos realizados no trabalho.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração anual de metano ao longo do tempo para aterros com diferentes taxas de recebimento de resíduos.....	73
Gráfico 2 – Geração anual de Energia Elétrica ao longo do tempo para aterros com diferentes taxas de recebimento de resíduos.....	74
Gráfico 3 – Potência instalada máxima em cada ano do projeto considerando o uso do potencial total de geração de metano em aterros com diferentes taxas de recebimento de resíduos.....	75
Gráfico 4 – Variação da Taxa Interna de Retorno (TIR) de um projeto de acordo com diferentes Taxas de Recebimento de Resíduos dos Aterros.....	76
Gráfico 5 – Tempo de Retorno do Investimento (Payback) de um projeto de acordo com diferentes Taxas de Recebimento de Resíduos dos Aterros.....	77

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Decomposição anaeróbia da matéria orgânica.....	26
Equação 2 – Produção de gás em aterro sanitário de acordo com modelo Scholl Canyon.....	36
Equação 3 – Produção total de gás em aterro sanitário de acordo com modelo Scholl Canyon..	36
Equação 4 – Produção de gás em aterro sanitário de acordo com modelo do IPCC.....	38
Equação 5 – Cálculo do potencial de geração de metano de acordo com modelo do IPCC.....	38
Equação 6 – Cálculo da fração de carbono orgânico degradável dissociada.....	39
Equação 7 – Produção de gás em aterro sanitário de acordo com modelo LandGEM.....	40
Equação 8 – Variação da produção de gás em aterro sanitário de acordo com modelo LandGEM.....	57
Equação 9 – Cálculo da aproximação entre a geração de metano calculada pelo modelo LandGEM e os dados reais de geração de metano medido nos aterros selecionados.....	59
Equação 10 – Cálculo da aproximação média “n” entre a geração de metano calculada pelo modelo LandGEM e os dados reais de geração de metano medido nos aterros selecionados para todo o período de dados disponíveis.....	60
Equação 11 – Cálculo da conversão do metano em energia elétrica.....	61
Equação 12 – Cálculo da Receita Total Bruta no ano.....	65
Equação 13 – Cálculo da Receita Total Líquida no ano.....	65
Equação 14 – Cálculo do EBITDA no ano.....	65
Equação 15 – Cálculo do EBIT no ano.....	66
Equação 16 – Cálculo do IR segundo regime de Lucro Presumido.....	66
Equação 17 – Cálculo da CSLL segundo regime de Lucro Presumido.....	66
Equação 18 – Cálculo do Lucro Líquido Anual	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa de recuperação de materiais recicláveis em relação à quantidade total coletada.....	29
Tabela 2 – Valores sugeridos de k pelo Banco Mundial.....	37
Tabela 3 – Valores sugeridos de L0 pelo Banco Mundial.....	37
Tabela 4 – Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo.....	39
Tabela 5 – Valores sugeridos de k pelo IPCC.....	39
Tabela 6 – Valores sugeridos de k pelo Landfill Gas Emission Model, Versão 3.02.....	41
Tabela 7 – Valores sugeridos de L0 pelo Landfill Gas Emission Model, Versão 3.02.....	41
Tabela 8 – Comparação das principais tecnologias de conversão do biogás.....	50
Tabela 9 – Comparação entre os valores estimados de geração de metano em relação aos valores medidos no aterro de Paulínia, no período de 2013 a 2020.....	68
Tabela 10 – Geração de metano real e calculada no Aterro Sanitário de Paulínia sem limitação de superestimativas de geração.....	69
Tabela 11 – Geração de metano real e calculada no Aterro Sanitário de Rio Claro.....	71
Tabela 12 – Modelo Financeiro de Projeto de Geração de Energia em aterros sanitários com a menor taxa de recebimento de resíduos para viabilização do projeto.....	76
Tabela 13 – Taxa média de recebimento de resíduos e retorno financeiro de projeto de comercialização de energia a partir do biogás em aterros localizados na UGRI 5.....	78
Tabela 14 – Taxa média de geração de resíduos e retorno financeiro de projeto de comercialização de energia a partir do biogás em aterros implementados por consórcios.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACL – Ambiente de Contratação Livre

ACR – Ambiente de Contratação Regulada

ADEME – Agência Francesa para a Transição Ecológica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BMP – Potencial bioquímico de metano

CAA – Clean Air Act

CAPEX – Despesa de Capital

CCEAR – Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CGH – Centrais Geradoras Hidrelétricas

CH₄ – Metano

CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis

CISBRA – Consórcio Intermunicipal de Saneamento da Região do Circuito das Águas

CO₂ – Dióxido de carbônico

CO₂e – Equivalência em dióxido de carbono

COD – Carbono orgânico degradável

CODf – Carbono orgânico degradável dissociada

COFINS – Contribuição para Financiamento da Seguridade Social

CONSAB – Consórcio Intermunicipal de Saneamento Ambiental

CONSIMARES – Consórcio Intermunicipal de Manejo de Resíduos Sólidos

CSLL – Contribuição Social sobre o Lucro Líquido

EBIT – Lucro antes de juros e impostos

EBITDA – Lucro antes de juros, impostos, depreciação e amortização

EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

ETE – Estações de tratamento de esgoto

FCH₄ – Fator de correção de metano

FCM – Fator de correção de metano

H₂ – Gás hidrogênio

H₂S – Sulfeto de hidrogênio

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IEA – Agência Internacional de Energia

IGPM – Índice Geral de Preços do Mercado

IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IR – Imposto de renda

IRENA – International Renewable Energy Agency

k – Taxa de geração de metano por ano

L₀ – Geração de metano em peso de resíduo

LandGEM –Landfill Gas Emissions Model

MDL –Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MME – Ministério de Minas e Energia

NBR – Norma Brasileira Registrada

NH₃ – Amônia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrica

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

ONU – Organização das Nações Unidas

OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo

OPEX – Despesa Operacional

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

P&L – Demonstrativo de Lucros e Perdas

PCH – Pequena central hidrelétrica

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PCI – Poder Calorífico Inferior

PIS – Programa de Integração Social

PME – Programa de Mobilização Energética

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

Proinfa – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

REIDI – Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI)

RenovaBio – Política Nacional de Biocombustíveis

RGGI – Regional Greenhouse Gas Initiative

RPS – Renewable Portfolio Standard

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa

SIN – Sistema Interligado Nacional

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TE – Tarifa de Energia

TFSEE – Taxa de Fiscalização dos Serviços de Energia Elétrica

TIR – Taxa Interna de Retorno

TUSD – Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição

TUSDg – Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição para Geração

TUST – Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Transmissão

UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 5

UHE – Usina Hidrelétrica de Energia

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

USEPA – Agência Ambiental dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 Objetivos Específicos.....	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1 Resíduos Sólidos: Definição, composição e gestão.....	21
3.2 Geração de biogás em Aterros Sanitários.....	24
3.3 Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos e Aproveitamento do Biogás no Brasil.....	28
3.3.1 Panorama do aproveitamento energético dos resíduos sólidos no Brasil.....	30
3.4 Contextualização do Uso de Biogás e Biometano no Mundo.....	31
3.5 Modelos teóricos para Estimativa de Geração de Biogás em Aterros Sanitários.....	34
3.5.1 Modelos de Primeira Ordem (Scholl Canyon, IPCC e LandGEM)	36
3.5.1.1 Modelo Scholl Canyon.....	36
3.5.1.2 Modelo desenvolvido pelo IPCC.....	37
3.5.1.3 Modelo LandGEM.....	40
3.5.2 Aplicação e Desafios para a aplicação dos modelos de estimativa de geração.....	41
3.6 Aproveitamento Energético do Biogás.....	46
3.6.1 Tecnologias para conversão energética do biogás.....	48
3.7 Mercado de Energia Elétrica.....	51
3.7.1 Mercado Livre de Energia Elétrica.....	43
3.7.2 Geração Distribuída.....	54
3.7.3 Projeções de aumento do custo da energia elétrica.....	55
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
4.1 Estimativa da Geração de Biogás e Energia Elétrica em Aterros Sanitários.....	57
4.1.1 Definição das Constantes L_0 e k	57
4.1.2 Conversão do biogás em energia elétrica.....	61
4.2 Definição dos custos de implementação e operação do projeto.....	62
4.3 Estimativa da receita do projeto.....	63
4.4 Cálculo da Viabilidade Financeira do projeto.....	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
5.1 Valores do potencial de geração de metano (L_0) e da taxa de geração de metano (k).....	68
5.2 Geração de Metano e de Energia Elétrica.....	72
5.3 Viabilidade financeira dos projetos de acordo com a taxa de recebimento de resíduos (R).....	75

6. CONCLUSÃO.....	82
REFERÊNCIAS.....	83

1. INTRODUÇÃO

Durante a Assembleia Geral das Nações Unidas de 2015, foi aprovada por líderes de 193 países a Agenda 2030, um plano de ação colaborativo que visa a promoção do desenvolvimento sustentável. Entre seus objetivos, está assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos e, como meta, destaca-se o aumento da participação de energias renováveis na matriz energética global (ONU, 2015). No mesmo ano, na 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, foi assinado por 195 países o Acordo de Paris, que formaliza a participação de todos os países no estabelecimento de metas para limitar o aumento da temperatura média do planeta em menos de 2°C até 2100, por meio da redução da emissão de gases do efeito estufa.

Entretanto, segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA), a emissão mundial de gases do efeito estufa permanece em ascensão, passando de 32,362 bilhões de toneladas de CO₂ em 2015 para 33,621 bilhões de toneladas em 2019 e, quando comparado com as emissões totais em 1990, observou-se um aumento de aproximadamente 85% (IEA, 2022). Vale destacar que, em 2019, em torno de 42% das emissões de CO₂ foram causadas pelo setor de produção de eletricidade e calor (IEA, 2022). Nesse sentido, desde 2000, os principais combustíveis utilizados para geração de eletricidade são o carvão e gás natural, representando em 2019, respectivamente, 37% e 23% do total, sendo responsáveis, em conjunto, pela emissão de 22,048 bilhões de toneladas de CO₂ em 2019 (IEA, 2022). Por sua vez, a energia elétrica a partir de resíduos representou apenas 0,42% do total da energia produzida em 2019 (IEA, 2022).

No Brasil, segundo dados do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), foram emitidas 2,16 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente em 2020, sendo que o setor de resíduos foi responsável por 92 milhões de toneladas dessas emissões, pouco abaixo do segmento industrial, responsável pela emissão de 100 milhões de toneladas no ano (SEEG, 2021). Do total de emissão do setor de resíduos, 64% foi causada pela disposição de resíduos sólidos em aterros controlados, lixões e aterros sanitários (SEEG, 2021).

A emissão de gases do efeito estufa em aterros está associada ao biogás, um gás gerado a partir do processo de decomposição anaeróbica da matéria orgânica dos resíduos depositados nesses aterros. Em aterros sanitários, a matéria orgânica é depositada em células de disposição, compactada e depois coberta com camadas de solo. Essas células são constantemente recobertas por camadas sucessivas de resíduos até o momento em que esta célula esteja completamente preenchida. O processo de cobertura isola as camadas do contato atmosférico, instalam-se condições físico-químicas redutoras de resíduos ideais para a proliferação de colônias de

microrganismos anaeróbicos. A digestão anaeróbica ocorre nesses ambientes, com ausência de oxigênio, pela ação desses microrganismos anaeróbicos e facultativos.

O biogás é composto predominantemente por metano e gás carbônico e, apesar do grande potencial de poluição, o metano apresenta alto poder calorífico, sendo, portanto, um recurso eficiente na geração de energia. Além da geração de energia, a queima do biogás transforma o metano em gás carbônico, que apresenta um potencial de aquecimento da atmosfera aproximadamente 21 vezes menor que o metano (ARCADIS, 2010). Desde 2003, 117 milhões de toneladas de CO₂e foram recuperadas no Brasil por meio da queima ou do aproveitamento energético do biogás (SEEG, 2021).

No que tange o setor de energia, observa-se o crescimento do consumo mundial de eletricidade, que apresentou aumento de 35% entre 2009 e 2019 (IEA, 2021). No âmbito nacional, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em seu Plano Decenal de Expansão de Energia, projeta um crescimento no consumo final a uma taxa média de 2,5% ao ano, chegando a aproximadamente 3,7 bilhões de MWh em 2031 (EPE, 2022). Sob a ótica socioambiental, o EPE destaca que o processo de transição energética do Brasil contempla principalmente iniciativas de descarbonização e produção de bioenergia e energias renováveis, destacando as oportunidades de ampliação do aproveitamento energético de resíduos (EPE, 2022).

No contexto de geração e comercialização de energia destaca-se o modelo de Geração Distribuída, que consiste em projetos descentralizados de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Atualmente, esse modelo corresponde a 4% da capacidade instalada de energia do Brasil e, segundo projeções da EPE, espera-se que represente 14% em 2031, passando de 8 GW para 37 GW de potência (EPE, 2022). Vale destacar que, no início de 2022, foi sancionada a Lei N° 14.300, que instituiu o Marco Legal da Minigeração e Microgeração Distribuída, trazendo ao setor maior previsibilidade sobre as regras de incentivo para essa modalidade e, conseqüentemente, maior segurança para investimentos. A Lei N° 14.300/2022 foi regulamentada em fevereiro de 2023 pela Resolução Normativa 1.059 da ANEEL (BRASIL, 2023). Segundo a nova legislação, são considerados projetos de minigeração distribuída as centrais geradoras de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que possuem potência instalada mínima de 75 kW e máxima de 5 MW para as fontes despacháveis ou 3 MW para as fontes não despacháveis, ou seja, que não possuem mecanismos para serem utilizadas sob demanda dos operadores da rede elétrica, de acordo com as exigências do mercado (BRASIL, 2022).

A comercialização de energia elétrica no Mercado Livre de Energia também é uma alternativa para projetos de geração em aterros sanitários. O Mercado Livre é um Ambiente de

Contratação Livre (ACL), onde os consumidores, geradores e comercializadores podem comprar e vender energia, negociando livremente os preços, fonte, volume, período, entre outras condições contratuais. A comercialização também é possível no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), onde as distribuidoras compram energia elétrica para fornecimento aos seus consumidores, através de leilões regulados e realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com o apoio da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Em suma, observa-se a necessidade de expansão da geração de energia no país, em um momento de dedicação de esforços internacionais para redução das emissões de gases do efeito estufa. Nesse sentido, os aterros sanitários são de extrema relevância, não apenas pela sua contribuição para as emissões globais de gases do efeito estufa, quando não há projetos para a sua queima ou recuperação energética, como também pela oportunidade de geração de energia renovável descentralizada.

O grande potencial de uso do biogás no Brasil também está associado a um cenário em que os aterros sanitários têm relevância significativa como depósitos de grandes quantidades de matéria orgânica (CETESB/SMA, 2006). Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), os aterros sanitários são a principal forma de disposição final de resíduos no solo, tendo recebido 73,8% do total de resíduos coletados em 2020 (SNIS, 2021). Também foi identificada a coleta média de resíduos sólidos domiciliares e públicos na taxa de 1,01 kg por habitante por dia, gerados pela população urbana, totalizando uma massa de 66,6 milhões de toneladas de resíduos coletados no ano (SNIS, 2021).

A Lei Nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil, estabeleceu como um dos seus objetivos o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético (BRASIL, 2010).

Por sua vez, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, um dos instrumentos da PNRS, instituído por meio do Decreto Nº 11.043/2022, estabelece como uma de suas metas o aumento da recuperação e aproveitamento energético de biogás de RSU. O indicador global da meta determina que, até 2040, mais de 60% do biogás gerado em processos de digestão anaeróbia e nos aterros sanitários deverá ser aproveitado energeticamente, com potencial para abastecer 9,5 milhões de domicílios com eletricidade. Um dos indicadores secundários da meta também aponta que todos os aterros sanitários terão eficiência mínima de captação de 50% de biogás para aproveitamento energético, com uma potência instalada de 257 MW até 2040 (BRASIL, 2022).

No que tange o objetivo definido pela PNRS de reaproveitamento dos resíduos sólidos, dados do SNIS evidenciam o baixo uso de tecnologias de tratamento de resíduos, como a compostagem e reciclagem, caracterizando a disposição final em aterros como o principal destino dos resíduos no Brasil. Em 2021, a taxa de recuperação de materiais recicláveis foi de apenas 2,35% em relação à quantidade total coletada (SNIS, 2022). Vale destacar que esse índice não apresenta melhorias significativas em relação aos anos anteriores, estando na faixa de 2% de recuperação desde 2014 (SNIS, 2023). Deste modo, também faz-se necessário o direcionamento estratégico de esforços para a geração de energia a partir do biogás, que configura-se como uma medida necessária para aproveitamento da matéria orgânica gerada no país, além de ser uma oportunidade de agregar valor à etapa de disposição final de resíduos, principal destinação utilizada no país, bem como melhorar o desempenho ambiental das unidades de disposição.

Cabe destacar que produção de biogás é maior quanto mais abundante for a disponibilidade de resíduos biodegradáveis. Nesse sentido, segundo dados do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, 45,3% dos resíduos gerados no país são matérias orgânicas e 10,4% são classificados como papel e papelão, componentes estes que apresentam quantidades significativas de carbono orgânico degradável, quando comparado com plástico, metal, vidro e outros (ABRELPE, 2020).

O elevado percentual de material orgânico em relação ao total produzido confere ao resíduo sólido urbano do país uma característica de alta biodegradabilidade. Além disso, por estarem localizados em clima tropical, os resíduos dispostos nos aterros brasileiros apresentam alta umidade, fator que também favorece o rápido processo de biodegradação.

Apesar de criar condições favoráveis para a produção de biogás, essas características dificultam a aplicação segura de modelos matemáticos para a estimativa do potencial de geração de gás metano, pois os modelos e as equações utilizadas foram calibrados e ajustados nas condições de estudos internacionais, o que gera diferenças notáveis nas características e nas condições de geração de gases dos aterros brasileiro (CASTRO et al., 2012). Assim, recomenda-se a utilização de dados reais observados em aterros sanitários da região estudada para ajuste das variáveis dos modelos matemáticos e melhor adequação da estimativa com a realidade local.

Dado o exposto, o presente trabalho visa produzir insumos e evidências do potencial e da viabilidade da exploração do biogás em aterros sanitários, com o objetivo de fomentar a expansão de projetos de produção de energia renovável por meio de um insumo perene e

abundante, de grande relevância para a diversificação da matriz energética nacional e mundial e para o cumprimento das metas mundiais de redução das emissões de gases do efeito estufa.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade econômica da geração e comercialização de energia elétrica a partir do metano presente no biogás em aterros sanitários no mercado de energia brasileiro.

2.1 Objetivos Específicos

- Investigar e definir valores de referência da capacidade potencial de geração de metano (L_0) e taxa de geração de metano (k) para uso nos modelos de estimativa de geração de biogás em aterros sanitários;
- Estimar a taxa mínima de recebimento de resíduos e de produção de biogás em um aterro para viabilizar a geração e comercialização da energia elétrica no modelo de Geração Distribuída e no Mercado Livre.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos: Definição, composição e gestão

De acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos são material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água. A PNRS também distingue o conceito de resíduo e rejeito ao definir este último como resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

A Norma ABNT NBR 10004:2004 classifica os resíduos em perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II), sendo esta segunda classe dividida em não inertes (Classe II A) e inertes (Classe II B). Os resíduos da classe I são aqueles que apresentam periculosidade, ou seja, geram risco à saúde pública ou ao meio ambiente quando gerenciado de forma inadequada, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Por sua vez, os resíduos da classe II B são aqueles que, quando submetidos ao contato com água à temperatura ambiente, não tem seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Por fim, fazem parte da classe II A os resíduos que não se enquadram nas classes I e II B e que podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004).

Segundo a PNRS, os resíduos sólidos também podem ser classificados de acordo com sua origem, conforme classes abaixo (BRASIL, 2012):

- Resíduos sólidos urbanos: Englobam os resíduos domiciliares e de limpeza pública, sendo os primeiros originados em atividades domésticas em residências urbanas e os segundos originados da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: Resíduos gerados pelas atividades de saneamento público básico, com exceção dos resíduos sólidos urbanos;
- Resíduos industriais: Oriundos de processos produtivos e instalações industriais;
- Resíduos de serviços de saúde: Originados nos serviços de saúde, como em hospitais, postos de saúde, laboratórios, entre outros;

- Resíduos da construção civil: Resíduos 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: Gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- Resíduos de serviços de transportes: Resíduos originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- Resíduos de mineração: Gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;
- Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: Incluem todos os resíduos gerados em estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, excetuados os resíduos de limpeza pública e de serviços públicos de saneamento básico e dos setores de saúde, construção civil e transporte.

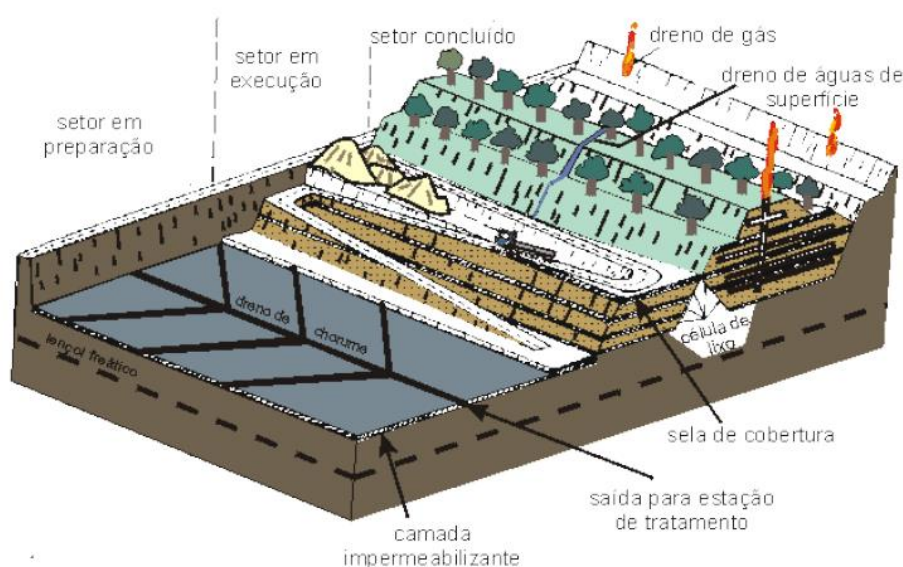
De acordo com Ensinas (2003), a composição dos resíduos varia de acordo com as modificações econômicas e as transformações tecnológicas da região, sendo que nos países mais desenvolvidos, com alto grau de industrialização, observa-se a predominância de materiais como papel, metal, plástico e vidros, característico de produtos industrializados e suas respectivas embalagens, além de maior quantidade de geração de resíduos, associado ao maior poder aquisitivo da população. Dados da ABRELPE indicam que 45,3% dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil são classificados como matéria orgânica, que contempla sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras. Em relação aos resíduos recicláveis secos, estes representam 33,6% da composição gravimétrica do RSU brasileiro, incluindo plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidros (2,7%), metais (2,3%), e embalagens multicamadas (1,4%). Os rejeitos, por sua vez, representam 14,1% do total de resíduos gerados (ABRELPE, 2020).

No que tange a gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, a PNRS define a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Neste sentido, a Lei também determina prazos para a implementação da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, em que até o dia 2 de agosto de 2024, todos os municípios deverão ter extinguido locais de disposição inadequada de resíduos. Ainda, é estabelecida a possibilidade de uso de tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2020).

No âmbito da Lei Nº 12.305/2010, é entendida como disposição final ambientalmente adequada a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2020).

De acordo com a Norma ABNT NBR 8419, projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos devem possuir sistema de drenagem das águas superficiais que tendam a escoar para a área do aterro sanitário, bem como das águas que se precipitam diretamente sobre essa área, sistema para drenagem, remoção e tratamento dos líquidos que percolam através dos resíduos dispostos (quando solicitado), impermeabilização inferior e/ou superior do aterro sanitário e sistema para a drenagem de gás, que pode ser integrado ao sistema de drenagem de líquido percolado (ABNT, 1992). Em aterros sanitários, os resíduos são dispostos em camadas, compactados e cobertos por camadas sucessivas de resíduos e terra, até quando a altura máxima permitida é atingida e a disposição de resíduos em suas células é encerrada. O desenho esquemático de um aterro sanitário e dos componentes citados podem ser observados na figura abaixo.

Figura 1 – Desenho esquemático de um aterro sanitário e seus componentes



Fonte: PROIN/CAPES & UNESP/IGCE (1999)

Vale destacar que os aterros sanitários diferem-se de lixões e aterros controlados, que são formas inadequadas de disposição de resíduos. Em lixões, os resíduos sólidos são dispostos diretamente sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Já nos aterros controlados, são utilizadas técnicas para confinamento de resíduos através da

cobertura com camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho. Entretanto, ainda não há impermeabilização da base, nem sistema de tratamento de percolado ou do biogás gerado (D’Almeida & Vilhena, 2000).

