

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS
E DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS DOS ESTADOS DE SÃO PAULO E MINAS GERAIS**

NATALIA DE SOUZA RIBEIRO

ITAJUBÁ, 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Estudo do potencial energético de biogás de aterros sanitários e da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos dos Estados de São Paulo e Minas Gerais

Natalia de Souza Ribeiro

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente.

Orientadora: Prof^ª. Dra Regina Mambeli Barros

Co-Orientador: Prof^º. Dr. Ivan Felipe Silva dos Santos

Julho, 2020

Itajubá

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, por ter me dado força e saúde e paciência para superar todas as dificuldades.

À minha família, em especial meus pais, Sonia e Maurício e a minha irmã Rafaela, pelo seu amor, carinho, incentivo e pelo seu apoio incondicional desde o início desta jornada.

Ao meu namorado, Johann, pela ajuda, compreensão, parceria e carinho.

A esta Universidade e aos professores do Mestrado em Engenharia de Energia, em especial a minha orientadora Prof^a. Dr. Regina Mambelli Barros, pelo apoio, paciência, confiança, oportunidade de aprendizado, coordenação e orientação neste trabalho.

Ao meu co-orientador Dr. Ivan Felipe Silva dos Santos e a Prof^a. Dr. Maria Luiza Grillo Renó, pela ajuda e suporte e ao Samuel Plácido Galdino da Silva, graduando em Engenharia Civil por ter colaborado com a programação utilizada neste trabalho.

Aos meus amigos e colegas presentes durante esta caminhada, que me ajudaram e me alegraram neste período de estudos, em especial Lilian, Jorge e Nágila.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

O gerenciamento de resíduos sólidos é um dos grandes desafios enfrentados pela sociedade moderna. A digestão anaeróbia tem ganhado destaque no tratamento dos resíduos sólidos urbanos, pois o biogás produzido durante o processo pode ser utilizado para a produção de energia elétrica, além de contribuir na redução dos impactos ambientais relativos à emissão de gases de efeito estufa. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial do aproveitamento energético do biogás de resíduos sólidos urbanos dos estados de São Paulo e Minas Gerais em dois sistemas, considerando como tecnologias aterros sanitários e digestores anaeróbios, e por fim uma análise da viabilidade econômica destes empreendimentos por auxílio de um algoritmo desenvolvido em Scilab® por Silva et al. (2019) com base em literatura e metodologia existente. Desta forma, foram levantados os aterros sanitários em operação no estado de São Paulo e os consórcios de aterros existentes em Minas Gerais. Em seguida realizou-se projeções referentes ao crescimento da população, geração de resíduos durante 20 anos (2020 a 2040) para se definir o potencial para a produção de energia elétrica nestes empreendimentos e por último fez-se uma análise da viabilidade econômica destes projetos considerando a venda da energia excedente em Leilão de Energia e também fez-se uma análise considerando o sistema de compensação na Geração Distribuída. Os resultados energéticos foram positivos, visto que para São Paulo a potência ótima estimada foi de 139 MW e para Minas Gerais foi de 11,7MW, para o uso do biogás de aterros sanitários. Quanto ao uso de biodigestores anaeróbios, a potência estimada para São Paulo foi 130 MW na situação A e 160 MW na situação B, quanto a Minas Gerais, a potência estimada foi de 15 MW na situação A e 17 MW na situação B. Os resultados econômicos mostraram-se favoráveis para uma parcela considerável dos empreendimentos, em especial ao sistema aterro sanitário. O cenário considerando o sistema de compensação de energia foi o que apresentou os melhores resultados, o que demonstra a importância do mercado de geração distribuída para empreendimentos de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos.

Palavras Chaves: aproveitamento energético, digestão anaeróbia, biogás, resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

The management of municipal solid waste is one of the biggest challenges faced by modern society. Anaerobic digestion has gained prominence in the treatment of municipal solid waste, as the biogas produced during the process can be used for the production of electric energy, also, contributes to the reduction of environmental impacts related to emission of greenhouse gases. In this context, the present work aims to evaluate the potential to generate energy from biogas of municipal solid waste in the states of São Paulo and Minas Gerais in two systems, landfill technologies and anaerobic digesters, and finally an analysis of the economic viability of these enterprises using an algorithm developed in Scilab® by Silva et al. (2019) based on existing literature and methodology. Thus, landfills in operation in the state of São Paulo and municipal solid waste consortia in Minas Gerais were surveyed. Then projections were made regarding population growth, generation of waste for 20 years (2020 to 2040) to define the potential for the production of electricity in these projects and finally an analysis of the economic viability of these projects was made considering the sale of surplus energy in an Energy Auction and an analysis was also made considering the compensation system in Distributed Generation. The energy results were positive, since for São Paulo the estimated optimal power was 139 MW and for Minas Gerais it was 11,7 MW, for the use of landfill biogas. As for the use of anaerobic digesters, the estimated power for São Paulo was 130 MW in situation A and 160 MW in situation B, for Minas Gerais, the estimated power was 15 MW in situation A and 17 MW in situation B. The economic results were attractive for a substantial number of projects, especially the landfill system. The scenario considering the energy compensation system was the one that presented the best results, which demonstrates the importance of the distributed generation market for energy generation projects from municipal solid waste.

Keywords: energy potencial, anaerobic digestion, biogas, municipal solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Disposição Final de RSU no Brasil por tipo de Destinação	23
Figura 2: Participação das regiões do país no total de RSU coletado.....	24
Figura 3: Fluxograma das Etapas da Digestão Anaeróbia.....	28
Figura 4: Esquema representativo de uma usina de aproveitamento energético do biogás em um aterro sanitário	35
Figura 5: Digestão anaeróbia e suas aplicações	38
Figura 6: Esquema de uma planta de digestão anaeróbia e suas possíveis aplicações	40
Figura 7: Plantas de digestores anaeróbios construídos na América do Norte.	41
Figura 8: Digestor anaeróbio para a metanização de resíduos orgânicos na UFMG.....	41
Figura 9: Exemplo de potência ótima e energia máxima.....	56
Figura 10: Cenários estudados	60
Figura 11: Relação entre Investimento e Potência.....	61
Figura 12: Potência disponível considerando a potência do ano inicial (situação A) e a potência do décimo quinto ano (situação B).....	63
Figura 13: Crescimento populacional esperado pela população atendida pelos aterros estudados.....	67
Figura 14: Projeção populacional do aterro 7	68
Figura 15: Geração anual de RSU estimado para as cidades estudadas no estado de São Paulo	69
Figura 16: Geração anual de RSUs anual no aterro 7 no estado de São Paulo.....	69
Figura 17: Relação entre população e geração de resíduos para o estado de São Paulo	70
Figura 18: Crescimento Populacional esperado para a população atendida em Minas Gerais	71
Figura 19: Crescimento Populacional previsto para o consórcio 13.....	72
Figura 20: Geração de resíduos estimada a ser recebido pelos consórcios mineiros.....	73
Figura 21: Geração de resíduos estimado para o consórcio 13.....	73
Figura 22: Relação entre população e geração de resíduos para o estado de Minas Gerais	74
Figura 23: Vazão de metano de estimada a ser gerado pelos aterros paulistas.....	75
Figura 24: Vazão de metano estimada para o aterro 7	76
Figura 25: Potência total estimada pelo aproveitamento do biogás dos aterros estado de São Paulo (MW).....	77
Figura 26: Potência estimada para o aterro 7	77
Figura 27: Relação entre população e potência ótima para o estado de São Paulo	78
Figura 28: Vazão de metano dos consórcios de aterro do estado de Minas Gerais	81
Figura 29: Vazão de metano esperada pelo consórcio 13	81
Figura 30: Potência estimada dos consórcios de RSU de Minas Gerais.....	82
Figura 31: Potência a ser gerada pelo Consórcio	83
Figura 32: Relação entre população e potência ótima em Minas Gerais	84
Figura 33: Relação entre LCOE e potência ótima para o estado de São Paulo	88
Figura 34: Relação entre LCOE e potência ótima para o estado de Minas Gerais	90

Figura 35: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de São Paulo	92
Figura 36: Vazão de metano estimada através do uso de biodigestor no aterro 7	92
Figura 37: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de São Paulo	93
Figura 38: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de São Paulo	93
Figura 39: Relação entre população e potência no uso de biodigestores para o estado de São Paulo.....	94
Figura 40: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais.....	96
Figura 41: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais.....	96
Figura 42: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais.....	97
Figura 43: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais.....	97
Figura 44: Relação entre população e potência no uso de biodigestores para o estado de Minas Gerais	98
Figura 45: Relação entre potência e LCOE no uso de biodigestores para o estado de São Paulo	101
Figura 46: Relação entre LCOE e potência para o estado de Minas Gerais	105
Figura 47: Análise de sensibilidade relacionando o investimento inicial ao VPL em São Paulo	107
Figura 48: Análise de sensibilidade relacionando o investimento inicial ao VPL em Minas Gerais	107
Figura 49: Análise de sensibilidade relacionando a tarifa ao VPL em São Paulo	108
Figura 50: Análise de sensibilidade relacionando a tarifa ao VPL em Minas Gerais.....	108
Figura 51: Análise de sensibilidade relacionando os CO&M ao VPL em São Paulo	109
Figura 52: Análise de sensibilidade relacionando os CO&M ao VPL em Minas Gerais	109
Figura 53: Análise de sensibilidade relacionando os Custos relativos a troca do motor ao VPL em São Paulo.....	110
Figura 54: Análise de sensibilidade relacionando os Custos relativos a troca do motor ao VPL em Minas Gerais	110
Figura 55: Emissões de GHG evitadas com o uso destes sistemas.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estimativa da composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil	25
Tabela 2: Vantagens e desvantagens da Digestão Anaeróbia	43
Tabela 3: Vantagens e desvantagens do Aterro Sanitário	44
Tabela 4: Valores sugeridos de k conforme as precipitações anuais correspondentes do local	52
Tabela 5: Valores sugeridos de L ₀ por conteúdo de resíduos orgânicos.....	52
Tabela 6: Parâmetros econômicos e energéticos referentes ao segregador	62
Tabela 7: Parâmetros econômicos e energéticos referentes ao Triturador.....	62
Tabela 8: Dados de entrada	65
Tabela 9: Dados de saída após a solução do algoritmo em Scilab.....	65
Tabela 10: Energia calculada para a geração de energia no uso do biogás de aterro sanitário no estado de São Paulo.....	80
Tabela 11: Energia calculada para a geração de energia no uso do biogás de aterro sanitário no estado de Minas Gerais	85
Tabela 12: Resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás no aterro 7.....	87
Tabela 13: Resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás de aterro no consórcio 13.....	89
Tabela 14: Energia calculada para a geração de energia elétrica a partir do biogás de digestores anaeróbios no estado de São Paulo	95
Tabela 15: Energia calculada para a geração de energia elétrica a partir do biogás de digestores anaeróbios no aterro 7.....	95
Tabela 16: Energia calculada para a geração de energia elétrica a partir do biogás de digestores anaeróbios no estado de Minas Gerais	99
Tabela 17: Energia calculada para a geração de energia elétrica a partir do biogás de digestores anaeróbios no consórcio 13.....	99
Tabela 18: Resultados referentes ao aterro 7 para o Cenário 2.....	102
Tabela 19: Resultados referentes ao consórcio 13 para o Cenário 1	103
Tabela 20: Resultados referentes ao consórcio 13 para o Cenário 2	104
Tabela 21: Análise de sensibilidade (média entre os estados).....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACR Ambiente de Contratação Regulada

AGV Ácidos Graxos Voláteis

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BRS Bactérias redutoras de sulfato

CETESB Companhia de Abastecimento de São Paulo

CH₄ Gás metano

CO₂ Dióxido de Carbono

COP21 21ª Conferência das Partes

DA Digestão Anaeróbia

EPA *Environmental Protection Agency*

FORSU Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos

GD Geração Distribuída

GWh Gigawatt hora

H₂ Gás Hidrogênio

H₂O Água

H₂S Gás sulfídrico

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMS Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IPCC Agência Intergovernamental de Painel sobre Mudanças Climáticas

kW Kilowatt

LANDGEM *Landfill Air Emissions Model*

LCOE *Levelized Cost of Electricity*

MCI Motores de Combustão Interna

MDL Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MJ Mega Joule

MTG: Microturbinas a gás

MW Megawatt

MWh Megawatt hora

NBR Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

NH₃ Amônia

NMOCs Compostos Orgânicos Não-Metânicos

O&M Operação e Manutenção

pH Potencial Hidrogeniônico

PIB Produto Interno Bruto

PME Programa de Mobilização Energética

PNMC Política Nacional sobre Mudança do Clima

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSS Resíduos do Serviço de Saúde

RSU Resíduos Sólidos Urbanos

SISNAMA Sistema Nacional do Meio Ambiente

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SNVS Agência Nacional de Vigilância Sanitária

SO₄²⁻ Sulfato

TIR Taxa Interna de Retorno

TWh Terawatt hora

USEPA *United States Environmental Protection Agency*

VPL Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVO	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
CAPÍTULO 2	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Política Nacional dos Resíduos Sólidos	20
2.2 Os Resíduos Sólidos	21
2.2.1 Definição.....	21
2.1.2 Classificação de Resíduos Sólidos.....	21
2.3 Geração, coleta, tratamento e destinação dos RSU no Brasil.....	23
2.4 Composição gravimétrica dos RSU no Brasil	24
2.4.1 A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos: impactos ambientais e normas técnicas existentes	25
2.5 Tecnologias empregadas no tratamento de RSU	26
2.6 Digestão anaeróbia.....	27
2.6.1 Fases da Digestão Anaeróbia	28
2.6.2 Biogás oriundo da digestão anaeróbia	30
2.6.3 Legislação para a produção, uso e comercialização do biogás	31
2.6.4 Biogás no Brasil e no Mundo.....	32
2.7 Sistemas de aproveitamento do biogás oriundo de RSU	32
2.7.1 Biogás de aterro sanitário.....	32
2.7.2 Aterros sanitários que fazem o aproveitamento energético do biogás no país	36
2.8 Biodigestor.....	36
2.8.1 Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos	36
2.8.2 Definição de biodigestores.....	37
2.8.3 Os biodigestores no Brasil e no mundo	39
2.9 Geração de energia elétrica a partir do biogás	41

2.9.1 O motor Ciclo Otto	42
2.9.2 Turbinas a gás	42
2.10 Principais vantagens e desvantagens do aproveitamento energético através de aterro sanitário e biodigestores	43
2.11 Regulamentação para o uso e comercialização de energia na geração distribuída...	44
2.11.1 Leilões de energia	44
2.11.2 Comercialização na minigeração e microgeração distribuída.....	44
2.12 Estudos sobre a utilização da digestão anaeróbia no tratamento de resíduos sólidos urbanos.....	46
CAPÍTULO 3.....	48
3. METODOLOGIA	48
3.1 Região Analisada	48
3.2 Projeção populacional.....	49
3.3 Estimativa do biogás a ser produzido	50
3.3.1. Aterro sanitário	51
3.3.2. Biodigestores.....	52
3.4 Estimativa do aproveitamento energético.....	53
3.5 Análise da viabilidade econômica	56
3.6 Aplicação dos dados no algoritmo no Scilab.....	63
3.7.1 Sobre o Scilab	64
3.7.2 Dados de entrada.....	64
3.7.3 Dados de saída	65
CAPÍTULO 4.....	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1. Cidades constituintes dos aterros.....	66
4.1.1 Estado de São Paulo.....	66
4.1.2 Estado de Minas Gerais.....	66
4.2 Projeção populacional.....	67
4.2.1 Estado de São Paulo	67
4.2.2 Estado de Minas Gerais.....	71
4.3 Resultados relativos ao aproveitamento do biogás de Aterro Sanitário	75
4.3.1 Resultados energéticos	75
4.3.1.1 São Paulo.....	75

4.3.1.2 Minas Gerais.....	80
4.3.1 Resultados econômicos	86
4.3.1.1 São Paulo.....	86
4.3.1.2 Minas Gerais.....	88
4.4 Resultados relativos ao aproveitamento do biogás de digestores anaeróbios.....	91
4.4.1 Resultados energéticos	91
4.4.1.1 São Paulo.....	91
4.4.1.2 Minas Gerais.....	96
4.4.2 Resultados Econômicos	100
4.4.2.1 São Paulo.....	100
4.4.2.2 Minas Gerais.....	103
4.5 Análise de Sensibilidade.....	106
4.6 Emissão de Gases de Efeito Estufa evitados	111
4.7 Análise entre os resultados obtidos pelo Aterro Sanitário e Digestores Anaeróbios	112
Capítulo 5.....	115
5. CONCLUSÃO.....	115
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	116
7. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	118
ANEXO A – Quadro com os aterros sanitários em operação no estado de São Paulo ..	134
ANEXO B - Quadro com os Consórcios intermunicipais em operação no estado de Minas Gerais	137
APÊNDICE A- Tabela com os resultados obtidos pelos aterros sanitários do estado de São Paulo para a geração de energia elétrica através de aterros	143
APÊNDICE B - Tabela com os resultados energéticos referentes ao aproveitamento do biogás de aterro sanitário dos Consórcios estudados do estado de Minas Gerais	145
APÊNDICE C – Tabela com os resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás de aterro dos empreendimentos estudados no estado de São Paulo (Cenários 1 e 2)	146
APÊNDICE D - Tabela com os resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás de aterro sanitário dos empreendimentos estudados no estado de Minas Gerais (Cenários 1 e 2).....	148
APÊNDICE E - Tabela com os resultados obtidos pelos aterros sanitários do estado de São Paulo para a geração de energia elétrica através de digestores anaeróbios	149

APÊNDICE F - Tabela com os resultados obtidos pelos aterros sanitários do estado de Minas Gerais para a geração de energia elétrica através de digestores anaeróbios.....	151
APÊNDICE G - Tabela com os resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás através do uso de digestores anaeróbios no estado de São Paulo (Cenário 1)	152
APÊNDICE H - Tabela com os Resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás através do uso de biodigestores no estado de São Paulo (Cenário 2)	154
APÊNDICE I - Tabela com os Resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás através do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais (Cenário 1).....	156
APÊNDICE J - Tabela com os resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás através do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais (Cenário 2)	157

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) causada pela rápida urbanização é considerada um dos maiores problemas enfrentados pelos países em desenvolvimento. Isto deve-se ao grande volume e diversidade destes resíduos, bem como aos impactos ambientais e aos perigos a saúde pública em consequência do gerenciamento destes resíduos. Neste contexto, a busca por técnicas para a disposição e tratamento mais viáveis para os resíduos e que causem menos impactos tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores ao redor do mundo.

No Brasil, o tratamento e disposição final dos RSU em aterros sanitários consiste na principal escolha pelos gerenciadores destes resíduos. Com o aumento na geração de resíduos há o aumento na emissão de gases de efeito estufa (GEE), em função das alternativas de seu gerenciamento (Santos et al., 2019). Sendo assim o aproveitamento energético do RSU, mostra-se como uma opção para reduzir a emissão destes gases. Por outro lado, o desenvolvimento econômico do país carece de uma demanda cada vez maior de energia. No cenário atual, a utilização de fontes de energia renováveis, em especial biomassa de RSU mostra-se como uma atraente alternativa energética.

Em função disso, a digestão anaeróbia (DA) tem se tornado uma técnica cada vez mais utilizada no manejo de RSU por tratar-se de uma alternativa que além de reduzir os impactos ambientais do processo, possibilita o uso do biogás na geração de energia elétrica ou térmica. Dentre os diferentes tipos de tratamento de resíduos, a DA apresenta-se como uma alternativa promissora para o tratamento da fração orgânica dos RSU.

Uma estimativa da melhor ordem de magnitude do total global de RSU é de cerca de 2 bilhões de toneladas por ano. As frações orgânicas compreendem uma porcentagem maior dos resíduos de RSU nos países de baixa renda (em que a fração orgânica é tipicamente de 50 a 70% de todos os RSU) comparando-se aos países de alta renda (onde os orgânicos representam em geral, 20 a 40%). A porcentagem de papel é geralmente, proporcional aos níveis de renda (23% dos RSU na alta renda, 19% a 11% na renda média e 7% nos países de baixa renda) (UN Environment, 2016).

O aproveitamento energético oriundo de RSU não é uma prática recente e já vem sendo utilizada em diferentes locais, em especial nos países desenvolvidos. No Brasil, o aproveitamento do biogás de aterro sanitário, mostra-se como uma opção interessante, já que uma quantidade considerável de resíduos é depositada em aterros sanitários. Outra alternativa, seria a implantação de digestores anaeróbios para o tratamento da fração orgânica dos resíduos, de forma controlada, possibilitando a captação e o uso do biogás.

Apesar do grande potencial existente no país, tal prática ainda é pouco utilizada. No Brasil, há 25 empreendimentos em operação, com Potência Outorgada de 179.781 kW (e Potência fiscalizada de 173.849kW), ou 1,2% do total da fonte biomassa (ANEEL/SCG, 2020). Barros, Tiago Filho e Silva (2014) estimaram valores de potencial de geração de energia elétrica entre 337 MW (254.166 tep; 3.955.951 MWh em 2030) e 601 MW (452.746 tep; 5.265.436 MWh em 2030), considerando o potencial de geração com energética em função da população, concluiu-se que populações superiores a 200.000 habitantes seria o mínimo valor que geraria viabilidade econômica para empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de biogás para aterro sanitário.

No Brasil, a Política Nacional dos Resíduos (PNRS), Lei federal 12.395/2010 (Brasil, 2010a) foi instituída e regulamentada no mesmo ano pelo Decreto 7404/2010 (Brasil, 2010b), no intuito de reduzir os principais problemas relacionados ao manejo inadequado dos resíduos, como também incentivar a busca por práticas de gerenciamento sustentáveis. A lei supracitada, aborda pontos importantes, como a redução na geração de resíduos, a reciclagem de materiais. Outro ponto abordado pela PNRS é a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa, visando a reduzir os impactos decorrentes do ciclo de vida dos produtos, bem como dar uma destinação ambientalmente correta aos resíduos.

Além disso, em 2015 na 21^a Conferência das Partes (COP21), foram propostos acordos internacionais em resposta as mudanças climáticas, visando o desenvolvimento sustentável. Por meio da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei federal nº 12.187/2009 (BRASIL, 2009), o Brasil propôs uma redução de ações de mitigação das emissões de GEE, com vistas em reduzir entre 36,1% (trinta e seis inteiros e um décimo por cento) e 38,9% (trinta e oito inteiros e nove décimos por cento) suas emissões projetadas até 2020, tendo como base as emissões do ano de 2005. Para a redução nas emissões, o Brasil se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia na matriz energética, aumentar a participação de energias renováveis, entre outros (BRASIL, 2019). Tanto a Lei instituída como os acordos

firmados, mostram o compromisso que o país possui para um melhor gerenciamento de resíduos, bem como apresenta-se como uma oportunidade para o aproveitamento energético de RSU.