3.2 Geração de biogás em Aterros Sanitários

O biogás é um gás composto predominantemente por metano e gás carbônico, sendo que este primeiro apresenta alto poder calorífico, permitindo que o biogás seja utilizado como um recurso energético. Por outro lado, o metano apresenta um potencial de aquecimento da atmosfera aproximadamente 21 vezes maior que o gás carbônico, sendo um grande problema quando não tratado corretamente ou aproveitado e emitido para a atmosfera (ARCADIS, 2010). Segundo o IPCC (1996), os aterros são responsáveis por cerca de 5 a 20% do total das emissões antrópicas de metano.

A geração do biogás ocorre através do processo de degradação de matéria orgânica. Em aterros sanitários, essa matéria orgânica é disposta em células, compactada e coberta com camadas de solo. As células de disposição são constantemente recobertas por camadas sucessivas de resíduos até seu completo preenchimento. Esse processo de cobertura isola as camadas do contato atmosférico, instalam-se condições físico-químicas redutoras ideais para a proliferação de colônias de microrganismos anaeróbicos. A digestão anaeróbica ocorre nesses ambientes, com ausência de oxigênio, pela ação desses microrganismos anaeróbicos e facultativos (Massey & Pohland, 1978).

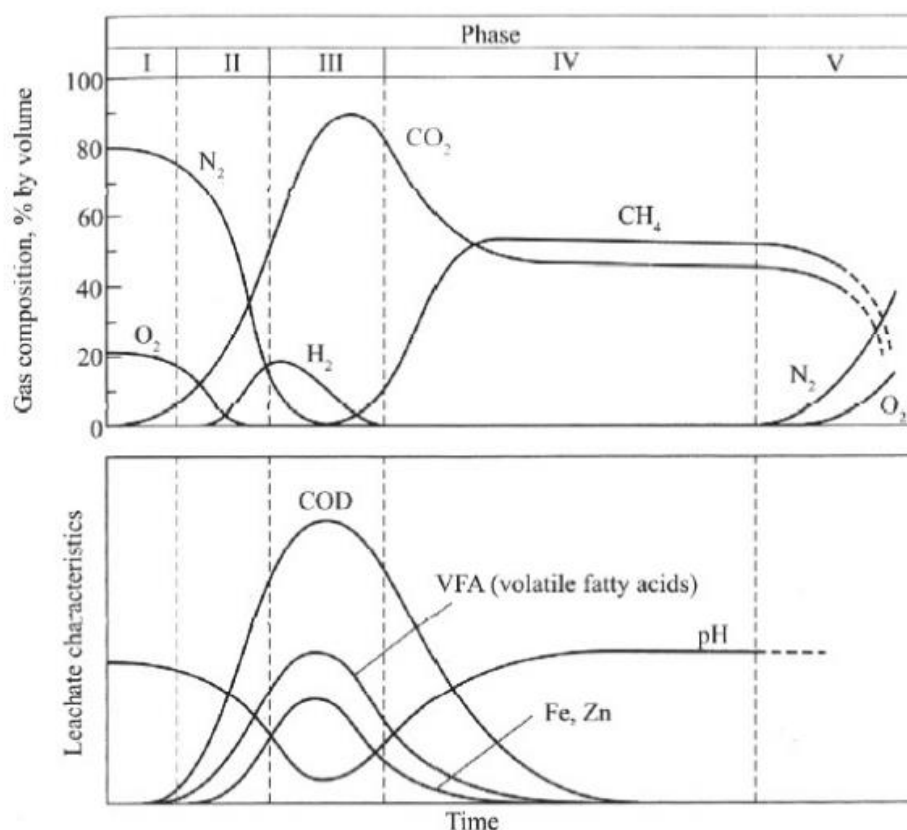
A decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos pode ser dividida nas cinco fases, que seguem descritas abaixo (Pohland & Harper, 1985; Tchobanoglous, 1993):

- Fase I – Ajuste Inicial: Processo de degradação aeróbia dos resíduos sólidos dispostos no aterro devido presença de oxigênio atmosférico na matéria orgânica. Ocorrem as primeiras mudanças dos parâmetros ambientais e o acúmulo preliminar de umidade.
- Fase II – Transição: Esgotamento gradativo do oxigênio e transição para condições anaeróbicas. Receptor primário de elétrons deixa de ser o oxigênio e é substituído por nitratos e sulfatos, estabelecendo condições de redução de matéria orgânica. Surgem produtos metabólicos intermediários, como ácidos orgânicos voláteis.
- Fase III – Acidificação: Hidrólise e fermentação das frações orgânicas dos resíduos. Tornam-se predominantes ácidos orgânicos voláteis intermediários, que causam queda acentuada no pH. Nesta fase, as concentrações de CO₂ no aterro elevam-se. Nutrientes como nitrogênio e fósforo são liberados e assimilados e o hidrogênio aparece.

- Fase IV – Metanogênese: Conversão dos intermediários formados na Fase III em CH_4 e CO_2 , constituintes essenciais do biogás. Nesta fase, predominam-se microrganismos estritamente anaeróbicos, há consumo contínuo de nutrientes e os valores de pH tendem a subir devido conversão dos ácidos e hidrogênio em CO_2 e metano.
- Fase V – Maturação Final: Redução da disponibilidade de nutrientes e consequente diminuição da atividade biológica, causando queda ou término na produção de biogás. Mesmo que haja material orgânico remanescente, apenas alterações estruturais ou mudanças na natureza do aterro possibilitarão sua decomposição.

A variação das concentrações dos nutrientes e das demais características do meio no decorrer do processo de digestão de resíduos, conforme fases supracitadas, pode ser observada na figura a seguir.

Figura 2 – Fases de Digestão de Resíduos Sólidos em Aterros Sanitários



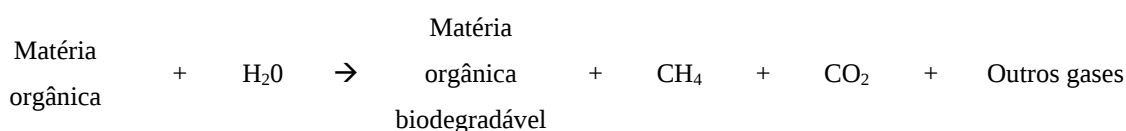
Fonte: Tchobanoglous et al. (1994)

A digestão anaeróbia dos resíduos, em específico, pode ser dividida em um processo de quatro fases sequências, que são: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Ghosh,

1981; Yang & Guo, 1990; USEPA, 1991; Pelczar Jr., 1996; Lobo, 2003; Tchobanoglous et al., 2003; Bengtsson, 2008; Barcelos, 2009).

- Hidrólise Enzimática: Transformação da matéria orgânica em polímeros mais simples como proteínas, carboidratos e lipídios, que também sofrem hidrólise e transformam-se em compostos dissolvidos de menor peso molecular (aminoácidos, pequenos sacarídeos, ácidos graxos e álcoois) pela ação de bactérias fermentativas. Processo demanda a presença de água.
- Acidogênese: Metabolização dos produtos formado na hidrólise por bactérias acidogênicas fermentativas, convertendo-os em substâncias como ácidos graxos voláteis, etanol e compostos minerais (CO_2 , H_2 , NH_3 e H_2S). Predominam-se bactérias anaeróbias estritas, embora haja presença de bactérias aeróbicas facultativas.
- Acetanogênese: Oxidação dos ácidos graxos e etanol por bactérias acetogênicas, gerando principalmente acetato e hidrogênio, compostos que formam os substratos para a produção de metano.
- Metanogênese: Conversão do acetato e o hidrogênio em CH_4 e CO_2 pela ação de metanobactérias. O metano também pode ser produzido por bactérias acetotróficas a partir da redução do ácido acético ou, embora menos comum, por bactérias hidrogenotróficas a partir da redução de CO_2 .

De acordo com Tchobanoglous et. al. (1993), na maioria dos processos de conversão, o dióxido de carbono e o metano constituem mais de 99% do total dos gases produzidos. Também são produtos desse processo a amônia (NH_4), gás sulfídrico (H_2S) e outros constituintes em menores quantidades. Conforme mostra a Equação 1, entre os fatores fundamentais para a formação dos constituintes do biogás, estão a disponibilidade de matéria orgânica dos resíduos sólidos e de água.



Equação 1 – Decomposição anaeróbia da matéria orgânica

Outros produtos desse processo são amônia (NH_4), gás sulfídrico (H_2S) e outros constituintes em menores quantidades. De acordo com Tchobanoglous et. al. (1993), na maioria

dos processos de conversão, o dióxido de carbono e o metano constituem mais de 99% do total dos gases produzidos.

Existe uma série de fatores que influenciam no processo de decomposição de matéria orgânica e consequentemente na produção de biogás, bem como na qualidade do gás produzido. Alguns desses fatores encontram-se elencados a seguir (CHESF, 1987; USEPA, 1991; Moura, 2014):

- **Composição dos resíduos:** A quantidade de material orgânico biodegradável presente nos resíduos destinado aos aterros influencia diretamente no potencial de geração de biogás. Segundo Augenstein e Pacey (1991), a quantidade da fração orgânica é principal fator que determina o potencial de geração de gases por volume de resíduo.
- **Tamanho das partículas:** Influencia na velocidade das reações. Quanto maior for a área da superfície específica da partícula e menor for a unidade da partícula, mais rápida ocorrerá a decomposição.
- **Temperatura:** Afeta diretamente a atividade enzimática das bactérias, uma vez que cada microrganismo possui uma temperatura ótima onde as reações ocorrem em velocidade máxima. Bactérias mesofílicas, onde estão classificadas as metanogênicas predominantes na maioria dos aterros (McBean et al., 2005), têm seu intervalo ideal entre 29 e 38°C. Já as termofílicas, onde estão as metanogênicas que geralmente apresentam maiores taxas de geração de biogás, tem o intervalo ideal entre 49 e 70°C.
- **pH:** O pH ótimo para o metabolismo das bactérias metanogênicas está entre 6,8 e 7,2, sendo o pH neutro considerado ótimo. Embora o pH nas fases iniciais de digestão seja ácido, ele tende a se aproximar da neutralidade a partir da metanogênese.
- **Concentração de oxigênio:** A digestão anaeróbica ocorre em ambiente redutor sem a presença do oxigênio que, embora presente na primeira fase do processo, é consumido e retirado após a cobertura dos resíduos no aterro.
- **Umidade:** Fator essencial para o metabolismo das bactérias que atuam no processo, sendo que uma umidade alta, entre 60 e 90%, pode aumentar a geração de biogás.
- **Pluviosidade:** Relacionado ao fator de disponibilidade de água para o processo, além de ser um importante meio de transporte para produtos gerados na digestão.
- **Idade do aterro:** A geração de biogás em um aterro é influenciada pelo tempo de atraso e tempo de conversão, sendo a primeira variável referente ao período entre a disposição do resíduo e o início da geração de metano e a segunda equivalente ao intervalo entre a disposição do resíduo e o término da geração de metano.

- Idade dos resíduos: Com o passar do tempo, ocorre o avanço no consumo de matéria orgânica, diminui-se a disponibilidade de material passível de decomposição e, consequentemente, a geração de biogás (Antonio, 2012; Cavallari, 2013; Gotardo, 2013). Assim, espera-se uma menor geração de biogás em regiões com resíduos mais antigos.

Existem outros fatores que podem influenciar na taxa de geração de gás, como a presença de bactérias, potencial de oxidação-redução, porosidade dos resíduos, profundidade da massa de resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos diversos (Filho, 2005).

Em estudo realizado em uma célula experimental no aterro sanitário de Rio Claro (SP) verificou-se que o caso de maior produção de biogás no período de um ano ocorreu cerca de 2 meses após um pico de alta precipitação, precedido e sucedido por períodos de seca. No entanto, foi verificada uma queda gradual no fluxo de biogás para o dreno de maior produção, proporcionada possivelmente pela distribuição de chuvas mais frequente e contínua que ocorreu nesse período (Moreira et al., 2017).

Deste modo, características climáticas adequadas e alta porcentagem de material orgânico nos resíduos do aterro criam condições propícias para a produção de metano (Castro & Bello, 2010).

3.3 Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos e Aproveitamento do Biogás no Brasil

Segundo dados do diagnóstico elaborado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a média nacional de massa coletada de resíduos sólidos urbanos per capita para a população urbana foi de 0,99 kg/habitante.dia em 2021. Considerando a população total, incluindo a população em áreas rurais, a massa média per capita de RSU coletada foi de 0,95 kg/habitante por dia. O SNIS também estimou que foram coletadas 65,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2021, sendo que a coleta seletiva representou cerca de 1,7 milhão de toneladas deste total (2,6%). Do montante de resíduos recicláveis coletados, 1,52 milhões foram destinados para unidades de tratamento para reciclagem ou compostagem. Assim, aproximadamente 64 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos foram dispostos em aterros sanitários, controlados e lixões em 2021 (SNIS, 2022).

Neste sentido, foram identificadas 5.530 unidades de processamento de RSU em operação em 2021, sendo 2.836 unidades de disposição no solo, representadas pelos aterros sanitários (669 unidades), lixões (1.572 unidades) e aterros controlados (595 unidades). Do total

de resíduos destinados para aterros e lixões, aproximadamente 73,3% foram dispostos em aterros sanitários, 11,8% em aterros controlados e 15% em lixões, ou seja, mais de um quarto (25%) dos resíduos tiveram disposição inadequada no solo. Em relação as unidades de tratamento, identificou-se em operação 1.726 unidades de triagem, que receberam 1,2 milhões de toneladas de recicláveis secos, e 77 unidades de compostagem, que receberam 0,4 milhões de toneladas de resíduos recicláveis orgânicos. Observa-se que os aterros sanitários são o principal destino dos resíduos no Brasil, recebendo cerca de 47 milhões de toneladas em 2021, equivalente a aproximadamente 72% do total coletado (SNIS, 2022).

Nesse sentido, vale destacar que, enquanto a coleta regular direta e indireta de resíduos sólidos domiciliares atende a 98,3% da população urbana e 89,9% da população total, a coleta seletiva em áreas urbanas foi identificada em apenas 1.567 municípios, que representam 32% dos municípios abrangidos pelo diagnóstico do SNIS. A coleta realizada sobre a prestação do serviço porta a porta foi realizada em 1.346 municípios (85,9% dos municípios com coleta seletiva) e abrange 39,7% da população urbana da amostra (SNIS, 2022).

Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos priorize o tratamento (reciclagem e compostagem) dos resíduos em detrimento da disposição final, a taxa de recuperação de materiais recicláveis em relação a quantidade total de resíduos domésticos e urbanos foi de apenas 2,35% em 2021. Analisando-se o histórico do indicador calculado pelo SNIS, observa-se que não houve melhorias significativas no aproveitamento dos materiais recicláveis, sendo que em 10 anos o aumento da taxa de recuperação foi de apenas 0,55%, conforme apresentado na tabela abaixo (SNIS, 2023). Esses valores reforçam o posicionamento dos aterros sanitários como o principal destino dos resíduos sólidos no Brasil, bem como a necessidade de agregar valor para os resíduos dispostos nestes aterros.

Tabela 1 – Taxa de recuperação de materiais recicláveis em relação à quantidade total coletada

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1,8%	1,8%	1,8%	2,0%	2,2%	2,1%	2,1%	2,2%	2,09%	2,17%	2,35%

Fonte: Elaborado pelo autor, com dados do SNIS (2023)

Em suma, dado o cenário brasileiro de baixo percentual de tratamento e aproveitamento dos resíduos urbanos, que apresentou pouco avanço ao longo dos últimos anos, e considerando que os aterros sanitários são a principal destinação dos resíduos no Brasil, os projetos de uso do biogás gerado nesses aterros são necessários para agregar valor à esta última e principal

etapa da gestão de resíduos, propiciando o aproveitamento do potencial energético dos resíduos sólidos, além de ser uma oportunidade de melhoria do desempenho ambiental das unidades de disposição.

Ademais, o diagnóstico de resíduos sólidos do SNIS destaca que a gestão e a sustentabilidade econômica e financeira da prestação dos serviços de manejo de resíduos sólidos urbanos vêm sendo aprimoradas pela formação de consórcios públicos intermunicipais. Nesse sentido, a Lei nº 14.026/2020, que atualiza o marco legal do saneamento, incentiva esse modelo de gestão associada e permite a associação voluntária de municípios para compartilhamento de aterros sanitários, unidades de tratamento e frotas de veículos de coleta, bem como para estruturação de planos de gestão e apoio a cooperativas de catadores de materiais recicláveis. Em 2021, foram identificados 226 consórcios intermunicipais para manejo de resíduos sólidos, com um conjunto de 1.380 municípios consorciados, que abrange 24,8% dos 5.570 municípios brasileiros e 13,6% da população urbana (SNIS, 2022). Assim, conforme apresentado nos resultados deste trabalho, o compartilhamento de aterros sanitários por municípios integrantes de um consórcio possibilita a viabilização de projetos de aproveitamento de biogás, sendo uma alternativa à aterros menores que não recebem a quantidade de resíduos suficientes para viabilizar este tipo de projeto.

3.3.1 Panorama do aproveitamento energético dos resíduos sólidos no Brasil

Nesse sentido, de acordo com o panorama elaborado pelo Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), houve um aumento de 16% no número de plantas de biogás em operação e 10% no volume de biogás produzido em 2021 em comparação ao ano anterior, sendo estimada a produção anual de 2,3 bilhões de Nm³ de biogás. Segundo da CIBiogás, esse valor ainda corresponde a cerca de 3% do potencial teórico total de 84,6 bilhões de Nm³ por ano. Em relação ao insumo para produção do biogás, em 2021, apenas 9% das plantas são do setor de saneamento, que engloba os aterros sanitários (RSU), as usinas de tratamento de resíduos orgânicos e estações de tratamento de esgoto (ETE). Por outro lado, o setor de saneamento foi responsável por 74% do volume total de biogás produzido, evidenciando o grande potencial do setor para produção do energético em grande escala. Ademais, embora São Paulo esteja na 5ª posição no quesito de número de plantas, o estado produz o maior volume de biogás, o que é justificado pelo fato de possuir um número maior de unidades de grande porte, que aproveitam, principalmente, resíduos da indústria e do setor de saneamento (CIBiogás, 2022).

Em relação ao aproveitamento energético do biogás, a geração de energia elétrica apresenta-se como a principal rota escolhida pelas plantas brasileiras, representando 87% das unidades em operação e aproximadamente 71% do volume de biogás produzido. Por sua vez, o aproveitamento térmico, como a queima em caldeira de vapor, secagem de grãos, aquecimento de aviários e secagem de lodo de esgoto, é feito em 11% das unidades em operação e consumiu aproximadamente 7% do biogás produzido em 2021. Já o uso de biogás para produção de biometano ocorre em apenas 10 plantas, equivalente à 1 % do total nacional. Entretanto, em termos de volume, a produção de biometano consumiu em torno de 23% do volume total de biogás produzido em 2021 (CIBiogás, 2022).

3.4 Contextualização do Uso de Biogás e Biometano no Mundo

Segundo dados da International Renewable Energy Agency (IRENA), em 2020, a geração de energia elétrica a partir do biogás e biometano no mundo totalizou 20.150 MW de capacidade instalada. Entre os países com maior capacidade instalada, encontra-se a Alemanha, Estados Unidos, Reino Unido, Itália e China, possuindo, respectivamente, 7.459 MW, 2.291 MW, 1.858 MW, 1.432 MW e 903,3 MW de potência instalada. O Brasil encontra-se na nona posição no ranking, com 417,20 de capacidade instalada, correspondente à aproximadamente 2% do total mundial (IRENA, 2021).

Nota-se a predominância dos países europeus no ranking de aproveitamento do biogás. De acordo com Mariani (2018), os países europeus também são líderes nas discussões sobre as mudanças no clima e assumiram metas arrojadas de redução de 8% de suas emissões em relação às aquelas de 1990 por meio do Protocolo de Quioto em 1997. Visando cumprir as metas assumidas, a Europa vem incentivando o uso de fontes renováveis de energia em substituição às fontes fósseis, também com o objetivo de reduzir a dependência em relação ao gás natural proveniente da Rússia, de modo a aumentar a segurança energética (Mariani, 2018).

Em 2016, a União Europeia definiu metas de redução de emissão de gases do efeito estufa para o setor energético e, nesse período, diversos países implantaram mecanismos de incentivo ao biogás. Todos os países da Europa possuem metas de redução de emissões, sendo este um dos principais motivadores para a implantação de mecanismos de incentivo às fontes de energias renováveis. Ademais, as tarifas *feed-in* são a política regulatória mais adotada nos países da Europa. Neste modelo, é pago uma tarifa fixa e subsidiada pela energia gerada por um período pré-determinado, baseada nos custos de produção da energia, de modo a tornar os investimentos mais atrativos e minimizar riscos. Também destaca-se a adoção de políticas regulatórias que determinam a obrigação de uso de biocombustíveis, presentes na maioria dos

países europeus, bem como de uso de certificados verdes comercializáveis, presentes na França, Itália, Reino Unido e outros. Além disso, incentivos fiscais, como a redução de impostos, e o investimento, financiamento ou subvenção públicos também são adotados por países como Alemanha, Itália, Reino Unido, entre outros (Mariani, 2018).

O Estados Unidos também é um país que se destaca no aproveitamento energético do biogás. No país, existe o Renewable Portfolio Standard (RPS), um regulamento que determina que as concessionárias de energia elétrica e outros fornecedores de eletricidade de varejo forneçam uma porcentagem mínima da demanda do cliente com fontes de eletricidade renovável. Em 2015, 29 Estados e Washington estabeleceram requisitos obrigatórios de RPS (USEPA, 2023). Na Califórnia, por exemplo, o percentual de energia renovável no portfólio dos fornecedores deve ser de 60% até 2030 e, para 2045, 100% da eletricidade vendida deve vir de recursos livres de carbono. Entre as energias qualificadas para o RPS, estão a solar, eólica, geotérmica, biomassa, metano renovável, pequena hidrelétrica, onda oceânica ou maré, ou células de combustível usando combustíveis renováveis (CPUC, 2021).

A Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI) é outro mecanismo em operação que visa reduzir as emissões de CO₂ do setor de energia elétrica no Leste dos Estados Unidos. A iniciativa é composta por 12 Estados, que juntos estabeleceram um limite regional para as emissões dos geradores de energia elétrica movidos a combustível fóssil com capacidade mínima de 25 MW. Esses geradores são obrigados a comprar certificados iguais às suas emissões e também podem adquirir permissões de compensação para uma parcela dessas emissões. As permissões de compensação são geradas por projetos de redução de emissão ou sequestro de carbono fora do setor de geração de energia elétrica, como projetos de captura e destruição de metano em aterros sanitários. O RGGI, além de conferir uma oportunidade de criação de receita adicional para projetos em aterros sanitários, também incentiva a geração de energia com o uso de fontes renováveis, uma vez que estes geradores não são obrigados a comprar permissões para emissão (RGGI, 2023).

A China, outro destaque mundial no aproveitamento energético, é considerada pioneira na utilização e desenvolvimento de usinas de biogás. Segundo estudos trabalho elaborado por Giwa *et al.* (2020), plantas simples de biogás foram introduzidas no país no final do século XIX e, no final da década de 1920, a primeira usina de biogás usando pressão de água foi implementada em Taiwan no final da década de 1920. Na década de 1970, o incentivo à produção e aproveitamento do biogás foi uma estratégia adotada pelo governo do país para reduzir a escassez de energia nas áreas rurais e, na década de 1980, a estrutura para o

desenvolvimento do biogás foi incorporada ao programa nacional de estabilidade da China (Giwa *et al.*, 2020)

Frente à grande e rápida expansão econômica do país e consequente aumento da demanda total de energia, o setor de biogás mostrou-se como uma fonte relevante entre os recursos energéticos disponíveis. A partir de 2003, o programa nacional de assistência social da China promoveu incentivos ao setor com a emissão pelo governo federal de doações financeiras para o desenvolvimento de projetos e pesquisas para melhoria de engenharia. Como resultado do programa, além da expansão da utilização do biogás, observou-se o aumento da eficiência dos projetos. Após 2009, houve o aumento dos subsídios de 25% para 45% para apoio a projetos de biogás em escala piloto. Além disso, o governo implementou milhões de usinas locais de biogás para atender à demanda de energia. Em 2015, a produção de biogás na China advinha majoritariamente de projetos domésticos e, em menores quantidades, do setor agrícola e industrial (Giwa, 2020).