Neste contexto, o presente trabalho propõe avaliar o potencial energético da fração orgânica dos RSU, por meio do aproveitamento do biogás de aterro sanitário e biodigestores dos estados de São Paulo e Minas Gerais, utilizando uma rotina criada no *software* Scilab®, com base em literatura e equação de geração de primeira ordem desenvolvido por Silva et al. (2019), apresentando assim como uma alternativa para um melhor gerenciamento de RSU no país. Para isto, tornou-se necessário um levantamento dos dados dos aterros sanitários destes locais, e a rotina foi capaz de realizar uma estimativa do crescimento da população, da geração de resíduos, uma análise do potencial energético destes locais, bem como a análise da viabilidade econômica da implantação destes projetos. A viabilidade econômica foi aprimorada no presente estudo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A produção crescente de RSU é considerada um dos grandes problemas enfrentados pela sociedade contemporânea. Estima-se que cerca de 1.3 bilhões de toneladas de RSU são gerados no mundo anualmente e este número pode chegar a 2.2 bilhões em 2025 (HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, 2012). O IPCC estima que a gestão de resíduos sólidos representou cerca de 3% das emissões globais de GEE em 2010, sendo a maior parte atribuível às emissões de metano de aterros sanitários (UN Environment, 2016). Por outro lado, a crescente demanda por energia e a busca por um desenvolvimento sustentável tem trazido a necessidade da inserção de maior porcentual de energia limpa na matriz energética nacional.

Neste contexto, o uso de fontes alternativas, como o biogás proveniente de aterro sanitário e de biodigestor, apresenta-se como alternativas atraentes para o atendimento da crescente demanda, como também na redução dos impactos ambientais oriundos da emissão dos GEE.

Como estudo de caso foram selecionados os estados de São Paulo e Minas Gerais, pois estão entre os estados que possuem os maiores valores de Produto Interno Bruto (PIB) do país, com valores de R\$ 2.119.854 (10⁶ milhões de reais) e R\$ 576.199 (10⁶ milhões de reais),

referentes ao ano de 2017, respectivamente (IBGE, 2019). De acordo com o IBGE (s.d.), segundo o Censo 2010 o estado mais populoso do Brasil é São Paulo, com 41.262.199 de pessoas. São Paulo e Minas Gerais são os estados mais populosos do país e estão localizados na região Sudeste, região responsável pela maior quantidade de resíduos gerados no país, sendo que em 2018 foram coletados 105.977 t/dia, que representa 53,2% do total coletado no país (ABRELPE, 2019).

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o potencial de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, por meio da utilização do programa desenvolvido em Scilab® por Silva et al. (2019), considerando o uso do biogás produzido em aterros sanitários, assim como o tratamento da fração orgânica destes mesmo resíduos em digestores anaeróbios, e a análise da viabilidade econômica destes projetos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de atingir o objetivo geral, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar as cidades integrantes dos aterros sanitários para gerenciamento dos RSU dos estados estudados.
- Estimar o crescimento populacional das cidades estudadas, bem como a geração de resíduos de cada cidade formadora dos diferentes aterros e/ou consórcios.
- Calcular o potencial de geração de energia elétrica por meio do biogás gerado nos aterros sanitários e a partir da utilização de biodigestores para os locais estudados.

- Apresentar a viabilidade econômica da utilização do biogás por meio das resoluções da ANEEL 482/2012 (ANEEL, 2012) e 687/2015 (ANEEL, 2015) e também considerando a venda desta energia em leilões.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O corpo do presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, estando organizados conforme descrição a seguir:

O Capítulo 1 apresenta a Introdução do trabalho, bem como são declarados a justificativa e os objetivos do trabalho proposto.

No Capítulo 2 é apresentada a Revisão Bibliográfica, onde discorre-se sobre a temática do trabalho, explorando os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo busca-se explicar sobre a questão dos resíduos sólidos urbanos no país, principais tecnologias utilizadas no tratamento dos resíduos, conceitos sobre a digestão anaeróbia, sistemas de aproveitamento de biogás, biodigestores, principais tecnologias utilizadas para a conversão de energia elétrica, as principais vantagens e desvantagens no aproveitamento do biogás de aterro e de digestores anaeróbios. Além disso, apresenta a regulamentação para o uso do biogás e por último, apresenta estudos sobre a utilização da digestão anaeróbia no tratamento de resíduos sólidos urbanos.

O Capítulo 3 apresenta a região analisada e alguns dados referentes aos estados de São Paulo e Minas Gerais. Ainda neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para se alcançar os objetivos esperados, onde há um detalhamento dos métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 4 exhibe os aterros sanitários e consórcios estudados dos dois estados. Os resultados energéticos e econômicos esperados para estes empreendimentos, além das discussões referentes aos resultados.

A conclusão do trabalho é exposta no Capítulo 5, onde há sinopse dos resultados correspondendo estes com os objetivos propostos, bem como recomendações para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este tópico apresenta a revisão bibliográfica elaborada sobre o tema, com o intuito de embasar o desenvolvimento do presente trabalho. Foram abordados temas como a geração, composição e tratamentos de RSU, as tecnologias de tratamento empregadas, conceitos sobre a digestão anaeróbia e geração de biogás. Também foram citadas as principais características sobre aterros sanitários e digestores anaeróbios.

2.1 Política Nacional dos Resíduos Sólidos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal N° 12.305/2010 dispõe sobre princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010a). Abrange instrumentos importantes no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes da gestão inadequada dos resíduos sólidos (BRASIL, 2018). A Lei foi regulamentada pelo decreto 7404/2010, de 23 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010b).

A Lei supracitada possui princípios como a redução na geração de resíduos, o desenvolvimento sustentável, a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, privado e demais segmentos da sociedade, a responsabilidade compartilhada entre o ciclo de vida dos produtos, o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania, entre outros (BRASIL, 2010a).

Além disso, possui como objetivos a proteção da saúde pública e ambiental, não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, incentivo a indústria de reciclagem, a

adoção de tecnologias limpas para minimizar os impactos ambientais, gestão integrada de resíduos, melhoria nos processos produtivos e o reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluindo a sua recuperação e aproveitamento energético (BRASIL, 2010a).

A supracitada Lei também cria metas para a eliminação dos lixões (assim como há proibição dos mesmos, em seu Art. 47) e institui instrumentos de planejamento nos diversos níveis, colocando o Brasil no mesmo patamar dos principais países desenvolvidos no que concerne ao marco legal (BRASIL, 2018).

2.2 Os Resíduos Sólidos

2.2.1 Definição

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 10004 (ABNT, 2004) define como Resíduos Sólidos aqueles resíduos nos estados sólido e semissólido resultantes de atividades de origem industrial, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Também, incluem-se na referida norma brasileira, os lodos oriundos de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, tal como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

2.1.2 Classificação de Resíduos Sólidos

De acordo com o Art. 13 da Lei Nº 12.305 (BRASIL, 2010a), que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS; BRASIL, 2010a), os resíduos sólidos são classificados como se segue:

I - quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;

- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resíduos resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II - quanto à periculosidade:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com a lei, regulamento ou norma técnica;
- b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

Parágrafo único. Respeitado o disposto no art. 20, os resíduos referidos na alínea “d” do inciso I do caput, se caracterizados como não perigosos, podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal.

2.3 Geração, coleta, tratamento e destinação dos RSU no Brasil

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019), em 2018 foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos, sendo que deste montante 92% foram coletados (72,7 milhões) no Brasil, o índice de cobertura de coleta apresentou um percentual de 92,01% no país. Em relação à disposição destes resíduos 59,5% dos RSU coletados foram enviados para aterros sanitários, 23% em aterros controlados, 17,5% em lixões (ABRELPE, 2019). As informações estão apresentadas na Figura 1:

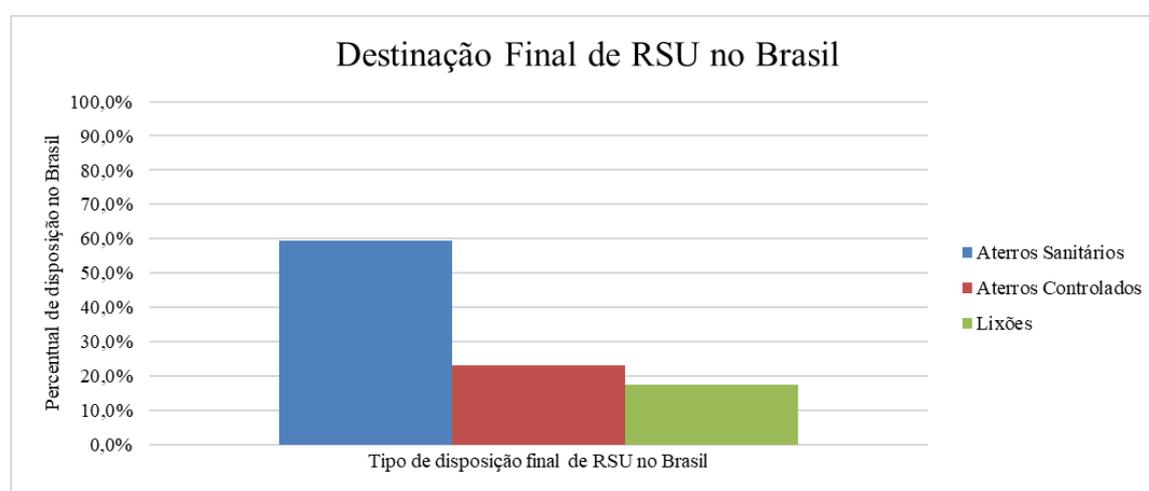


Figura 1: Disposição Final de RSU no Brasil por tipo de Destinação

Fonte (ABRELPE, 2019)

Deve-se atentar que conforme o Art. 47. da Lei 12305/2010 (BRASIL, 2010a), as seguintes formas de destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeito são proibidas: lançamento *in natura* a céu aberto (com exceção dos resíduos de mineração); lançamento em praias, no mar ou em quaisquer corpos hídricos; queima a céu aberto ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade; ou ainda, outras formas vedadas pelo poder público.

A região sudeste apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta no país, representando cerca de 53,2% do total de RSU coletado no Brasil, um aumento de 0,2 no serviço de coleta quando comparado a 2017, conforme Figura 2 (ABRELPE, 2019). O mesmo

estudo aponta que os municípios da região sudeste geraram diariamente em 2018, 108.063 toneladas de RSU, sendo que deste total, aproximadamente 98,1% destes resíduos foram coletados.

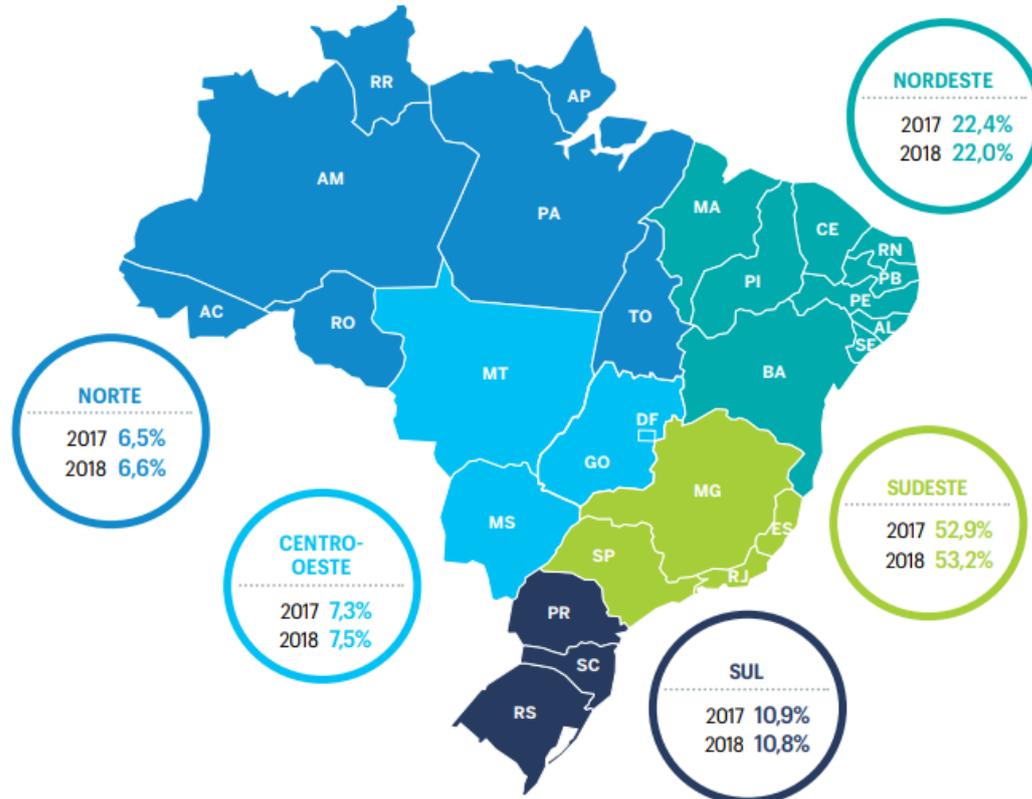


Figura 2: Participação das regiões do país no total de RSU coletado

Fonte: ABRELPE (2019)

2.4 Composição gravimétrica dos RSU no Brasil

No que concerne à composição dos RSU gerados sabe-se que esta apresenta uma composição heterogênea, que varia em função de fatores como nível socioeconômico da população, época do ano e tipo de coleta existente (REICHERT, 2005). Quanto maior o desenvolvimento econômico e a taxa de urbanização de um local, maior é a quantidade de resíduos produzidos (HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, 2012). Para estimar a quantidade dos diferentes tipos de resíduos produzidos no Brasil, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos

(PNRS), utilizou dados de diferentes pesquisas realizadas entre os anos de 1995 e 2008 (BRASIL, 2012). A Tabela 1 a seguir apresenta a estimativa da composição gravimétrica média dos RSU coletados no país:

Tabela 1: Estimativa da composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil

Resíduos	Participação (%)
Material Reciclável	31,9
Metais	2,9
Aço	2,3
Alumínio	0,6
Papel, papelão e tetrapak	13,1
Plástico Total	13,5
Plástico Filme	8,9
Plástico rígido	4,6
Vidro	2,4
Matéria Orgânica	51,4
Outros	16,7
Total	100

Fonte: Adaptado de Brasil (2012)

Observa-se que os resíduos das cidades brasileiras apresentam predominância de matéria orgânica. Uma vez que a proporção da fração orgânica presente nos resíduos representa mais de 51%, mostra-se a necessidade da adoção de tecnologias biológicas para o tratamento destes resíduos.

2.4.1 A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos: impactos ambientais e normas técnicas existentes

De acordo com Silva (2009), os resíduos sólidos orgânicos compõem uma parte significativa dos RSU, dos resíduos rurais ou agrícolas, de alguns tipos de resíduos industriais, de resíduos resultantes de tratamento de esgotos e coleta de resíduos coletados nas áreas urbanas. A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) quando é depositada em aterros sanitários se degrada naturalmente, produzindo subprodutos como biogás e o lixiviado

que deve ser drenado e tratado conforme se preconiza nas normas para projeto e operação de aterros sanitários, a fim de evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais. Além disso, também é responsável pela poluição atmosférica devido à liberação de gases durante a sua degradação, inclusive aqueles responsáveis pelo efeito estufa (ZHU et al., 2009). Por essa razão, para o projeto e operação de aterros sanitários, há que se desenvolver um projeto de coleta e tratamento tanto de lixiviados, quanto do biogás gerado, além de outras condições. São normas de interesse da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 13896/1997 (ABNT, 1997), que fixa as condições mínimas que são exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, visando à proteção adequada das coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, assim como os operadores destas instalações e populações vizinhas.
- NBR 15849/2010 (ABNT, 2010), que proporciona as especificações dos requisitos mínimos para localização, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários de pequeno porte, para a disposição final de RSU.

2.5 Tecnologias empregadas no tratamento de RSU

Atualmente, existem diversas tecnologias empregadas para o tratamento dos resíduos. O método mais comum para a disposição e tratamento de RSU no Brasil é a disposição/tratamento final destes resíduos em aterros sanitários (BARROS; TIAGO FILHO; SILVA, 2014). Além disso, existem tratamentos térmicos e biológicos que podem ser empregados no tratamento de RSU.

A conversão térmica de RSU utiliza calor para a redução do volume de resíduos, podendo haver a recuperação de energia neste processo. Como exemplo de tecnologias de conversão térmica, pode-se citar a incineração, pirólise e a gaseificação (NG et al., 2014). Dentre estas, a incineração é a mais utilizada em diferentes países. Possui diversas vantagens como a redução do volume e massa em 90% e 70% respectivamente, a redução de patógenos e na geração de calor, que pode ser utilizado no aquecimento da água, além da geração de energia elétrica (LINO; ISMAIL, 2017). Apesar das vantagens, a incineração pode apresentar elevado

custo de implantação (CENBIO, 2001). No Brasil, a incineração é utilizada para uma pequena parcela dos resíduos industriais perigosos (LOUREIRO; ROVERE; MAHLER, 2013) e também como destinação a uma parcela considerável dos resíduos do serviço de saúde (RSS), sendo que em 2018, 40,2% dos RSS foram enviados para a incineração (ABRELPE, 2019).

Comumente, os tratamentos biológicos são indicados para tratamento de resíduos orgânicos biodegradáveis, devido ao alto teor de umidade presente nestes resíduos (LEITE et al., 2009). Nestes processos, há o uso de enzimas e de microrganismos que decompõem a matéria orgânica produzindo o biogás e outros subprodutos. Alguns exemplos de processos biológicos são a DA, fermentação e a compostagem (NG et al., 2014). Tratamentos biológicos possuem diversas vantagens, pois são processos naturais que necessitam de menos energia, além de causarem menores impactos ambientais quando comparadas a outras tecnologias (KONDUSAMY; KALAMDHAD, 2014).

2.6 Digestão anaeróbia

A DA é um processo em que substratos orgânicos são degradados na ausência de oxigênio, por meio de atividade enzimática e de diversos microrganismos (bactérias e arqueas) em simbiose, ocorrendo a produção de biogás (LIU; ZHANG; EL-MASHAD; DONG, 2009; JAIN et al., 2015). Além disso, há a produção de um composto rico em nutrientes e condicionadores orgânicos do solo (EDELMANN; BAIER; ENGELI, 2005). Pode-se afirmar que a DA funciona como um ecossistema em que vários grupos de microrganismos convertem matéria orgânica complexa em metano (CH_4), gás carbônico (CO_2), água (H_2O), gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), além de novas células bacterianas (CHERNICHARO, 1997).

A DA é um processo que ocorre tanto em aterro sanitário (BEYLOT; VILLENEUVE; BELLENFANT, 2013), como também é um processo que pode ocorrer em biodigestores, em que há o aquecimento e a circulação da matéria orgânica (DEFRA, 2004). No aterro sanitário o processo ocorre naturalmente, não havendo necessidade de um controle do processo, diferentemente dos biodigestores, em que há um controle do processo.

2.6.1 Fases da Digestão Anaeróbia

O processo de DA de recursos orgânicos biodegradáveis consiste basicamente de quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (BHARATHIRAJA et al., 2018). Chernicharo (1997) menciona uma quinta etapa chamada de sulfetogênese que ocorre em resíduos que contêm enxofre em sua composição. As principais etapas da DA são apresentadas na Figura 3, a seguir:

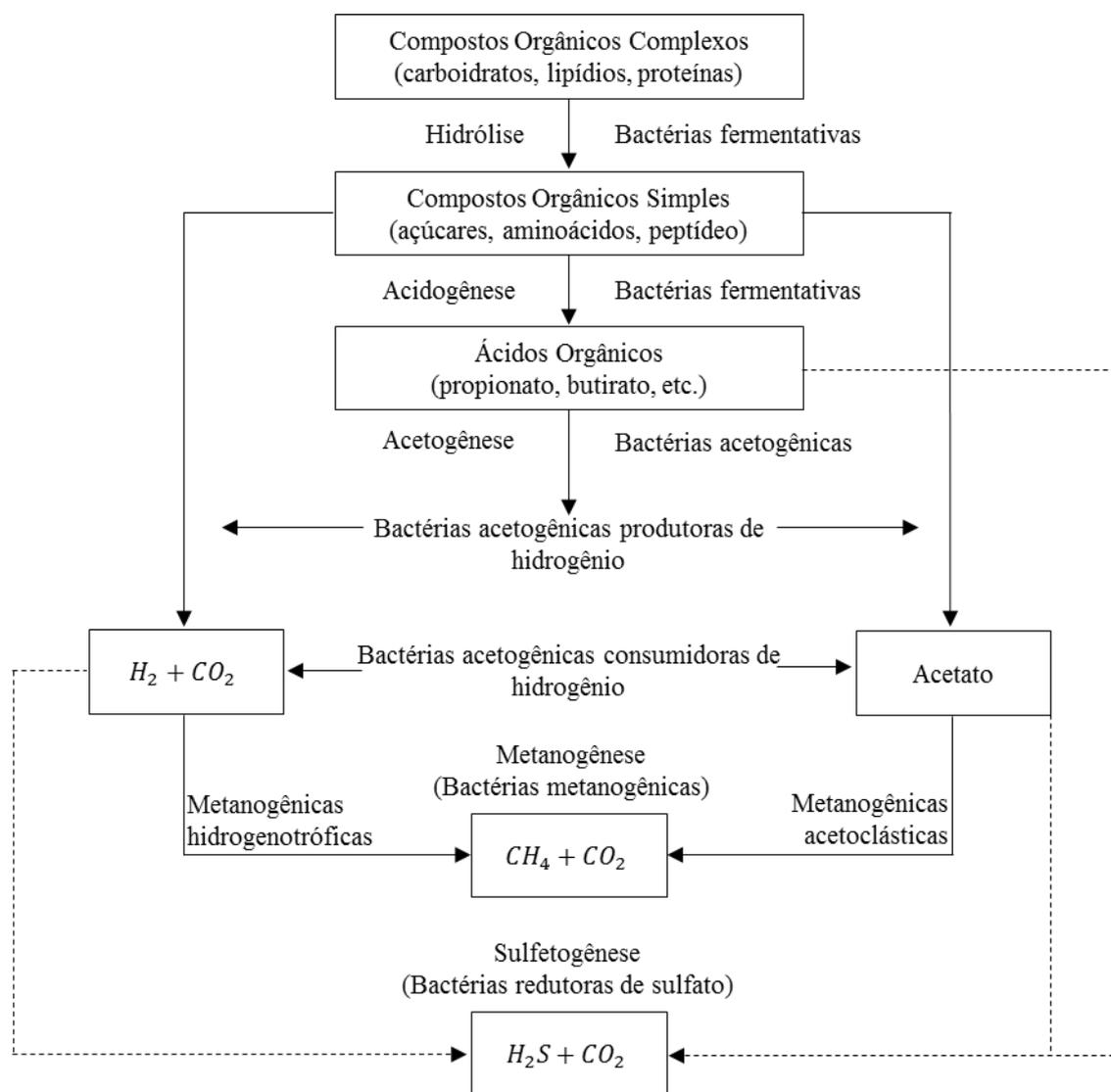


Figura 3: Fluxograma das Etapas da Digestão Anaeróbia

Fonte: (CHERNICHARO, 1997)

As etapas serão apresentadas a seguir:

- Hidrólise:

O início do processo de degradação da matéria orgânica começa com a hidrólise, etapa em que ocorre a redução de polímeros orgânicos como proteínas, lipídios e polímeros de carboidratos em moléculas simples solúveis em água como ácidos graxos de cadeia longa e açúcares (LI; PARK; ZHU, 2011). É um processo lento, realizado por meio de enzimas extracelulares excretadas a partir de bactérias hidrolíticas (MANCHALA et al., 2017).