Em relação ao contexto político nacional, de acordo com histórico apresentado no trabalho de Guimarães *et al.* (2021), foi na década de 1970 que o biogás começou a ganhar relevância, como efeito do aumento no preço do petróleo promovido pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), que impulsionou o país a buscar novas fontes de energia para incrementar seu consumo interno que, na época, era suprido majoritariamente através de importações. Em 1977, criou-se o Projeto de Difusão do Biogás, executado no estado de São Paulo e no Distrito Federal. Em 1982, através do Programa de Mobilização Energética (PME) instituído pelo Decreto 87.079/1982, o Governo Federal passou a estimular a construção de biodigestores com uso de materiais simples e de baixo custo. Entretanto, o país carecia de conhecimento técnico sobre a construção e operação dos biodigestores, bem como de equipamentos adaptados para os projetos nacionais, acarretando a baixa durabilidade, baixa eficácia e custo elevado. (Guimarães *et al.*, 2021).

Apenas em 1990 o biogás voltou ao foco no país, impulsionado pelas discussões sobre o aquecimento global e mudanças climáticas. Neste contexto, a queima do biogás foi vista como uma forma de reduzir os efeitos da emissão de gases do efeito estufa nas mudanças climáticas e, assim, projetos para esse fim foram inclusos no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), possibilitando a geração de créditos de carbono. Em 2002, a implementação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) criou um novo estímulo à expansão do biogás no Brasil, uma vez que objetivava ampliar a geração de energia elétrica por meio de pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e das fontes eólica e biomassa, visando a redução nas emissões previstas no Protocolo de Kyoto. Após dez anos, em 2012, foi

instituída a Geração Distribuída pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), possibilitando que o excedente de energia elétrica gerado nos projetos de biogás fosse inserido nas redes de distribuição. Impulsionada por esses e outros fatores e pelo desenvolvimento tecnológico ao longo das décadas, a implementação de plantas de biogás, de todos os portes, ganhou um grande impulso nos últimos anos (Guimarães *et al.*, 2021).

Em 2016, o Ministério de Minas e Energia lançou a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), com o objetivo de contribuir para o cumprimento dos compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris e promover a expansão dos biocombustíveis na matriz energética brasileira. Como um dos principais instrumentos, foram estabelecidas metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, visando incentivar o aumento da participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes do país (CIBIOGÁS, 2023).

Em 2022, novo incentivo ao aproveitamento do biogás foi implementado com a instituição do Programa Nacional de Redução de Emissões de Metano – Metano Zero pela Portaria MMA N° 71/2022, que tem como objetivos estratégicos o uso sustentável de biogás e biometano como fontes renováveis de energia e combustível e fomento de acordos setoriais visando ao uso sustentável de biogás e biometano e à redução das emissões de metano (MMA, 2022). Em conjunto com o Programa Metano Zero, o Ministério de Minas e Energia, por meio da Portaria MME N° 627/2022, incluiu a produção de biometano no Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI), possibilitando que os projetos beneficiados tenham suspensão na cobrança dos impostos de PIS e COFINS para aquisição de máquinas, materiais de construção, dentro outros equipamentos (MME, 2022).

3.5 Modelos teóricos para Estimativa de Geração de Biogás em Aterros Sanitários

A previsão da geração de biogás em um aterro sanitário ao longo do tempo é um fator fundamental para a implementação de projetos de produção de energia elétrica a partir do biogás. Do mesmo modo, a confiabilidade dos dados estimados é primordial para realização do correto dimensionamento operacional e financeiro dos projetos, uma vez que estes dados irão embasar o tamanho dos investimentos e custos de operação, assim como a expectativa de geração de energia e de receita financeira.

Existem diferentes modelos teóricos para estimativa da geração de biogás em aterros. Segundo Castro (2016), esses modelos são ferramentas matemáticas utilizadas para prever a taxa de geração de biogás ao longo do tempo e, na maioria dos casos, utilizam em suas formulações variáveis como quantidade de resíduos disposto e tempo de disposição, vida útil

do aterro, porcentagem de material orgânico presente nos resíduos e as condições climáticas do local.

Os modelos teóricos de geração de biogás podem ser divididos em quatro tipos: modelos de ordem zero, modelos de primeira ordem, modelos de segunda ordem e modelos multifásicos. As características de cada modelo encontram-se abaixo (Castro, 2016):

- Modelos de ordem zero: Consideram a produção de biogás constante ao longo do tempo a partir de uma quantidade de resíduos, sendo independente da quantidade de resíduos degradáveis remanescente ou da quantidade de biogás já produzida. O principal modelo de ordem zero é o Modelo de Regressão elaborado pela Agência Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), que considera que a geração de metano é proporcional à quantidade de resíduos disposta e ao valor constante de produção de metano por peso de resíduo (L_0). Devido à dificuldade de seleção do valor adequado de L_0 e também por não considerar a diminuição da produção de metano com o avanço da degradação dos resíduos, a aplicação do modelo é limitada, sendo mais utilizada em estimativas preliminares para aterros de larga escala, uma vez que considera a composição dos resíduos e o tempo de disposição pouco significativas;
- Modelos de primeira ordem: Consideram a influência do tempo de disposição dos resíduos na geração de metano, presumindo que a partir da data de encerramento do aterro a produção de gás diminui exponencialmente ao longo dos anos. Entre os modelos de primeira ordem mais utilizados, estão o Modelo Scholl Canyon, o Modelo do Internacional Panel on Climate Change (IPCC) e o Landfill Gas Emission Model (LandGEM), que estão detalhados nos tópicos a seguir;
- Modelos multifásicos: Estimam a geração de biogás a partir de diferentes frações de materiais que compõem os resíduos, que são classificadas em quatro classes de acordo com sua degradabilidade: prontamente, moderadamente, lentamente degradáveis e inertes;
- Modelos de segunda ordem: Tem como base as reações químicas e o processo microbiológico da síntese do metano. Envolve um grande número de reações, todas com diferentes taxas de produção para cada tipo resíduo.

Segundo Oonk & Boon (1995), com base nos resultados de projetos holandeses de recuperação de gás de aterro, o modelo de primeira ordem e o modelo multifásico são adequados para prever a formação de gás de aterro. Os autores compararam os resultados de

diferentes modelos com os dados de campo em três aterros distintos e concluíram que o modelo de ordem zero apresentou erros de até 44%, o de primeira ordem apresentou erros máximos de 22% e o multifásico de 18%. Dado que a geração de metano depende de uma série de fatores, conforme discutido no item 3.2 deste trabalho, observa-se que a inclusão de um maior número de variáveis no modelo aproxima a ferramenta matemática do cenário real, gerando dados mais confiáveis.

3.5.1 Modelos de Primeira Ordem (Scholl Canyon, IPCC e LandGEM)

3.5.1.1 Modelo Scholl Canyon

O modelo Scholl Canyon é um modelo amplamente utilizado, sendo recomendado pelo Banco Mundial (2004) para projetos de recuperação energética do biogás em aterros na América Latina e no Caribe. Este modelo considera que a geração de metano ao longo do tempo é influenciada pelo avanço no processo de degradação dos resíduos depositados no aterro, conforme expresso pelas Equações 2 e 3 abaixo.

$$Q_x = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-T)}$$

Equação 2 – Produção de gás em aterro sanitário de acordo com modelo Scholl Canyon

Onde:

Q_x = Quantidade de metano gerado no ano ($m^3 CH_4$ /ano);

k = Constante de decaimento (1/ano);

R_x = Quantidade de resíduos sólidos disposta no aterro por ano (t);

L_0 = Potencial de geração de metano em peso de resíduo (m^3/t);

T = Início da disposição de resíduos do aterro (ano);

x = Ano do estudo (ano).

A vazão de metano em um ano é dada pela soma das vazões de metano oriundas dos resíduos depositadas no aterro em cada ano (Equação Y).

$$\sum Q_x = k \cdot L_0 \cdot \sum R_x \cdot e^{-k(x-T)}$$

Equação 3 – Produção total de gás em aterro sanitário de acordo com modelo Scholl Canyon

Onde:

$\sum Q_x$ = Soma das vazões de metano no ano considerado ($m^3 CH_4$ /ano)

Deste modo, o modelo reflete o fato de que, com o passar dos anos, a capacidade de um montante de resíduos depositado em um dado ano diminui devido ao avanço do processo de degradação desses resíduos. A geração total é dada pela soma da geração de metano dos resíduos dispostos ano a ano. Após encerramento do aterro, a geração de metano começa a diminuir gradativamente, até o esgotamento de resíduos disponíveis passíveis de degradação.

Na ausência de dados empíricos do aterro, o Banco Mundial sugere valores de referência para k e L_0 , de acordo com a precipitação anual na região onde o aterro está alocado e com a biodegradabilidade dos resíduos depositados, conforme apresentado pelas tabelas abaixo.

Tabela 2 – Valores sugeridos de k pelo Banco Mundial

Precipitação Anual	Degradabilidade dos resíduos		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
Menos de 250 mm	0,01	0,02	0,03
Entre 250 e 500 mm	0,01	0,03	0,05
Entre 500 e 1000 mm	0,02	0,05	0,08
Mais de 1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: Adaptado de Banco Mundial (2004)

Tabela 3 – Valores sugeridos de L_0 pelo Banco Mundial

Classificação do resíduo	Valor mínimo	Valor máximo
Relativamente inerte	5	25
Moderadamente degradável	140	200
Altamente degradável	225	300

Fonte: Adaptado de Banco Mundial (2004)

3.5.1.2 Modelo desenvolvido pelo IPCC

O modelo desenvolvido pelo IPCC (2006) é um método que considera que a geração de metano depende da quantidade de carbono presente nos resíduos dispostos no aterro. Além da equação para cálculo da geração de metano (Equação 4), o modelo também sugere um método para cálculo valor de L_0 (Equação 5).

$$G_{CH_4} = \sum A \cdot k \cdot RSU_t(x) \cdot RSU_f(x) \cdot L_0 \cdot e^{-k(t-x)}$$

Equação 4 – Produção de gás em aterro sanitário de acordo com modelo do IPCC

Onde:

Geração de metano. (tCH₄/ano);

RSU_t(x) = Total de resíduos gerados no município no ano x (tRSU/ano);

RSU_f(x) = Fração de resíduos depositado no aterro no ano x (%);

L₀ = Potencial de geração de metano. (m³/tRSD x ano)

A = Fator de normalização para correção da soma, equivalente a (1-e^{-k})/k;

k = Constante de geração. (1/ano)

$$L_0 = F_{CH_4} \cdot COD \cdot COD_f \cdot F \cdot 16/12$$

Equação 5 – Cálculo do potencial de geração de metano de acordo com modelo do IPCC

Onde:

L₀ = Potencial de geração de metano. (m³/tRSD x ano);

F_{CH₄} = Fator de correção de metano;

COD = Carbono orgânico degradável (t_C / t_{LIXO});

COD_f = Fração de carbono orgânica degradável dissociada (%);

F = Fração em volume de metano no biogás (%);

16/12 = Fator de conversão de carbono em metano (t_{CH₄}/t_C).

O fator de correção de metano (F_{CH₄}) considera características do aterro como profundidade, impermeabilização, tipo e espessura da camada de cobertura dos resíduos, etc. Em aterro sanitários, o valor de F_{CH₄} pode ser considerado igual a 1. Para aterros controlados e lixões com profundidade acima de 5 metros, recomenda-se o valor de 0,8. Já para aterros com profundidades menores que 5 metros e para aterros cujas condições de disposição sejam desconhecidas, recomenda-se o uso do valor de 0,6 (IPCC, 2006).

O carbono orgânico degradável (COD) representa a quantidade de carbono presente nos resíduos depositados no aterro, sendo dado pela multiplicação da porcentagem de carbono presente em cada componente de resíduo pela quantidade de resíduos deste componente, sendo necessário para seu cálculo conhecer a composição gravimétrica dos resíduos e o percentual de carbono em cada componente presente. A porcentagem de carbono presente em cada componente de resíduo é dada pela tabela abaixo.

Tabela 4 – Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo

Classificação do resíduo	Valor mínimo
Papel, papelão e tecidos	40
Resíduos de parques e jardins	17
Restos de comida	15
Madeira *	30
* excluindo a fração de lignina que se decompõem lentamente	

Fonte: Adaptado de Britto (2006)

A fração de carbono orgânico degradável dissociada (COD_f), que corresponde a fração de carbono disponível para a decomposição bioquímica, é dada pela equação seguir.

$$\text{COD}_f = 0,014T + 0,28$$

Equação 6 – Cálculo da fração de carbono orgânico degradável dissociada

Onde:

T = Temperatura da massa de resíduos disposta no aterro em uma zona anaeróbia (°C).

Na ausência de informações sobre a temperatura do aterro na zona anaeróbica, o IPCC (2006) recomenda o uso do valor de 0,5 para o COD_f.

Por fim, o IPCC também sugere valores de k, conforme Tabela X abaixo.

Tabela 5 – Valores sugeridos de k pelo IPCC

Tipo de resíduo		Zona Climática							
		Clima temperado ($\leq 20^\circ\text{C}$)				Clima tropical ($> 20^\circ\text{C}$)			
		Seco ($<1000\text{ mm}$)		Úmido ($\geq 1000\text{ mm}$)		Seco ($<1000\text{ mm}$)		Úmido ($\geq 1000\text{ mm}$)	
		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)

3.5.1.3 Modelo LandGEM

O modelo Landfill Gas Emission Model (LandGEM) foi proposto pela USEPA (2005) e criado a partir do modelo Scholl Canyon. Esse modelo contabiliza a produção de metano durante e após a vida de um aterro, conforme equação que segue abaixo:

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Equação 7 – Produção de gás em aterro sanitário de acordo com modelo LandGEM

Onde:

Q_{CH_4} = Quantidade de gás gerado durante um ano (m^3/ano);

L_0 = Potencial de geração de metano em peso de resíduo (m^3/t);

R = Quantidade anual de resíduos depositados no aterro (t/ano);

k = Taxa de geração de metano por ano ($1/ano$);

t = Tempo desde o início da disposição do aterro (anos);

c = Tempo desde o encerramento do aterro (anos).

Durante a operação do aterro, a geração de metano cresce ao longo dos anos, conforme aumento da quantidade de resíduos dispostos no aterro. Embora seja considerada a diminuição da capacidade dos resíduos depositados em um dado ano de gerar metano devido ao processo de degradação, assim como no modelo Scholl Canyon, o recebimento periódico de resíduos garante a disponibilidade de material biodegradável e geração crescente de metano. Entretanto, após encerramento do aterro, o LandGEM passa a atribuir valores à variável “c”, que resulta no decaimento da geração de metano. Deste modo, a maior geração de metano ocorre no ano de encerramento do aterro e passa a decair após interrupção do fornecimento de resíduos.

Ademais, nota-se que o LandGEM também utiliza os parâmetros k e L_0 , fundamentais para determinar a capacidade dos resíduos de gerarem metano através do processo de biodegradação anaeróbica e a velocidade desse processo de degradação. No modelo, é possível utilizar dados específicos do local para estimar emissões ou parâmetros padrão se nenhum dado específico do local estiver disponível. Nesse sentido, o LandGEM contém dois conjuntos de parâmetros padrão: Padrões CAA e Padrões de Inventário. Os padrões CAA são baseados em requisitos para aterros sanitários de resíduos sólidos estabelecidos pela *Clean Air Act* (CAA), que produz estimativas de emissão conservadoras. Por sua vez, os padrões de inventário são baseados em fatores de emissão da *Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (AP-42) da

Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA), que gera emissões médias e pode ser usado para gerar estimativas de emissões para uso em inventários de emissões e para obtenção de licenças para empresas que emitem poluentes, na ausência de dados de teste específicos do local. Os valores sugeridos por esses padrões, na versão 3.02 do modelo, de acordo com as características do local, encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 6 – Valores sugeridos de k pelo Landfill Gas Emission Model, Versão 3.02

Padrão e Condição Climática	Valores sugeridos de k (ano⁻¹)
CAA Convencional	0,05
CAA Áreas Áridas	0,02
Inventário Convencional	0,04
Inventário Áreas Áridas	0,02
Inventário Áreas Úmidas	0,07

Fonte: USEPA (2005)

Tabela 7 – Valores sugeridos de L₀ pelo Landfill Gas Emission Model, Versão 3.02

Padrão e Condição Climática	Valores sugeridos de L₀ (m³/ton)
CAA Convencional	170
CAA Áreas Áridas	170
Inventário Convencional	100
Inventário Áreas Áridas	100
Inventário Áreas Úmidas	96

Fonte: USEPA (2005)

3.5.2 Aplicação e Desafios para a aplicação dos modelos de estimativa de geração

Nota-se que a assertividade na estimativa da quantidade de gás gerado em um aterro sanitário depende diretamente da disponibilidade de dados e do conhecimento em relação às particularidades de cada aterro, da região onde está localizado e das características dos resíduos depositados. De acordo com Castro e Bello (2010), a complexidade de gerar previsões seguras da geração de biogás ao longo do tempo é um dos principais fatores que dificultam a implantação de sistemas de aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários, uma vez que comprometem a confiabilidade de estudos de viabilidade econômica. Como exemplo, em

artigo publicado por Goldstein (2007), que avalia a situação dos projetos de aproveitamento de gás de aterro sanitário nos EUA, é constatado que alguns projetos de aproveitamento do biogás produziram 10% do valor estimado por modelos matemáticos.

Thompson et al (2009) avaliou diferentes modelos de cálculo de geração de metano e comparou os resultados obtidos com as taxas reais de recuperação de metano de 35 aterros sanitários canadenses. Foram utilizados cinco diferentes modelos, sendo um de ordem zero, o German EPER model, e quatro de primeira ordem, sendo eles: Belgium Model, TNO Model, Scholl Canyon e LandGEM (versão 2.01). Os modelos Belgium, Scholl Canyon e LandGEM geraram os melhores resultados, apresentando respectivos erros médios absolutos em comparação com as taxas de geração de metano de 91%, 71% e 89%. Esses resultados consideraram as taxas de recuperação de metano no aterro equivalente a 20% e a frações de carbono orgânico degradável (DOCf) de 0,50.

Já Gollapalli & Kota (2018) mediram as emissões de metano e dióxido de carbono em um aterro no nordeste da Índia entre setembro de 2015 e agosto de 2016 e compararam os resultados obtidos de geração de CH₄ com as previsões de quatro modelos, sendo eles: Modified Triangular Method (MTM), LandGEM (Clean Air Act), LandGEM (Inventory) e IPCC. Os resultados obtidos indicam que os modelos MTM, LandGEM (Clean Air Act), LandGEM (Inventory) e IPCC preveem, respectivamente, 1,9 vezes, 3,3 vezes, 1,6 vezes e 1,4 vezes o fluxo de emissão de CH₄ medido. Vale destacar que os parâmetros de L₀ e k sugeridos pelo Clean Air Act para o modelo LandGEM são maiores do que os sugeridos pelo padrão de Inventário, o que justifica a maior superestimativa com o uso das referências deste primeiro. Embora o LandGEM (Inventory) e IPCC tenham gerado os menores erros, os autores enfatizam a importância de se considerar corretamente a composição biodegradável dos resíduos.

Em estudo desenvolvido por Borba (2006), foram utilizados os modelos Scholl Canyon, LandGEM e IPCC para estimar a geração de biogás no aterro de Nova Iguaçu – RJ. Durante os anos de operação do aterro, os resultados obtidos pelo modelo LandGEM e Scholl Canyon foram semelhantes, embora bastante superiores aos resultados do modelo IPCC. A metodologia do IPCC, por utilizar um maior número de elementos em sua formulação, é considerada pelo autor mais adequada para o local estudado. Entretanto, o autor destaca que a metodologia do IPCC não apresenta valores razoáveis para aterros após seu encerramento, uma vez que sua fórmula gera valores de emissão sempre crescentes. Sendo assim, o LandGEM e Scholl Canyon são mais adequados para aterros encerrados.

Maciel & Jucá (2011) conduziram um programa de testes de laboratório e de campo para investigar a geração de gases de uma Célula Experimental em Recife – PE. Neste estudo,

os autores inicialmente compararam a geração real de gás com os valores calculados pelo modelo LandGEM e IPCC, utilizando-se valores padrão dos parâmetros L_0 e k para as condições de clima tropical úmido recomendados pelas diretrizes dos modelos. As previsões obtidas com o uso dos parâmetros recomendados foram inferiores aos dados experimentais medidos. Posteriormente, os parâmetros foram ajustados com base na curva experimental de geração de CH_4 e, deste modo, a curva calculada aproximou-se dos dados reais. Assim, constatou-se que os resíduos em um clima tropical úmido se decompõem 4 a 5 vezes mais rápido em comparação com os parâmetros padrão recomendados pelos modelos tradicionais. Os autores também defendem que a aplicação dos modelos de primeira ordem deve ser calibrada com dados experimentais, de modo a obter estimativas mais realistas.

Pode-se observar, com base nas equações apresentadas no tópico 3.4.1 acima e os estudos supracitados, que os principais parâmetros que impactam na estimativa do potencial de geração de biogás são as variáveis L_0 e k . Essas variáveis refletem a influência de fatores importantes na geração do biogás, conforme apresentado no tópico 3.2, como a composição dos resíduos, temperatura, umidade, pluviosidade e a influência da idade dos resíduos e do aterro.

O potencial de geração de metano por tonelada de resíduo (L_0) representa a fração biodegradável presente no volume de resíduos e indica a propensão destes de sofrerem biodegradação anaeróbica e gerarem metano ao serem dispostos em um aterro. O valor de L_0 depende, basicamente, do tipo e composição dos resíduos dispostos no aterro (USEPA, 2005). Esse parâmetro pode ser obtido a partir de testes de biodegradabilidade, sob condições ideais de temperatura, umidade, pH e nutrientes, embora esse potencial possa não ser atingido, devido as condições climáticas particulares do local e das práticas operacionais do aterro (CASTRO, 2016).

Já a constante de decaimento (k), também denominada como a taxa de geração de metano por ano, determina a velocidade do processo de degradação dos resíduos e, consequentemente, a velocidade de produção de metano. O valor de k é principalmente influenciado por quatro fatores, sendo eles: teor de umidade da massa de resíduos, disponibilidade dos nutrientes para microrganismos que decompõem os resíduos, pH da massa de resíduos e temperatura da massa de resíduos (USEPA, 2005).

Estudos realizados em aterros brasileiros apresentaram diferentes valores para os parâmetros L_0 e k , mesmo quando localizados no mesmo Estado. Entre os motivos das divergências, podem-se citar as particularidades da implementação e operação de cada aterro, as diferentes composições gravimétricas do volume de resíduos destinado para os aterros, o tempo de operação do aterro e época em que os estudos foram realizados e as condições

climáticas diversas em cada região estudada, bem como a disponibilidade e qualidade dos dados utilizados para estimativa dos valores.

Em estudo desenvolvido em 1997 pela USEPA para avaliação da viabilidade de conversão de gás em energia em aterros localizados em São Paulo, foi obtido um valor de k igual a 0,125/ano para o Aterro de Bandeirantes, com base na análise de dados coletados em testes de bombeamento. Para o L_0 , utilizou-se o valor de 124,91 m³ CH₄/t de resíduo. Os mesmos valores foram adotados para os aterros de Santo Amaro, São Mateus, São João, Sapopemba e Vila Albertina, todos localizados na região metropolitana de São Paulo (USEPA, 1997).

Em estudo realizado por Ensinas (2003) no aterro Delta, localizada em Campinas – SP, foram obtidos os valores de 156,9 m³ CH₄/t de resíduo para L_0 e 0,0283/ano para k . O valor do L_0 foi calculado a partir do método proposto pelo IPCC e utilizando-se os valores da composição dos resíduos de Campinas para obter a quantidade de carbono orgânico degradável (COD). Os demais valores necessários para cálculo do L_0 foram selecionados de acordo com as recomendações da literatura. Para o valor de k , utilizou-se um processo iterativo de modo a obter pelos cálculos o valor de produção de metano real medido no décimo primeiro ano de operação do aterro.

Mendes (2005) também utilizou o modelo do IPCC para cálculo do L_0 de aterro localizado em Guaratinguetá – SP, encontrando como resultado o valor 131,4 m³ CH₄/t de resíduo. O cálculo do COD teve como base um estudo da composição do resíduo sólido domiciliar de Guaratinguetá, enquanto o valor do fator de correção de metano (FCM) baseou-se nas características de construção de um aterro sanitário, igual a 1. Adotou-se 50% como o valor de F e o valor de COD_f foi o recomendado pela literatura. Em relação ao k , utilizou-se o valor de 0,05/ano, sendo um valor intermediário na faixa recomendada pelo Banco Mundial (2004) com base na pluviosidade do município.

Pecora et al (2009) obteve o valor de 99,69 m³ CH₄/t para o L_0 e 0,077/ano para k em estudo desenvolvido no aterro de Caieiras – SP. O valor de L_0 foi calculado pelo modelo do IPCC e o k foi obtido através da fórmula $k = \ln 2/t_{1/2}$, derivada da equação $L_0(t)/L_0 = e^{-kt}$ e considerando que o tempo médio para 50% da decomposição é de 9 anos. Figueiredo (2011) obteve valores similares em estudos desenvolvidos por Pecora et al (2009) no mesmo aterro. O L_0 também foi obtido através do IPCC e resultou no valor de 109,301 m³ CH₄/t de resíduo. O valor de k foi igual a 0,077/ano e também foi obtido pela fórmula $L_0(t)/L_0 = e^{-kt}$.

Assim como Pecora et al (2009), Machado et. al (2009) utilizaram a equação do IPCC para encontrar o valor de L_0 e a fórmula $k = \ln 2/t_{1/2}$ para estimar o valor de k do aterro metropolitano de Salvador – BA. Foram obtidos o valor de 0,21/ano para k e 66,62 m³ CH₄/t

de resíduo para L_0 . Neste estudo, os valores calculados pelas metodologias são comparados com os resultados experimentais de campo e de laboratório. Observou-se que os valores L_0 e k obtidos são próximos dos valores experimentais.

Fernandes (2009) obteve o valor de L_0 igual a $84,33 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ de resíduo para o aterro experimental de Belo Horizonte – MG através da equação do IPCC, utilizando a composição gravimétrica dos resíduos depositados no aterro e demais parâmetros recomendados pela literatura. No estudo, para simular a geração de metano através do modelo do LandGEM, foram utilizados dois valores de k , iguais a 0,0283 e 0,0395/ano, com base em referência de aterros similares. Vale destacar que os valores obtidos foram significativamente inferiores aos encontrados no aterro sanitário experimental com a utilização da placa de fluxo. Entretanto, quando utilizado os valores extremos para os parâmetros de k e L_0 sugeridos pela metodologia de inventário do LandGEM para áreas úmidas ($k = 0,7/\text{ano}$ e $L_0 = 96 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$), o valor estimado a partir dos ensaios da placa de fluxo encontra-se próximo aos obtidos pelo modelo LandGEM, embora ainda menores.

Em estudo desenvolvido por Audibert & Fernandes (2011) em aterro controlado de Londrina – PR adotou-se os valores de 0,05/ano para k e de $170 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ de resíduo para L_0 para simular a geração de metano pelos modelos do LandGEM e Municipal Solid Waste Landfills (MSW) da USEPA. Utilizou-se o mesmo valor de k e L_0 igual a $85,91 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ de resíduo no modelo do IPCC, calculado conforme sugerido pela metodologia. Os resultados obtidos de geração de biogás com a aplicação de modelos matemáticos IPCC, USEPA e LandGEM foram, respectivamente, $37.446.882 \text{ m}^3/\text{ano}$, $34.665.202 \text{ m}^3/\text{ano}$ e $31.764.292 \text{ m}^3/\text{ano}$. Os valores obtidos divergiram ligeiramente da média das emissões obtidas nas medições reais, igual a $34.398.731 \text{ m}^3/\text{ano}$, sendo que o modelo da USEPA apresentou resultados muito similares aos reais.

Necker & Rosa (2013) aplicaram a equação proposta pelo IPCC para estimar o valor do L_0 dos resíduos a serem recebidos pelo aterro de Ji-Paraná – RO. Utilizando a análise gravimétrica dos resíduos urbanos do município para obter o COD e adotando valores de referência recomendados pela bibliografia para as demais variáveis, foi obtido o valor de 0,07977 toneladas de CH_4 por tonelada de resíduo, equivalente a aproximadamente $107,8 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ por tonelada de resíduos. Já para k , foi utilizado o valor de 0,09/ano, conforme proposto pelo Banco Mundial (2004) considerando a alta precipitação da região.

Estudos experimentais realizados no aterro municipal de Guarapuava – PR por Crovador (2014) obtiveram o valor de 0,4/ano para k e $48,32 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ de resíduo. O valor de L_0 foi obtido por meio de ensaios do potencial bioquímico de metano (BMP) com resíduo

fresco. Em termos de resíduo adicionado, a geração de biogás foi de 96,64 m³/t de resíduo seco. Para o cálculo do potencial de geração de metano foi aplicado um percentual de 50%, sugerido pelo LandGEM, resultando em um L₀ igual a 48,32 m³ por tonelada de resíduo seco. A variável k também foi obtida a partir dos ensaios BMP. Nota-se que o valor de k é superior ao valor recomendado pelo Banco Mundial (2004) e o valor de L₀ é inferior ao recomendado para resíduos moderadamente degradáveis.

Em estudo elaborado por Rossini (2018) para o aterro da cidade de Itapeva – SP, foram utilizados os valores de 99,33 m³ CH₄/t de resíduos para L₀ e k igual a 0,06/ano. O potencial de geração de metano (L₀) foi obtido através da aplicada da equação estequiométrica de decomposição de resíduos, considerando as características físico-químicas dos resíduos sólidos urbanos da cidade de São Paulo – SP. Uma vez que o cálculo do L₀ indicou que o resíduo é moderadamente degradável e considerando o índice pluviométrico anual da cidade, utilizou-se o valor de k indicado pelo Banco Mundial (2004).

3.6 Aproveitamento Energético do Biogás

Para que o biogás gerado em aterros seja utilizado como um recurso energético, é necessário a sua coleta e tratamento antes de sua utilização em processos de geração de energia e. Portanto, após a geração do biogás no aterro sanitário através da biodigestão anaeróbica dos resíduos, conforme detalhado no item 3.2 deste trabalho, ocorrem os processos de captação, tratamento e conversão energética do biogás, segundo as etapas descritas abaixo (Zanette, 2009; Figueiredo, 2011):

- **Captação:** Processo ocorre por meio de tubos de sucção horizontais, que geralmente são instalados enquanto os resíduos ainda estão sendo depositado no aterro, possibilitando que a coleta do biogás seja iniciada desde o início da sua produção (Willumsen, 2001). Na lei nacional vigente, a colocação desta tubulação já está prevista (ABNT, 1992). Normalmente, também é feita a perfuração de uma rede de tubos verticais nas camadas de resíduos, em que as pontas são conectadas por tubulações laterais que transportam o gás para um coletor principal por meio da pressão negativa desses tubos de transmissão. Além dos tubos para coleta, é necessário um sistema de compressão para fazer a sucção do gás nos poços de coleta. Os compressores também podem ser úteis para comprimir o gás antes de entrar no sistema de recuperação energética;
- **Tratamento:** Tem como objetivo a remoção de condensados e impurezas do biogás, sendo um processo necessário para atender as especificações necessárias para cada aplicação (tubulações, geradores, caldeiras, veículos), aumentar o poder calorífico do

gás e padronizar o gás produzido. Para muitas aplicações, o biogás deve ser purificado e sua qualidade deve ser melhorada, como para o uso direto em motores estacionários de combustão ou para gasodutos. As principais substâncias que devem ser removidas são sulfeto de hidrogênio, que apresenta poder corrosivo, amônia, água e compostos halogenados. O processo de remoção do gás carbônico não é necessário para uso em geradores, mas deve ser feito para produção do biometano, conforme especificações técnicas ditadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2022). As opções de processos para o tratamento são variadas. Para a geração de energia, por exemplo, as impurezas podem ser retiradas por meio de filtros;

- **Conversão energética:** Consiste na transformação da energia química das moléculas em energia mecânica, por meio de uma combustão controlada, que por sua vez pode produzir energia elétrica por meio do acionamento de um alternador. Entre as tecnologias convencionais que podem ser utilizadas nesse processo, pode-se citar os motores de combustão interna, turbinas a gás e caldeiras.

Considerando as etapas supracitadas, a geração de energia elétrica a partir do biogás dependerá dos seguintes fatores: eficiência da captação do gás no aterro, poder calorífico do metano, do fator de conversão da energia térmica do gás (kcal) em energia elétrica (MWh) e a eficiência de conversão do gerador, considerando a ocorrência de perdas de energia existentes em todo processo de transformação de energia.

Atualmente, existem tecnologias que permitem que praticamente todo o gás gerado em um aterro seja coletado, como é o caso das membranas impermeáveis que impedem o escape do gás para a atmosfera, denominadas emissões fugitivas. Entretanto, essas membranas possuem alto custo e necessitam de um sistema de recirculação do chorume (Figueiredo, 2011).

Nesse sentido, o Banco Mundial (2004) recomenda assumir a eficiência do sistema de drenagem de biogás igual a 75%. Já a USEPA (1996) define que a eficiência do sistema de coleta pode variar entre 50 e 90%, dependendo da camada de cobertura. Já em estudo realizado por SPOKAS et al. (2006) em três aterros sanitários na França, cujos resultados foram usados como base para as diretrizes da agência ambiental francesa (ADEME) para valores padrão de porcentagem de recuperação, foram obtidos os seguintes valores de eficiência de coleta de gás: 35% para uma célula operacional com um sistema ativo de recuperação de gás de aterro sanitário, 65% para uma cobertura temporária com um sistema ativo de recuperação de gás, 85% para uma célula com cobertura final de argila e recuperação ativa do gás, e 90% para uma célula com cobertura final de geomembrana e recuperação ativa de gás.

Em relação à quantidade de calor libertada na combustão do gás, o poder calorífico inferior do metano é de $35,9 \text{ MJ/Nm}^3$, ou seja, aproximadamente $8580,3 \text{ kcal/Nm}^3$, em condições normais de temperatura e pressão (PROBIOGÁS, 2017). De acordo com o Livro “Biocombustíveis”, elaborado por Lora & Osvaldo (2012), o poder calorífico inferior do metano pode ser considerado equivalente a 8.500 kcal/m^3 .

Já a conversão da energia térmica em energia elétrica, considerando a eficiência máxima do processo, pode ser dada pela relação entre as unidades de medidas. Considerando a máxima eficiência do processo de conversão, o fator de conversão é de aproximadamente $1,622 \times 10^{-6} \text{ MWh/kcal}$. Este valor corresponde aos fatores apresentados em ferramentas de conversão de unidades (Hainke, 2005).

Entretanto, vale destacar que não é possível a conversão de toda a energia térmica em energia mecânica e elétrica sem perdas. A Segunda Lei da Termodinâmica institui que nenhuma máquina pode transformar toda a energia térmica em energia mecânica, sendo impossível um rendimento equivalente à 100% (Thomson, 1851). A eficiência de conversão da energia depende, entre outros fatores, da tecnologia utilizada, conforme discutido no tópico a seguir.

3.6.1 Tecnologias para conversão energética do biogás

A conversão do poder calórico do biogás em energia elétrica pode ser realizada por meio de diferentes tecnologias. Neste tópico são apresentadas três das principais tecnologias utilizadas, sendo elas: motor de combustão interna, turbinas a gás e caldeiras.

O motor de combustão interna produz energia mecânica através da queima de uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro. A energia mecânica é gerada com a transformação do movimento retilíneo do pistão em circular por meio de um virabrequim (Figueiredo, 2011). Essas máquinas térmicas podem ser classificadas em motores de combustão externa, como as máquinas a valor, e motores de combustão interna, representados pelos motores de ciclo Otto e de ciclo Diesel. O funcionamento do motor ciclo Otto pode ser dividido em 4 etapas, conforme listado por Castro (2006):

- Primeiro tempo: Injeção de mistura ar-combustível no cilindro através da abertura da válvula de admissão. Pistão é empurrado para baixo com o movimento do virabrequim e permite entrada de ar na câmara de combustão;
- Segundo tempo: Fechamento da válvula de admissão. Vala gera faísca conforme pistão sobe, comprimindo a mistura de ar-combustível;
- Terceiro tempo: Explosão da mistura e expansão dos gases quentes formados na explosão. Pistão desce devido força da explosão;

- Quarto tempo: Expulsão dos gases pelo pistão com a abertura da válvula de escape.

A eficiência térmica do ciclo Otto depende apenas da taxa de compressão, que possuem entre si uma em relação diretamente proporcional (Moran & Shapiro, 2002). Entretanto, é estabelecido um limite superior de compressão devido à possibilidade de autoignição, processo que ocorre quando a temperatura da mistura não queimada se torne muito alta antes que a mistura seja consumida pela frente de chama e que pode causar ondas de alta pressão, provocando a perda de potência e danos no motor (Figueiredo, 2011).

Segundo Matteli (2008), um conjunto moto-gerador, composto de um motor de combustão interna acoplado a um gerador elétrico, baseado no ciclo Otto, apresenta baixo custo de aquisição, alta eficiência e uma larga faixa de aplicação (de 75 kW até 50 MW). Silva (1995) também defende que os motores a álcool são interessantes para a operação com biogás, já que possuem uma taxa de compressão mais elevada. De acordo com Figueiredo (2011), fabricantes como GE Jenbacher, Caterpillar e Cummins já possuem motores preparados para utilizar o biogás como combustível.

Já nas turbinas a gás, ocorre a compressão de um fluido no compressor, causando um aumento de pressão e, conseqüentemente, da temperatura do ar, visto que esses equipamentos operam em regime adiabático. O ar aquecido é posteriormente direcionado para a câmara de combustão, onde queima ao entrar em contato com o combustível. Os gases resultantes da combustão se expandem na turbina, gerando energia mecânica e acionando o compressor. O trabalho útil produzido é calculado pela diferença entre o trabalho da turbina e o consumido pelo compressor (Figueiredo, 2011).

As turbinas são classificadas em turbinas de ciclo fechado e de ciclo aberto. No primeiro caso, ocorre o reaproveitamento dos gases formados na combustão, que são resfriados e entram novamente no compressor. Apesar de conferir o melhor aproveitamento do calor, essa configuração é utilizada somente em instalações de grande porte (COSTA et. al, 2003). As microturbinas possuem o mesmo princípio das turbinas a gás de circuito aberto, com o diferencial de apresentar a possibilidade de geração de eletricidade em pequena escala.

Por fim, as caldeiras são equipamentos que produzem vapor com o uso do calor produzido na queima de um combustível. Após geração do vapor nas caldeiras, este vapor é direcionado para uma turbina, onde se expande, causa o movimento das palhetas e gera potência mecânica no eixo da turbina. Por sua vez, a potência mecânica aciona um alternador e produz energia elétrica. Ao sair da turbina, o vapor é condensado e bombeado novamente para a caldeira, reiniciando o ciclo (Figueiredo, 2011).

Vale destacar que a combustão direta do biogás em caldeiras demanda controle do nível de umidade do combustível, uma vez que esta pode danificar o equipamento e causar problemas durante sua operação. Também se faz necessário o controle da variação da qualidade do gás e a instalação de válvulas e sensores para controle da quantidade de combustível a ser utilizado de acordo com a concentração de metano (Salomon, 2007).

De acordo com relatório elaborado pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), onde foi realizada uma comparação da potência de trabalho, rendimento e emissões entre as tecnologias de motores e turbinas a gás, observa-se que os motores de combustão interna apresentam a maior eficiência de conversão elétrica, além de operarem em uma grande faixa de potência. Por outro lado, conforme mostra a Tabela X abaixo, os motores estão associados a maiores emissões de NOx.

Tabela 8 – Comparação das principais tecnologias de conversão do biogás

Tecnologia	Potência	Rendimento	Emissões de NOx
Motores de Combustão	30 kW – 20 MW	30% – 40%	250 ppm – 3.000 ppm
Turbinas	500 kW – 150 MW	20% – 30%	35 ppm – 50 ppm (gás de aterro)
Microturbinas	30 kW – 100 kW	24% – 28%	< 9 ppm

Fonte: CENBIO, 2005

De acordo com Ferguson & Kirkpatrick (2001), a eficiência dos motores pode ser definida como a razão entre a energia útil gerada pelo motor e a energia total fornecida ao motor, onde a primeira consiste na energia mecânica disponível na saída, enquanto a energia fornecida é a energia química contida no combustível que é queimado. A eficiência térmica máxima teórica do motor ciclo Otto é de cerca de 60%, que ocorre quando a compressão do motor é infinitamente grande. Como o aumento da compressão é limitada pela possibilidade de autoignição, a eficiência real de um motor ciclo Otto, segundo os autores, pode variar de cerca de 20% a 30%, dependendo das condições de operação. No entanto, eles observam que a eficiência pode ser maior em motores mais modernos com tecnologias avançadas de injeção de combustível e gerenciamento de energia.

Já de acordo com Çengel & Boles (2006), as eficiências globais típicas de motores de combustão interna estão na faixa de 26% a 30% para motores automotivos a gasolina, de 34%

a 40% para motores a Diesel, e de 40% a 60% para motores de grandes usinas geradoras de energia elétrica.

Cabe salientar que, devido a possibilidade de operar em uma faixa de potência grande, sendo uma alternativa tanto para pequenos projetos (30 kW), como para os maiores projetos de Geração Distribuída (potência instalada máxima de 5 MW), os motores a combustão apresentam ainda como vantagem a modularidade, possibilitando a instalação de módulos menores de forma faseada, de modo a acompanhar o crescimento da geração de metano ao longo da operação do aterro, bem como acomodar a diminuição da geração após seu encerramento. Ademais, de acordo com Castro *et al.* (2010), em aterros com geração mais contínua de gás, é possível utilizar equipamentos de menor porte por um período mais longo, além de adotar sistemas modulares com maior flexibilidade para acomodar o decaimento da taxa de geração. Nesse sentido, também destaca-se a oportunidade da criação de modelos de negócio robustos que integrem projetos em diferentes aterros, propiciando a transferência dos equipamentos modulares de projetos em aterros já em processos de exaustão e decaimento da geração de gás para projetos em aterros na fase de crescimento exponencial de geração, de modo a otimizar o uso dos equipamentos e a geração de energia de acordo com a variação da geração de gás nos diferentes aterros ao longo dos anos, viabilizando um sistema de gestão integrada de aproveitamento energético do biogás.

3.7 Mercado de Energia Elétrica

Segundo dados do International Energy Agency (IEA), no início do século, o consumo mundial de eletricidade foi de 14.157,2 TWh. Em 2020, o consumo de energia global chegou a 24.901,4 TWh, representando um aumento de 75% em 20 anos. Em 10 anos, o consumo mundial anual per capital passou de 2,9 MWh em 2010 para 3,2 MWh em 2020 (IEA, 2023).

No Brasil, segundo relatórios da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo nacional de energia elétrica passou de 415.277 GWh em 2010 para 475.648 GWh em 2020, ou seja, aumentou 14,5% em 10 anos, sendo que em 2020 o consumo residencial representou 31,2% do consumo total, enquanto o industrial representou 35%. O maior consumo de energia elétrica do país encontra-se no Sudeste, responsável por 49% do consumo total de eletricidade em 2020. No que tange o consumo de energia elétrica na rede, as maiores distribuidoras do Brasil em 2020 foram CEMIG, Enel SP, CPFL Paulista, COPEL e CELESC, que concentraram respectivamente 10,9%, 8,5%, 6,4%, 6,2% e 5,4% de todo o consumo nacional. Em relação as tarifas de energia, os maiores valores foram observados no Norte, com o valor médio de R\$559,98/MWh (sem impostos), seguido pelo Sudeste (R\$518,99/MWh) e Sul

(R\$511,44/MWh), e por fim pelo Sul (R\$474,65/MWh) e Nordeste (R\$469,19/MWh), que tiveram as menores tarifas em 2020 (EPE, 2021).

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), é previsto o crescimento do consumo final de energia à taxa média de 2,5% anuais entre 2021 e 2031, chegando a aproximadamente 3,7 milhões de GWh em 2031. Para o setor residencial, é previsto que a demanda de energia poderá crescer 1,4% ao ano entre 2021 e 2031, resultado, entre outros, da evolução da renda das famílias, da expansão do crédito financeiro para compra de equipamentos, da redução do desemprego, do avanço do número de domicílios e da malha de distribuição de combustíveis e da penetração das tecnologias nas residências (EPE, 2022). Dentro da demanda de energia, destaca-se a tendência de crescimento da importância da eletricidade do País, com um incremento médio anual de 3,5%, enquanto espera-se que a demanda por gás natural cresça em 4,9% ao ano, enquanto os derivados de petróleo terão crescimento médio de 1,6% anuais entre 2021 e 2031 (EPE, 2022).

Em relação a potência instalada para geração de energia elétrica, o Brasil fechou 2020 com 174,737 GW de potência instalada. A principal fonte de energia do país são as hidrelétricas, que representam 59% da potência instalada, seguida das usinas eólicas, biomassa e gás natural, que representaram em 2020, respectivamente, 9,8%, 8,6% e 8,5% da capacidade instalada brasileira. Já no âmbito de geração de energia, foram gerados 621.219 GWh em 2020, sendo a energia hidráulica responsável por 63,8% da geração, a eólica por 9,2%, as usinas a biomassa por 9% e as usinas a gás natural por 8,6%. Os Estados de São Paulo, Paraná e Minas Gerais foram os que mais geraram energia, sendo que cada uma gerou aproximadamente 10% da energia total (EPE, 2021). De acordo com a EPE, as usinas hidrelétricas devem permanecer como principal fonte de energia do país nos próximos anos, representando aproximadamente 51% da capacidade instalada em 2031. Entretanto, a expectativa de evolução da capacidade instalada mostra o aumento da participação da Mini e Microgeração Distribuída, que passará de 4% em 2021 para 17% em 2031 (EPE, 2022).

O processo físico da geração da energia até a entrega para consumo final ocorre por meio do Sistema Interligado Nacional (SIN), o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil. A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias (ONS, 2023). Esse sistema físico é operado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrica (ONS). Já o processo de comercialização da energia elétrica gerada nas centrais geradoras para os consumidores finais é gerenciado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e ocorre em dois

ambientes de comercialização distinto, sendo eles: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL). Esses dois modelos de comercialização de energia serão detalhados no tópico a seguir.

3.7.1 Mercado Livre de Energia Elétrica

O Ambiente de Contratação Livre (ACL), também conhecido como Mercado Livre, é um ambiente competitivo de negociação de energia elétrica, onde os consumidores, geradores e comercializadores podem celebrar contratos bilaterais de compra e venda de energia, sem a intermediação das distribuidoras. Além da negociação dos preços, é possível escolher a fonte de energia, volume, período, entre outras condições contratuais. Em fevereiro de 2023, 13.868 agentes estavam cadastrados na Câmara Comercializadora de Energia Elétrica (CCEE) e 93.257 contratos estavam registrados em janeiro de 2023 (CCEE, 2023).

A início da construção do Mercado Livre ocorreu em 1995, a partir da Lei N° 9.074, que possibilitou que os consumidores com a carga contratada junto a distribuidora igual ou superior a 10.000 kWh e atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV contratassem energia elétrica diretamente com os fornecedores. A lei também estabeleceu que o poder concedente, no caso, o Ministério de Minas e Energia, poderia diminuir os limites de carga e tensão após oito anos da publicação da lei, possibilitando que mais consumidores tivessem acesso à contratação livre de energia (BRASIL, 1995). A criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) foram marcos importantes para a regularização plena do Mercado Livre. A ANEEL foi criada em 1996, através da Lei N° 9.427, que passou a regular o novo modelo do setor elétrico e atuou na formatação do novo Mercado Livre de Energia, enquanto a CCEE foi criada em 2004, através da Lei N° 10.848, com a função de promover os leilões de energia, registrar os contratos de compra e venda de energia do Mercado Livre e apurar os dados de consumo dos consumidores. Em 2004, também foram estabelecidos o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e Ambiente de Contratação Regulado (ACR) (COPEL, 2023).

O Ambiente de Contratação Regulada (ACR) é o modo pelo qual as distribuidoras compram energia elétrica para atender o consumo dos clientes do mercado cativo, predominantemente composto por consumidores do Grupo B, conectados na rede de Baixa Tensão, onde estão classificadas as residências e pequenas empresas. Neste ambiente, a contratação de energia pelas distribuidoras ocorre através de leilões, regulados e realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com o apoio da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), de modo a garantir concorrência e as melhores tarifas para os

consumidores (Ômega Energia, 2023). Após os leilões, gerador e distribuidora firmam Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR), que segue a regulação da Aneel e cujas condições contratuais não podem ser alteradas. A remuneração das distribuidoras ocorre por meio de pagamento pelos consumidores de fatura mensal composta pela Tarifa de Energia (TE) e pela Tarifa de Transmissão e Distribuição (TUSD e TUST), além de encargos setoriais e tributos.

Já no Ambiente de Contratação Livre (ACL), conforme mencionado no início deste tópico, os geradores podem negociar os preços da energia elétrica e demais condições contratuais diretamente com os consumidores, sem a intermediação das distribuidoras. Neste ambiente, também participam comercializadoras de energia, que compram e vendem energia de geradores e consumidores. Atualmente, os consumidores que podem participar do ACL, chamados de consumidores livres, são aqueles que compõem o Grupo A, sendo conectados na Alta Tensão, e que possuem demanda mínima de 500 kW. Vale destacar que, a partir de janeiro de 2024, espera-se a abertura do Mercado Livre para consumidores com demanda inferior a 500 kW, permitindo que qualquer consumidor do Grupo A possa migrar para o Mercado Livre (MME, 2019). Os consumidores livres permanecem pagando faturas mensais para a distribuidora, conforme tarifas reguladas, uma vez que permanecem utilizando a rede de transmissão e distribuição, mas o valor da energia é pago diretamente para o gerador ou comercializador do qual comprou a energia, conforme condições contratuais acordadas nos acordos bilaterais com o fornecedor.