- Acidogênese:

A segunda etapa do processo de DA é a acidogênese ou acidificação. Tal processo consiste na conversão de produtos hidrolisados em moléculas simples com baixo peso molecular como Ácidos Graxos Voláteis, AGVs (ácido acético, propiônico e butírico), álcoois, aldeídos e gases como CO₂, H₂ e NH₃ (KONDUSAMY; KALAMDHAD, 2014).

- Acetogênese:

É a terceira etapa onde os produtos da etapa anterior são convertidos em ácidos acéticos, hidrogênio e CO₂ por bactérias acetogênicas (KONDUSAMY; KALAMDHAD, 2014).

- Metanogênese:

A etapa final da DA é a metanogênese, em que as arqueas metanogênicas consomem acetato (metanogênese acetotrófica), dióxido de carbono e hidrogênio (metanogênese hidrogenotrófica) para produzir metano (LI; PARK; ZHU, 2011). Esta etapa é realizada por um grupo de organismos conhecidos como metanogênicos. As arqueas metanogênicas são divididas em dois grupos: as metanogênicas acetoclásticas que consomem o acetato e produzem metano e CO₂. O segundo grupo é denominado de arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, pois utilizam o hidrogênio como doador e CO₂ como acceptor de elétrons para produzir metano (MANCHALA et al., 2017).

- Sulfetogênese:

Esta etapa ocorre na DA de resíduos que contêm enxofre em sua composição. Nesta etapa, sulfatos, sulfitos e compostos sulfurados são transformados em sulfetos por meio de bactérias redutoras de sulfato (BRS) ou sulforredutoras (CHERNICHARO, 1997). Vale ressaltar que a sulfetogênese pode ocorrer ou não. Neste caso, é uma etapa que tende a diminuir a produção de metano e de aumentar a de gás sulfídrico, sendo o gás sulfídrico indesejável para o aproveitamento do biogás (MARTINS, 2018).

2.6.2 Biogás oriundo da digestão anaeróbia

O biogás é um gás proveniente da DA de resíduos da biomassa tais como RSU, esgoto e águas residuais orgânicas (TSAI, 2007). A composição deste gás varia de acordo com a composição do resíduo presente no processo. Basicamente, o biogás constitui-se de uma mistura de gases composto principalmente de dióxido de carbono e metano em composições variáveis (ABNT, 1992).

Além destes elementos, outros são encontrados em menores proporções como hidrogênio (H_2), amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S), oxigênio (O_2), monóxido de carbono (CO), nitrogênio (N) e água (H_2O) (SANTOS; LIMA, 2017). O biogás é um combustível com alto teor energético podendo ser utilizado na geração de energia elétrica, térmica ou mecânica (SOUZA et al., 2004). O teor de metano indica a pureza do biogás, bem como o seu poder calorífero, já que este está diretamente relacionado com a quantidade deste gás presente na mistura gasosa (CASSINI, 2003; SUZUKI, 2011). Desta forma, o potencial energético do biogás varia. Quando origina-se de aterros sanitários, a proporção de metano encontra-se em média de 50%, ao ser gerado em reatores anaeróbios de efluentes, pode chegar a 65%; no entanto, ao ser comparado ao gás natural apresenta menor valor de poder calorífero inferior (PCI), já que este possui de (85% a 90%) de metano em sua composição (CENBIO, 2001), além de que o biogás contém impurezas como siloxanos e mercaptanas.

De acordo com a CENBIO (2001, p. 6. 7), a utilização energética do biogás apresenta diversas vantagens, sendo estas:

Para a sociedade:

- Geração de empregos e eliminação ou redução de subempregos;
- Geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, proveniente de uma fonte renovável que vem sendo tratada como resíduo;
- Colaboração para a viabilidade econômica do saneamento básico.

Para as prefeituras:

- Possibilidade de renda extra a partir da energia gerada com biogás e vendida às concessionárias;
- Colaboração para a viabilidade econômica do tratamento dos resíduos;

- Menor rejeição social das instalações de saneamento, já que estas passam a ter um melhor gerenciamento, se tornando um exemplo a ser seguido.

Para as estações de tratamento de esgotos ou gerenciadoras de aterros:

- Redução da quantidade de energia a ser comprada das concessionárias;
- Possibilidade de venda da energia excedente à rede;
- Possibilidade de uso de processos de co-geração, já que a geração de eletricidade possui como subproduto calor, que pode ser utilizado no tratamento de esgotos ou vendido a terceiros.

Para o meio ambiente:

- Redução nas emissões de metano para a atmosfera, dado que este é um importante gás de efeito estufa;
- Redução no consumo de combustíveis fósseis, principais responsáveis pelo aumento do efeito estufa;
- Redução na geração de odor nas vizinhanças, de chorume e da contaminação do lençol freático;
- Melhoria nas condições dos lixões, que ainda estão presentes no país.

2.6.3 Legislação para a produção, uso e comercialização do biogás

Compete a Agência Nacional de Petróleo e Gás Natural (ANP) estabelecer as especificações dos derivados de petróleo, gás natural e seus derivados e dos biocombustíveis. A Lei nº 12.490 (BRASIL, 2011), de 16 de setembro de 2011, deu plena competência a ANP sobre os biocombustíveis, atribuindo à esta, a regulação e a autorização das atividades relacionadas com a indústria dos biocombustíveis. O biometano atende à definição de biocombustível conforme a Lei nº 12.490/2011 (BRASIL, 2011).

Segundo a resolução ANP nº 685/2017 (BRASIL, 2017a), o biogás é definido como um gás bruto obtido pela decomposição biológica de resíduos orgânicos. Já o biometano é considerado um gás derivado da purificação do biogás, sendo constituído basicamente por metano.

A qualidade do biometano obtido é regulamentada por meio da Resolução ANP nº 8/2015 (BRASIL/ANP, 2015) e da Resolução ANP nº 685/2017 (BRASIL/ANP, 2017a). A

primeira trata da especificação do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais, abordando regras relativas a qualidade e a especificação do biometano, sua produção, comercialização, transporte e utilização como biocombustível, além de definições (ANP, 2019). A segunda é relativa a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto, estabelecendo regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional (ANP, 2019).

O Regulamento Técnico da ANP Nº 1/2017 (BRASIL/ANP, 2017a) é o que se aplica ao biometano oriundo de aterros e de estações de tratamento de esgotos, cuja especificação do biometano deve ser de acordo com o regulamento técnico deve ser determinado sempre pelas publicações mais recentes das normas previamente citadas.

2.6.4 Biogás no Brasil e no Mundo

Segundo o relatório do Panorama das Energias Renováveis na Europa (SEIGNEUR et al., 2017), em 2015, a produção de energia elétrica a partir do uso do biogás foi de 15.6 Mtoe em todo o continente. Deste valor, quase 77% desta energia concentrou-se em três países, Alemanha, Reino Unido e Itália.

No Brasil, com relação à capacidade total instalada da matriz de energia elétrica nacional, a biomassa representa cerca de 8,4% deste total. Do conjunto da biomassa, somente 0,0945 % é derivado de biogás de RSU (ANEEL, 2020).

2.7 Sistemas de aproveitamento do biogás oriundo de RSU

2.7.1 Biogás de aterro sanitário

O aterro sanitário é considerado uma técnica ambientalmente correta de aterramento de RSU, pois possui sistemas de impermeabilização do solo, sistema de coleta e tratamento do lixiviado, além de possuir um sistema de poços e tubulações de coleta e queima de gás

(THEMELIS; ULLOA, 2007), recobrimento diário da massa de RSU compactada e controle de recebimento de resíduos e acessos. No entanto, possuem algumas desvantagens como vida útil limitada. Também, a área do aterro deve continuar sendo avaliada pelo sistema de monitoramento de águas subterrâneas e gases drenados, pois mesmo após o término de vida útil do aterro ainda há ocorrência de atividade microbiana (BARROS, 2012).

Após a deposição dos resíduos orgânicos nos aterros sanitários a digestão anaeróbia desenvolve-se naturalmente (PAVI, 2016). A grande variedade de resíduos dispostos no aterro, ocasiona uma numerosa diversidade de microorganismos em simbiose, incluindo bactérias hidrolíticas e fermentativas, acidogênicas, acetogênicas e arqueas metanogênicas, além de BRS e protozoários (CASTILHOS JR et al., 2003). Estes microorganismos fazem com que os resíduos orgânicos sofram diversas reações bioquímicas.

2.7.1.2 Fases da produção de gases no aterro sanitário

De acordo com Farquhar e Rovers (1973, apud Barros, 2012), a produção de gases em um aterro possui 4 fases identificadas conforme descrito a seguir:

- **Fase I** – Primeira fase aeróbia: fase em que ocorre a decomposição aeróbia com consumo de oxigênio presente nos resíduos imediatamente a sua disposição. Essa etapa produz dióxido de carbono, água e calor, podendo durar de algumas horas a semana (BANCO MUNDIAL, 2004).
- **Fase II** – Anaeróbia não metanogênica: fase onde a atividade anaeróbia é predominante. Compostos ácidos e gás hidrogênio são formados e ainda há a produção de dióxido de carbono; etapa que possui duração de 1 a 6 meses (BANCO MUNDIAL, 2004).
- **Fase III** – Anaeróbia metanogênica instável: fase em que ocorre o aumento na concentração de CH_4 com um valor final constante. Nesta fase há uma diminuição da produção de dióxido de carbono devido a mudança da decomposição aeróbia para a decomposição anaeróbia, produzindo calor, água e metano (BANCO MUNDIAL, 2004). Possui de 3 meses a 3 anos de duração (BANCO MUNDIAL, 2004).
- **Fase IV** - Anaeróbia metanogênica estável: a composição dos gases e as taxas de produção mantêm-se constantes, podendo ocorrer variações na

produção de gás em decorrência de variações ambientais ou variações de longo prazo como esgotamento de nutrientes e concentração de substâncias inibitórias. Etapa que dura de 8 a 40 anos (BANCO MUNDIAL, 2004).

Diversos fatores interferem na produção de metano em um aterro sanitário, sendo que os fatores mais relevantes são a composição dos resíduos, a presença de componentes orgânicos degradáveis, teor de umidade, a idade do resíduo, o pH e a temperatura (MACHADO et al., 2009).

No Brasil, a utilização de biogás de RSU é pouco explorada. Uma pequena fração da energia produzida a partir do biogás em aterros sanitários é utilizado no país (LEME et al., 2014).

2.7.1.3 Sistemas básicos para a implantação e uso do biogás de aterro sanitário

Para o aproveitamento do biogás oriundo de aterros sanitários são necessários três componentes básicos: sistema de coleta de biogás ou de queima alternativa em *flare*, sistema de tratamento do biogás e um sistema de geração ou recuperação energética. A seguir, são apresentados algumas informações sobre os sistemas previamente citados (adaptado de CETESB, 2006a):

- Sistema de coleta e queima alternativa - um sistema padrão de coleta possui: poços de coleta, tubos condutores, um sistema de tratamento e um compressor. Além disso, o aterro sanitário com sistema de recuperação energética possui um *flare* para queima do excesso de biogás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos.
- ✓ Tubos de coleta: a coleta do gás se dá através do sistema de coleta que é conectada a uma tubulação lateral que transporta o biogás até um coletor principal.
- ✓ Sistema de tratamento de condensado: parte importante do sistema de coleta de biogás. O biogás produzido (quente), atravessa os tubos e se resfria formando um condensado. Este condensado caso não removido, pode bloquear o sistema de coleta, interrompendo o processo de geração de energia.

- ✓ Compressor: necessário para succionar o biogás dos poços de coleta que também pode ser indispensável para comprimir o biogás antes de entrar no sistema de recuperação energética.
- Sistema de tratamento do biogás: após ser coletado e antes do seu uso no processo de conversão de energia, o biogás deve ser tratado para remover alguma parcela de condensado não coletado, assim como particulados e impurezas. Este tratamento inclui uma série de filtros para remover impurezas, que podem danificar os componentes do motor ou turbina, e reduzir a eficiência do sistema.
- Sistema de geração ou recuperação de energia: para o aproveitamento energético do biogás, é necessário a sua conversão em alguma forma de energia útil como eletricidade, vapor e combustível.

Além dos componentes supracitados, também podem ser acrescentado (Cetesb, 2006b apud Santos, 2015):

- ✓ Gasômetro: utilizado para armazenar diferentes volumes de combustível. O armazenamento do biogás é feito para realizar manutenção dos equipamentos de geração de energia elétrica;

Para um melhor entendimento sobre a captação e uso do biogás, a Figura 4, mostra o esquema de uma usina de aproveitamento de energia elétrica em um aterro sanitário.

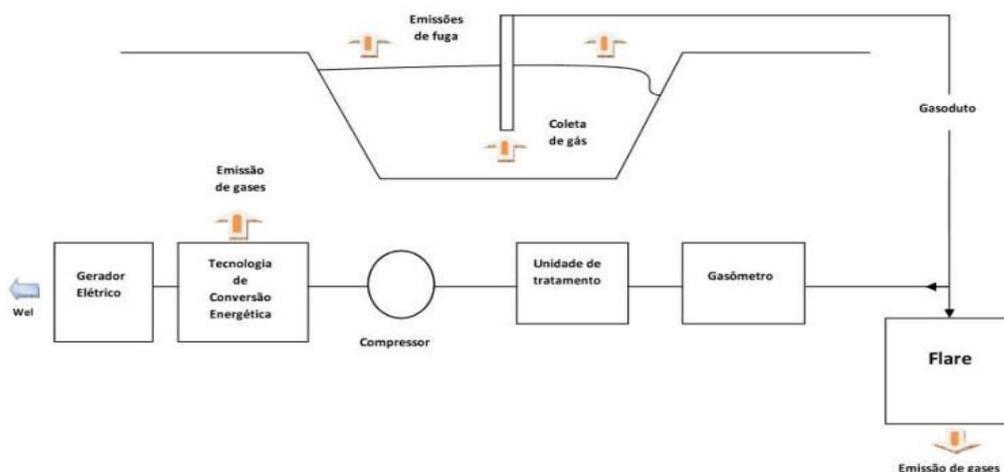


Figura 4: Esquema representativo de uma usina de aproveitamento energético do biogás em um aterro sanitário

Fonte: Santos (2015)

2.7.2 Aterros sanitários que fazem o aproveitamento energético do biogás no país

A seguir são apresentados alguns aterros que possuem sistemas para o aproveitamento do biogás no país.

Em 2004, foi instalado a primeira usina de geração de energia elétrica de biogás no Brasil, no aterro de Bandeirantes em São Paulo (SILVA, 2006). Juntamente com a usina instalada em 2008 no aterro São João, com a captura e queima do biogás, gera-se o equivalente a 7% da energia consumida na cidade (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2019).

Em Belo Horizonte, a Usina termoelétrica de biogás da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040, funciona desde 2011 sob responsabilidade do Consórcio Horizonte ASJA, que utiliza o biogás do aterro CTRS/BR-040, totalizando uma potência de 4,3 MW de energia elétrica em 2015 (NASCIMENTO et al., 2019).

A central de Resíduos do Recreio (CRR), que opera na cidade de Minas do Leão pela empresa Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos - CRVR, desde 2015 gera eletricidade a partir do biogás, sendo a primeira do estado do Rio Grande do Sul (CETESB, 2015). O local foi projetado para atender uma capacidade de 23 milhões de toneladas durante os 23 anos de operação, com uma capacidade de geração de 8,5 MW, o que equivale a atender à uma população de aproximadamente 100 mil habitantes (CRVR, 2016).

A usina Termoverde Salvador, operada pelo Grupo Solvi, foi implantada em 2011, sendo a primeira termoelétrica a biogás de aterro sanitário do Nordeste, com uma potência instalada de 19,73 MW (NASCIMENTO et al., 2019) no Aterro Metropolitano Centro – AMC (TERMOVERDE SALVADOR, 2019).

2.8 Biodigestor

2.8.1 Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos

A DA é um método que tem sido utilizado no tratamento de diferentes resíduos orgânicos como resíduos de cozinha, grama e dejetos de animais e no tratamento de esgotos (LI; PARK; ZHU, 2011; LIU et al., 2012). A DA tem recebido merecida atenção em pesquisas

e implantação devido a crescente preocupação na disposição final de resíduos e a segurança energética (VAN FAN et al., 2018). Dentre os tratamentos biológicos existentes, a DA apresenta mais benefícios devido à alta taxa de recuperação de energia no processo e ao seu baixo impacto ambiental (MATA-ALVAREZ; MACÉ; LLABRÉS, 2000).

De acordo com Barros (2012), o processo de DA da matéria orgânica pode ocorrer por meio da oxidação e da fermentação da matéria orgânica. Em um ambiente anaeróbio, na oxidação há dois aceptores de elétrons: o dióxido de carbono (CO_2) e o sulfato (SO_4^{2-}). Na fermentação, ocorre a formação do precursor do metano, o acetato, sendo assim denominado de metanogênese acetotrófica. Tanto a oxidação quanto a fermentação resultam na formação de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) em diferentes proporções. No entanto, devido às bactérias redutoras de sulfato (BRS), há a formação de gás sulfídrico (H_2S) em proporção da relação com a DBO: sulfato do substrato.

Deste modo, a DA possui uma grande importância no tratamento de resíduos orgânicos, pois contribui para o controle de emissões de gases como metano e dióxido de carbono para a atmosfera, além de possibilitar o aproveitamento energético destes resíduos. O processo de tratamento anaeróbio é uma alternativa promissora para os resíduos sólidos orgânicos em razão das altas taxas de produção de biogás (LEITE et al., 2009). A energia obtida pode ser utilizada tanto para o consumo próprio tanto para a sua comercialização.

2.8.2 Definição de biodigestores

Os biodigestores são equipamentos utilizados para a digestão de materiais orgânicos. O biodigestor anaeróbio nada mais é que uma tecnologia composta por uma câmara fechada onde os resíduos sólidos orgânicos são tratados em meio anóxico, ou seja, na ausência de oxigênio, ocorrendo a degradação e a decomposição da matéria orgânica por meio da ação de diferentes microorganismos, tendo como subprodutos o biogás e o biofertilizante (MALINOWSKY, 2016). O biogás produzido é purificado, podendo ser queimado em *flare* ou utilizado tanto para a produção de energia elétrica como energia térmica (ZILOTTI, 2012).

Os tratamentos biológicos tem como objetivos principais: estabilizar a matéria orgânica em ambiente controlado, no intuito de minimizar a disposição de resíduos em aterros, prolongação da vida útil de aterros em decorrência da redução da massa disposta nestes locais,

recuperação energética do biogás e o aproveitamento dos materiais estabilizados para diferentes finalidades (LINHARES et al., 2017). A Figura 5 apresenta a digestão anaeróbia e suas aplicações:

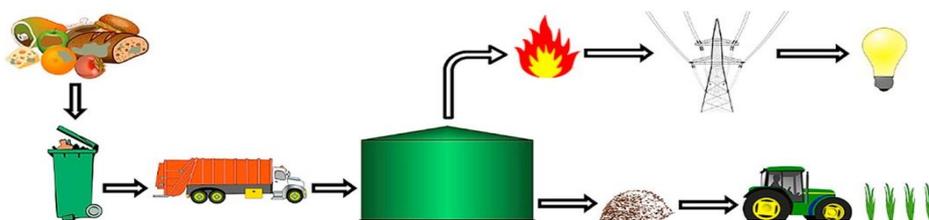


Figura 5: Digestão anaeróbia e suas aplicações

Fonte: (SLORACH et al., 2019)

Nos últimos anos, diferentes tipos de digestores anaeróbios tem sido desenvolvidos para o tratamento de FORSU. De acordo com (CASSINI, 2003), dentre os principais tipos de reatores anaeróbios utilizados no tratamento de resíduos orgânicos, destacam-se:

Quanto ao tipo de estágios:

- **Sistemas de um estágio:** no sistema de um estágio, todas as etapas de metanização (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) ocorrem em um único reator. As vantagens apresentadas pelo sistema de um estágio são os menores custos de implantação e de operação destes reatores. (FNR, 2010; SALOMONI et al., 2011). Por outro lado, este sistema não é efetivo para resíduos com alto teor de de sólidos, pois a produção de metano pode ser ineficiente devido à acidez dada pela queda do valor de pH, tendo como consequência a inibição da metanogênese (DOGAN; DEMIRER, 2012).
- **Sistemas de dois estágios:** o sistema de dois estágios é composto por dois reatores, sendo que no primeiro há a ação de microorganismos hidrolíticos e formadores de ácidos e no segundo, ocorre a ação de microorganismos acetogênicos e metanogênicos (CASSINI, 2003). Este sistema apresenta como vantagem, quando comparado ao sistema de um estágio único, um maior controle da acidificação, aumentando a estabilidade do sistema favorecendo a metanogênese (DOGAN; DEMIRER, 2012).

Quanto ao regime de alimentação:

- **Sistemas em Batelada:** nos sistemas em batelada, os digestores são abastecidos uma única vez com os resíduos frescos, com ou sem inóculo (CARNEIRO, SOUTO, POVINELLI, 2005; CASSINI, 2003;) e são esvaziados após o processo de DA. Podem suportar mais cargas em relação ao sistema de fluxo contínuo, resultando em condições ambientais menos estáveis, podendo reduzir as produções de metano (FERREIRA, 2015).
- **Sistema de alimentação contínua:** os resíduos orgânicos são adicionados de forma constante e regular e simultaneamente, uma quantidade de resíduos já digeridos é removida (REIS, 2012). Este sistema resulta em processos mais estáveis e com maior taxa de conversão da matéria orgânica em biogás (FERREIRA, 2015).

2.8.3 Os biodigestores no Brasil e no mundo

O uso de biodigestores não é recente na história da humanidade, sendo utilizado especialmente em países asiáticos como China e Índia. Após a segunda guerra mundial, a abundante disponibilidade de petróleo a baixo custo, fez com que o desenvolvimento da tecnologia da biodigestão e uso do biogás fossem deixados de lado (FERREIRA, 2015; REIS, 2012). No entanto, a crise energética na década de 70 fez com que houvesse uma busca por novos recursos energéticos, aumentando assim, o interesse no uso de biodigestores para a produção de biogás (LUSK, 1998).

Mais recentemente, a crise ambiental, a implementação do Mecanismo de desenvolvimento Limpo (MDL), o rápido desenvolvimento econômico e a elevação no preço dos combustíveis tem contribuído no aumento nos investimentos e pesquisas no uso do biogás (SALOMON, 2007). Nas últimas três décadas, a produção doméstica de biogás teve um aumento considerado nas áreas rurais da China (CHEN; CHEN; SONG, 2012), sendo que em 2007, havia 26,5 milhões de usinas de biogás no país (CHEN et al., 2010). Na Índia em 2011 foram construídos 150.000 novas plantas de biogás alcançando o número de 4.5 milhões de unidades no país (WBA, 2013).

Os países membros da União Européia (UE) utilizam o aproveitamento energético do biogás tanto na geração térmica de energia quanto na elétrica. Na Europa, até 2014, estavam

previstas as instalações de 144 digestores anaeróbios para o tratamento da FORSU (DE BAERE; MATTHEEUWS, 2010). Na Alemanha, em 2015 o número de plantas de biogás era de 8.856, o equivalente a 4.018 MW de capacidade elétrica (SEIGNEUR et al., 2017)

No Brasil, a propagação desta tecnologia ocorreu de forma considerável no final da década de 1970, devido à alta do preço do petróleo, e pelas medidas adotadas pelo governo para diminuir a dependência dos derivados de petróleo, com um amplo Programa de Mobilização Energética - PME, na década de 1980 (FILHO, SANTANA, GATTAMORTA, 2018). Atualmente, os estados do sul, líderes na suinocultura no país, destacam-se na utilização de biodigestores como alternativa sustentável na agropecuária. A Figura 6 a seguir apresenta uma representação esquemática de uma planta de digestão anaeróbia.

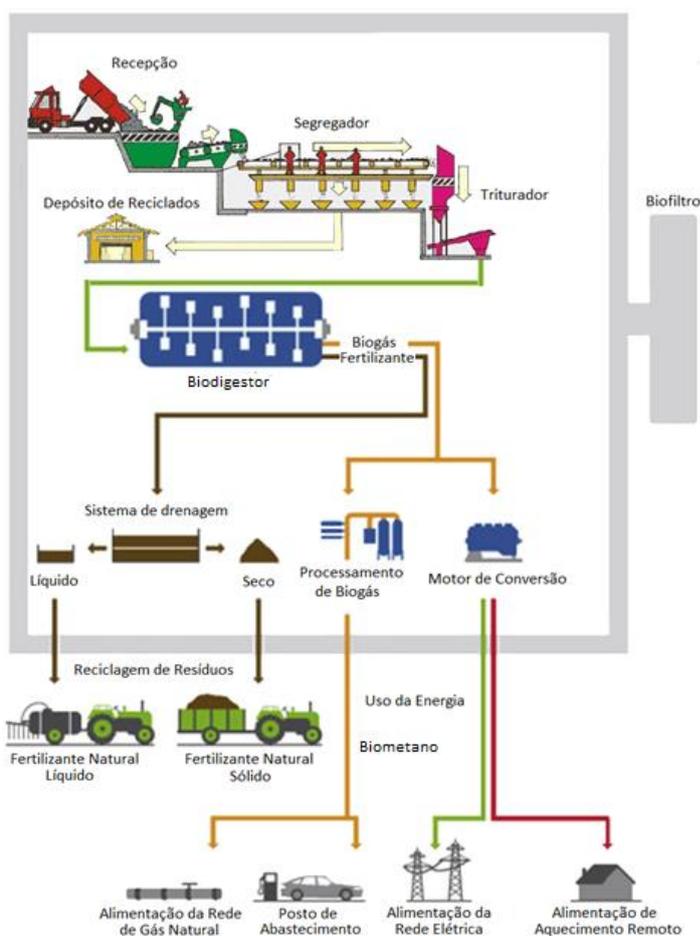


Figura 6: Esquema de uma planta de digestão anaeróbia e suas possíveis aplicações

Fonte: Elaborado a partir de Bluestem (2004) apud Li e Liew (2011) e Prefeitura municipal de São José da Varginha (2013)

As Figuras 7 e 8 apresentam exemplos de plantas industrial e piloto de biodigestão, respectivamente.



Figura 7: Plantas de digestores anaeróbios construídos na América do Norte.

Fonte: Businesswire (2019).



Figura 8: Digestor anaeróbico para a metanização de resíduos orgânicos na UFMG

Fonte: Ferreira (2015)

2.9 Geração de energia elétrica a partir do biogás

Existem diversas tecnologias que realizam o processo de conversão do biogás em energia elétrica. Conversão energética é o processo que transforma um tipo de energia em outro com um dado rendimento (SANTOS, 2015). No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica em um processo de combustão controlado (COELHO et al., 2006). De acordo com o autor supracitado, existem diversas tecnologias utilizadas para a conversão energética do biogás, sendo as mais comuns: motores de combustão interna do tipo Ciclo Otto e turbinas a gás.

2.9.1 O motor Ciclo Otto

O motor Ciclo Otto é o equipamento mais utilizado na conversão do biogás em energia elétrica (ICLEI, 2009). De acordo com Mello (2016), no motor Ciclo Otto uma mistura de ar e combustível é inflamada e queimada liberando calor, causando um aumento na pressão interna do cilindro. A pressão se transforma em trabalho mecânico pelo movimento dos pistões que é então, transmitido ao gerador (MELLO, 2016).

Dentre as vantagens da utilização destes motores na geração de energia elétrica estão uma maior vida útil, menor necessidade de manutenção, alta eficiência total, além de ser um motor projetado para a queima de combustíveis gasosos (FNR, 2010 apud BIDART, 2013).

2.9.2 Turbinas a gás

As turbinas a gás funcionam sob alta pressão, onde o ar comprimido é injetado na câmara de combustão abastecendo o sistema de oxigênio para a queima do combustível (SANTOS, 2015). De acordo com Costa (2006), há a ocorrência de uma reação exotérmica, em que a energia química do combustível é transferida para os gases, elevando sua temperatura. Na turbina, o gás resultante se expande, sendo possível a extração de energia mecânica para acionamento do compressor e da carga acoplada ao eixo. As turbinas a gás são mais resistentes a danos por corrosão quando comparados aos motores de combustão interna (MCI), apresentam menores taxas de emissões de óxidos de nitrogênio, além de serem mais compactas e apresentarem menores custos de O&M (USEPA, 2017).

2.10 Principais vantagens e desvantagens do aproveitamento energético através de aterro sanitário e biodigestores

Em um estudo desenvolvido por Kalyani e Pandey (2014), comparando diferentes tipos de práticas para o aproveitamento energético de RSU na Índia, foram apresentadas as principais vantagens e desvantagens no uso de aterros sanitários e biodigestores, tais informações estão descritas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente:

Tabela 2: Vantagens e desvantagens da Digestão Anaeróbia

Vantagens	Desvantagens
Recuperação energética e produção de fertilizante	Utilizado em resíduos orgânicos
Não é necessário o uso de energia	Necessária a separação dos resíduos para uma melhor eficiência da digestão
Sistema fechado possibilitando a captura do biogás	
Controle de emissão de GEE	
Livre de maus odores, roedores, poluição visual	
Projeto compacto, tendo como consequência menor área utilizável	
Aplicável em pequena escala	

Fonte: Kalyani e Pandey (2014).

Tabela 3: Vantagens e desvantagens do Aterro Sanitário

Vantagens	Desvantagens
Menor custo de implantação quando comparado a outras tecnologias	Pode ocorrer contaminação do solo e água pelo chorume*
O biogás produzido pode ser utilizado na geração de energia ou uso térmico	Entre 30% a 40% do biogás gerado é utilizado
Não necessita de mão de obra qualificada	É necessário uma grande área de terra
Recursos naturais são reciclados ao retornar ao solo	Custos com transporte
	Custos significativos para o pré-tratamento do gás e do chorume
	Risco de explosões

*Nota: A contaminação do solo e águas superficiais e subterrâneas são evitadas pelas observâncias às Normas ABNT NBR 13896/1997 (ABNT, 1997), NBR 8419/1996 (ABNT, 1996) e NBR 15849/2010 (ABNT, 2010).

Fonte: Kalyani e Pandey (2014)

2.11 Regulamentação para o uso e comercialização de energia na geração distribuída

2.11.1 Leilões de energia

No Brasil, os leilões são a principal forma de contratação de energia elétrica. Desta forma, concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica garantem o atendimento a todo ao Ambiente de Contratação Regulada ACR (CCEE, 2018). Os leilões são realizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), por delegação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), utilizando o critério de menor tarifa (CCEE, 2018).

2.11.2 Comercialização na minigeração e microgeração distribuída

A micro e a mini geração distribuída consiste na produção de energia elétrica que vem de pequenas fontes de geração de energia, com base em fontes renováveis como energia hidráulica, solar, eólica biomassa ou cogeração qualificada conectada à rede de distribuição

(ANEEL, 2014). Assim, a geração distribuída (GD) permite a construção de pequenas fontes de geração de energia elétrica próximas ao consumidor, reduzindo custos na geração e transmissão de eletricidade, pois a energia é gerada no local onde é consumida (MATHIAS; MATHIAS, 2015). A difusão da geração distribuída no sistema de distribuição tem se apresentado como uma alternativa para o aumento da oferta de eletricidade no Brasil (FERREIRA et al., 2018).

A resolução normativa nº 482/2012 (BRASIL/ANEEL, 2012), publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), foi a responsável pela criação de uma nova classe de consumidores/geradores conhecidos como a micro e a mini geração distribuída (BRASIL, 2012). A GD de tecnologias de energia modernas e renováveis apresenta-se como uma nova configuração para o setor elétrico (GARCEZ, 2017).

A resolução normativa 687/2015 (BRASIL/ANEEL, 2015) trouxe algumas mudanças ao que foi estabelecido na resolução normativa 482/2012 (BRASIL/ANEEL, 2012). De acordo com as novas regras a microgeração distribuída define-se como uma central geradora de energia elétrica que apresenta potência instalada menor ou igual a 75 kW, já a minigeração distribuída refere-se a uma central geradora com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada para as demais fontes de energia elétrica conectadas a rede de distribuição (BRASIL/ANEEL, 2015).

A resolução normativa 786/2017 (BRASIL/ANEEL, 2017b) também trouxe alterações na Resolução normativa 482/2012, pois a potência instalada de fontes renováveis considerada para minigeração distribuída deve ser superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW para todas as fontes. Uma outra alteração significativa feita pela resolução é que ficaram impedidos como microgeração ou minigeração distribuída as centrais geradoras que já tenham sido objeto de registro, concessão, permissão ou autorização, ou tenham entrado em operação comercial ou tenham tido sua energia elétrica contabilizada no âmbito da CCEE (BRASIL/ANEEL, 2017b).

Estas resoluções trazem o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, que permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora como micro ou minigeração distribuída seja injetada na rede da distribuidora, funcionando como uma bateria, ou seja armazenando a energia excedente (ANEEL, 2014). Se a energia injetada na rede for superior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) a ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário ou na fatura dos próximos meses, além disso, estes créditos podem ser utilizados em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma

área de concessão caracterizada como autoconsumo remoto, geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (ANEEL, 2014).

2.12 Estudos sobre a utilização da digestão anaeróbia no tratamento de resíduos sólidos urbanos

A possibilidade de se utilizar recursos renováveis que gerem menores impactos ambientais e não comprometam o desenvolvimento das gerações futuras tem ganhado importância nas últimas décadas. Neste contexto, diversas pesquisas têm sido realizadas ao redor do mundo relativas ao aproveitamento energético dos RSU. Com a diminuição dos combustíveis fósseis, é fundamental o enfoque no uso econômico sustentado de recursos existentes, assim como na identificação de novas tecnologias e recursos renováveis como por exemplo a biomassa para o fornecimento futuro de energia (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Barros, Tiago Filho e Silva (2014) realizaram um estudo para identificar o potencial de viabilidade econômica no uso de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários no Brasil, como opção de expansão de energia no país. Neste estudo foram definidas populações entre 80.000 a 500.000 habitantes atendidas pelos aterros sanitários onde foi possível determinar o potencial energético para que fosse possível realizar estudos sobre a viabilidade econômica destes empreendimentos. Os empreendimentos que se mostraram viáveis, eram aqueles que atendiam populações de no mínimo 200.000 habitantes e o potencial máximo economicamente viável está próximo de 4 TWh/ano nos cenários mais favoráveis. Os autores ressaltam a necessidade de políticas públicas para incentivar o uso desta energia para aterros que atendam às populações menores.

Mello (2016) realizou um estudo sobre o potencial de aproveitamento energético gerado em aterros sanitários no Brasil considerando diferentes faixas de população atendidas variando entre 100 mil a 20 milhões de pessoas. O estudo 1 abrangia aterros que atendiam populações entre 100 mil a 4 milhões de habitantes com potência de geração até 5000 kW, enquanto o estudo 2 referente a populações entre 5 milhões a 20 milhões, que possuem potência entre 1000 kW e 5000 kW. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, apresentando grande geração de metano, em especial aos cenários com maior índice de recuperação e população atendida.

Ferreira (2018) realizou um trabalho apresentando o estado da arte do potencial energético de biogás de aterro no estado de Minas Gerais em cada um dos dezessete Territórios de Desenvolvimento do estado, considerando o período de 2010 a 2050. No cenário otimista, considerando que todo o resíduo gerado no estado fosse enviado a aterros sanitários, a potência instalada prevista para o estado seria de 5851,11 MWh/dia para o ano de 2050, com destaque para a região Território Metropolitano, demonstrando valores de até 2.237,06 MWh/dia em 2050. O autor concluiu que o uso do biogás proveniente de aterros sanitários, além de ser uma potencial fonte de energia renovável contribui na atenuação de danos ambientais e na redução de emissão de GEE.

Santos et al. (2019) avaliaram o potencial energético a partir de RSU para o município de São José dos Campos considerando o aproveitamento energético em 4 sistemas: aterro sanitário, digestores anaeróbios e incineradores e a combinação entre incinerador e digestor anaeróbio. O aterro sanitário foi a única opção economicamente viável para a cidade. A opção de tratamentos de resíduos a partir da digestão anaeróbia apesar de ser a melhor opção para o meio ambiente não apresentou VPL positivo e a incineração foi o cenário que apresentou a maior produção de energia. Como uma das sugestões para tornar os empreendimentos viáveis seria a realização de leilões específicos, com diferentes tarifas dependendo do tipo do tipo de tratamento de RSU realizado. Os autores afirmam que apesar dos resultados positivos da utilização do biogás a partir dos aterros sanitários, o seu aproveitamento no Brasil é inexplorado. O trabalho destaca a necessidade de apoio governamental e políticas públicas que incentivem o desenvolvimento de outras alternativas de tratamento de resíduos.

Santos et al. (2018) apresentaram uma pesquisa com o objetivo de determinar o potencial de energia e das emissões a serem evitadas por meio do uso do biogás produzido a partir de diferentes tipos de resíduos orgânicos no país. Estas avaliações foram feitas considerando resíduos: de aterro sanitário, estações de tratamento de água, esterco e vinhaça. O potencial de biogás calculado no Brasil foi positivo, tendo destaque ao uso do estrume de gado, seguido pelo uso do biogás de aterro sanitário, os menores valores obtidos foram pelo aproveitamento energético de estações do tratamento de esgoto. Os valores obtidos considerando o ano de 2015 é de um potencial energético que varia de 4,5 GW a 6,9 GW, com reduções nas emissões de CO₂ de 4,93% por ano. Os autores concluíram que o uso do biogás como uma fonte de energia contribui na redução no uso de combustíveis fósseis, na redução da emissão de GEE e o contribui para o aumento na qualidade de vida nos grandes centros urbanos.

CAPÍTULO 3

Este capítulo apresenta as etapas metodológicas desenvolvidas para a obtenção dos resultados esperados para o presente trabalho.

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta para este trabalho se divide em quatro partes:

- 1) Levantamento dos aterros e/ou consórcios presentes nos estados de São Paulo e Minas Gerais, bem como das cidades a serem estudadas;
- 2) Cálculo da projeção populacional e da geração de resíduos de cada cidade;
- 3) Cálculo do potencial energético do biogás dos aterros sanitários e dos biodigestores;
- 4) Análise da viabilidade econômica dos empreendimentos de geração de energia através de RSU tanto para o aproveitamento do biogás produzido em aterro como em digestor anaeróbio.

3.1 Região Analisada

O estado de São Paulo localiza-se na região sudeste do Brasil, possui uma população de 44.269.710 habitantes distribuídos em 645 municípios, possuindo uma área total de 248.209,3 km² (SÃO PAULO, 2019). Faz divisa com os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Paraná e Mato Grosso do Sul. Além disso, é o estado mais rico do país, representando cerca de 31,5% do PIB nacional, o equivalente a R\$ 2.119.854 (10⁶ milhões de reais), referentes a 2017 (IBGE, 2019).

O estado de Minas Gerais, também está localizado na região sudeste, ocupando uma área de 586.521,121 km², com uma população de 19.597.330 habitantes, segundo dados do último censo realizado em 2010 (IBGE, 2019). A população está distribuída em 853 municípios, sendo o segundo estado mais populoso do país. Faz divisa com os estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia, Goiás, Distrito Federal e Mato Grosso do Sul. Minas Gerais é o

estado que apresenta o terceiro maior PIB do país, totalizando R\$ 576.199 (10⁶ milhões de reais), no ano de 2017 (IBGE, 2019).

Os dados da população e da geração de resíduos das cidades foram utilizados para estimar a vazão de biogás e o potencial energético de cada consórcio e/ou aterro sanitário e posteriormente, o cálculo da viabilidade econômica do uso da energia elétrica deste biogás. Para a realização deste trabalho, foram pesquisados os consórcios de aterros de gerenciamento de resíduos e/ou aterro sanitário existentes nos estados previamente citados. Para o estado de São Paulo foram analisados 39 aterros sanitários que atendem à 136 cidades paulistas. No estado de Minas Gerais, foram objeto de estudo 15 consórcios intermunicipais de gerenciamento de resíduos sólidos, abrangendo a 203 cidades mineiras.

As equações a serem apresentadas foram utilizadas como base para a rotina automática de cálculos criado no Software Scilab®, por Silva et al. (2019).

3.2 Projeção populacional

Conforme o Ministério de Meio Ambiente, Brasil (2016) e Barros (2012), para se estimar a geração futura de resíduos no horizonte do planejamento é necessário estimar a população do município no período analisado com o objetivo de possuir a população para cada ano de horizonte do projeto.

Esta etapa do estudo iniciou-se com o levantamento dos dados censitários, referentes a contagem da população de cada município estudado dos estados de São Paulo e Minas Gerais, conforme informações publicadas pelo IBGE. De posse destes dados, elaborou-se uma tabela no *Microsoft® Excel®*, com os censos populacionais dos anos de 2000 e 2010.

Para o cálculo da projeção populacional das cidades estudadas, utilizou-se o modelo apresentado por Sha'ato et al. (2007). Por este método, fez-se uma estimativa do crescimento da população por um período de 20 anos (SILVA et al., 2017; BARROS, 2012) contados a partir do ano de 2020. Para determinar a taxa anual de crescimento da população das cidades foram utilizados os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): considerando no estudo os Censo Demográficos dos anos de 1990, 2000 e 2010. A metodologia utilizada para o cálculo da projeção populacional é apresentada na equação (1):

$$P_n = P_0 (1 + r)^n \quad (1)$$

Onde:

P_n = é a população calculada no período de projeção;

P_0 = é a população inicial;

r = taxa anual de crescimento da população calculado com base nos dados históricos dos censos demográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010);

n = período de projeção dado em anos.

Vale ressaltar que o ano de 2019 foi considerado o ano abertura do aterro, 2020 o começo da deposição dos resíduos e geração de biogás até 2040, o ano de encerramento do aterro.

Para o estado de São Paulo, a geração de resíduos sólidos foi calculada a partir dos dados disponibilizados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo CETESB (2017). Este documento apresenta os dados de todas as cidades estudadas, relativos à produção de RSU dados em (t/dia) referentes ao ano de 2017. Em relação ao estado de Minas Gerais, o cálculo da geração de resíduos foi obtido por meio dos dados da geração per capita disponibilizados pelo SNIS (2019). A quantidade de resíduos gerados em cada cidade foi calculada multiplicando a geração per capita pela população em cada ano.

A projeção per capita para os anos posteriores a 2017, foi feita assumindo uma taxa de crescimento anual do índice de geração de resíduos de 0,5%, conforme sugerido por Pin et al. (2018). Com base nestes dados, pôde-se calcular a geração total de resíduos (em toneladas por ano) de cada município ao longo do período de projeção. Posteriormente, foi possível calcular a quantidade de resíduos referentes a cada empreendimento, que é dado pela soma anual de cada cidade integrante. Os dados obtidos foram utilizados para estimar o potencial energético dos aterros sanitários e dos biodigestores.

3.3 Estimativa do biogás a ser produzido

Após a soma, dos dados referentes de cada unidade, estimou-se a produção de biogás em cada um por meio da rotina desenvolvida por Silva et al. (2019).

3.3.1. Aterro sanitário

Existem diferentes modelos disponíveis para determinar a produção de biogás em aterros sanitários e quantificar a energia gerada, por meio da utilização do metano. De acordo com Santos (2015), os modelos de geração de biogás de aterro sanitário baseados em equações de decaimento de primeira ordem são os mais utilizados, como os modelos desenvolvidos pela agência americana de proteção ambiental (USEPA, 2005), utilizada no *software* LandGEM®, equação 2, e pela Agência Intergovernamental de Painel sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006), equação 3 para o cálculo de emissões de biogás proveniente de aterros sanitários e aplicada pela Companhia de Tecnologia Ambiental CETESB (2005).