3.7.2 Geração Distribuída

Em 2012, através da Resolução Normativa ANEEL N° 482, foram estabelecidas as condições gerais para o acesso à Microgeração e Minigeração Distribuída, bem como o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, que permitiu a unidades consumidoras a geração de sua própria energia para compensação do seu consumo ativo de energia elétrica. Neste sistema, unidades de geração com potência instalada de até 5 MW que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica podem injetar energia na rede, que é cedida à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora. Nesse sentido, a Microgeração Distribuída é definida como a central geradora com potência instalada menor ou igual a 75 kW, enquanto a Minigeração Distribuída são as centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW (ANEEL, 2012).

Posteriormente, através de inclusão de redação pela Resolução Normativa da ANEEL N° 687/2015, a Geração Distribuída passa oficialmente a ser composta por dois modelos de comercialização da energia, sendo eles: autoconsumo remoto e geração compartilhada. No primeiro modelo, a energia excedente gerada é compensada de unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica ou Pessoa Física que tenha posse ou tenha arrendado uma unidade com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, contanto que dentro da mesma área de concessão ou permissão. No segundo modelo, há a reunião de consumidores, com diferentes titularidades, contanto que dentro da mesma distribuidora, por meio de consórcio ou cooperativa que tenha posse ou tenha arrendado unidade com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada (ANEEL, 2015).

Em relação aos custos para injeção da energia gerada na rede de distribuição, em 2022, foi sancionada a Lei N° 14.300, que instituiu o Marco Legal da Minigeração e Microgeração Distribuída e alterou, principalmente, a oferta de subsídios para novos empreendimentos de geração (BRASIL, 2022). Segundo as novas regras, os novos empreendimentos que solicitarem o parecer para acesso ao sistema de distribuição a partir de 8 de janeiro de 2023, com potência instalada acima de 500 kW, em fonte não despachável na modalidade autoconsumo remoto ou geração compartilhada, deverão pagar o custo do Fio B, 40% do Fio A, a taxa de Fiscalização SEE (TFSEE), a tarifa de P&D e a TUSD Geração (TUSDg). A Lei N° 14.300/2022 foi regulamentada em fevereiro de 2023 pela Resolução Normativa 1.059 da ANEEL (BRASIL, 2023).

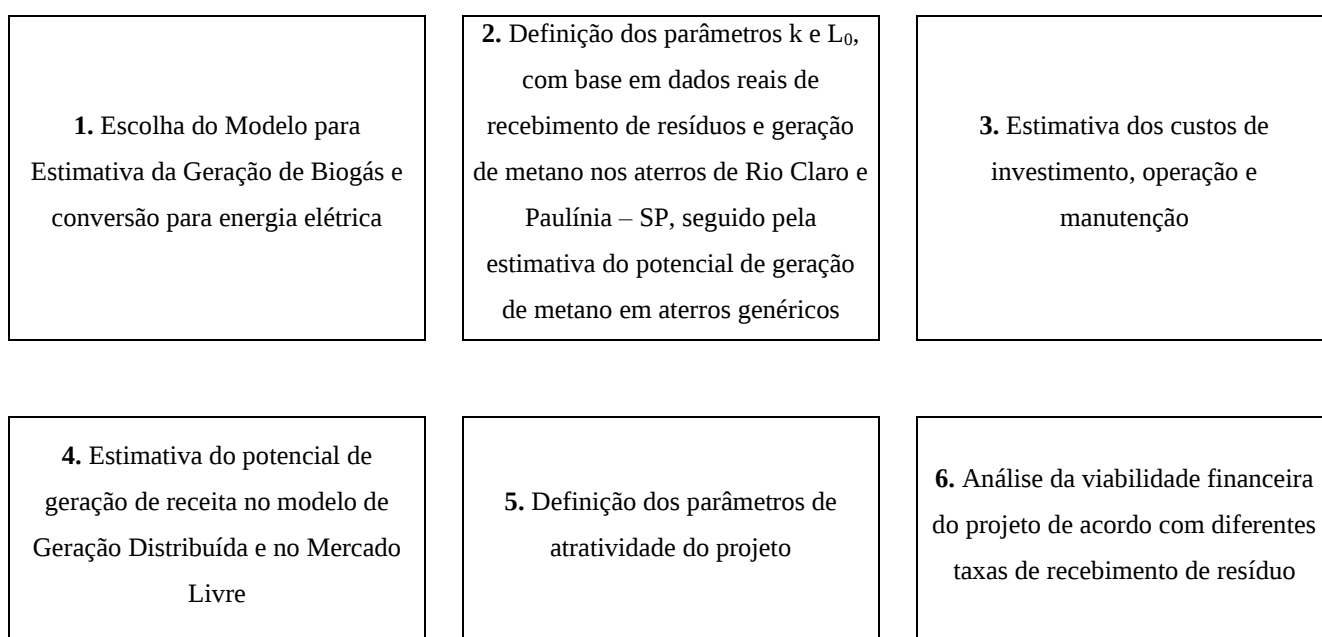
3.7.3 Projeções de aumento do custo da energia elétrica

Com base em relatório elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel, 2023), que apresenta o histórico das componentes da tarifa residencial no Brasil entre os anos de 2010 e 2022, observa-se que a variação do custo da energia elétrica tem sido compatível com o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA). O relatório mostra a evolução da tarifa residencial média de todas as concessionárias e permissionárias de energia elétrica no Brasil nos últimos doze anos, bem como o valor esperado da tarifa em caso de reajuste utilizando como índice de o IPCA e o IGPM. Deste modo, é possível notar que, com base no histórico dos últimos 12 anos, o IPCA se mostrou um indicador adequado para prever o aumento das tarifas de energia.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A viabilidade econômica da comercialização de energia elétrica a partir da geração do biogás em aterros sanitários é dada pela receita do projeto e pelos custos de implementação e operação, sendo a receita o resultado da quantidade de energia gerada no projeto e do valor de venda desta energia, enquanto os custos são definidos pelo valor dos equipamentos e custos dos procedimentos de operação e manutenção. Deste modo, os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa estão apresentados no fluxograma da Figura 3 abaixo:

Figura 3 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos realizados no trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na primeira etapa do projeto, foi selecionado o modelo para estimativa da geração de biogás nos aterros sanitário e definido os valores teóricos dos parâmetros deste modelo, sendo eles o potencial de geração de metano em peso de resíduo (L_0) e a taxa de geração de metano por ano (k). A definição desses parâmetros foi realizada através de análise que utilizou dados reais de geração de metano e recebimento de resíduos dos Aterros de Rio Claro e Paulínia, localizado no Estado de São Paulo. Nesta análise, que está detalhada no item 4.1.1 deste trabalho, buscou-se os valores de k e L_0 que resultam na melhor aproximação entre a geração de metano calculada pelo modelo e os dados geração de metano reais medidos nos aterros de Rio Claro e Paulínia. Os valores de k e L_0 que forneceram o melhor ajuste foram fixados e utilizados nas etapas seguintes para o cálculo do potencial teórico de geração de metano em

projeto de 15 anos em aterro genérico, com vida útil de 20 anos, em diferentes cenários de taxa de recebimento de resíduos.

Após a definição das premissas para uso no modelo de estimativa de geração de metano, iniciou-se a análise do potencial financeiro de geração de energia no aterro genético. Para esta etapa, o presente trabalho definiu, primeiramente, a receita do projeto em reais por MWh (R\$/MWh) e os custos do projeto em reais (R\$), reais por potência instalado (R\$/MW) ou reais por volume de metano utilizado (R\$/m³). Conforme detalhado no tópico 4.3, o valor de venda da energia foi calculado de acordo com preços adotados no modelo de Geração Distribuída e Mercado Livre.

A partir das informações de receita e custos, foi avaliada a taxa de recebimento de resíduos (toneladas/ano), a geração de metano e a geração de energia (m³/ano) necessária para viabilizar economicamente o projeto, com base em premissas pré-definidas de atratividade.

4.1 Estimativa da Geração de Biogás e Energia Elétrica em Aterros Sanitários

Para estimar a geração de biogás a partir dos resíduos dispostos em aterros sanitários, foi utilizado o modelo Landfill Gas Emission Model (LandGEM). Esse modelo utiliza uma equação de primeira ordem para contabilizar a variação da produção de metano durante e após a vida de um aterro, que segue abaixo:

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Equação 8 – Variação da produção de gás em aterro sanitário de acordo com modelo LandGEM

Onde:

Q_{CH_4} = quantidade de gás gerado durante um ano (m³/ano);

L_0 = potencial de geração de metano em peso de resíduo (m³/t);

R = quantidade anual de resíduos depositados no aterro (t/ano);

k = taxa de geração de metano por ano (1/ano);

t = tempo desde o início da disposição do aterro (anos);

c = tempo desde o encerramento do aterro (anos).

4.1.1 Definição das Constantes L_0 e k

Entre os parâmetros necessários para estimar a geração de biogás através do modelo LandGEM, estão o potencial de geração de metano em peso de resíduo (L_0) e da taxa de geração

de metano por ano (k). Como esses valores dependem de uma série de fatores e as referências disponíveis apresentam uma grande variação entre si, conforme descrito no item 3.4 deste trabalho, optou-se por ajustar os valores de k e L_0 com base em valores reais de geração de metano, medidos em aterros selecionados.

Desta forma, foram utilizados os dados de geração de metano medidos em campo nos Aterros de Rio Claro, entre 2012 e 2014, e de Paulínia, entre 2013 e 2020, com exceção de 2016. Em seguida, utilizou-se a função “Solver” do Excel para encontrar os valores de k e L_0 que melhor se aproximassem dos valores obtidos em campo (condição real). Esses valores foram fixados para estimar o potencial teórico de geração de metano em aterro sanitário hipotético com vida útil de 20 anos, bem como para analisar a viabilidade financeira de projeto de produção e venda da energia elétrica com duração de 15 anos, conforme procedimentos detalhados a seguir.

Para obtenção dos valores de k e L_0 , foram levantados os demais parâmetros da Equação X, sendo eles: o recebimento anual real de resíduos (R), o tempo em operação (t), o tempo desde encerramento (c), equivalente a zero, uma vez que os aterros selecionados ainda estão em operação, e a quantidade de gás real gerada nos aterros selecionados (Q_{CH_4} real). Posteriormente, variou-se os valores de k e L_0 , dentro dos intervalos de referência mencionados no item 3.4, de modo que o resultado obtido pelo modelo (Q_{CH_4} calculada) seja o mais próximo possível da quantidade de gás real gerada (Q_{CH_4} real). Os aterros de Paulínia e de Rio Claro estão localizados na mesma Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos, a UGRHI 5, constituída pelas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí do Estado de São Paulo. O início de operação do aterro de Paulínia ocorreu em 1999, enquanto o de Rio Claro ocorreu dois anos depois, em 2001. A pluviosidade média de Paulínia e Rio Claro é de 1.580 mm/ano e 1.576 mm/ano, respectivamente, configurando um clima úmido (Climate-Data, 2023).

Os dados históricos da geração de metano (Q_{CH_4} real) no aterro sanitário de Paulínia foram retirados da base de registro e monitoramento de projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), para os anos entre 2013 e 2020, com exceção de 2016 (MDL, 2023). A geração de metano no aterro sanitário de Rio Claro foi obtida através de medições realizadas entre os anos de 2012 e 2014, desenvolvido por Castro (2016).

A quantidade de resíduos recebida (R) pelos aterros de Paulínia e Rio Claro foi obtida através dos Inventários Estaduais de Resíduos Sólidos elaborados pela CETESB, Governo do Estado de São Paulo e Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (CETESB, 2022), para o

mesmo período em que foram encontrados os dados de geração de metano real. Os inventários disponibilizam, para todo ano, as informações da quantidade de resíduos gerados em cada município do Estado e o aterro para o qual o resíduo foi destinado. Deste modo, foi possível obter a quantidade de resíduo que os aterros de referência receberam entre os anos de 2012 e 2021.

A quantidade de resíduos recebidos por cada aterro (R), bem como o tempo desde o início da operação (t), foram adicionados em planilha Excel e utilizados como os dados de entrada para calcular a geração de metano pelo modelo LandGEM. Os resultados obtidos de geração de metano (Q_{CH_4} calculada) foram comparados com os dados reais (Q_{CH_4} real) e, através da ferramenta Solver do Excel, variou-se e testou-se os valores de L_0 e k , de modo a obter a menor diferença entre a quantidade de metano calculada (Q_{CH_4} calculada) e a quantidade real medida nos aterros (Q_{CH_4} real), conforme será explicado a seguir.

Para Paulínia, foram utilizados os dados de geração referente aos anos de 2013 e 2020, com exceção do ano de 2016. Para Rio Claro, os dados utilizados para comparação foram de 2012 a 2014. A comparação consistiu em obter a diferença entre os dados medidos de geração de metano (Q_{CH_4} real) obtidos dos aterros com os dados estimados gerados pelo modelo (Q_{CH_4} calculada), para cada ano, através da obtenção da razão entre o segundo pelo primeiro, conforme equação abaixo.

$$\text{Razão}_{\text{Ano } i} = \frac{Q_{CH_4} \text{ calculada Ano } i}{Q_{CH_4} \text{ real Ano } i}$$

Equação 9 – Cálculo da aproximação entre a geração de metano calculada pelo modelo LandGEM e os dados reais de geração de metano medido nos aterros selecionados

Onde:

$\text{Razão}_{\text{Ano } i}$ = Aproximação entre o valor calculado e o valor real no ano i ;

$Q_{CH_4} \text{ calculada}_{\text{Ano } i}$ = Geração de metano calculada pelo LandGEM no ano i (m^3/ano);

$Q_{CH_4} \text{ real}_{\text{Ano } i}$ = Geração de metano real medida no aterro no ano i (m^3/ano).

Depois, foi calculada a média das razões, obtendo-se a diferença média entre os valores estimados e os valores reais da série de dados.

$$\text{Média "n" Razões} = \frac{\sum_{i=\text{ano } 1}^n \text{Razão Ano } i}{n - \text{ano } 1}$$

Equação 10 – Cálculo da aproximação média “n” entre a geração de metano calculada pelo modelo LandGEM e os dados reais de geração de metano medido nos aterros selecionados para todo o período de dados disponíveis

Onde:

Média “n” Razões = Aproximação média entre o valor calculado e o valor real no ano i para todo o período com dados disponíveis/calculados;

i = Ano em que valores foram calculados;

Ano 1 = Primeiro ano do período com dados disponíveis/calculados;

n = Último ano do período com dados disponíveis/calculados.

Em seguida, utilizou-se a ferramenta “Solver” do Excel, onde o objetivo foi obter o maior valor da média das razões (Média Razões), ou seja, a maior aproximação dos dados estimados com os dados reais, variando os valores de L_0 e k . Além de buscar os valores de L_0 e k que geram os valores de geração de metano (Q_{CH_4} calculada) mais próximos possíveis dos dados reais medidos (Q_{CH_4} real), também foram estabelecidas as seguintes restrições:

- A média das razões (Média Razões) deve ser no máximo 1 (um). Deste modo, em média, os dados estimados não podem ser maiores que os dados reais no período analisado. Assim, a média das razões será o maior valor entre 0 (zero) e 1 (um). Essa regra foi estabelecida para não superestimar a geração de metano;
- A razão de cada ano ($\text{Razão}_{\text{Ano } i}$) não deve ser maior que 1,25, ou seja, os valores estimados em um ano não podem ser 25% maiores que os dados reais. Embora, em média (Média Razões), a estimativa de geração não possa ser maior que os dados reais para o período analisado, foi permitido que em algum ano em específico a vazão estimada (Q_{CH_4} calculada) seja maior que a vazão real (Q_{CH_4} real). Essa regra foi estabelecida para não subestimar a geração de metano;
- O valor de k deve estar dentro dos valores sugerido pelo Banco Mundial, ou seja, entre 0,01 e 0,09 (Banco Mundial, 2004);
- O valor de L_0 deve estar dentro dos valores sugerido pelo Banco Mundial, ou seja, entre 5 e 300 (Banco Mundial, 2004).

Devido à maior disponibilidade de dados do Aterro de Paulínia e ao fato de que o Aterro de Rio Claro, no período de coleta de dados, já possuía drenos sem vazão de gás devido à idade

avançada do aterro, foram utilizados como base para o cálculo da geração de metano em aterros sanitários os valores de L_0 e k obtidos no modelo de Paulínia.

Para estimar a viabilidade de projetos de geração de energia elétrica a partir do biogás de acordo com diferentes taxas de recebimento de resíduos de um aterro sanitário genérico, fixaram-se os valores de L_0 e k obtidos no Aterro de Paulínia e definiu-se um prazo de 15 anos de projeto a partir de 2024, considerando o início de operação do aterro em 2023. Considerou-se também que o aterro terá vida útil de 20 anos, ou seja, permanecerá gerando metano durante toda a duração do projeto. Deste modo, foi possível estimar a geração de metano para diferentes valores de recebimento de resíduos com o modelo LandGEM, variando-se a quantidade anual de resíduos depositados no aterro (R).

4.1.2 Conversão do biogás em energia elétrica

A geração de energia elétrica a partir do biogás foi obtida pelo produto da geração calculada de metano pela eficiência de captação do gás, poder calorífico do metano, fator conversão do poder calórico em energia e a eficiência de conversão do gerador, conforme ilustrado na fórmula abaixo:

$$\text{Geração de Energia} = Q_{\text{CH}_4} \times \text{Eficiência Captação} \times \text{PCI}_{\text{CH}_4} \times \text{Fator Conversão} \times \text{Eficiência}$$

Equação 11 – Cálculo da conversão do metano em energia elétrica

Onde:

Geração de Energia = Energia elétrica total gerada (MWh/ano);

Q_{CH_4} = quantidade de gás gerado durante um ano (m^3/ano);

Eficiência Captação = Percentual de captura do gás gerado (65%);

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do Metano ($8.500 \text{ kcal}/\text{m}^3$);

Fator Conversão = Fator de conversão da energia térmica em energia elétrica ($1,1622 \times 10^{-6} \text{ MWh}/\text{kcal}$);

Eficiência = Eficiência de geração de energia elétrica do gerador utilizado (25%).

Os valores para cada uma das variáveis acima foram selecionados com base nas referências mencionadas no item 3.5 acima, sendo eles:

- Eficiência de captação do gás: Entre 50 e 90% (USEPA, 1996). Adotou-se o valor de 65%, sendo mais conservador em relação aos valores sugeridos pelo Banco Mundial e

de acordo com o cenário intermediário adotado pela ADEME (Banco Mundial, 2004; SPOKAS et al., 2006);

- Poder Calorífico Inferior do metano: 8.500 kcal/m³ (Lora & Venturini, 2012);
- Fator de conversão: 1,1622 x 10⁻⁶ MWh/kcal (Hainke, 2005);
- Eficiência média de Motor Ciclo Otto: Entre 20% e 30%, dependendo das condições de operação (Ferguson & Kirkpatrick, 2001). Adotou-se o valor médio de 25%, sendo um valor conservador em relação às outras referências (CENBIO, 2005; Çengel & Boles, 2006).

4.2 Definição dos custos de implementação e operação do projeto

Para análise da viabilidade financeira do projeto, fez-se necessário estimar os custos de implementação e operação do projeto. Os dados de investimento e operação de projetos de geração de energia elétrica a partir do biogás foram retirados do programa “Biogás Geração e Uso Energético”, desenvolvido a partir de convênios firmados entre o Governo do Estado de São Paulo, por meio da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, e do Governo Federal, por meio do Ministério da Ciência e Tecnologia, visando promover a disseminação da tecnologia de produção e uso do biogás (CETESB, 2006). Considerando que a base de dados citada foi realizada em 2006, todos os valores monetários foram atualizados conforme variação do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) no Brasil entre janeiro de 2006 e janeiro de 2023. O IPCA foi selecionado para reajuste dos custos pois é um dos índices de inflação mais tradicionais e importantes do Brasil, representando a variação de preços de uma cesta de produtos e serviços consumida pela população do país, indicando a variação mês a mês. Os valores de investimento considerados estão dispostos a seguir:

- Queimador: R\$ 513.403,54 por unidade. Foram consideradas 1 (uma) unidade (CETESB, 2006, atualizado pelo IPCA);
- Gerador Ciclo Otto: R\$ 2.567,02/kW instalado. O custo total variou de acordo com a geração de energia estimada (CETESB, 2006, atualizado pelo IPCA).

Também foi considerado o investimento de R\$2.000.000,00 (2 milhões de reais) com licenciamento e engenharia, que representa aproximadamente 13% do investimento do projeto, considerando a potência instalada de 5 MW (McMahon, 2019).

Vale destacar que não foi considerado o custo da infraestrutura para captação do gás nas camadas do aterro sanitário, uma vez que o presente trabalho visou analisar a viabilidade de projetos apenas em aterros sanitários que, segundo norma vigente, já devem possuir sistema

para a drenagem de gás (ABNT, 1992). Já o custo para condução do gás retirado das camadas do aterro até o gerador foi considerado como custo operacional de compressão e sucção, apresentado abaixo.

Nos custos operacionais, foram considerados o tratamento do gás para retirada de H_2O , H_2S e siloxina, o custo de compressão/sucção para gerador, gasômetro e mão de obra. Os valores utilizados encontram-se a seguir:

- Tratamento: R\$ 0,05/m³ (cinco centavos por metro cúbico);
- Compressão/sucção: R\$ 1.283,51 m³/h (mil duzentos e oitenta e três reais e cinquenta e um centavos por metro cúbico por hora);
- Gasômetro: R\$ 231,03 m³/h (duzentos e trinta e um reais e três centavos por metro cúbico por hora);
- Mão de obra: R\$21.000 (21 mil reais) por mês, considerando R\$3.000/mês por funcionário e 7 (sete) funcionários, sendo 5 (cinco) responsáveis pelas atividades de controle, automação, monitoramento e inspeção e 2 (dois) funcionários para o setor comercial, sendo responsáveis pela venda da energia para clientes finais ou negociação com empresa gestora de consórcio de clientes.

Foi considerado que o projeto será autossuficiente em geração de energia elétrica para abastecimento da planta e, portanto, não foram inclusos custos com energia elétrica da rede ou geradores adicionais. Uma vez que a potência instalada máxima do projeto deste estudo foi de 5 MW, limitado pelas premissas do modelo de Geração Distribuída, haverá excedente de gás para gerar energia suficiente para a planta.

4.3 Estimativa da receita do projeto

Foram utilizados dois modelos de comercialização de energia elétrica: Geração Distribuída e Mercado Livre. Para ambos os modelos, foram considerados a potência máxima permitida no modelo de Geração Distribuída, equivalente a 5 MW de potência instalada. Essa potência máxima correspondeu a 10.950 MWh/ano, considerando a eficiência de conversão igual à 25%, conforme apresentado no item 4.1.2 deste trabalho, e a operação constante (8760 horas por ano).

Para estimar a receita obtida no modelo de Geração Distribuída, foi fixada a tarifa de energia da distribuidora CPFL Paulista, homologada em julho de 2022, composta pelas parcelas da Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição (TUSD) e Tarifa de Energia (TE) da modalidade B3 (Baixa Tensão) Convencional (ANEEL, 2022). Considerando que o desconto oferecido para os clientes de Geração Distribuída é feito em relação à tarifa bruta com impostos,

foram adicionadas na tarifa homologada as alíquotas de 18% de ICMS e 5% PIS/COFINS sobre cada parcela (TUSD e TE), obtendo-se a tarifa bruta de energia. Sobre a tarifa bruta, considerou-se a oferta de um desconto de 10% para os clientes consumidores da energia, para os quais a energia será comercializada. Visando obter a tarifa líquida a ser recebida pelo projeto, depois de subtrair o desconto fornecido para os clientes, descontaram-se do valor remanescente o ICMS e PIS/COFINS calculados anteriormente, obtendo-se a tarifa líquida a ser recebida pelo projeto.

Seguindo as novas regras de Geração Distribuída instituídas pela Resolução Normativa 1.052/2023, foram descontados da tarifa líquida a TUSD Geração (TUSDg) aplicada ao subgrupo A3a (30 a 44kV), 100% do custo do Fio B, 40% do Fio A e 100% dos custos de TFSEE e P&D (ANEEL, 2023). Deste modo, obteve-se o valor da energia em R\$/MWh (reais por MWh) a ser recebida pelo projeto. Assim como os valores totais de TUSD e TE acima mencionados, os valores da TUSDg, Fio A, Fio B, TFSEE e P&D foram retirados da Resolução Homologatória da ANEEL para a Distribuidora CPFL Paulista, N° 3.058 de julho de 2022, e da sua respectiva planilha da estrutura tarifária (ANEEL, 2022). A tarifa obtida para o primeiro ano do projeto foi de R\$356,39/MWh.