Os resultados obtidos podem ser utilizados para avaliar o potencial de emissões de GEE, bem como a viabilidade de projetos de aproveitamento do biogás (SILVA, 2012). Nesta etapa, a geração de metano proveniente de RSU depositado em aterros foi estimada por meio da equação 3 também utilizada na rotina de Silva et al. (2019).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] e^{-kt_{ij}} \quad (2)$$

$$\sum Q_x = k \cdot L_0 \cdot \sum (R_x \cdot e^{-k(x-T)}) \quad (3)$$

Onde:

k = taxa de decaimento (ano^{-1});

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

M_i = massa de resíduos aportada ao aterro no ano i ; (USEPA, 2005);

Q_x = Fluxo de metano no ano x gerado pelos resíduos depositados no ano inicial t ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$);

Q_{CH_4} = vazão anual de metano;

R_x = fluxo de resíduos no ano (t/ano);

$\sum Q_x$ = soma das estimativas da vazão de metano;

x = ano atual. (CETESB, 2006b e IPCC, 1996);

T = ano de deposição do resíduo (ano) (CETESB, 2006b).

Os valores de k e L_0 , foram obtidos com base nos dados de World Bank (2004), conforme as Tabelas 4 e 5 a serem apresentadas a seguir. Para a variável k foi considerado o valor de $0,06 \text{ ano}^{-1}$, estimado para locais com precipitação acima de 1000mm (NERY; SILVA; CARFAN, 2004) e para L_0 , o valor de $170 \text{ m}^3/\text{t}$ (média entre os valores máximo e mínimo). Em seguida, com base nos resultados obtidos, foi possível calcular a potência disponível em cada unidade.

Tabela 4: Valores sugeridos de k conforme as precipitações anuais correspondentes do local

Precipitação Anual (mm)	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
<250	0,01	0,02	0,03
250-500	0,01	0,03	0,05
500-1000	0,02	0,05	0,08
>1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: World Bank (2004).

Tabela 5: Valores sugeridos de L_0 por conteúdo de resíduos orgânicos

Categoria de RSU	Valor mínimo de L_0	Valor máximo de L_0
Resíduo relativamente inerte	5	25
Resíduo moderadamente degradável	140	200
Resíduo altamente degradável	225	300

Fonte: World Bank (2004).

3.3.2. Biodigestores

Para os digestores anaeróbios a estimativa do biogás produzido foi feita com base em Santos et al. (2019), considerando digestores anaeróbios mesofílicos. A quantidade de resíduos orgânicos gerados foi estimada pela equação 4. Em relação a quantidade de biogás produzido e coletado no biodigestor, este foi calculado de acordo com as equações 5 e 6, conforme apresentado por Santos et al. (2019):

$$R_o = R \cdot F_o \quad (4)$$

$$Q_{BG} = R_o \cdot I_{BG} \quad (5)$$

$$Q_{Col} = Q_{BG} \cdot E_{Col} \quad (6)$$

Onde:

R_o = quantidade de resíduos orgânicos gerados (t/ano);

R = resíduos gerados (t/ano);

F_o = porcentagem da fração de resíduos orgânicos;

Q_{BG} = quantidade de biogás produzido (m^3 /ano);

I_{BG} = quantidade média de biogás produzido (m^3 /t);

Q_{Col} = quantidade de biogás coletado (m^3 /ano);

E_{Col} = eficiência de coleta (%);

Como dados de entrada, a porcentagem da fração de resíduos orgânicos foi considerada como sendo de 51,4% (BRASIL, 2012). O parâmetro I_{BG} adotado foi de $150 m^3/t$ de biogás conforme Henríquez (2016) e considerando um conteúdo de metano de 65%, conforme Santos et al. (2019). O parâmetro E_{col} foi considerado como sendo de 90% (adaptado de Faulhaber, Raman e Burns, 2012).

3.4 Estimativa do aproveitamento energético

Para estimar o potencial de energia elétrica a partir do biogás gerado, é necessário levar em consideração fatores como: a vazão de gás, o poder calorífico inferior (PCI) do metano, a eficiência de coleta de biogás no aterro e a eficiência da tecnologia de conversão a ser utilizada, que neste estudo foi considerado o motor ciclo Otto.

A partir destes dados, torna-se possível determinar a potência disponível em cada unidade, onde para o cálculo será considerado apenas o biogás coletado. Estes fatores são utilizados para determinar a potência disponível, obtida por meio da equação 7 (modificado de CETESB, 2006b; apud Barros, 2012) e a energia a ser gerada, por meio do motor Ciclo Otto de

acordo com a equação 8 (SANTOS; BARROS; TIAGO FILHO, 2018a), e modelado no Scilab® por Silva et al. (2019):

$$P = Q_{CH_4} \cdot E \cdot E_c \cdot P_{cCH_4} \cdot \left(\frac{1}{365.24.3600} \cdot \frac{1}{1000} \right) \quad (7)$$

$$En = P \cdot f_c \cdot 8760 \quad (8)$$

Onde:

P= Potência disponível por ano (kW);

Q_{CH_4} = Vazão de metano por ano (m^3CH_4 /ano);

P_{cCH_4} = Poder calorífico do metano (J/m^3CH_4);

E_c = Eficiência de coleta de biogás (%);

E= Eficiência da tecnologia de conversão (%);

$1/365.24.3600$ = número de segundos em 1 ano ($s \cdot ano^{-1}$);

$1/1000$ = para transformação da unidade de $J \cdot s^{-1}$ para kW;

f_c = fator de capacidade;

8760= número de horas por ano;

En = Energia disponível anualmente (kWh/ano).

Considerando a opção de aterro sanitário, para a aplicação da equação 7, foram considerados os seguintes parâmetros para o aproveitamento energético do biogás: PCI do metano no valor de $35,5 \cdot 10^6$ (J/m^3CH_4) (PIÑAS et al., 2016), motor Ciclo Otto de combustão interna com eficiência considerada de 33% (PECORA, 2006; BOVE; LUNGHI, 2006) e a eficiência de coleta de biogás de 55,5%, considerando a média encontrada em estudos (SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013; WATERMOLEN, 2012). O fator de capacidade foi considerado de 80% (SANTOS; BARROS; TIAGO FILHO, 2018a).

Para a opção de digestores anaeróbios foram considerados os parâmetros: tecnologia de conversão (motor Ciclo Otto), o fator de capacidade e o PCI do metano foram os mesmos adotados para o aterro sanitário. Por outro lado, a eficiência de coleta de biogás foi considerada de 90%, conforme Santos et al. (2019).

Na análise energética um importante parâmetro a ser analisado é a potência ótima de atuação, que é definida como a potência que gera a maior produção de energia. Conforme Santos et al. (2018), esta potência é obtida por meio da determinação da potência a ser instalada no aterro sanitário que resulte na maior produção possível de energia.

O aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários foi planejado por meio do método escalonado proposto por Santos (2015) e por Santos, Barros e Tiago Filho (2018b). Este método é constituído pela aplicação de grupos geradores operando a plena carga, funcionando somente no período de tempo em que estes podem ser totalmente supridos pelo biogás produzido no aterro. De acordo com CEPTEL (2001 apud Mello Jr e Fagá, 2005), o rendimento de motores a gás diminui quando estes operam a carga parcial. Por exemplo em um modelo de motor a gás apresentado pelos autores supracitados, o rendimento cai em 10% do total quando se trabalha com uma carga parcial de 60%, ao invés de uma carga plena de 100%. A escolha da potência do primeiro grupo gerador corresponde à potência, que quando combinada com o tempo de disponibilidade da vazão de biogás para suprimento deste gerador (Δt), resulta na máxima produção energética (SANTOS, 2015).

A metodologia de Santos, Barros e Tiago Filho (2018b) foi modelada na rotina em Scilab® por Silva et al. (2019). Embora Santos, Barros e Tiago Filho (2018b) tenham proposto o escalonamento de até 3 geradores, o presente trabalho realiza os cálculos com um único grupo gerador, devido ao melhor desempenho econômico deste cenário no estudo anteriormente citado. A Figura 9 exemplifica a potência ótima para o suprimento do gerador a ser utilizado. Onde a curva vermelha representa a potência e a curva azul a energia gerada. Desta forma, a máxima energia gerada pela potência ótima é a que se encontra no pico da parábola azul.

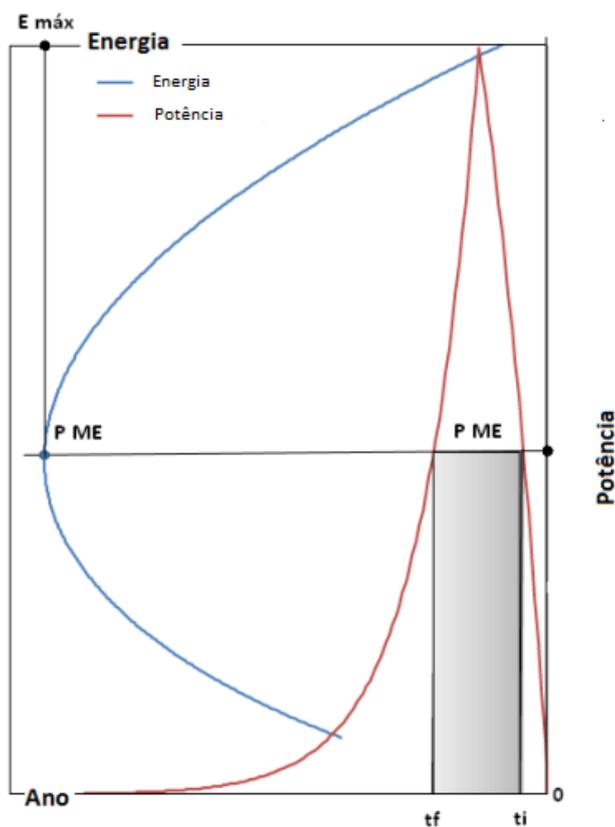


Figura 9: Exemplo de potência ótima e energia máxima

Fonte: Santos, 2015.

Após a obtenção dos dados energéticos obtidos por cada sistema estudado foi possível calcular as emissões de gases de efeito estufa (GEE) evitadas. Para este cálculo, o valor padrão do fator de emissão de CO₂, tendo o biogás como combustível de biomassa utilizado foi de 83,6 kgCO₂/GJ (NIELSEN; NIELSEN; PLEJDRUP, 2014). Em 2019, o fator médio de emissão anual foi de 0,5181 tCO₂/MWh, de acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (BRASIL, 2020a). A equação 9, foi utilizada para os cálculos (Brito et al.,2019).

$$GEE_{evitados} = E_{anual} \cdot (GEE_{biogás} - GEE_{SNIS}) \quad (9)$$

Onde:

GEE_{evitados} = emissões de GEE evitados com o uso de energia renovável;

$GEE_{\text{biogás}}$ = valor padrão do fator de emissão de CO₂;

GEE_{SNIS} = fator médio de emissão anual.

3.5 Análise da viabilidade econômica

A análise econômica relativa aos dois sistemas foi feita separadamente no *Microsoft Excel*®. Para verificar a viabilidade econômica dos empreendimentos propostos é necessária uma análise de todos os custos envolvidos nos empreendimentos como o investimento inicial, os custos anuais relativos a operação e manutenção (O&M), bem como os benefícios obtidos por meio da venda da energia excedente, sendo uma etapa de suma importância para a tomada de decisão. Para ambos os cenários, toda a energia gerada pelos empreendimentos foi considerada nos cálculos econômicos, o que nem sempre é o ideal.

Conforme os dados obtidos pelas etapas anteriores, foi possível efetuar os cálculos financeiros relativos a ambas tecnologias de gerenciamento e aproveitamento energético de RSU. Na análise econômica foram considerados os parâmetros valor presente líquido (VPL) e o custo nivelado de energia (LCOE, em Inglês) conforme Branker et al., (2011). Além disso, outro parâmetro analisado foi a Taxa Interna de Retorno (TIR). A equação do VPL está apresentada, conforme equação 10.

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{(E_n \cdot T) - C_{o\&m}}{(1+i)^n} - I \quad (10)$$

Sendo:

E_n = energia gerada no período t a partir da potência ótima;

m = vida útil do projeto (anos);

T = tarifa de venda de energia em R\$/MWh;

i = taxa de juros;

$C_{O\&M}$ = custos de operação e manutenção;

I = Investimento inicial;

n = ano de análise.

O cálculo do LCOE relaciona a energia gerada pelo empreendimento e os custos envolvidos, ao longo do período de vida útil do projeto, e representa o custo mínimo de receita a ser obtido por MWh para cobrir as despesas referentes aos custos de operação e manutenção, os investimentos, juros e a remuneração dos investidores (NAKABAYASHI, 2014). O LCOE, é encontrado por meio da equação 11:

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=0}^m \frac{C_n}{(1+i)^n}}{\sum_{t=0}^m \frac{E_n}{(1+i)^n}} \quad (11)$$

Onde:

C_n = custos no período t (igual ao investimento inicial no ano 0 e ao custo de operação e manutenção nos anos posteriores);

E_n = energia produzida anualmente;

i = taxa de juros;

m = vida útil do projeto (anos);

n = ano de análise.

A TIR é a taxa que o investidor obtém, a cada ano sobre os capitais investidos no projeto, enquanto o investimento inicial é recuperado gradativamente, ou seja, o TIR é utilizado para determinar a taxa de rentabilidade mínima que torna um projeto viável sendo normalmente utilizada conjuntamente com o VPL (MENDES, 2017). Matematicamente, a TIR é a taxa de atualização do projeto que dá o VPL nulo (MENDES, 2017), equação 12, onde o valor é substituído na equação 13.

$$\text{TIR} \Rightarrow \text{VPL} = 0 \quad (12)$$

$$\text{VPL} = \sum_{t=1}^m \frac{(E_n \cdot T) - C_{o\&m}}{(1+\text{TIR})^n} - I \quad (13)$$

Se $\text{TIR} > i$, o projeto é viável;

Se $TIR < i$, o projeto é desfavorável;

Se $TIR = i$, é indiferente aceitar ou não o projeto (MENDES, 2017).

Para o aproveitamento energético em ambas tecnologias, a taxa de juros adotada foi de 10% a.a. (PEREIRA; SANTOS; SANTOS, 2018), os custos relativos à O&M foram considerados como 5% em relação ao investimento inicial (LOPES, 2017). O tempo adotado para o funcionamento de uma usina de biogás foi considerado de 15 anos, pois no estudo não foram considerados fatores como o tratamento de sulfetos no processo, o que diminui a vida útil do projeto. Na primeira análise (Cenário 1), os aterros e consórcios foram considerados no sistema de geração distribuída, no caso a micro e mini geração distribuída, no sistema de compensação de energia conforme a Resolução ANEEL 482/2012 modificada pela Resolução ANEEL 687/2015. Neste cenário, a energia destes empreendimentos pode ser injetada na rede distribuidora. Desta forma, os VPLs foram analisados, conforme a tarifa aplicada pelas companhias de distribuição dos estados. Em Minas Gerais, o valor da tarifa adotado foi o aplicado pela CEMIG, com o valor da tarifa de fornecimento de R\$ 628,33/MWh (ANEEL, 2020). Para o estado de São Paulo, fez-se uma média das tarifas realizadas pelas sete concessionárias de distribuição de energia elétrica presentes no estado, encontrando um valor de R\$ 518,77/MWh (ANEEL, 2020).

Para uma segunda análise (Cenário 2), os VPLs dos empreendimentos foram analisados conforme a tarifa praticada no mercado cativo de energia, sendo que o preço de venda de energia foi considerado de 311 R\$/MWh, valor obtido conforme o Leilão de Geração de Energia A4/2019, nº 3 de 2019 (EPE, 2019a), conforme mostra a Figura 10. A taxa de conversão utilizada é de R\$ 4,183 para USD (cotação do dia 22/11/2019; Banco Central do Brasil, 2020b).

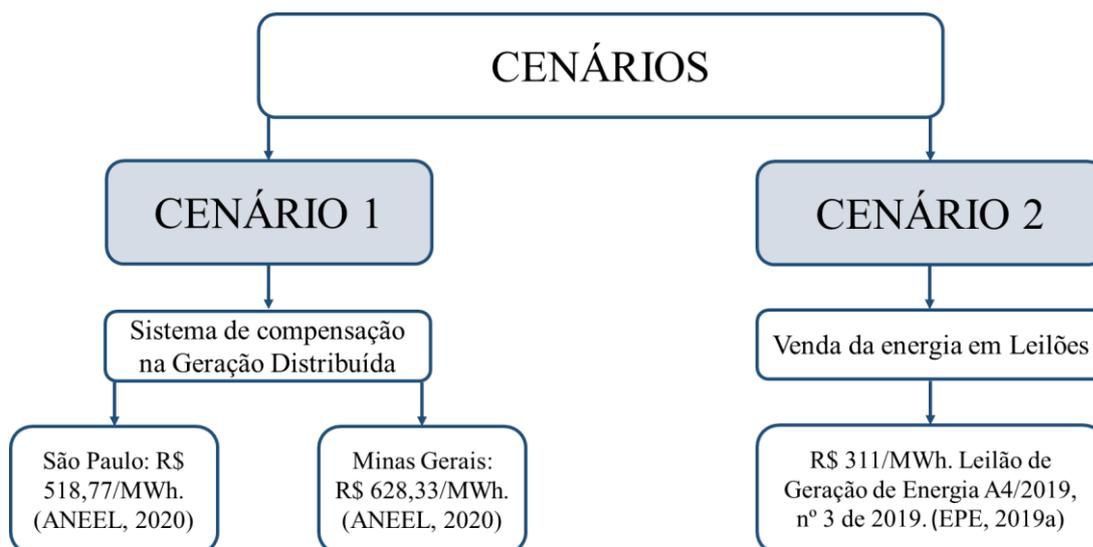


Figura 10: Cenários estudados

Fonte: Elaborada pelo autor

No cálculo da viabilidade econômica, para se obter o investimento inicial, foram considerados nos cálculos os equipamentos necessários para a captação e uso do biogás. O investimento inicial foi calculado conforme estudos desenvolvidos por Santos et al. (2015) que estabelece uma relação entre a potência e o investimento, Figura 11, de uma usina utilizando motores de combustão interna (MCI) e o custo dos seguintes componentes: queimador, gasômetro, compressor, gasoduto, drenos, tubulação de coleta e o tratamento, conforme equação 14:

$$I = 0,008.P + 0,520 \quad (14)$$

Sendo:

I= investimento total da usina (milhões de R\$);

P= potência ótima (kW).

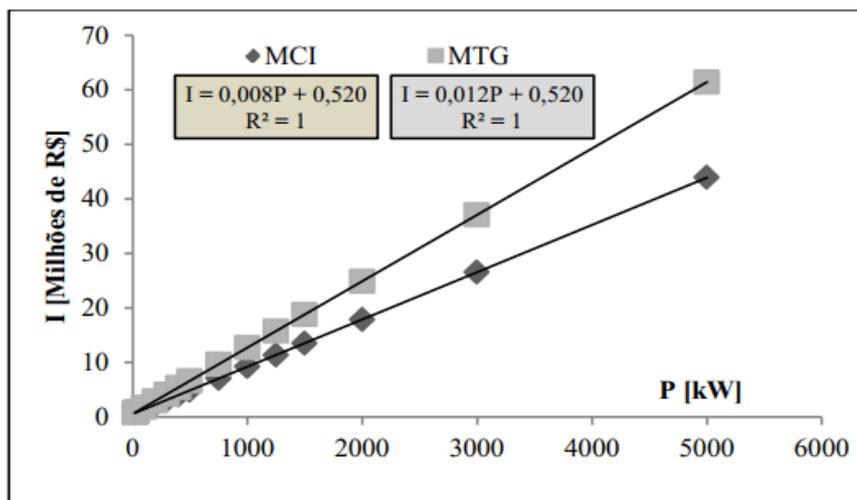


Figura 11: Relação entre Investimento e Potência

Nota: MCI: Motores de combustão interna e MTG: Microturbinas a gás

Fonte: Santos et al. (2015)

No caso do digestor anaeróbio, além dos componentes básicos presentes no aterro há também a presença de segregador, triturador, utilizados na etapa de pré-tratamento dos resíduos e o próprio biodigestor. Os custos relativos ao triturador e ao segregador foram baseados conforme nos preços praticados por Alibaba (2020a) e Alibaba (2020b), os custos relativos à implantação do biodigestor foram considerados como 20% do investimento inicial, conforme sugerido por Probiogás (2015).

Primeiramente determinou-se a produção por ton/h em cada empreendimento. Com posse destes dados foi possível dimensionar o empreendimento conforme as informações disponibilizadas pelo fabricante. Os aterros e/ou consórcios foram classificados, de acordo com suas produções de resíduos, buscando o dimensionamento de menor custo econômico e energético. Os valores foram atualizados em reais, conforme a cotação R\$ 4,183 (cotação do dia 22/11/2019; Banco Central do Brasil, 2020b). A energia utilizada para o funcionamento do triturador e do segregador, foi descontada anualmente da energia gerada pelo empreendimento. Os dados utilizados para os cálculos econômicos e energéticos estão apresentados nas Tabelas 6 e 7:

Tabela 6: Parâmetros econômicos e energéticos referentes ao segregador

Vazão (ton/h)	Potência (kW)	Investimento (\$)
5	1,5	\$ 1.200,00
10	2	\$ 1.350,00
20	2	\$ 1.630,00
50	3	\$ 2.490,00
100	4	\$ 3.924,00
160	5,5	\$ 5.645,00
200	6,5	\$ 6.792,00
250	7,5	\$ 8.226,00
350	11	\$ 11.094,00
450	15	\$ 13.962,00
600	22	\$ 18.264,00
800	30	\$ 24.000,00

Elaborado a partir de dados disponibilizados por Alibaba (2020a)

Tabela 7: Parâmetros econômicos e energéticos referentes ao Triturador

Vazão (ton/h)	Potência (kW)	Investimento (\$)
1	15	\$ 21.000,00
2	22	\$ 25.333,00
4	44	\$ 34.000,00
10	88	\$ 60.000,00
15	90	\$ 81.667,00
30	132	\$ 146.667,00
45	180	\$ 211.667,00
55	264	\$ 255.000,00
70	315	\$ 320.000,00

Elaborado a partir de dados disponibilizados por Alibaba (2020b)

Outro custo considerado nos cálculos dos dois sistemas analisados foi a troca do motor a ser realizada no oitavo ano do empreendimento, ou seja, no sétimo ano, além dos custos relativos a O&M foi adicionado o custo referente ao motor, conforme valor obtido por (SANTOS et al., 2015), onde o valor foi corrigido para novembro de 2019 com base na calculadora do cidadão do Banco Central Brasileiro (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2020a).