Já para estimativa do valor de venda da energia no Mercado Livre de Energia, foi utilizada a média dos preços históricos de venda das energias renováveis (Solar Fotovoltaica, PCH, UHE, CGH, Eólica e Resíduo Sólido Urbano), com exceção da biomassa, a partir de 2018, em leilões de contratação de energia pelas distribuidoras do Sistema Interligado Nacional no Ambiente de Comercialização Regulado (ACR), equivalente a R\$288,15/MWh (CCEE, 2023). A biomassa foi excluída devido a distorção de preço causada pela falta do combustível no mercado nos últimos anos.

Conforme estudo apresentado no item 3.6.3 deste trabalho, para projetar o crescimento da tarifa de energia recebida pelo projeto ao longo dos anos, considerou-se um aumento anual de 4% ao ano, a partir de 2024 até o final do projeto, com base no IPCA projetado para 2025 e 2026, segundo o Relatório de Mercado do Boletim Focus do dia 24/03/2023. Para a tarifa no Mercado Livre, o crescimento de 4% ao ano foi aplicado sobre o valor bruto calculado, equivalente a R\$288,15/MWh em 2024. Para a tarifa no modelo de Geração Distribuída, o aumento foi aplicado aos valores de TUSD e TE. O valor de 4% teve como base o IPCA projetado para 2025 e 2026, segundo o Relatório de Mercado do Boletim Focus do dia 24/03/2023.

4.4 Cálculo da Viabilidade Financeira do projeto

Para analisar a viabilidade financeira do projeto, foram selecionados dois indicadores financeira, sendo eles: Taxa Interna de Retorno (TIR) e prazo para retorno do investimento (Payback). Para obtenção desses indicadores, construiu-se o Demonstrativo de Lucros e Perdas (P&L) e, em seguida, o Fluxo de Caixa do Projeto.

A primeira etapa do P&L é o cálculo da receita total bruta do projeto por ano, obtida pelo produto do total da energia gerada ao ano e valor da energia recebida pelo gerador, conforme Equação A.

$$\text{Receita Total Bruta} = \text{Geração de Energia (MWh/ano)} \times \text{Valor da Energia (R$/MWh)}$$

Equação 12 – Cálculo da Receita Total Bruta no ano

Em seguida, realizou-se o cálculo da receita líquida, através do desconto dos impostos, conforme Equação B. Foram considerados 12% de ICMS, 3% de PIS e 0,01% de COFINS sobre a receita bruta, segundo o regime de Lucro Presumido. Essa etapa foi realizada apenas para o modelo de comercialização no Mercado Livre, uma vez que, conforme descrito no item 4.3 neste trabalho, a tarifa calculada para a Geração Distribuída já faz o desconto dos impostos previamente.

$$\text{Receita Líquida} = \text{Receita Total Bruta} - [(\text{Receita Total Bruta} * \text{ICMS}) + (\text{Receita Total Bruta} * \text{PIS}) + (\text{Receita Total Bruta} * \text{COFINS})]$$

Equação 13 – Cálculo da Receita Total Líquida no ano

Depois, descontaram-se os custos de operação no ano (tratamento, compressão, gasômetro e mão de obra), obtendo-se o EBITDA, valor que indica os lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização, conforme equação C.

$$\text{EBITDA} = \text{Receita Líquida} - \text{Custo Tratamento} - \text{Custo Compressão} - \text{Custo Gasômetro} - \text{Custo Mão de Obra}$$

Equação 14 – Cálculo do EBITDA no ano

Após, deduziu-se do EBITDA a depreciação do ativo, obtendo-se o EBIT. A depreciação do ativo no ano foi considerada equivalente ao valor da divisão do CAPEX total do projeto (Geradores e Queimador) pelo tempo de projeto (15 anos), conforme equação D.

$$\text{EBIT} = \text{EBITDA} - \frac{(\text{Custo Geradores} + \text{Custo Queimador})}{\text{Tempo de projeto}}$$

Equação 15 – Cálculo do EBIT no ano

Do valor obtido, foram retirados os tributos de Imposto de renda (IR) e a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL), considerando o regime de Lucro Presumido e a atividade de geração e venda de energia como “Outras atividades não especificadas (exceto prestação de serviços)”. Deste modo, considerou-se o valor do IR igual a 20% do valor equivalente a 8% da receita bruta (Equação E), e o CSLL igual a 9% do valor equivalente a 12% da receita bruta (Equação F).

$$\text{IR} = 20\% \times (8\% \times \text{Receita Total Bruta})$$

Equação 16 – Cálculo do IR segundo regime de Lucro Presumido

$$\text{CSLL} = 9\% \times (12\% \times \text{Receita Total Bruta})$$

Equação 17 – Cálculo da CSLL segundo regime de Lucro Presumido

Deste modo, obteve-se lucro líquido através da Equação F.

$$\text{Lucro Líquido} = \text{EBIT} - \text{IR} - \text{CSLL}$$

Equação 18 – Cálculo do Lucro Líquido Anual

Após cálculo do P&L, seguiu-se para o cálculo do Fluxo de Caixa. O Fluxo de Caixa do Projeto englobou o fluxo de caixa operacional e o fluxo de caixa de investimentos para todo o período do projeto. O fluxo de caixa do projeto considerou a soma do lucro líquido com o valor positivo depreciação, uma vez que a depreciação não será, de fato, descontada do fluxo de caixa do projeto. O fluxo de caixa do investimento considerou o investimento total (CAPEX) no primeiro ano e, nos anos seguintes, foi inserido o CAPEX de reposição, que considerou o valor igual a 1% do CAPEX total por ano. Por fim, somou-se o fluxo de caixa operacional com o fluxo de caixa de investimento para cada um dos anos, gerando o fluxo de caixa para equity. Sobre o fluxo de caixa para equity, foi calculada a TIR, enquanto o Payback foi calculado considerando o tempo percorrido até o fluxo de caixa gerado compensar o investimento realizado, gerando o primeiro valor positivo.

Para análise da atratividade do projeto, foi considerado como referência o valor do IPCA, somado a uma taxa adicional. O IPCA foi fixado em 4%, conforme valor projetado para 2025 e 2026 no Relatório de Mercado do Boletim Focus do dia 24/03/2023. A taxa adicional foi fixada em 6,35%, com base na rentabilidade oferecida para um título de Tesouro Direto IPCA+ 2045 no dia 31/03/2023. Deste modo, projeto com TIR superior a 10,35% foram considerados atrativos e viáveis financeiramente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Valores do potencial de geração de metano (L_0) e da taxa de geração de metano (k)

Para o Aterro Sanitário de Paulínia, os valores de geração de metano em peso de resíduo (L_0) e da taxa de geração de metano por ano (k) que resultaram nos valores de geração de metano (Q_{CH_4} calculada) mais próximos da geração de metano real (Q_{CH_4} real) foram, respectivamente, 42,355 m³ CH₄/tonelada e 0,083/anos. Esses valores resultaram em uma aproximação média entre geração de metano calculada e geração real (Média Razões) igual a 74,241%, ou seja, os valores reais medidos foram, em média, aproximadamente 25,8% maiores do que os valores calculados. Os resultados obtidos de geração de metano pelo modelo do LandGEM (Q_{CH_4} calculada), bem como a aproximação destes com os dados reais, estão dispostos na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 – Comparação entre os valores estimados de geração de metano em relação aos valores medidos no aterro de Paulínia, no período de 2013 a 2020

Tempo	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Q_{CH_4} real [m ³ /ano]	48.713.649,52	54.382.047,54	48.501.391,14	-	37.683.219,16	38.722.061,51	25.728.371,35	42.417.427,45
Q_{CH_4} calculada [m ³ /ano]	24.892.878,98	25.503.121,48	27.600.055,51	29.108.001,56	30.621.308,15	31.713.075,22	32.151.030,37	33.051.450,82
Aproximação produção real e calculada	51%	47%	57%	-	81%	82%	124,9633%	78%

Fonte: Autor, 2023

Observou-se na Tabela 9 que a imposição de limite para a vazão anual estimada em até 25% superior a vazão medida (ano de 2019) gerou valores bem inferiores nos outros anos utilizados no ajuste. Para fins de investigação do impacto dessa limitação nos resultados, excluiu-se a limitação da razão de cada ano em 1,25. A simulação do Solver resultou em um valor de L_0 foi igual a 72,8998 m³ CH₄/tonelada, o k foi 0,0527/anos e a aproximação média de 99,985%. Entretanto, entre os anos de 2017 e 2020, a geração de metano calculada foi superestimada, chegando a ser 70% superior à geração real em 2019. Os dados desta simulação encontram-se na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 – Geração de metano real e calculada no Aterro Sanitário de Paulínia sem limitação de superestimativas de geração

Tempo	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Q _{CH₄} real [m ³ /ano]	48.713.649,52	54.382.047,54	48.501.391,14	-	37.683.219,16	38.722.061,51	25.728.371,35	42.417.427,45
Q _{CH₄} calculada [m ³ /ano]	32.417.253,46	33.621.818,33	36.457.075,83	38.682.571,57	40.932.762,18	42.736.305,88	43.822.922,43	45.402.142,46
Aproximação produção real e calculada	67%	62%	75%	-	109%	110%	170,3292%	107%

Fonte: Autor, 2023

Em relação aos dados de geração real de metano utilizados, observou-se que a vazão de metano medida no aterro de Paulínia apresentou uma diminuição entre os anos de 2013 e 2017. Além disso, em 2019, a vazão foi consideravelmente inferior ao observado nos demais anos da série histórica. O comportamento observado no aterro de Paulínia difere-se do comportamento esperado de geração de metano em um aterro sanitário, onde costuma ocorrer um crescimento exponencial da geração, enquanto ocorre a disposição de resíduos, seguido pela diminuição da geração de metano após encerramento do aterro e conforme exaustão da matéria orgânica biodegradável. Os dados reais observados em Paulínia e utilizados para ajustes neste estudo não seguem esse comportamento esperado. Portanto, tende-se a concluir que os dados disponíveis não refletem a geração absoluta de metano no aterro, e sim o volume captado e medido, que foi menor provavelmente devido a ineficiências ou problemas operacionais na captura do gás, perdas de gás decorrentes de emissões fugitivas da superfície do aterro para a atmosfera, problemas no equipamento de medição ou até a idade avançada de alguns maciços de resíduos que se encontram a mais tempo no aterro. Entretanto, mesmo que não reflita a totalidade da geração de metano, os dados reais disponíveis são os que melhor representam a realidade operacional do projeto, conferindo mais confiabilidade e segurança para modelos que utilizam esses dados para simular seu comportamento.

Nesse sentido, vale ainda destacar que não houve diminuição da taxa de recebimento de resíduos entre 2013 e 2017, nem em 2019, bem como não foram encontradas notificações de implementação de sistemas para reduzir a geração de gases, que inclusive não deve ser desejado pelo aterro, uma vez que, por estar registrado no MDL, recebe créditos de carbono pela quantidade de gás gerado e queimado em *flaire* ou aproveitado. Assim, acredita-se que a diminuição da vazão de metano medida no aterro não é resultado da diminuição da capacidade de geração de metano, nem da diminuição da atividade biológica. De todo modo, a diminuição inesperada na produção de metano observada em alguns anos no aterro reitera a necessidade de

adoção de premissas mais conservadoras para resguardar o empreendedor de fatores não passíveis de previsão, gerando estimativas mais seguras.

Conforme apresentado no item 3.4 deste trabalho, superestimar a geração de metano não é desejado, uma vez que pode causar o superdimensionamento do projeto, que terão equipamentos com capacidade ociosa, uma vez que foram projetados para receber um volume de metano superior ao efetivamente gerado. Assim, superestimavas na ferramenta de cálculo de geração de metano resultam na redução da eficiência financeira do projeto, pois serão dispendidos maiores investimentos para geração de menos receita. Além disso, a adoção de premissas mais conservadoras pode proteger o empreendedor de eventuais multas em contratos de comercialização de energia decorrentes da geração de valores inferiores ao volume de eletricidade contratada. Em contratos de comercialização de energia no Modelo de Geração Distribuída, o comprador e/ou consumidor da energia pode requerer que o contrato de compra preveja penalidades ao gerador se este fornecer energia em quantidade inferior ao acordado. Assim, é importante adotar coeficientes de segurança e premissas conservadoras, mitigando o risco de penalidades em caso de falhas imprevistas na operação e necessidade de manutenções não programadas.

Assim, apesar dos valores de k e L_0 obtidos na segunda simulação, sem limitação de superestimativas de geração de metano, tenham gerado na média dos anos uma melhor aproximação dos valores reais, optou-se pela simulação que não permite superestimativas, em prol da segurança contratual e saúde financeira do projeto, garantindo maior probabilidade de cumprimento de compromissos legais assumidos com os clientes, bem como do retorno calculado para o projeto. Deste modo, optou-se por utilizar os valores de $42,355 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tonelada}$ de resíduo para o L_0 e $0,083/\text{anos}$ para o k .

Em relação à simulação realizada no Aterro Sanitário de Rio Claro, os valores de geração de metano em peso de resíduo (L_0) e da taxa de geração de metano por ano (k) foram, respectivamente, $13,471 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tonelada}$ e $0,09/\text{anos}$, resultando em uma aproximação média entre geração de metano calculada e a geração real (Média Razões) igual a 72,61%. A Tabela 11 abaixo mostra os resultados obtidos de geração de metano pelo modelo do LandGEM (Q_{CH_4} calculada) e a aproximação destes com os dados reais em cada ano.

Tabela 11 – Geração de metano real e calculada no Aterro Sanitário de Rio Claro

Tempo	2012	2013	2014
Q _{CH₄} real [m ³ /ano]	913.063,42	1.482.501,12	439.529,68
Q _{CH₄} calculada [m ³ /ano]	526.927,12	520.764,61	549.412,14
Aproximação produção real e calculada	58%	35%	125%

Fonte: Autor, 2023

Observou-se que os valores encontrados para o Aterro de Paulínia e para o Aterro de Rio Claro diferem-se significativamente entre si, provavelmente devido à quantidade de recebimento de resíduos ao longo de tempo. Em Rio Claro, a taxa de recebimento de resíduos é muito inferior à taxa de Paulínia, sendo a média da taxa de Rio Claro, entre 2012 e 2021, igual a cerca de 170 toneladas por dia, e a de Paulínia igual a 2.614 toneladas por dia, ou seja, cerca de 15 vezes maior. A manutenção de altas taxas de recebimento de resíduos em Paulínia ao longo dos anos garante a disponibilidade de matéria orgânica biodegradável, passível de digestão anaeróbica e, conseqüentemente, geração constante e alta de metano. Já em Rio Claro, após mais de 10 anos em operação, uma grande parcela do material disposto encontra-se já degradado, diminuindo assim a capacidade de geração de metano em peso de resíduo.

Ademais, para o Aterro de Paulínia, há uma maior disponibilidade de dados, o que garante maior confiabilidade para os valores que resultaram da sua simulação. Além disso, os valores de L_0 e k , embora inferiores, estão mais similares aos valores de referência citados no item 3.4 deste trabalho.

Devido aos motivos supracitados, foram fixados para este estudo os valores de geração de metano em peso de resíduo (L_0) igual a 42,355 m³ CH₄/tonelada e de taxa de geração de metano por ano (k) igual a 0,083/ano.

Conforme apresentado no item 3.4.1 deste trabalho, os valores de k recomendados pelo Banco Mundial para cidades com precipitação anual de mais de 1.000 mm é de 0,02 a 0,09, variando de acordo com a degradabilidade dos resíduos (Banco Mundial, 2004). O valor de 0,083/ano encontrado está mais próximo do valor máximo de 0,09/ano, sugerido para resíduos altamente degradáveis. Já em comparação com os valores sugeridos pelo IPCC, considerando que o aterro está localizado em clima tropical úmido, o valor de 0,083/ano obtido encontra-se abaixo do intervalo sugerido entre 0,15 e 0,2/ano para a massa total dos resíduos. Entretanto, o valor obtido está dentro do intervalo de 0,06 e 0,085/ano, sugerido para resíduos relativamente

inertes (IPCC, 2006). Em relação ao LandGEM, o valor obtido encontra-se acima do maior valor sugerido pelo padrão de Inventário para Áreas Úmidas, igual a 0,07/ano (USEPA, 2005).

Já em relação ao L_0 , o valor encontrado está consideravelmente abaixo dos valores recomendados pelo Banco Mundial para resíduos altamente degradáveis, que variam de 225 a 300 m³ CH₄/tonelada (Banco Mundial, 2004). O valor de 42,355 m³ CH₄/tonelada está mais próximo dos valores sugeridos para resíduos relativamente inertes (5 a 25 m³ CH₄/tonelada) e abaixo dos valores para moderadamente degradável (140 a 200 m³ CH₄/tonelada). O valor também encontra-se abaixo dos valores sugeridos para o LandGEM, igual a 170 m³ CH₄/tonelada pelo padrão CCA Convencional, a 100 m³ CH₄/tonelada pelo padrão de Inventário Convencional e 96 m³ CH₄/tonelada pelo padrão de Inventário para Áreas Úmidas.

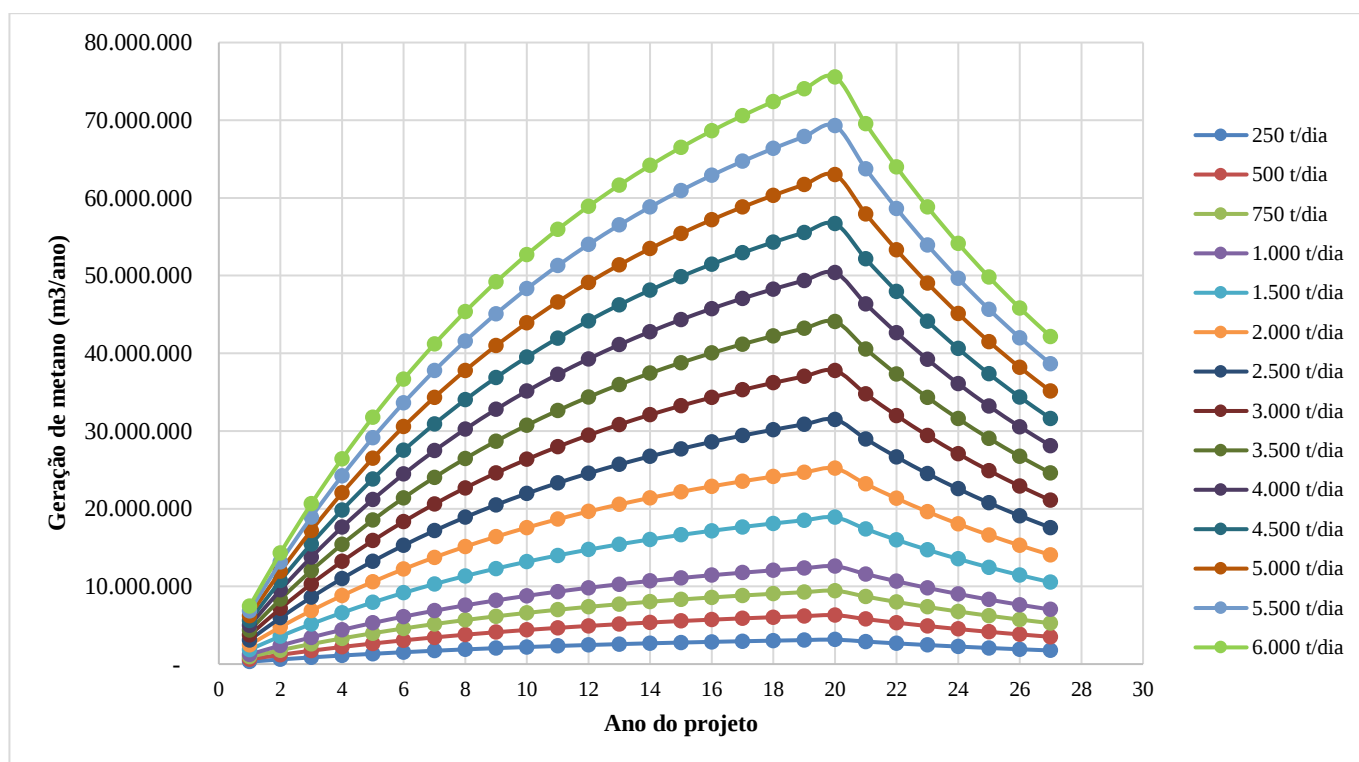
A diferença entre os valores de referência do Banco Mundial, IPCC e LandGEM e os valores reais podem ser observados em outros trabalhos que comparam os resultados dos modelos com a vazão medida nos aterros. Conforme apresentado na revisão bibliográfica, Audibert & Fernandes (2011), ao comparar os valores obtidos pelo modelo do IPCC, USEPA e LandGEM com os dados reais medidos no aterro controlado de Londrina – PR, notaram que o modelo do USEPA foi o que gerou resultados mais próximos aos valores reais medidos, com o uso de 0,05/ano para k e 85,91 m³ CH₄/t de resíduo. Entretanto, apesar de gerar a melhor estimativa, nota-se que o valor de L_0 é inferior aos valores sugeridos pelo Banco Mundial para resíduos moderadamente degradáveis e altamente degradáveis, bem como inferior aos valores sugeridos pelo LandGEM. Ademais, baixos valores de L_0 também foram encontrados em estudos desenvolvidos em aterros brasileiros. Machado et. al (2009) obtiveram o valor de 66,62 m³ CH₄/t de resíduo para L_0 pelo modelo do IPCC. Crovador (2014), através de ensaios de laboratório, obteve o valor de 48,32 m³ CH₄/t de resíduo para o aterro municipal de Guarapuava – PR.

5.2 Geração de Metano e de Energia Elétrica

Visando analisar o impacto da quantidade de recebimento de resíduos no volume gerado de metano, simulou-se a geração de metano de acordo com diferentes taxas de recebimento de resíduos. Observou-se que a quantidade de metano gerada em um aterro sanitário, calculado pelo modelo LandGEM, é maior conforme aumento da taxa de recebimento diário de resíduos. Os parâmetros do item 5.1 e da metodologia foram mantidos constantes e variou-se a quantidade de resíduos dispostos diariamente, considerando a geração de metano em peso de resíduo ($L_0 = 42,355$ m³ CH₄/tonelada), taxa de geração de metano por ano ($k = 0,083$ /anos) e aterro com início de operação em 2023 e final de operação em 2043, considerando uma vida

útil de 20 anos. Assim, foi calculada a geração de metano anual ao longo dos anos da vida do aterro, de acordo com diferentes taxas de recebimento de resíduos (R variando de 250 t/dia até 6.000 t/dia). Os resultados das simulações podem ser encontrados no gráfico abaixo.