No caso dos biodigestores os cenários foram divididos em 2 tipos: a situação A, considerando um dimensionamento do projeto para a potência alcançada no primeiro ano dos empreendimentos estudados, neste caso, o projeto tende a ter um investimento menor, pois o motor a ser considerado, atenderá uma menor potência; e a situação B onde dimensionou-se os empreendimentos para atender a potência a ser gerada no décimo quinto ano do estudo, onde o projeto terá um custo maior, pois o motor a ser considerado, atenderá a uma maior potência, já que é previsto com base no ano final, ano que tende a atender a uma maior quantidade de resíduos. A Figura 12, exemplifica as duas situações:

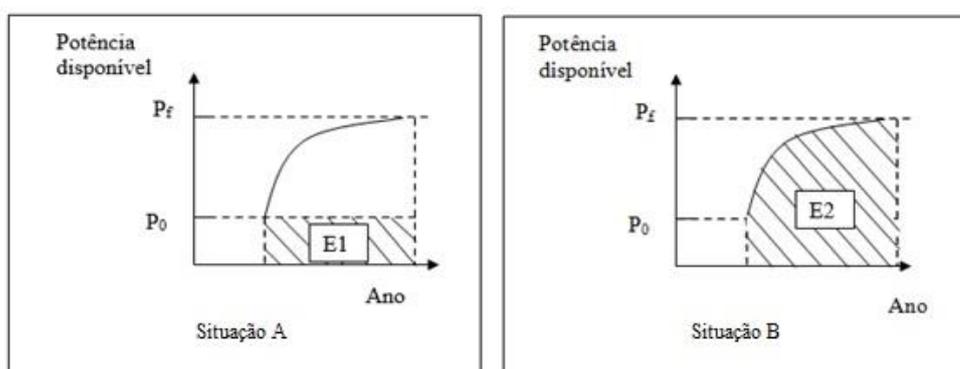


Figura 12: Potência disponível considerando a potência do ano inicial (situação A) e a potência do décimo quinto ano (situação B)

Fonte: Piva (2019)

Após a realização do estudo econômico para cada sistema de gerenciamento de RSU estudado, fez-se uma análise de sensibilidade considerando os parâmetros analisados: investimento inicial, tarifa de energia, custos de operação e manutenção e os custos relativos a troca do motor, com a finalidade de apresentar o impacto da variação dos preços destes parâmetros no VPL dos empreendimentos estudados. Para esta análise os parâmetros foram submetidos a variações gradativas de 10%, que variaram de 70% a 130% do seu valor original (Santos et al., 2019), tendo como base o VPL do cenário 2.

3.6 Aplicação dos dados no algoritmo no Scilab®

A metodologia apresentada das seções 3.2 a 3.4, foi utilizada para o desenvolvimento do algoritmo no *software* Scilab® por Silva et al. (2019), no intuito de gerar informações sobre o potencial energético dos empreendimentos estudados. O algoritmo criado por Silva et al. (2019), foi o escolhido para o presente trabalho pois possibilita em um só programa a obtenção de dados referentes a projeção populacional, geração de resíduos, vazão de metano e de biogás, potência, bem como a análise econômica dos empreendimentos estudados, diferentemente dos outros programas disponíveis, que apenas apresentam a análise energética.

3.7.1 Sobre o Scilab®

O Scilab® é um *software* livre e de código aberto para a computação numérica que fornece um poderoso ambiente de computação para aplicações científicas e de engenharia, estando disponível para *download* gratuitamente (SCILAB, 2020). Sua versão mais atual é a 6.0.2. É um software com centenas de funções matemáticas, linguagem de programação que permite acesso a estruturas avançadas de dados e funções gráficas 2D e 3D. Este *software* tem sido utilizado por diferentes autores para análises energéticas, podendo citar trabalhos como COSTA, SANTOS e MENSAH (2018) e RESENDE (2013). O algoritmo utilizado no presente trabalho foi preparado por Silva et al. (2019) no *software* Scilab® e foi aplicado para o estudo dos aterros e consórcios estudados.

O Scilab® permite que o usuário insira dados de entrada referentes a análise do estudo apresentado. Para este trabalho, alguns dados foram inseridos por meio do uso de uma planilha do *software* Excel®. Esta planilha continha dados de entrada das populações dos Censos Demográficos referentes aos anos de 1990, 2000 e 2010, como também a produção de resíduos referente a cada cidade. Outra forma de entrada de dados é a inserção de parâmetros que são solicitados no início da utilização do programa.

3.7.2 Dados de entrada

As equações utilizadas na rotina baseiam-se nas equações de 1 a 11. Os dados de entrada utilizados para gerar a solução do algoritmo no Scilab® estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Dados de entrada

Parâmetro	Valor
População referente ao ano 2000	Censo demográfico 2000 (IBGE, 2010)
População referente ao ano 2010	Censo demográfico 2000 (IBGE, 2010)
Crescimento anual de geração de RSU (%)	0,5% como em Pin et al. (2018)
Constante de decaimento(t/ano)	0,06 (WORLD BANK, 2004)
Potencial de geração de biogás (m ³ /ton)	170 (WORLD BANK, 2004)
Ano atual	2019
Porcentagem da FORSU (%)	51,4% (BRASIL, 2012)
Quant. média de biogás produzido (m ³ /ano)	119 (HENRÍQUEZ, 2016)
Eficiência de coleta de biogás no biodigestor (%)	90% (adaptado de FAULHABER, RAMAN E BURNS (2012))
Poder calorífero do metano (J/m ³)	35,5. 10 ⁶ (PIÑAS et al., 2016)
Eficiência da tecnologia de conversão (%)	33% (PECORA, 2006; BOVE; LUNGHI, 2006)
Eficiência de coleta de biogás no aterro (%)	55,5% (SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013; WATERMOLEN, 2012).
Fator de capacidade	80% (SANTOS; BARROS; TIAGO FILHO, 2018a).

Fonte: Elaborado pelo autor

3.7.3 Dados de saída

Os dados de saída gerados após a solução do algoritmo em Scilab® estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Dados de saída após a solução do algoritmo em Scilab®

Parâmetro	Valor
Estimativa do crescimento populacional anual	Nº de habitantes no período de 20 anos
Estimativa da geração de resíduos anual	(ton/ano)
Estimativa do biogás a ser gerado anualmente no aterro sanitário	período de 20 anos (m ³ /ano)
Estimativa da potência disponível anualmente no aterro sanitário	100 anos (kW/ano)
Potência ótima do aterro sanitário	(kW/ano)
Energia disponível no aterro sanitário	(kWh/ano)
Quantidade de resíduos orgânicos gerados anualmente	(ton/ano)
Estimativa do biogás produzido no biodigestor	(m ³ /ano)
Estimativa da potência disponível no biodigestor	(kW/ano)

Fonte: Elaborado pelo autor

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Cidades constituintes dos aterros

4.1.1 Estado de São Paulo

Segundo informações da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2018) constatou-se a presença de 39 aterros ativos no estado no ano de 2017, atendendo a 136 cidades paulistas. As informações estão apresentadas no Anexo A no final do trabalho.

4.1.2 Estado de Minas Gerais

De acordo com dados disponibilizados pela Fundação Estadual do Meio Ambiente, FEAM (2018), no ano de 2017, haviam 16 consórcios intermunicipais em operação no estado de Minas Gerais, abrangendo 203 cidades mineiras. No entanto, as cidades constituintes de um dos consórcios não utilizam o mesmo para o depósito de seus resíduos, mas sim outros empreendimentos, desta forma estas cidades foram consideradas nos outros consórcios, sendo analisados no presente estudo 15 consórcios intermunicipais de RSU. Das 203 cidades, 12 cidades depositavam seus resíduos em mais de um local; neste caso, a quantidade de resíduos gerada foi dividida igualmente entre os locais. Outro destaque é que 9 cidades, apesar de estarem inclusas no consórcio não dispunham seus resíduos nos empreendimentos compartilhado pelo consórcio, sendo, portanto, desconsideradas no estudo. Além disso, as cidades que não fazem parte de consórcio, mas que utilizam o empreendimento do mesmo para depositar seus resíduos foram consideradas nos cálculos. As informações dos consórcios em operação, estão apresentadas no Anexo B.

4.2 Projeção populacional

4.2.1 Estado de São Paulo

Com o a aplicação dos dados do IBGE na rotina de Silva et al. (2019), no método de projeção populacional escolhido, equação 1, foi possível elaborar os gráficos. De modo a facilitar a visualização e análise dos dados, a partir deste tópico, os resultados a serem apresentados graficamente são o do total obtido por cada estado e do consórcio ou aterro que atende a maior população. Desta forma, a Figura 13, apresenta o crescimento populacional referente a população a ser atendida pelos aterros no estado de São Paulo e a Figura 13, mostra o crescimento populacional esperado para o aterro 7, que é o aterro que atende a maior população no estado.

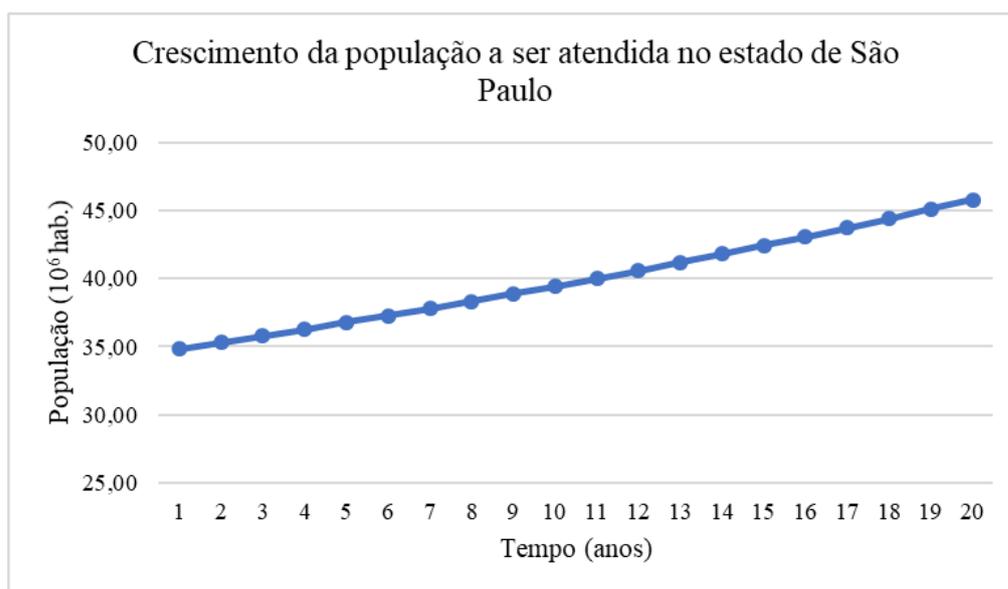


Figura 13: Crescimento populacional esperado pela população atendida pelos aterros estudados

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Pelo gráfico da Figura 13, pode-se notar que a população a ser estudada, terá um crescimento considerado durante os 20 anos de estudo, passando de uma população de 34.845.191 hab. para 45.586.347 hab.. Este crescimento expressivo se deve a presença da cidade de São Paulo no estudo, bem como outras cidades com populações elevadas como

Sorocaba, Osasco, Campinas e São Bernardo do Campo. A população da maioria dos aterros possui uma tendência de crescimento, sendo que a população dos aterros 3 e 30 estão decrescendo; no entanto, por atenderem pequenas populações, estes resultados não interferiram no resultado do estado. A informações referentes a população atendida pelo aterro sanitário 7 estão apresentadas na Figura 14.

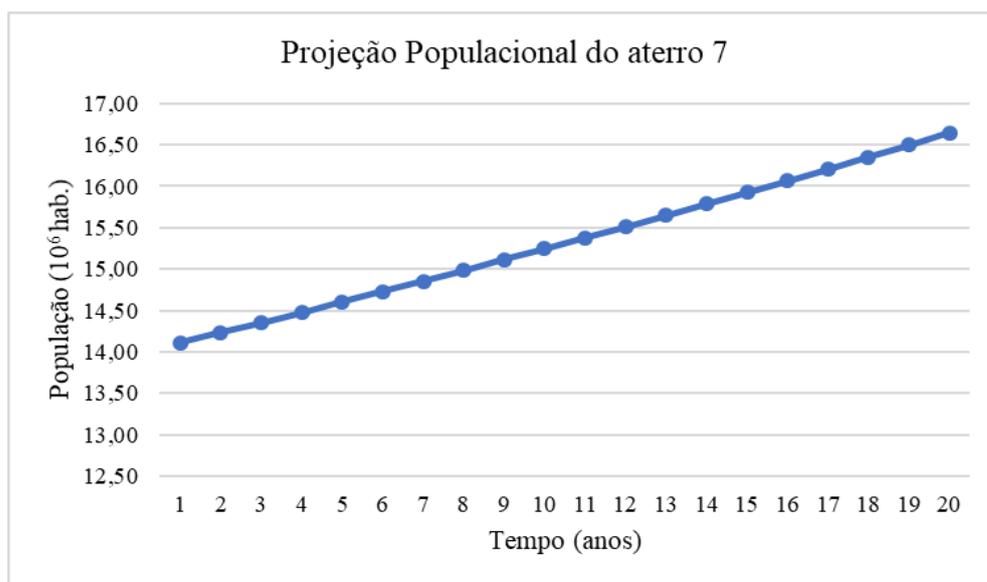


Figura 14: Projeção populacional do aterro 7

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

De acordo com as informações obtidas pela Figura 14, o aterro 7 é o que possui a maior população atendida, como também é o que apresenta o maior crescimento populacional, passando de 14.112.107 hab. em 2020 para 16.641.544 hab. no vigésimo ano.

Para estimar a quantidade de RSU em um aterro deve-se considerar o crescimento populacional previsto durante os 20 anos de funcionamento do aterro. Deste modo, com base nos valores obtidos pela projeção populacional, foi possível estimar a geração anual de RSU levando em consideração a quantidade de resíduos gerados em cada cidade. A Figura 15, apresenta a geração de resíduos de todos os aterros. Já as informações referentes a quantidade anual de RSU estimada para o aterro 7 estão apresentadas na Figura 16:

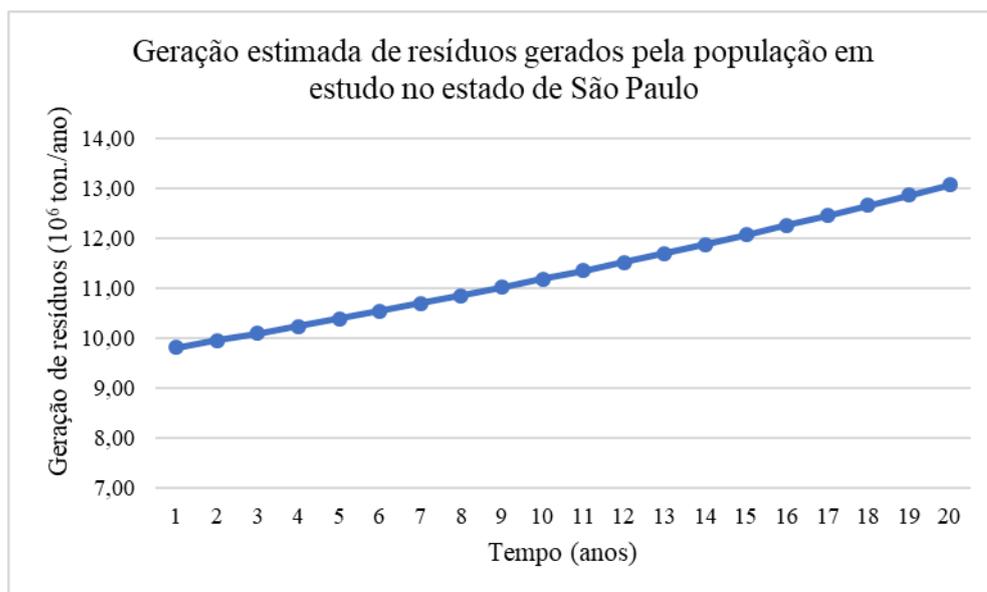


Figura 15: Geração anual de RSU estimado para as cidades estudadas no estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

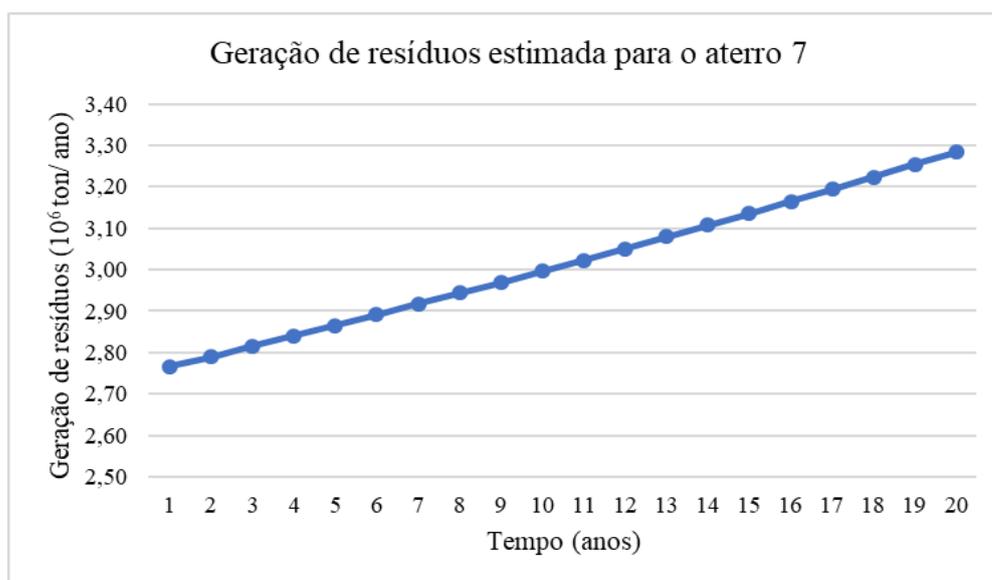


Figura 16: Geração anual de RSUs anual no aterro 7 no estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Segundo a análise, em 2020, a geração total dos aterros paulistas é estimada em 9,8 milhões toneladas alcançando o valor de $13 \cdot 10^6$ ton/ano no ano final do estudo. Já o aterro sanitário 7 possui a estimativa de atingir o montante $3,3 \cdot 10^6$ toneladas no vigésimo ano. Para encontrar uma relação entre a geração de resíduos com a população, fez-se uma análise linear

obtendo a equação 15, com um coeficiente de determinação de 0,9323, conforme mostra a Figura 17:

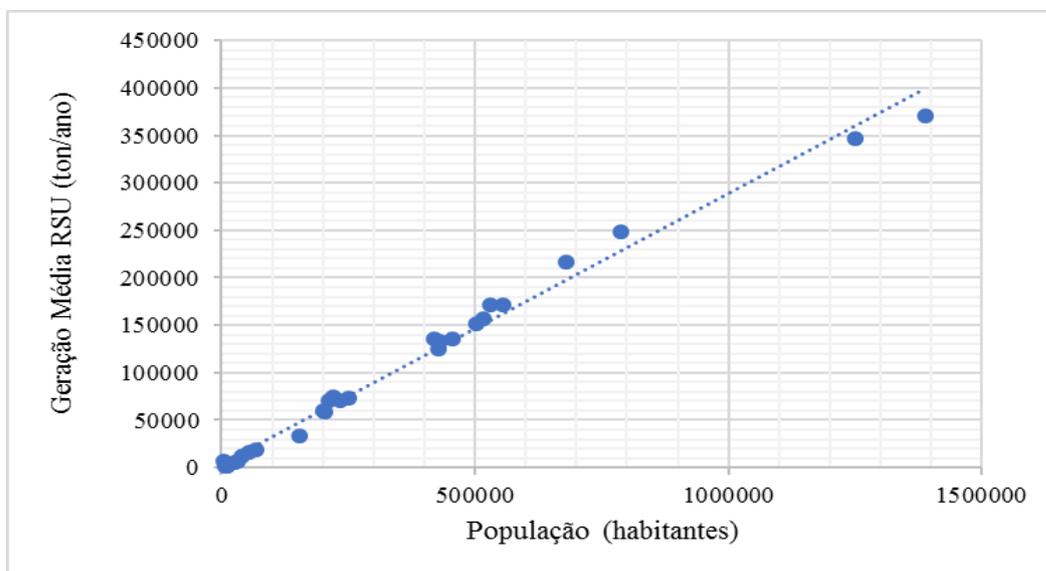


Figura 17: Relação entre população e geração de resíduos para o estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor

$$RSU \left(\frac{ton}{ano} \right) = 0,2112[pop. (hab.)] + 74250 \quad (15)$$

$$R^2 = 0,9323$$

Nesta etapa, verificou-se uma variação na geração de resíduos entre os aterros estudados, ou seja, alguns aterros, que apesar de atenderem populações inferiores a outros aterros, produzem uma quantidade anual de resíduos superior. Como exemplo, é possível comparar os aterros 30 e 20. O aterro 30, apesar de atender a uma população inferior em média de 2 mil habitantes, gera uma quantidade de resíduos duas vezes maior. Isto ocorre devido ao fato de que uma das cidades do aterro possui uma geração diária de resíduos alta quando comparado as cidades do aterro 20, ao analisar as informações disponibilizadas pela Cetesb (2018). As informações referentes a geração de resíduos dos outros aterros estão apresentadas no Apêndice A.

4.2.2 Estado de Minas Gerais

Para o estado de Minas Gerais é previsto um pequeno aumento na população atendida pelos consórcios intermunicipais de aterros se comparada a população dos aterros do estado de São Paulo. As informações referentes ao crescimento populacional esperado pelos consórcios estudados está presente na Figura 18. O consórcio 13 é o que atende a maior população, a Figura 19 apresenta o crescimento populacional esperado para o consórcio citado.