Gráfico 1 – Geração anual de metano ao longo do tempo para aterros com diferentes taxas de recebimento de resíduos

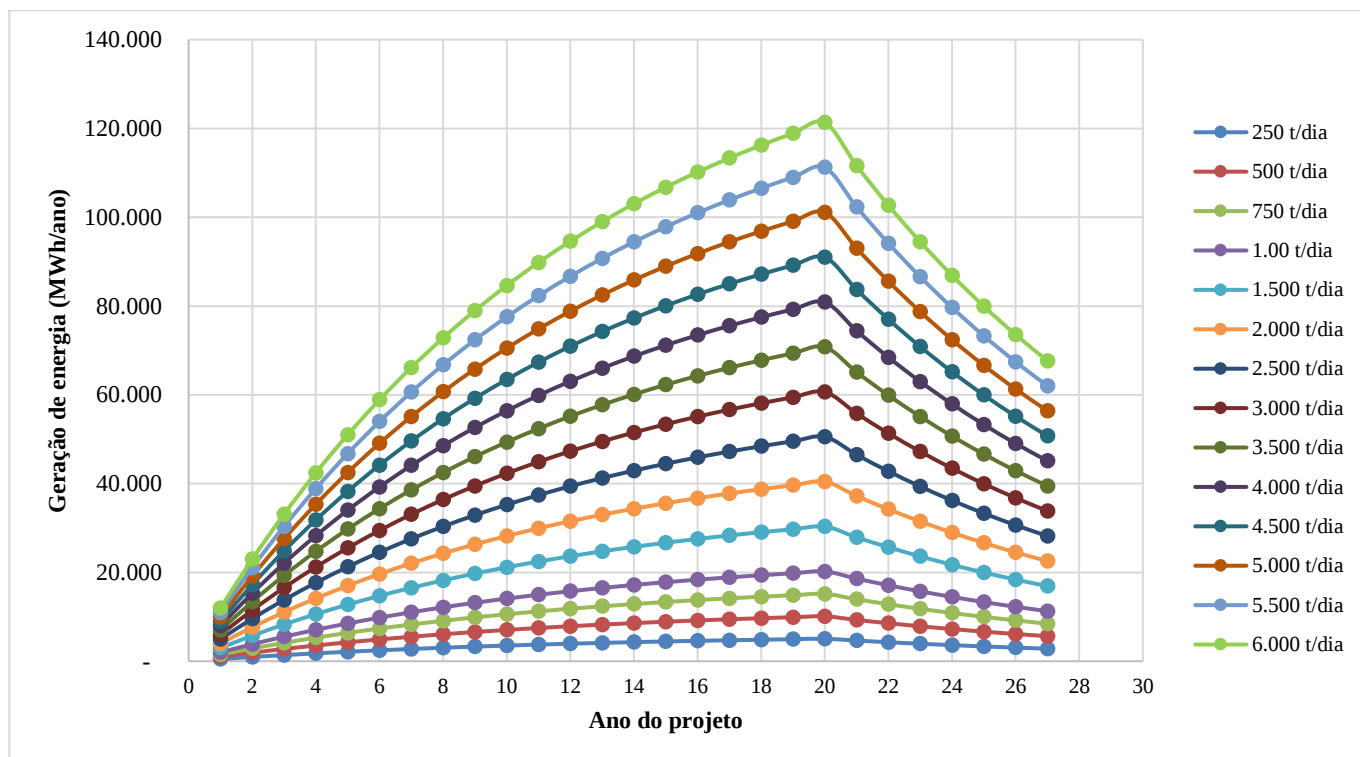


Fonte: Autor, 2023

Observa-se que, após encerramento do aterro no vigésimo ano e consequente interrupção do recebimento de resíduos, inicia-se a redução da geração de metano. O pico de geração de gás em um aterro ocorre no último ano de operação, o que pode ser observado no gráfico acima. Ademais, dado que o parâmetro k é próximo ao valor máximo recomendado de 0,09/anos, espera-se rápido decaimento da geração de metano quando comparado com aterros com menores valores de k .

Ademais, a partir das estimativas de geração de metano para diferentes taxas de recebimento de resíduos, foi calculada a geração de energia, também com base nos procedimentos apresentados no item 5.1 e na metodologia, considerando a eficiência de captação (80%), poder calorífico (8.500 kcal/m³), fator de conversão de energia e eficiência do sistema de geração. Assim, foi simulada a geração de energia anual no projeto para diferentes taxas de recebimento de resíduos. Os resultados são apresentados no Gráfico abaixo.

Gráfico 2 – Geração anual de Energia Elétrica ao longo do tempo para aterros com diferentes taxas de recebimento de resíduos

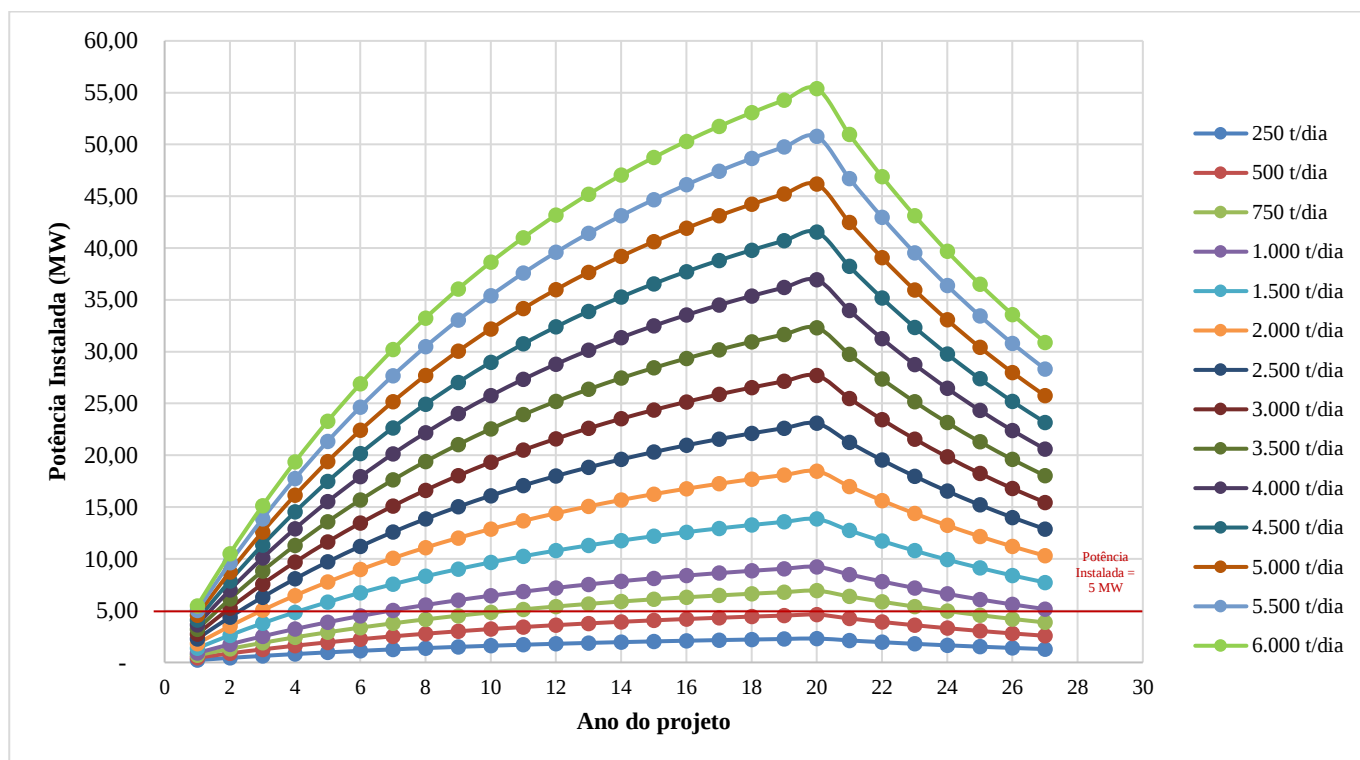


Fonte: Autor, 2023

Até a taxa de 1.000 toneladas de resíduos por dia, a geração de energia não ultrapassa 20.500 MWh/ano. Importante destacar que, no modelo de Geração Distribuída, os projetos são limitados a potência instalada de 5 MW. Assim, mesmo que o aterro gere metano suficiente para produzir mais energia, o máximo que poderá ser comercializado nesse modelo será de 10.950 MWh/ano, considerando o produto da potência instalada por 25% de eficiência de geração de energia elétrica do gerador, conforme apresentado no item 4.1.2, e por 8760 horas em um ano. Considerando essa limitação, foram simuladas a potência máxima que poderia ser gerada pelo aterro de acordo com diferentes taxas de recebimento de resíduos (Gráfico 3).

Observou-se que, acima da taxa de recebimento de resíduos de 500 toneladas por dia, todos os aterros podem ter mais de 5 MW de potência instalada em algum ano. Durante os 15 anos de projeto de geração e venda de energia, a média de potência instalada ficou acima de 5 MW para aterros com taxa de recebimento de resíduos superior a 750 toneladas por dia. Por outro lado, apenas acima da taxa de recebimento de resíduos de 5.000 mil toneladas por dia foram observadas possibilidades de implementação de projetos com potências instaladas acima de 5 MW durante todos os anos do projeto.

Gráfico 3 – Potência instalada máxima em cada ano do projeto considerando o uso do potencial total de geração de metano em aterros com diferentes taxas de recebimento de resíduos



5.3 Viabilidade financeira dos projetos de acordo com a taxa de recebimento de resíduos (R)

Um projeto de geração de energia elétrica a partir do biogás de um aterro sanitário com início de operação em 2024 e prazo de 15 anos apresentará viabilidade, ou seja, terá uma Taxa Interna de Retorno (TIR) superior a 10,35%, no modelo de Geração Distribuída, a partir de taxa de recebimento de resíduos equivalente a cerca de 237 toneladas por dia, considerando todos os parâmetros citados na metodologia e no item 5.1 acima de geração de metano em peso de resíduo (L_0), taxa de geração de metano por ano (k), aterro com início de operação em 2023 e final de operação em 2043, eficiência de captação, poder calorífico, fator de conversão de energia, eficiência do sistema de geração, receita, investimento, custos de operação, impostos e tributos. Neste cenário de taxa de recebimento mínima, o tempo de retorno foi de 9 anos.

A Tabela 12 abaixo apresenta a geração de metano e energia e os principais indicadores financeiros, considerando um aterro com a taxa de recebimento de resíduos mínima para viabilizar o projeto (237 ton/dia).

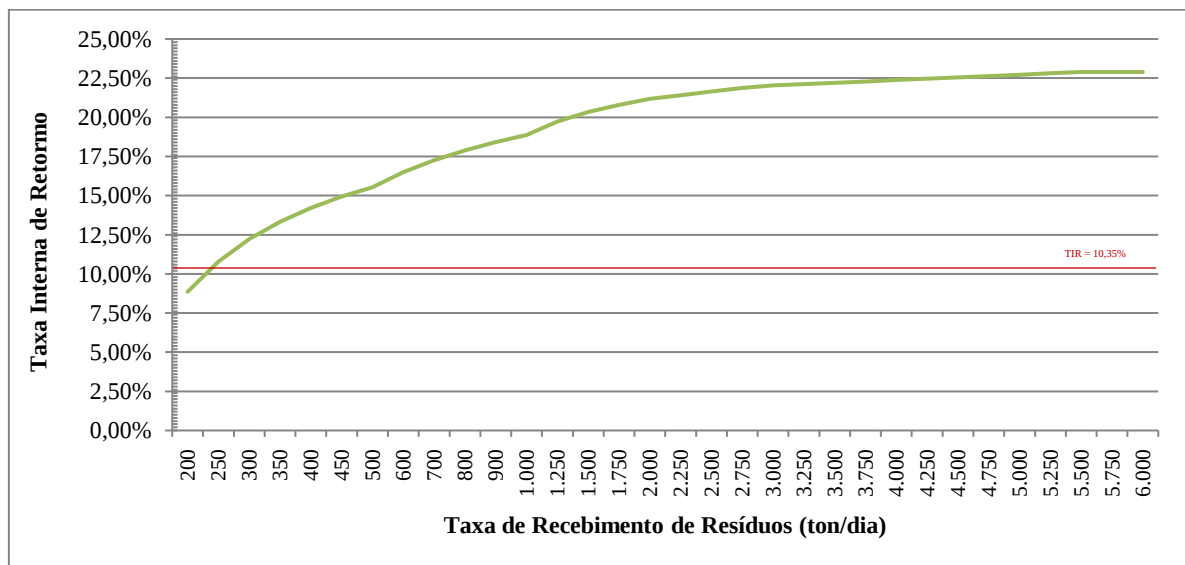
Tabela 12 – Modelo Financeiro de Projeto de Geração de Energia em aterros sanitários com a menor taxa de recebimento de resíduos para viabilização do projeto

Tempo	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Recebimento de resíduos	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15	86.462,15
Captação de metano [m³/ano]	-	191.315,79	367.319,00	529.235,22	678.191,94	815.226,43	941.292,92	1.057.289,27	1.163.963,07	1.262.117,28	1.352.415,41	1.436.486,23	1.511.898,20	1.582.213,50	1.646.891,68	1.706.383,13	1.761.132,19
Produção de metano estimado [m³/ano]	-	294.331,98	565.106,15	814.208,02	1.043.372,22	1.254.194,51	1.448.142,86	1.626.568,10	1.796.712,41	1.941.716,90	2.080.636,09	2.208.440,35	2.326.012,62	2.434.174,61	2.533.679,50	2.625.220,20	2.709.434,14
Energia comercializada [MWh/ano]	-	472,50	907,17	1.307,06	1.674,94	2.013,38	2.324,73	2.611,16	2.874,66	3.117,07	3.340,08	3.545,25	3.733,99	3.907,62	4.067,36	4.214,31	4.349,00
Energia total produzida [MWh/ano]	-	472,50	907,17	1.307,06	1.674,94	2.013,38	2.324,73	2.611,16	2.874,66	3.117,07	3.340,08	3.545,25	3.733,99	3.907,62	4.067,36	4.214,31	4.349,00
Potência máxima do equipamento	-	0,22	0,41	0,60	0,76	0,92	1,06	1,19	1,31	1,42	1,53	1,62	1,71	1,78	1,86	1,92	1,99
Potência máxima GD [MW]	-	0,22	0,41	0,60	0,76	0,92	1,06	1,19	1,31	1,42	1,53	1,62	1,71	1,78	1,86	1,92	1,99
Volume de metano necessário [m³/ano]	-	191.315,8	367.319,0	529.235,2	678.191,9	815.226,4	941.292,9	1.057.289,3	1.163.963,1	1.262.117,3	1.352.415,4	1.436.486,2	1.511.898,2	1.582.213,5	1.646.891,7	1.706.383,1	1.761.132,2
Tarifa [R\$/MWh]		356,39	406,25	431,28	457,31	484,39	512,55	541,83	572,28	603,96	636,90	671,16	706,79	743,84	782,38	822,45	864,13
P&L																	
Receita Líquida	-	168.392,17	368.536,58	563.708,15	765.972,17	975.255,37	1.191.528,05	1.414.801,33	1.645.124,61	1.892.583,48	2.127.287,55	2.379.418,98	2.639.130,72	2.906.845,29	3.182.203,54	3.466.873,71	3.758.550,55
EBITDA	-	126.907,16	34.171,48	183.036,10	361.899,09	540.454,62	728.459,02	925.726,56	1.132.125,57	1.347.574,99	1.572.041,25	1.805.535,46	2.048.110,67	2.299.860,66	2.560.915,92	2.831.443,89	3.111.640,43
EBIT	-	503.030,04	342.351,40	183.486,78	14.623,80	163.931,73	351.930,14	549.203,68	755.602,69	971.052,10	1.195.518,36	1.429.012,57	1.671.587,08	1.923.337,77	2.184.393,03	2.454.921,01	2.735.123,54
EBT	-	503.030,04	342.351,40	183.486,78	14.623,80	163.931,73	351.930,14	549.203,68	755.602,69	971.052,10	1.195.518,36	1.429.012,57	1.671.587,08	1.923.337,77	2.184.393,03	2.454.921,01	2.735.123,54
Lucro Líquido	-	507.542,95	352.235,18	198.594,16	35.151,85	137.794,89	320.003,19	511.287,80	711.513,35	920.598,87	1.138.506,79	1.365.244,14	1.600.859,28	1.845.439,68	2.099.109,98	2.362.030,23	2.634.594,39
Cash flow																	
Fluxo de caixa operacional	-	131.020,07	24.294,70	177.525,72	341.371,04	514.317,77	696.526,07	887.809,89	1.088.036,23	1.297.121,75	1.515.029,68	1.741.767,03	1.977.352,16	2.221.962,56	2.475.632,86	2.738.553,12	3.010.917,27
Fluxo de caixa de investimentos	(5.647.843)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)	(56.478)
Cash flow - PROJETO																	
Fluxo Equity	(5.647.843)	(167.499)	(32.184)	121.450	284.893	457.839	640.048	831.331	1.031.558	1.240.643	1.458.551	1.685.289	1.920.904	2.165.484	2.419.154	2.682.075	2.954.439
Fluxo de caixa da Dívida	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Free cash flow	(5.647.843)	(167.499)	(32.184)	121.450	284.893	457.839	640.048	831.331	1.031.558	1.240.643	1.458.551	1.685.289	1.920.904	2.165.484	2.419.154	2.682.075	2.954.439

Fonte: Autor, 2023

O retorno do projeto é maior conforme aumenta-se a taxa de recebimento de resíduos, chegando ao valor máximo de 22,89% de TIR e 4 anos de Payback a partir do recebimento de 5.490 toneladas de resíduos por dia, quando é atingida a potência instalada máxima aceita pelo modelo de Geração Distribuída (5 MW) em todos os anos. O crescimento da TIR de acordo com a taxa de recebimento de resíduos pode observado no Gráfico 4 abaixo.

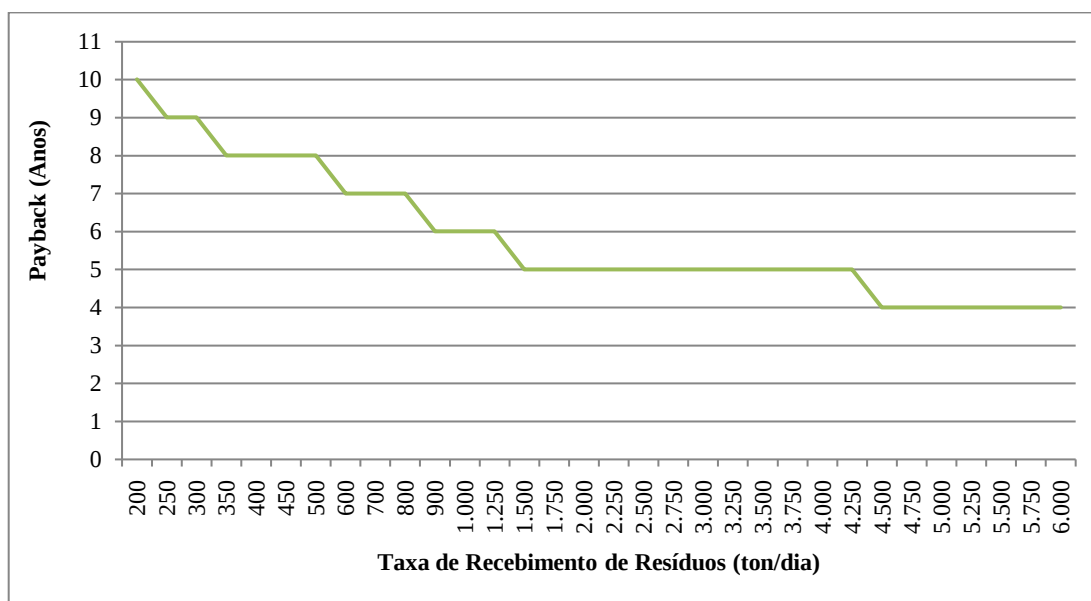
Gráfico 4 – Variação da Taxa Interna de Retorno (TIR) de um projeto de acordo com diferentes Taxas de Recebimento de Resíduos dos Aterros



Fonte: Autor, 2023

Em relação ao tempo de retorno do projeto, observa-se a diminuição do Payback com o aumento do recebimento de resíduos. Assim, quanto maior a quantidade de resíduos disponíveis, maior a geração de metano, de energia elétrica e, consequentemente, de receita, diminuindo o tempo de retorno do investimento, conforme ilustrado pelo Gráfico 5.

Gráfico 5 – Tempo de Retorno do Investimento (Payback) de um projeto de acordo com diferentes Taxas de Recebimento de Resíduos dos Aterros



Fonte: Autor, 2023

Considerando a média dos anos de 2012 a 2021 da taxa de recebimento de resíduos de sete aterros localizados na UGRHI 5 (Americana, Bragança Paulista, Indaiatuba, Piracicaba, Paulínia, Rio Claro, Rio das Pedras), equivalente a cerca de 559 toneladas por dia (CETESB, 2021), um aterro médio com essa taxa de recebimento poderia gerar até 11.300 MWh/ano. Considerando a média do consumo residencial anual de eletricidade per capital igual a 698 kWh/habitante (EPE, 2022), esse projeto poderia atender 16.189 habitantes. Supondo que os resíduos destinados para o aterro são exclusivamente residenciais e que cada habitante destina 0,95 kg/ dia para o aterro, conforme taxa de coleta calculada pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento de 2021 (SNIS, 2022), a população necessária para gerar cerca de 559 toneladas por dia seria de cerca de 588 mil habitantes. Deste modo, neste caso hipotético, aproximadamente 3% da população que destina resíduos para o aterro sanitário poderia ser abastecida com a energia elétrica gerada pelo projeto. Ademais, um projeto de geração de energia elétrica com biogás neste aterro teria uma TIR de aproximadamente 16,14% e Payback

de 7 anos. Deste modo, o projeto superaria o retorno mínimo desejado de 10,35%, podendo ser considerado viável de acordo com os parâmetros estabelecidos neste trabalho.

Analizando separadamente a viabilidade financeira de projetos em aterros sanitários localizados na UGRHI 5, dos sete aterros mapeados (Americana, Bragança Paulista, Indaiatuba, Piracicaba, Paulínia, Rio Claro, Rio das Pedras), três apresentaram taxa de recebimento de resíduos acima de 237 ton/dia e, consequentemente, retorno acima de 10,35%. A taxa média de recebimento de resíduos utilizada para a estimativa, calculada com base nos dados disponibilizados pela CETESB dos anos de 2012 até 2021, bem como o retorno estimado e Payback, encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 13 – Taxa média de recebimento de resíduos e retorno financeiro de projeto de comercialização de energia a partir do biogás em aterros localizados na UGRHI 5

Aterro	Taxa média de recebimento de resíduos (ton/dia)	Retorno Financeiro – TIR (%)	Payback (Anos)
Paulínia	2613,73	21,75%	5
Piracicaba	331,28	12,95%	8,01
Indaiatuba	249,96	10,79%	9,01
Americana	225,87	9,94%	10,01
Rio Claro	169,77	7,31%	11,01
Rio das Pedras	169,33	7,28%	11,01
Bragança Paulista	151,56	6,17%	11,01

Fonte: Autor, 2023

Projetos em aterros sanitários implementados para receber os resíduos sólidos de consórcios públicos de municípios também podem ser viáveis, sendo uma alternativa para cidades que não geram resíduos em quantidades suficientes para viabilizar a construção de um aterro próprio e/ou para viabilizar projetos de comercialização de energia elétrica a partir do biogás gerado em aterro próprio de pequena escala. Neste cenário, considerou-se a quantidade média de geração de resíduos nos municípios localizados em São Paulo que constituem os seguintes consórcios: Consórcio Intermunicipal de Manejo de Resíduos Sólidos – CONSIMARES, Consórcio Intermunicipal de Saneamento Ambiental – CONSAB e Consórcio Intermunicipal de Saneamento da Região do Circuito das Águas – CISBRA. Os municípios do Estado de São Paulo que compõem o CONSIMARES são Americana, Capivari, Elias Fausto, Hortolândia, Monte Mor, Nova Odessa, Santa Bárbara D'Oeste e Sumaré, enquanto o CONSAB é composto por Artur Nogueira, Conchal, Cordeirópolis, Cosmópolis, Engenheiro Coelho, Holambra e Jaguariúna e, por fim, fazem parte do CISBRA os municípios paulistas de Águas de Lindoia, Amparo, Itapira, Lindoia, Monte Alegre do Sul, Morungaba, Pedra Bela,

Pinhalzinho, Santo Antônio de Posse, Serra Negra e Socorro (Santos, 2016). A soma da taxa média de geração de resíduos dos municípios dos consórcios e os resultados de retorno financeiro do projeto e Payback encontram-se na Tabela 14.

Observa-se que, no caso do CONSIMARES, os consórcios de municípios, uma vez que podem viabilizar a construção de grandes aterros públicos para a destinação dos resíduos produzidos em todos os municípios que os constituem, configuram-se como um relevante mecanismo para propiciar o aproveitamento do potencial energético dos resíduos orgânicos. Assim, a baixa viabilidade do uso de biogás para geração de energia, estimada para aterros de pequeno porte, pode ser solucionada por meio da cooperação entre municípios para constituição de consórcios e implementação de aterros sanitários de maiores escalas. Ademais, o aproveitamento do biogás nesses aterros de grande escala constitui uma fonte de receita adicional para os municípios e agrega valor para a etapa final de destinação da grande maioria dos resíduos geradores.