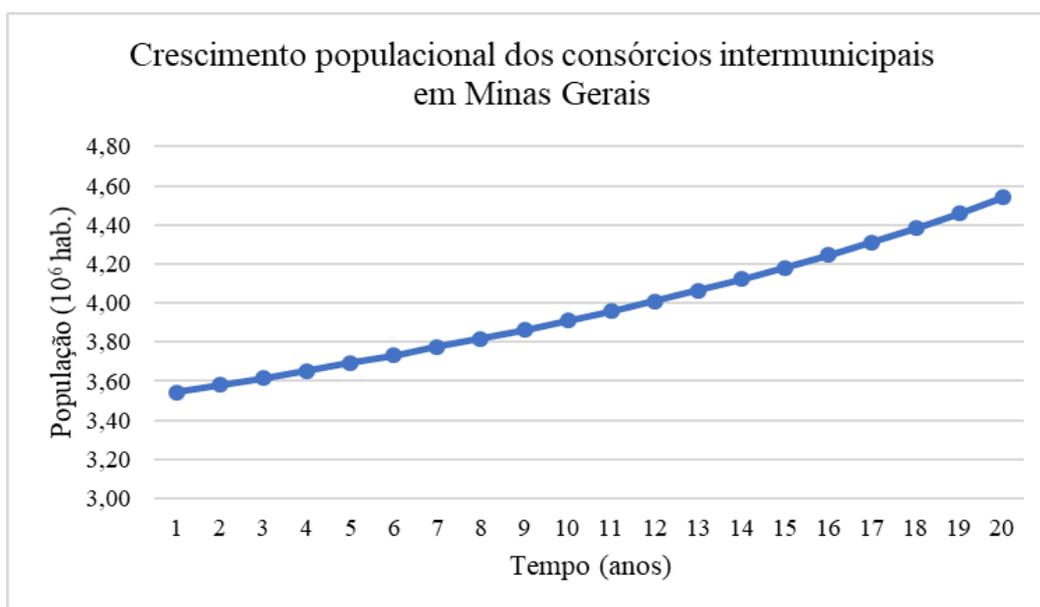


Figura 18: Crescimento Populacional esperado para a população atendida em Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

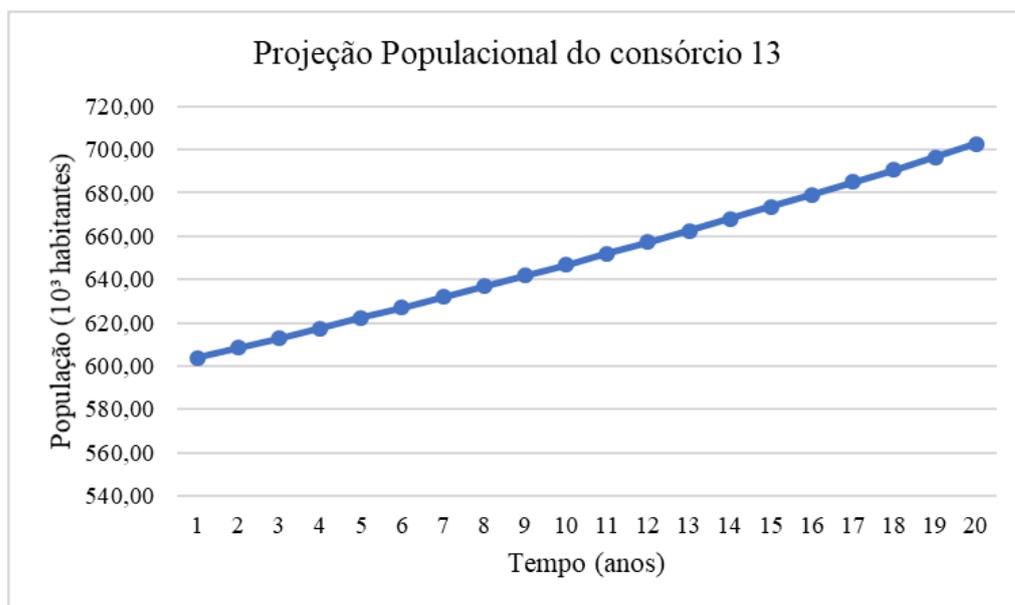


Figura 19: Crescimento Populacional previsto para o consórcio 13

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

As cidades componentes dos consórcios de RSU mineiros tem uma previsão de passar de uma população de 3.544.743 hab. em 2020 para 4.540.239 hab. no final do período de estudo. Dentre os empreendimentos estudados, espera-se através dos resultados obtidos pela projeção populacional que os consórcios 1 e 7 sofram um decréscimo populacional. O consórcio 13, foi o que apresentou a maior população atendida, tendo sua população um crescimento de 603.889 para 702.540 no vigésimo ano.

Como calculado para o estado de São Paulo, a partir dos dados da população e da geração per capita de cada cidade, foi possível determinar a geração de resíduos esperada pelos consórcios, conforme Figura 20.

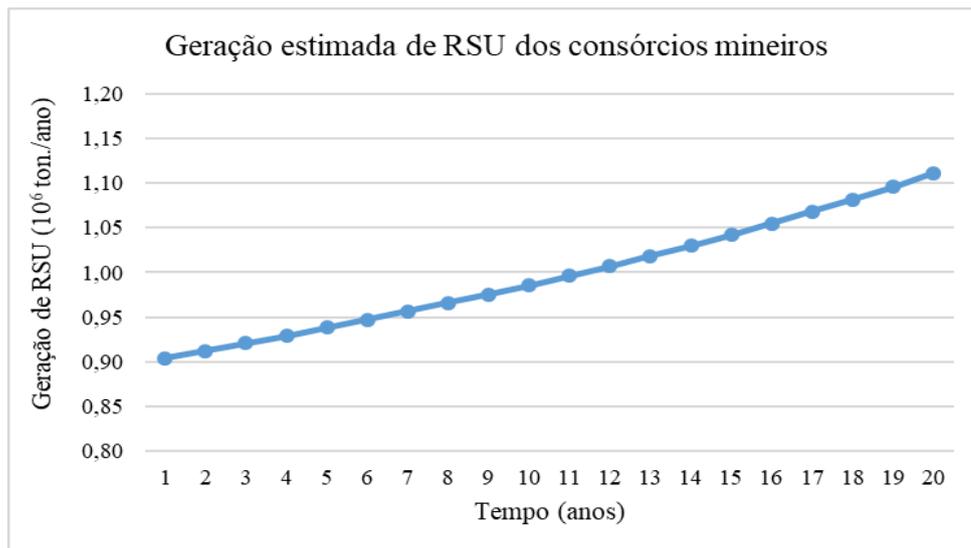


Figura 20: Geração de resíduos estimada a ser recebido pelos consórcios mineiros

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Os consórcios mineiros têm como estimativa receber entre $0,904 \cdot 10^6$ e $1,11 \cdot 10^6$ toneladas de RSU. Em relação ao consórcio 13, os resultados mostraram que a geração de resíduos pode atingir $194,8 \cdot 10^3$ toneladas de RSU, conforme apresenta a Figura 21.

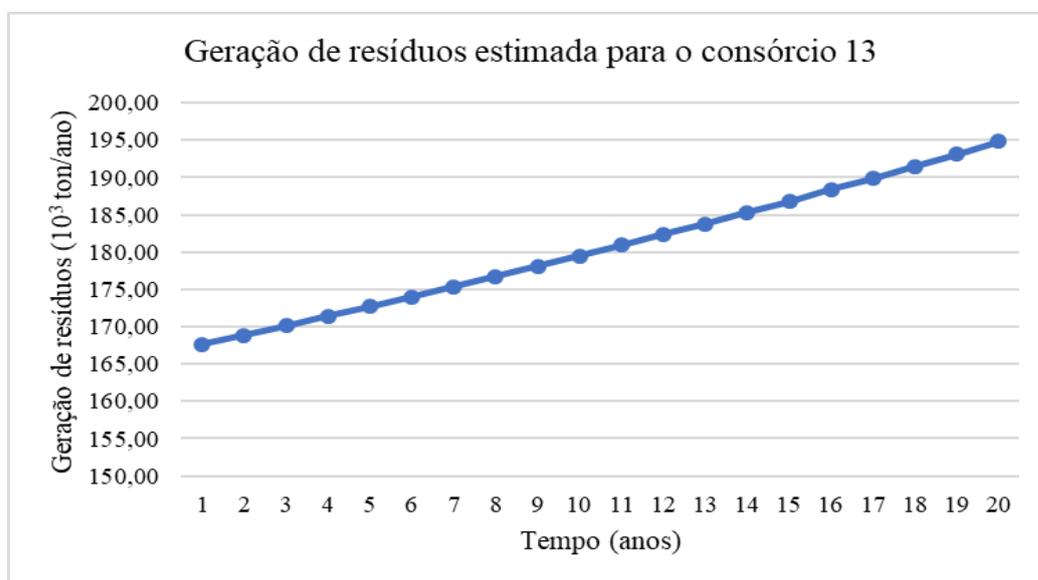


Figura 21: Geração de resíduos estimado para o consórcio 13

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

A quantidade de RSU gerada varia de acordo com o crescimento da população, logo quanto maior a população atendida, maior será a geração de resíduos. Além disso, quanto a geração de resíduos, é importante levar em consideração fatores como a abrangência dos serviços de coleta, a diferença da composição gravimétrica entre as cidades, em especial a porcentagem de matéria orgânica. Estudos mostram que há cidades brasileiras que possuem frações orgânicas inferiores a 50%, apresentando uma variação de 37,05% a 46,65% (Haubert et al. (2018); Menezes et al. (2019); Silva, Farias e Lima (2018); Souza, Guadagnin (2009); Urbanizadora Municipal S. A (2018)), o que mostra a importância da utilização de dados atualizados e específicos da região a ser estudada.

No estado de Minas Gerais, também se verificou uma não linearidade entre a geração de resíduos quando comparado a população. Para exemplificar, pode-se comparar os consórcios 15 e 5. O consórcio 5 possui em média uma população superior em 10 mil habitantes em relação ao consórcio 15; no entanto, a sua geração média anual de resíduos é de $53,8 \cdot 10^3$ toneladas por ano, enquanto do consórcio 15 é de $85,9 \cdot 10^3$ toneladas por ano. Um fator que pode ter influenciado tal resultado, é que a geração de resíduos das cidades do consórcio 5, são inferiores as cidades do consórcio 15. As informações referentes aos outros consórcios estão apresentadas no Apêndice B.

Com a regressão linear, foi feita uma relação entre a geração de resíduos e população para o estado de Minas Gerais, onde obteve-se a equação 16, com uma correlação de 0,9091, conforme mostra a Figura 22:

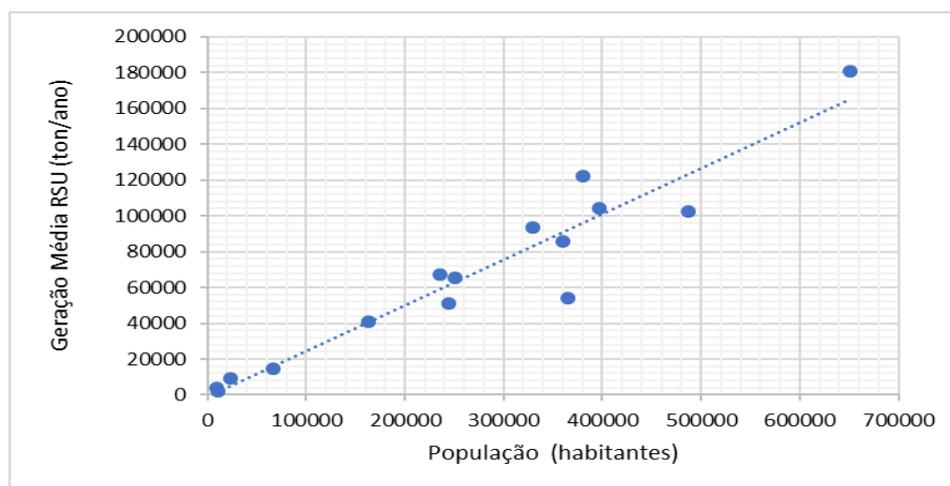


Figura 22: Relação entre população e geração de resíduos para o estado de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

$$RSU \left(\frac{ton}{ano} \right) = 0,2548[pop. (hab.)] - 1042,6 \quad (16)$$

$$R^2 = 0,9091$$

4.3 Resultados relativos ao aproveitamento do biogás de Aterro Sanitário

4.3.1 Resultados energéticos

4.3.1.1 São Paulo

Para a estimativa do metano a ser gerado é necessário levar em conta a quantidade anual de resíduos a ser gerada. Com posse destes dados e com a definição dos parâmetros pedidos, foi possível determinar a produção de metano a ser gerado pelos aterros estudados. A Figura 23 apresenta os resultados da produção de metano, estimada a ser gerada nos aterros paulistas e a Figura 24, apresenta os resultados relativos a vazão de metano esperado pelo aterro 7, que atende a maior população.

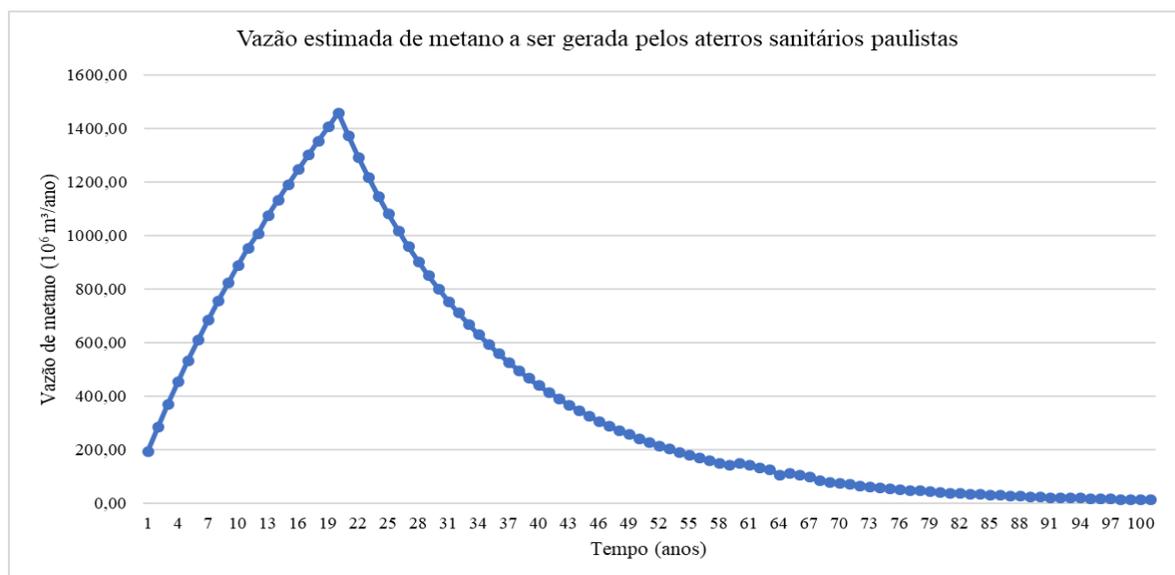


Figura 23: Vazão de metano de estimada a ser gerado pelos aterros paulistas

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

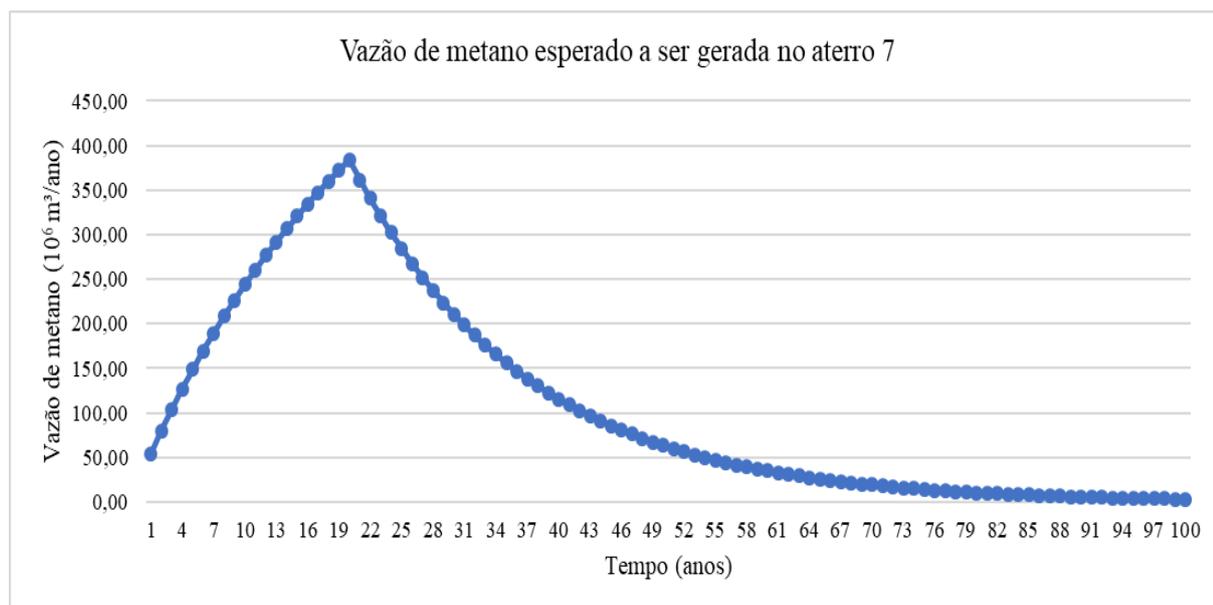


Figura 24: Vazão de metano estimada para o aterro 7

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Considerando os dados obtidos por meio do uso da rotina supracitada, os resultados mostram que os aterros paulistas podem alcançar $14,6 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ de metano passível de ser coletado no ano final de estudo. A Figura 24, revela que o aterro 7 possui o maior potencial de geração de biogás durante o período, podendo atingir o valor de $3,84 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ de metano. Os resultados estão relacionados com a população, visto que por meio do método utilizado a população reflete a produção de RSU, que por sua vez são utilizados como dados de entrada para a estimativa da vazão de metano a ser gerado.

O volume de metano gerado reflete o potencial energético de cada aterro sanitário, possuindo o mesmo comportamento graficamente. A Figura 25, apresenta a potência a ser gerada pelos aterros no estado de São Paulo durante o período de estudo, e as informações sobre o aterro 7 estão apresentadas conforme mostra a Figura 26.

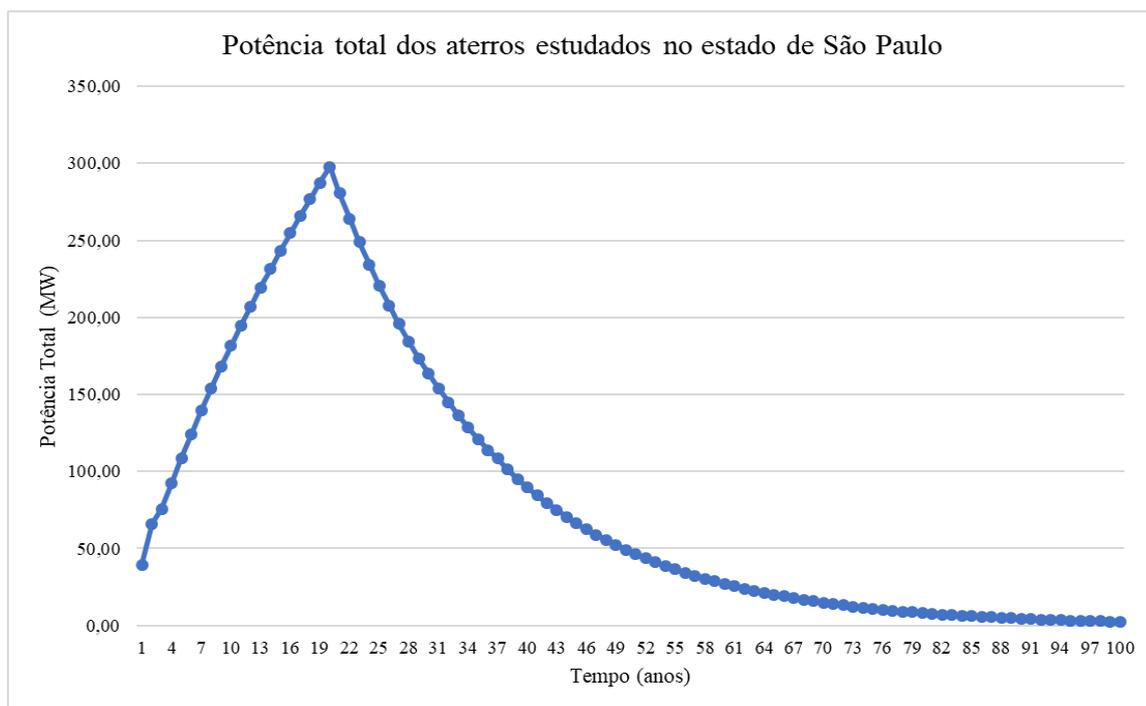


Figura 25: Potência total estimada pelo aproveitamento do biogás dos aterros estado de São Paulo (MW)

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

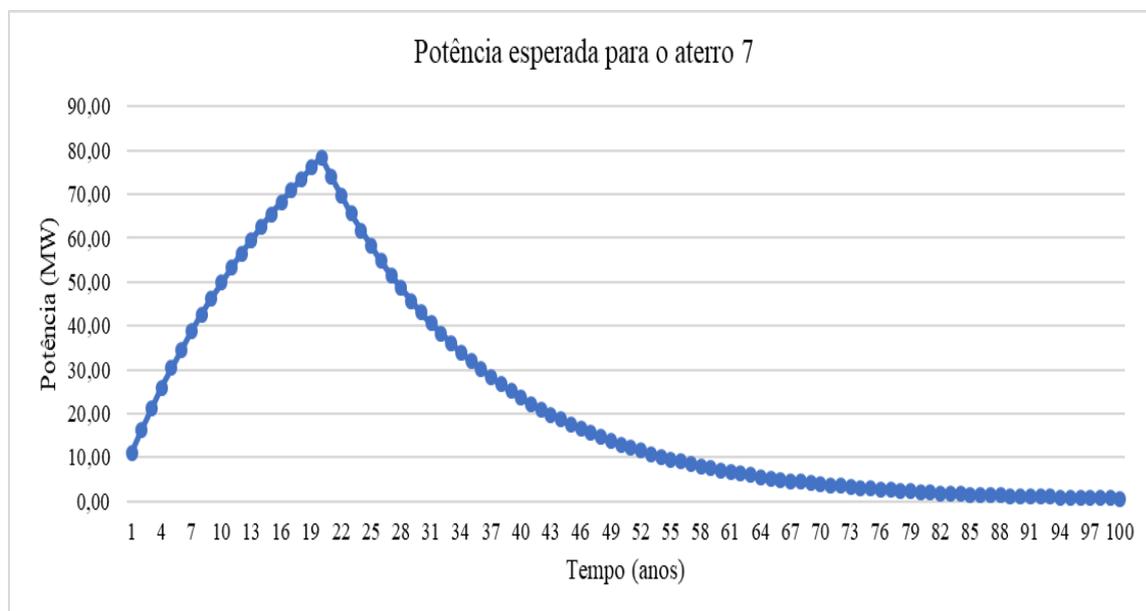


Figura 26: Potência estimada para o aterro 7

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

A curva apresenta a potência gerada durante o período de aporte dos resíduos no aterro que possui um crescimento durante os 20 anos de deposição dos resíduos, atingindo o pico no ano de fechamento do aterro. Após este período, a potência gerada deve-se à presença dos resíduos lá presentes, após o fechamento do empreendimento (SANTOS et al. 2019).

Segundo a Figura 25, a potência máxima a ser gerada pelos aterros no estado de São Paulo pode alcançar um valor de 297,8 MW, no ano de encerramento dos empreendimentos. Todavia a potência a ser utilizada é a potência ótima, que como explicitado no tópico 3.4 é a potência que gera a maior produção de energia. Para o estado de São Paulo, a potência ótima estimada foi de 139,5 MW. O aterro 7, apresentou valores entre 11,4 MW em e 78,4 MW conforme apresenta a Figura 26, tendo uma potência ótima de 38,7 MW.