Tabela 14 – Taxa média de geração de resíduos e retorno financeiro de projeto de comercialização de energia a partir do biogás em aterros implementados por consórcios

Consórcio	Municípios	Taxa média de geração de resíduos (ton/ano)	Taxa média total de geração de resíduos do Consórcio (ton/dia)	Retorno Financeiro – TIR (%)	Payback
CONSIMARES	Americana	201,79	922,083	18,53%	6,01
	Capivari	38,92			
	Elias Fausto	9,25			
	Hortolândia	190,73			
	Monte Mor	40,82			
	Nova Odessa	43,46			
	Santa Barbara d'Oeste	163,15			
	Sumaré	233,97			
CONSAB	Artur Nogueira	35,74	174,84	7,60%	11,01
	Conchal	19,73			
	Cordeirópolis	14,28			
	Cosmópolis	48,72			
	Engenheiro Coelho	9,55			
	Holambra	6,80			
	Jaguariúna	40,01			
CISBRA	Águas de Lindoia	12,24	174,65	7,59%	11,01
	Amparo	42,46			
	Itapira	46,80			
	Lindoia	5,14			
	Monte Alegre do Sul	3,00			
	Morungaba	7,55			
	Pedra Bela	1,01			
	Pinhalzinho	4,86			
	Santo Antônio de Posse	13,89			
	Serra Negra	16,93			
	Socorro	20,73			

Fonte: Autor, 2023

Ademais, este trabalho foi estimado o potencial teórico e financeiro de projetos considerando que o aterro estudado tem início de operação no ano de 2023, enquanto o projeto de comercialização de energia elétrica ocorre no ano seguinte (2024) e tem 15 anos de duração. Assim, para garantir maior exatidão nos resultados e obter estimativas mais precisas para embasamento da implementação de projetos nos demais aterros, faz-se necessário adequar as condições de contorno para a realidade operacional de cada aterro, além de verificar se a vida útil do aterro é suficiente para suportar um projeto com duração de 15 anos ou mais, assegurando o retorno financeiro estimado do projeto. Vale destacar que, a depender da capacidade do aterro, existe a possibilidade da continuidade da geração de biogás e energia após o período do projeto. Ainda, conforme mencionado no item 3.5.1 deste trabalho, após encerramento da vida útil do aterro, caso tenham sido escolhidos equipamentos de geração de energia modulares, existe a possibilidade de transferir progressivamente a estrutura para outros projetos, também atentando-se a vida útil do próprio equipamento, de modo a acomodar com maior flexibilidade o decaimento da taxa de geração de metano.

Já considerando a comercialização de energia no Mercado Livre e mantendo-se a potência instalada máxima de 5 MW, visando compará-lo com o modelo de Geração Distribuída, o projeto não apresentará viabilidade em nenhum cenário de recebimento de resíduos. A TIR máxima que pode ser obtida pelo projeto é de 8,46%, atingida a partir da taxa de recebimento de 5.490 toneladas de resíduos por dia. A partir dessa taxa de recebimento, não há aumento da TIR, pois é atingida a potência instalada máxima do projeto (5 MW) desde o primeiro ano, não havendo como aumentar a venda da energia e, conseqüentemente, a receita. Vale destacar que, considerando a massa média de resíduo sólido urbano (RSU) coletada por habitante em relação à população total igual à 0,95 kg/habitante.dia (SNIS, 2022), o aterro precisaria atender mais de 5,7 milhões de pessoas para atingir este limite, ainda sem considerar o percentual de resíduos destinado para tratamento. Neste modelo, o aterro de Paulínia, um dos maiores do Estado de São Paulo, que recebeu resíduos de 21 municípios em 2021 e possui taxa média de recebimento de resíduos igual a 2.614 toneladas por dia (CETESB, 2022), teria TIR de 8,17% e PayBack de 9 anos.

Entretanto, excluindo a limitação da potência instalada em 5 MW, projetos de comercialização da energia a partir do biogás apresentam viabilidade (TIR superior a 10,35%) no Mercado Livre em aterros com taxa de recebimento de resíduos igual ou superior a 1.025 toneladas por dia. Assim, estima-se que, para viabilização do projeto no Mercado Livre, o aterro

precisaria atender, aproximadamente, 1.079.000 habitantes, considerando a taxa de destinação igual a 0,95 kg de resíduos por dia por habitante. Considerando os aterros localizadas na UGRHI 5, apenas um projeto no aterro de Paulínia apresentaria viabilidade, com taxa de retorno igual a 23,02% e 6 anos de Payback, considerando o recebimento de 2.614 toneladas de resíduos por dia.

Assim, o modelo de comercialização da energia elétrica advinda do biogás no Mercado Livre é viável para grandes aterros. Entretanto, cabe salientar que, em cenário econômico onde há baixas tarifas da energia elétrica e altas tarifas de combustíveis, como o gás natural, espera-se que a rota de produção de biometano em grandes aterros seja mais vantajosa do que o uso do biogás para produção de energia elétrica. Essa análise pode justificar o panorama de mercado apresentado no capítulo 3.3.1 deste trabalho, que mostra que, apesar da produção de biometano ocorre em apenas 10 plantas, esses projetos ocorrem em grandes plantas que produziram 23% do volume total de biogás aproveitado em 2021 (CIBiogás, 2022).

Por fim, é importante destacar que os resultados financeiros calculados neste trabalho consideram as premissas estimadas de geração de metano em peso de resíduo (L_0) e taxa de geração de metano por ano (k) de acordo com os dados reais do Aterro de Paulínia, podendo não refletir com exatidão as condições dos demais aterros mencionados neste trabalho e demais aterros em operação no país. Os parâmetros de k e L_0 pode apresentar grande variação a depender dos aspectos construtivos do aterro e dos procedimentos de operação e manutenção, bem como das condições climáticas e características dos resíduos de cada região. Além disso, para análise da viabilidade financeira no modelo de Geração Distribuída, foram fixadas as tarifas de energia elétrica para consumidores B3 Convencional na distribuidora CPFL Paulista. Deste modo, o retorno econômico de projetos de comercialização de energia elétrica a partir do biogás pode ser maior em regiões em que as tarifas de energia de outras distribuidoras sejam superiores às observadas em São Paulo. Do mesmo modo, os preços fixados para a comercialização no Mercado Livre utilizam uma média histórica de leilões e não consideram, por exemplo, que projetos de biogás podem vir a ter preços superiores ao das demais fontes pelos seus atributos de sustentabilidade associados. Deste modo, é de suma importância que as premissas adotadas em estudos para implementação de projetos de geração de energia elétrica em aterro sanitários considerem, com a maior acurácia possível, a realidade de cada aterro e as condições de cada mercado, garantindo resultados confiáveis e seguros de viabilidade do projeto.

6. CONCLUSÃO

Os estudos desenvolvidos neste trabalho, através do uso do modelo LandGEM e com base em dados reais do aterro sanitário de Paulínia, indicaram para valores de geração de metano em peso de resíduo (L_0) igual a 42,355 m³ CH₄/tonelada e de taxa de geração de metano por ano (k) igual a 0,083/ano. O parâmetro k obtido encontra-se dentro dos valores de referência recomendados, enquanto o L_0 encontra-se abaixo dos valores de referência, possivelmente indicando ineficiência no sistema de captação e medição dos gases e elevadas taxas de emissão fugitiva pela superfície do aterro utilizado neste estudo.

Em relação à análise de viabilidade, pode-se concluir que se espera que projetos de geração de energia elétrica a partir do metano contido no biogás para comercialização no modelo de Geração Distribuída sejam economicamente viáveis em aterros com taxa de recebimento de resíduos a partir de 237 toneladas por dia.

Já no Mercado Livre, considerando a média de preços das energias renováveis, a viabilidade não foi obtida quando limitou-se a potência instalada em 5 MW. Por outro lado, utilizando toda a energia potencialmente produzida pelo metano contido no biogás gerado no aterro, sem limitação da potência instalada, há viabilidade em aterros com taxa de recebimento de resíduos a partir de 1.025 toneladas por dia.

Entretanto, o aumento da procura por fontes de energia mais sustentáveis, alinhadas ao fortalecimento das metas de sustentabilidade e redução de emissão das companhias, bem como a criação de políticas públicas e linhas de financiamento para incentivo desse tipo de projeto, que podem ser implementadas em decorrência das metas estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos e das pressões para cumprimento das metas internacionais de redução de emissão, assim como possível criação de fontes alternativas de receita, como créditos de carbono, além de esperados avanços tecnológicos para otimização e redução dos custos de implementação e operação de projetos, podem culminar no aumento da viabilidade financeira dos projetos.

Por fim, notou-se grande variação dos valores dos parâmetros k e L_0 entre os estudos desenvolvidos em aterros, fato que enfatiza a necessidade de estudos específicos que consideram as particularidades de cada aterro e de cada região, de modo a garantir estudos de viabilidade mais confiáveis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/>. Acesso em 22/04/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Componentes da tarifa residencial. Evolução TUSD/TE. Luz na Tarifa. Brasília, 2023. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/luz-na-tarifa>. Acesso em 01/04/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro 2022. Ministério de Minas e Energia. Diário Oficial da União: Edição 186, Seção 1, Página 47. 2022.

ANTONIO, S. M. Análise da variação da vazão e da concentração do metano presentes nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro – SP. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Rio Claro, São Paulo, 2012.

ARCADIS, T. Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de Energia Renovável. Produto 6 - Resumo Executivo. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em 04/09/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, p. 4. 1992.

AUDIBERT, J. L.; FERNANDES, F. Avaliação qualitativa e quantitativa da emissão de biogás em aterro controlado de porte médio. Revista DAE, v. 190, p. 56-73, 2012.

AUGENSTEIN, D.; PACEY, J. Modelling landfill methane generation. The Third International Landfill Symposium, Sardinia, Itália, vol. 1, pp.115-148. 1991.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Relatório de Mercado. Expectativa de Mercado 24 de março de 2023. Boletim Focus. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>. Acesso em 31/03/2023.

BARCELOS, B. R. Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

BENGTSSON, S. et al. Acidogenic fermentation of industrial wastewaters: Effects of chemostat retention time and pH on volatile fatty acids production. *Biochemical Engineering Journal*, 40:492, 2008.

BORBA, S. M. P. Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 134 p. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: Seção 1, Página 10125. Brasília, DF, 1995.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. *Diário Oficial da União*: Edição 135, Seção 1, Página 1. Brasília, DF, 2020.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). *Diário Oficial da União*: Edição 5, Seção 1, Página 4. Brasília, DF, 2022.

BRASIL, ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de novembro de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, 2012.

BRASIL, ANEEL. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, 2015.

BRASIL, ANEEL. Resolução Normativa nº 3.058, de 12 de julho de 2022. Homologa o resultado da Revisão Tarifária Extraordinária, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD referentes à Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL Paulista, e dá outras providências. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/resultado-dos-processos-tarifarios-de-distribuicao>. Acesso em: 20/03/2023.

BRASIL, ANEEL. Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 19/03/2023

BRITTO, M. L. C. P. S. Taxa de Emissão de Biogás e Parâmetros de Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Metropolitano Centro. Tese de Mestrado, Salvador, Bahia, 2006.

CALIFORNIA PUBLIC UTILITIES COMMISSION – CPUC. Renewables Portfolio Standard (RPS) Program. California, 2021. Disponível em: <https://www.cpuc.ca.gov/rps/>. Acesso em: 20/05/2023.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. Nossa CCEE. Sobre nós. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/sobrenos>. Acesso em 10/04/2023.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. Relatório de Resultados Consolidados dos Leilões. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/acervo-ccee?especie=38753&assunto=39056&keyword=consolidado&periodo=1825>. Acesso em: 20/03/2023.

CARDOSO, L. M.; DE SOUZA, P. L.; SILVA, T. N. Panorama operacional e os desafios da primeira usina termoeletrica movida a biogás de aterro sanitário do estado do Rio Grande do Sul. 2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade – Foz do Iguaçu, Paraná, 2019.

CASTRO, M. C. A. A. Avaliação do comportamento da temperatura dos resíduos, da composição e da vazão do biogás em aterro sanitário de médio porte. Tese (Livre docência) – Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho – IGCE. 2016.

CASTRO, M.C.A.A; BELLO, P.P.G. Evaluation of percentage of methane gas generated in the landfill of the Rio Claro city, Brazil: study of energetic potential”. In: Third International Symposium on Energy From Biomass and Waste, Venice 2101-Third International Symposium on Energy From Biomass and Waste. Padova: Eurowaste-IWWg, 2010. v.1. p.212-216.

CASTRO, M. C. A. A.; MARQUES, N. P.; ANTONIO, S. M.; JÚNIOR, N. C.; MOREIRA, C. A. Estudo comparativo da geração de gás metano estimado por modelagem matemática com dados reais medidos em campo no aterro sanitário de Rio Claro – SP. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio Claro, 2012.

CASTRO, M. C. A. A.; OLIVEIRA, S. C.; BELLO, P. P. G. Estimativa da produção de biogás no aterro sanitário de Rio Claro – SP. 9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications. 2010.

CASTRO, R. Energias renováveis e produção descentralizada. Área Científica de Energia. Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC) do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2006.

CAVALLARI, F. Relação entre produção de biogás em aterro sanitário e variações no potencial elétrico natural. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Rio Claro, São Paulo, 2013.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENERGI-BIOG. Relatório Técnico Final. São Paulo, 2005.

ÇENGEL Y.A., BOLES M. A. Termodinâmica. 5ª ed., MC Graw Hill, 2006.

CETESB/SMA – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO/SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. Biogás: pesquisa e projetos no Brasil. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo/Secretaria de Meio Ambiente, 186 p., 2006.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Biogás - Aterro: Programa para Cálculo de Geração de Biogás e Opções de Uso Energético. Versão 1.0. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/software/>>. Acesso em 22/02/2023.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 29/11/2022.

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis. Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro. [201?]. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/biogas-nobrasil-historia-e-perspectiva-de-futuro>. Acesso em: 20/05/2023.

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis. Panorama do Biogás no Brasil 2021. CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2022 – Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2022.

CLIMATE-DATA. Dados climáticos para cidades mundiais. AM Online Projects - Alexander Merkel. Degerforsenstr, 2023. Disponível em: <https://pt.climate-data.org>. Acesso em 12/01/2023.

COPEL. História do Mercado Livre de Energia no Brasil. Mercado Livre. Governo do Estado do Paraná. 2020. Disponível em: <https://copelmercadolivre.com/historia-do-mercado-livre-de-energia-no-brasil/>. Acesso em: 10/04/2023.

COSTA, A. A. S; ASTORGA, O. A. M.; SILVEIRA, J. L. Análise técnico-econômica da utilização de um gerador a gás natural em um sistema de cogeração: Estudo de caso. (Artigo).

V Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia (CLAGTEE). São Pedro, 2003.

CROVADOR, M.I.C. Potencial de geração de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia). Universidade Estadual do Centro-Oeste. Guarapuava, 2014.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. Lixo municipal: Manual de gerenciamento integrado. IPT/CEMPRE, 2º ed., p. 370. São Paulo, 2000.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 (ano base 2021). Brasília: MME/EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 03/04/2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal De Expansão De Energia 2031. Brasília: MME/EPE, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>>. Acesso em: 20/08/2022.

ENSINAS, A. V. Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas SP. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 129 p. Campinas, 2003.

FERNANDES, J. G. (2009). Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

FIGUEIREDO, N. J. V. Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Energia – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FILHO, L. F. B. Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FERGUSON, C.R.; KIRKPATRICK, A.T. (2001). Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. New York: John Wiley & Sons. (página 102)

GHOSH, S. Kinetics of acid-phase fermentation anaerobic digestion. Biotechnology Bioeng., 2:301, 1981.

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

GOLDENERGY. Glossário de termos energéticos. Axpo Group. Portugal, 2023. Disponível em: <https://goldenergy.pt/glossario/>. Acesso em: 15/04/2023.

GOLDSTEIN, R. 2006 Update: The State of U. S. Landfill Gas Utilization Projects. Revista Cogeração e Geração Distribuída , v. 22, n. 1, pág. 23-33, 2007.

GOLLAPALLI, M.; KOTA, S. H. Methane emissions from a landfill in north-east India: Performance of various landfill gas emission models. Environmental Pollution, 234, 174-180, 2018.

GOTARDO, O. Análise da influência da precipitação e do tempo de disposição de resíduos domiciliares na vazão de biogás em um aterro sanitário. In: Simpósio sobre resíduos sólidos, 3, 2013, São Carlos – SP. Anais. São Carlos, 2013.

GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. S.; MILANEZ, A. Y. Biogás: Evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. BNDES, v. 27, n. 53, p. 177-216. Rio de Janeiro, 2021.

HAINKE, T. Conversor de Unidades, 2005. Disponível em: <https://www.converter-unidades.info/Converter+Quilocaloria+de+Megawatt-hora.php>. Acesso em: 19/03/2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Total CO₂ emissions, World 1990-2019. IEA Data Services, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 20/08/2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). CO₂ emissions by sector, World 1990-2019. Greenhouse Gas Emissions from Energy, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 20/08/2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). CO₂ emissions by energy source, World 1990-2019. Greenhouse Gas Emissions from Energy, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 20/08/2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Electricity generation by source, World 1990-2019. Electricity Information, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 20/08/2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Electricity consumption, World 1990-2019. IEA Data Services, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 20/08/2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook. v. 2. 1996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. v.3. 1996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Solid Waste Disposal – Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Report produced by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) on the invitation of the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5 – Waste, 2019.

Disponível em <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol5.html>> . Acesso em 20/08/2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. Renewable capacity statistics 2021. Abu Dhabi, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>. Acesso em 20/05/2023.

LOBO, A. G. de C. Desenvolvimento de MODUELO 2: ferramenta para a avaliação da contaminação produzida em aterros de resíduos sólidos urbanos. Tese (Doutorado) – Departamento de Ciências e Técnicas do Ar e do Meio Ambiente, Universidade de Cantabria, Santander, c.2-26, 2003.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. Biocombustíveis. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012.

MACHADO, S.L.; CARVALHO, M.F.; GOURC, J.P.; VILAR, O.M.; NASCIMENTO, J.C. Geração de metano em aterros tropicais: métodos simplificados e resultados de campo. Waste Management 29, 153–161. 2009.

MACIEL, F. J.; JUCA, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. Waste Management, v. 31, n. 5, p. 966-977. 2011.

MARIANI, L. Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. [Tese de Doutorado] Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica Orientadora, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2018.

MASSEY, M.L.; POHLAND, F.G. Phase separation of anaerobic stabilization by kinetic controls. J. Water pollut. Control. Fed. 50:2204, 1978.

MATELLI, J. A. “Sistemas baseados em conhecimento para projeto de plantas de cogeração a gás natural”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2008.

McBEAN, E.A.; ROVERS, F.A.; FARQUHAR, G.J. Solid Waste Landfill Engineering and Design. Prentice Hall: 2005. p. 521.

MCMAHON, T. Engineering Costs: How Much Will It Cost to Hire an Engineer? Forbes, 2019.

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Projeto: 0165 Projeto de Emissão de Gás de Aterro Paulínia ESTRE (EPLGP), 2023. Disponível em: <<http://cdm.UNFCCC.int/Projects/DB/DNV-CUK1134989999.25/view>>. Acesso em: 15/01/2023.

MENDES, L. G. G. (2005). Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá. Dissertação (Mestrado). Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Portaria MMA Nº 71 de março de 2022. Institui o Programa Nacional de Redução de Emissões de Metano - Metano Zero. Diário Oficial da União, Edição: 55, Seção:1, Página: 64. 2022.

Ministério de Minas e Energia – MME. Portaria MME Nº 465, de 12 de dezembro de 2019. Diário Oficial da União, Edição 242, Seção 1, pg. 156. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-465-de-12-de-dezembro-de-2019.-233554889>. Acesso em: 10/04/2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Portaria Nº 627/GM, de março de 2022. Diário Oficial da União, Edição: 55, Seção: 1, Página: 64. 2022.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. Princípios da Termodinâmica para Engenharia. 4ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

MOREIRA, C. A.; HELENE, L. P. I; CAVALLARI, F.; CARRAZZA, L. P.; DOURADO, J. C. Analysis of rainfall influence in biogás production and variation in the self-potential in a Rio Claro sanitary landfill. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 36, n. 3, p. 589 – 597 (2017).

MOURA, J. P. de. Estudo de casos das rotas tecnológicas para produção de biogás e da influência da composição química de dejetos de matrizes suínas na qualidade do biogás gerada por biodigestor. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

NECKER, H. S.; ROSA, A. L. D. (2013). Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná-RO. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 17(17), 3416-3424.

ÔMEGA ENERGIA. Tudo sobre o Mercado Livre de Energia de um jeito simples. News. 2023. Disponível em: <https://www.omegaenergia.com.br/news/tudo-sobre-o-mercado-livre-de-energia-de-um-jeito-simples>. Acesso em 10/04/2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICA – ONS. Sobre o SIN: O que é o SIN. NOS, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em 09/04/2023.

OONK, J. & BOON, A. Landfill gas formation, recovery and emissions. – Institute of environmental and energy technology (TNO). Netherlands: Apeldoorn, 148 p., 1995.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. The General Assembly, 4th plenary meeting, 2015. Disponível em <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>. Acesso em 30/07/2022.

PECORA, V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: Estudo de caso em São Paulo. São Paulo, 2009.

PELCZAR JR, M.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N. R. Microbiologia: conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996. Vol. II. 517 p.

POHLAND, F. G.; HARPER, S. R.; CHANG, K.; DERTIEN, J. T.; CHIAN, E. S. K. Leachate generation and control at landfill disposal sites. v. 20, n. 3, p.12-13. (1985)

PROBIOGÁS. Guia técnico sobre geração distribuída de energia elétrica por biogás em ETEs. Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto. 1ª Edição. Ministério das Cidades. Brasília, 2017.

PROIN/CAPES e UNESP/IGCE. Material Didático: arquivos de transparências (CDROM). Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, 1999.

REGIONAL GREENHOUSE GAS INICIATIVE – RGGI. Elements of RGGI. The Regional Greenhouse Gas Initiative – An initiative of Eastern States of the US. 2023. Disponível em: <https://www.rggi.org/program-overview-and-design/elements>. Acesso em: 20/05/2023.

ROSSINI, M. H. Análise da potencialidade de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário na cidade de Itapeva/SP. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia de Produção. Universidade Estadual Paulista – Unesp, Faculdade de Ciência Farmacêuticas. Araraquara, 2018.

SALOMON, K. R. Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2007.

SANTOS, A. H. L. Consórcios Intermunicipais de Resíduos Sólidos: expectativa e realidade nos aspectos de fortalecimento institucional. Dissertação (Mestrado). Centro Universitário de Araraquara. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente. Araraquara, 2016.

SILVA, F. M. Sistema de alimentação de motores com duplo combustível (metano e diesel). (Tese de Doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 1995.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. Série Histórica. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA). Brasília, DF, 2023. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>. Acesso em 26/04/2023.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2020. Brasília, 2021. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnosticos>>. Acesso em 20/08/2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2021. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/diagnosticos_snis>. Acesso em 27/03/2023.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Análise das emissões brasileiras de gases do efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020. 2021. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/documentos-analiticos>>. Acesso em 20/08/2021.

SOUZA, A. D. Estudo de caso de Geração Distribuída com Biogás no Aterro Municipal de Cascavel–PR. 2020. (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2020.

SPOKAS, K. et al. Methane mass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems? Waste Management, v. 26, n. 5, p. 516-525, 2006.

TCHOBANOGLIOUS, G.T.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. Integrated solid waste management: Engineering Principles and Management Issues. New York: McGraw-Hill, 1993.

TCHOBANOGLIOUS, G.T.; THEINSEN, H.; VIGIL, S. A. Composicion y Características, Generacion, Movimiento y Control de los Gases de Vertedero. Gestion Integral de Resíduos Sólidos, v. 1, Mc Graw Hill., 1994.

TCHOBANOGLIOUS, G.T.; THEINSEN, H.; VIGIL, S. A. Integrated Solid Waste Management. Ed Mc Graw-Hill International, Nova York, 978 p., 2003.

TESOURO NACIONAL. Tesouro Direto: Preços e Taxas dos Títulos IPCA, Pré e Pós-fixados. Esplanada dos Ministérios. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.tesourodireto.com.br/titulos/precos-e-taxas.htm>. Acesso em 31/03/2023.

THE WORLD BANK. Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean. Janeiro de 2004.

THOMPSON, S.; SAWYER, J.; BONAM, R.; VALDIVIA, J.E. Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. Waste Management, 29, 2085-2091. 2009.

THOMSON, W. (1851) On the dynamical theory of heat, with numerical results deduced from Mr. Joule's equivalent of a thermal unit, and M. Regnault's observations on steam. 1851. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, p. 261-298.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Air Emission from Municipal Solid Waste Landfills – Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Emission Standards Division. 1991.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Section 4, Method 2E: Determination of Landfill Gas; Gas Production Flow Rate. 1996, 40 CFR 60 Appendix A 61: 9929. 1996.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Feasibility assessment for gas-to-energy at selected landfills in São Paulo, Brazil. Public Review Draft. EPA 68-W6-004. 1997.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Washington. 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development Washington, DC. 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Renewable Portfolio Standards. Energy and Environment Guide to Action – Chapter 5. Energy Resources for State and Local Governments. [202?]. Disponível em: <https://www.epa.gov/statelocalenergy/energy-and-environment-guide-action-chapter-5-renewable-portfolio-standards>. Acesso em: 20/05/2023.

WILLUMSEN, H. C. Energy recovery from landfill gas in Denmark and Worldwide. LG Consultant, 2001

WORLD BANK. Handbook for the preparation of Landfill gas to Energy Projects to American Latin and Caribbean. The world Bank, 2004.

YANG, S. T.; GUO, M. Kinetics of methanogenesis from whey permeate in packed bed immobilized cells bioreactor. Biotechnology Bioengineering, 36:427, 1990.

ZANETTE, A. L. Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009.