Através da regressão linear, foi possível estabelecer uma relação entre potência ótima e a população para os dois estados estudados. A Figura 27, apresenta a relação obtida para os aterros do estado de São Paulo, conforme equação 17, com uma correlação de 0,9467,

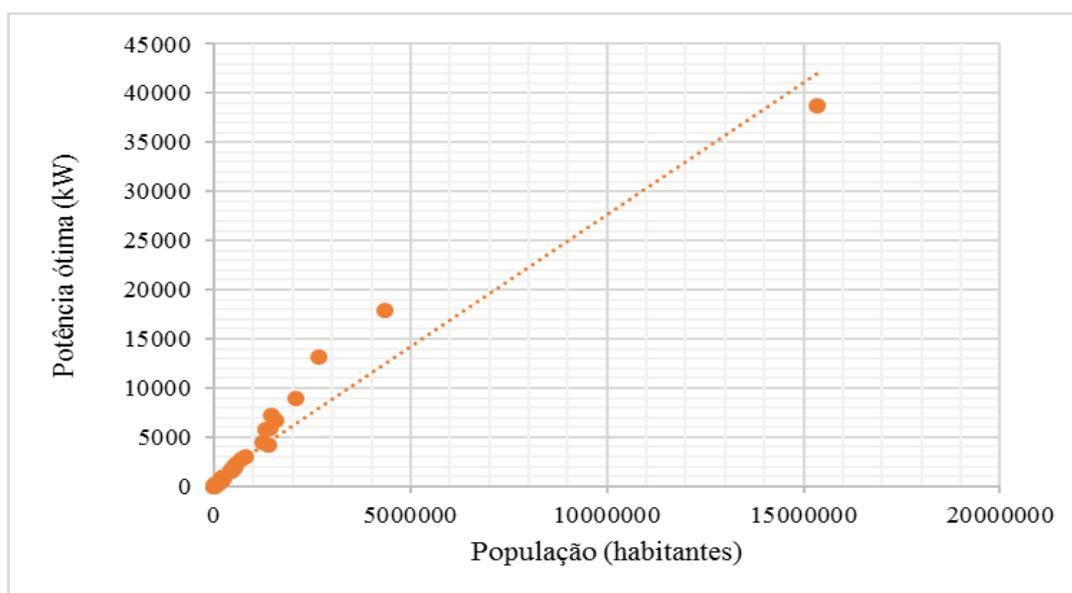


Figura 27: Relação entre população e potência ótima para o estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

$$Potência\ ótima\ (kW) = 0,027[pop.\ (hab.)] + 830,99 \quad (17)$$

$$R^2 = 0,9467$$

Comparou-se os resultados obtidos em relação a potência encontrada pelo presente estudo em relação ao aterro 7, com um estudo realizado pelo Centro de Pesquisa para inovação em Gás (RCGI) (AGÊNCIA FAPESP, 2019), que constitui de um conjunto de mapas interativos que estimam a produção de biogás e biometano no estado de São Paulo e o potencial elétrico a partir do biogás de cada cidade. De acordo com as informações disponibilizadas, levantou-se o potencial energético de RSU das cidades constituintes do aterro 7. Desta forma, obteve-se uma potência elétrica em torno de 162 MW. Sendo que este potencial considera a utilização de Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro Sanitário e Esgoto Sanitário em Estação de tratamento de esgoto (ETE).

Pode-se observar que a potência prevista pelo estudo previamente citado 162 MW é bem superior ao que foi encontrado no presente trabalho 38,7 MW. Vale ressaltar que esta potência apresentada por (AGÊNCIA FAPESP, 2019) considera o RSU de aterro sanitário e de ETE, diferentemente da presente pesquisa, onde o estudo referente ao ETE não foi considerado. Além disso, um outro fator que pode ter influenciado nos resultados é que os resíduos da cidade de São Paulo são depositados em mais de um local, desta forma, somente uma fração destes resíduos são depositados no aterro 7, o que pode ter impactado nas diferenças entre o potencial dos dois estudos.

Segundo dados da ANEEL (2020), atualmente as usinas produtoras de energia elétrica oriunda de biogás produzido por RSU possuem uma potência média instalada de 179,78 MW no Brasil. A potência ótima média encontrada para os aterros paulistas foi de 139,5 MW. Este resultado corresponde a 77% da capacidade atual instalada no país. Este valor pode ser maior se considerássemos os resíduos produzidos por todas as cidades do estado.

Desta forma, o aproveitamento energético do biogás oriundo destes aterros representaria um impacto positivo para o uso e expansão desta energia no país. Tais resultados mostram que o uso do biogás de RSU necessita de incentivos para um aumento na sua utilização, e consequentemente, se torne uma fonte considerável de energia elétrica no país.

Com os dados presentes, e com a aplicação da Equação 8, foi possível calcular a energia produzida pelas potências em cada aterro sanitário. A Tabela 10, apresenta os dados relativos a energia estimada pelos aterros sanitários do estado bem como do aterro 7, a potência máxima que é aquela alcançada no último ano de funcionamento dos empreendimentos e a potência ótima obtida.

Tabela 10: Energia calculada para a geração de energia no uso do biogás de aterro sanitário no estado de São Paulo

P.ótima do estado (MW)	P.máx.do estado (MW)	P.ótima do aterro 7 (MW)	P.máx.do aterro 7 (MW)	Energia (MWh/ano) do estado	Energia (MWh/ano) do aterro 7
138,5	297,8	38,7	78,4	977.778,8	271.136,7

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

De acordo com a Tabela 10, a geração total de eletricidade estimada para São Paulo é de 977.778,8 MWh/ano, considerando todos os aterros sanitários estudados, sendo que o aterro 7, seria o responsável por 271.136,7 MWh/ano desta geração. Os dados referentes aos outros aterros do estado estão no Apêndice A.

De acordo com dados fornecidos pela EPE (2018a), em 2017, o consumo residencial de energia elétrica no estado de São Paulo foi de 38.969 GWh/ano, sendo o número de consumidores, ou seja, de residências, igual a 16.953.937. Desta forma, fazendo uma razão entre estes valores com os resultados obtidos em relação a geração de energia elétrica no estado, estima-se que esta demanda poderia atender a 425.395 residências. Segundo dados do Censo Demográfico de 2010, o Brasil possui cerca de 3,3 moradores por domicílio, o que seria possível atender a 1.403.802 pessoas através da geração de energia elétrica de RSU dos aterros paulistas estudados. Apesar de pequena, é importante ressaltar que esta energia é oriunda de um resíduo que necessita de um tratamento e uma destinação adequada, desta forma o seu uso apresenta-se como um ganho tanto ambiental como econômico.

Relacionando a potência ótima com a potência máxima encontrada em cada aterro paulista, encontrou-se uma variação entre 42,84% a 50,26%, com uma média de 46,92%. Para o aterro 7 esta relação foi de 49,31%. Fazendo uma relação entre a potência ótima pela média dos habitantes obteve-se valores que variaram de 0,0011 kW/hab. a 0,0050 kW/hab., tendo uma média de 0,0040 kW/hab.. Em relação ao aterro 7, este apresentou o valor de 0,0025 kW/hab.

4.3.1.2 Minas Gerais

Quanto ao estado de Minas Gerais, os resultados obtidos são apresentados a seguir. A Figura 28, apresenta a vazão referente aos consórcios estudados e a Figura 29 os resultados do consórcio 13, que conforme mostrado a seguir.

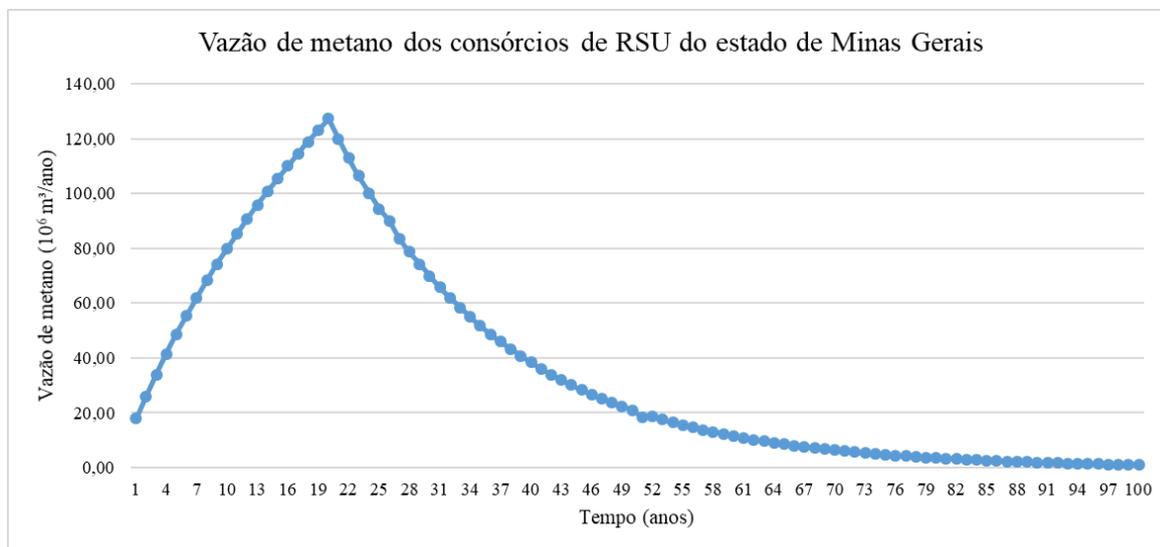


Figura 28: Vazão de metano dos consórcios de aterro do estado de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

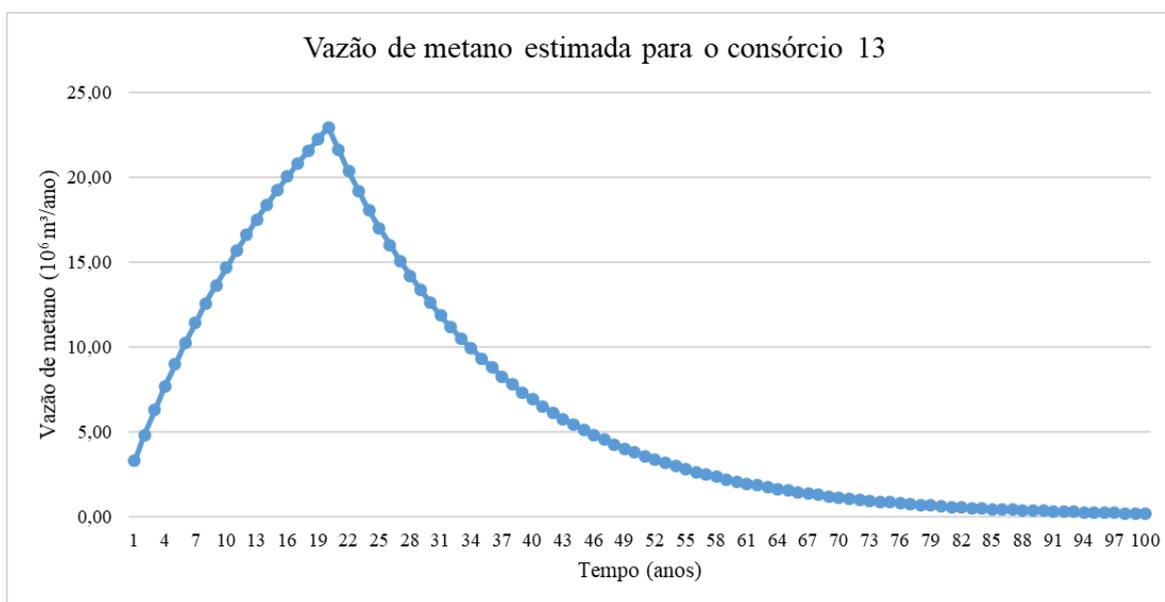


Figura 29: Vazão de metano esperada pelo consórcio 13

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Em relação a vazão de metano total calculada pelos consórcios estudados a vazão pode alcançar 127.10^6 m³ de metano no vigésimo ano. Em relação ao consórcio 13, este apresentou valores que vão de $3,3 \cdot 10^6$ de m³ de metano para 23.10^6 m³ de metano.

Com base nos resultados obtidos pela vazão anual de metano dos consórcios estudados, foi possível estimar a potência a ser gerada em cada um. A Figura 30, apresenta uma estimativa da potência anual a ser gerada por meio da soma das potências de cada consórcio. A Figura 31, apresenta os resultados encontrados para o consórcio 13.

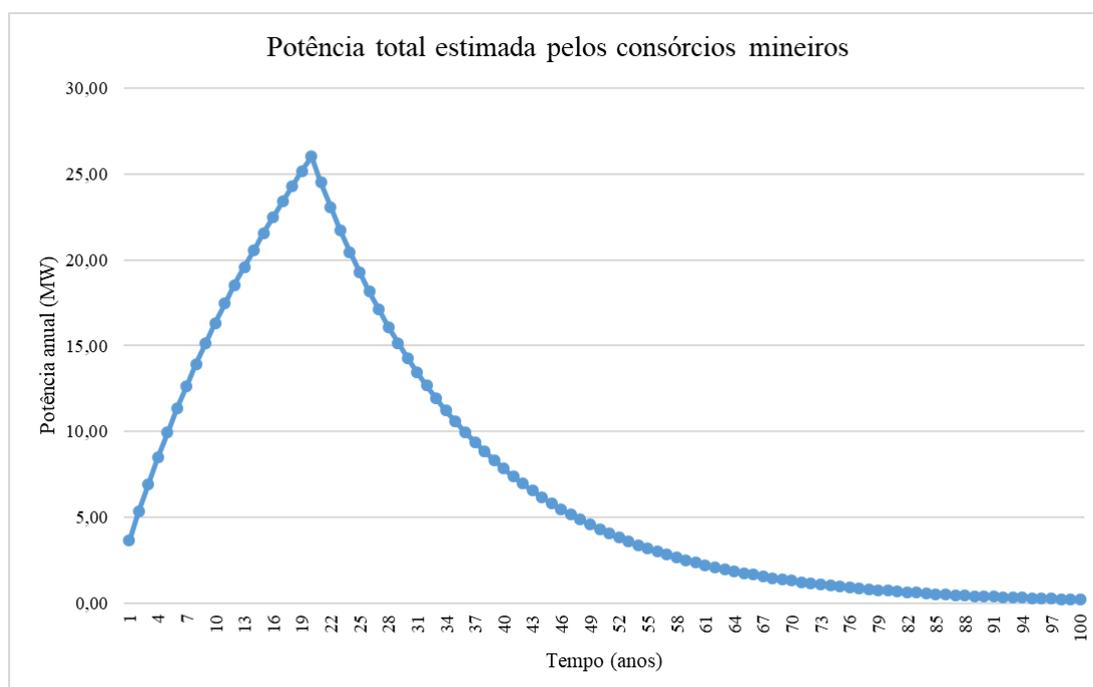


Figura 30: Potência estimada dos consórcios de RSU de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

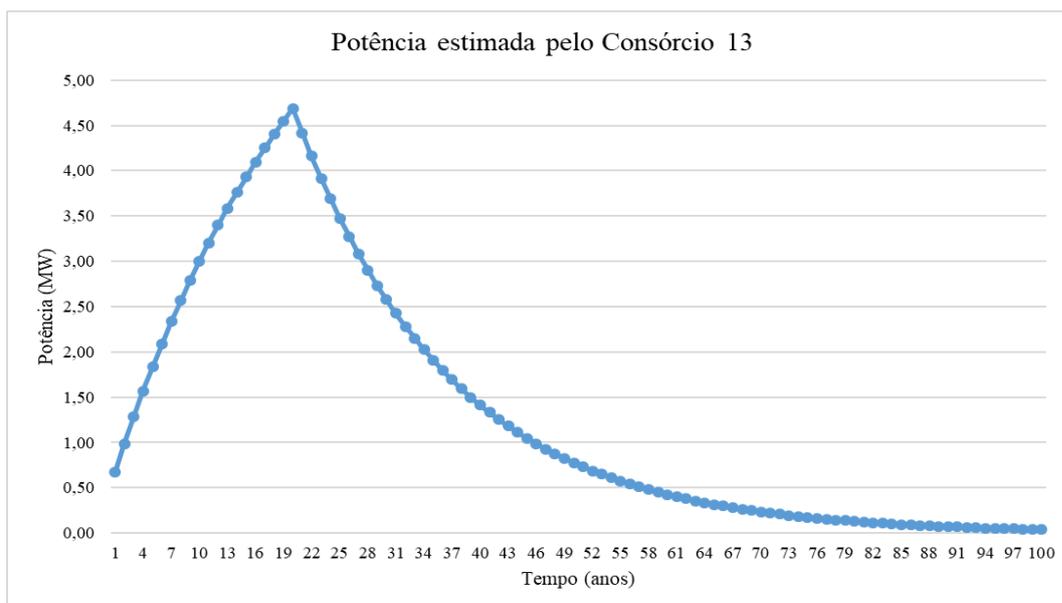


Figura 31: Potência a ser gerada pelo Consórcio

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Os resultados mostram que em Minas Gerais a potência disponível em 2020 é estimada em 3,6 MW, podendo atingir a potência máxima de 26 MW. No entanto, a potência ótima encontrada, ou seja, a capacidade instalada para o estado seria de 11,7 MW, segundo o presente estudo. O consórcio 13 é estimado em gerar uma potência máxima de 4,6 MW, no entanto a potência ótima calculada para o consórcio foi de aproximadamente 2,1 MW.

Para o estado de Minas Gerais, a relação entre potência ótima e população foi obtida através da equação 18, conforme apresenta a Figura 32, tendo um coeficiente de determinação de 0,9241.

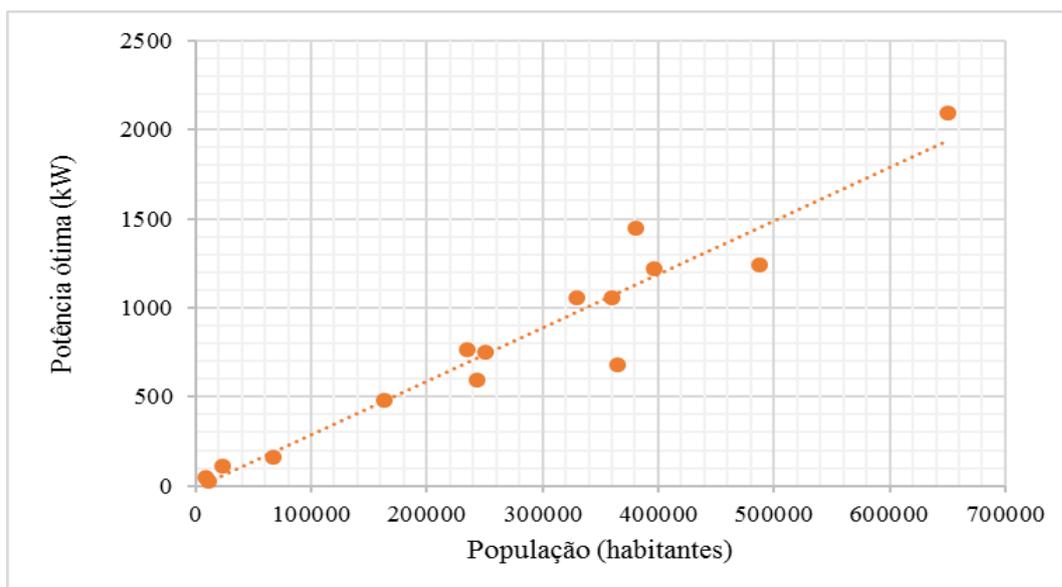


Figura 32: Relação entre população e potência ótima em Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

$$Potência\ ótima\ (kW) = 0,003[pop.\ (hab.)] - 14296 \quad (18)$$

$$R^2 = 0,9241$$

Comparou-se o potencial encontrado pelo presente trabalho com o estudo realizado por Brito et al. (2019), onde os autores fizeram uma análise do potencial energético de 27 consórcios de aterros do estado de Minas Gerais em (2014), considerando um período de 30 anos. Conforme os resultados encontrados pelo estudo, os consórcios mineiros teriam uma capacidade instalada de 21,9 MW, através do aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário.

Desta forma, pode-se dizer que os resultados encontrados pelo presente trabalho estão dentro do esperado, já que os valores encontrados por Brito et al. (2019), são superiores aos encontrados neste estudo, o que se deve a diversos fatores, como a quantidade de cidades estudadas, visto que pelas informações utilizadas pelos autores constava a existência de 27 consórcios no estado e não 15, conforme abordado pelo presente estudo. Além disso, vale ressaltar que no estudo supracitado, a metodologia utilizada para a projeção da população foi diferente, sendo utilizado o método de projeção logístico e o método utilizado por este estudo

foi o proposto por Sha'ato et al. (2007), além disso, o crescimento anual de geração de resíduos considerado por Brito et al. (2019) foi de 1% ao ano e neste estudo 0,5%.

Os resultados obtidos no estado de Minas Gerais são bem menores quando comparados ao estado de São Paulo; no entanto, podem ser significativos se considerar a inserção desta energia na matriz elétrica nacional. É importante salientar que para o estudo somente foram abordadas aproximadamente $\frac{1}{4}$ das cidades mineiras, sendo que grandes cidades do estado não estão inclusas nos consórcios estudados. Desta forma, prevê-se que o potencial a partir de RSU no estado de Minas Gerais, pode ser superior ao apresentado pelo presente estudo.

Os resultados referentes aos outros consórcios do estado, estão apresentadas no Apêndice B. A Tabela 11, mostra a energia estimada para o estado de Minas Gerais, bem como as informações relativas ao consórcio 13:

Tabela 11: Energia calculada para a geração de energia no uso do biogás de aterro sanitário no estado de Minas Gerais

P.ótima do estado (MW)	P.máx.do estado (MW)	P.ótima do consórcio 13 (MW)	P.máx.do consórcio 13 (MW)	Energia (MWh/ano) do estado	Energia (MWh/ano) do consórcio 13
11,7	26	2,1	4,7	82.218,4	14.660,3

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

A partir dos dados observados pela Tabela 11, a geração total de eletricidade estimada somando todos os consórcios mineiros é de 82.218,4 MWh/ano. O consórcio 13 tem uma geração de eletricidade estimada em 14.660,3 MWh/ano.

Comparativamente, dados fornecidos pela EPE (2018a), mostra que em 2017, o consumo residencial de energia elétrica no estado de Minas Gerais foi de 10.724 GWh/ano, sendo o número de consumidores igual a 7.230.052 residências. Assim, fazendo uma razão entre os resultados obtidos pelo presente trabalho, obteve-se que esta energia poderia atender a 55.431 residências no estado de Minas Gerais. Considerando 3,3 moradores por domicílio conforme o Censo Demográfico de 2010 seria possível atender a 182.923 pessoas.

A relação entre potência ótima e potência máxima em cada consórcio mineiro variou entre 42,92% a 48,08%, com uma média de 45,58%. Para o consórcio 13 esta relação foi de 44,60%. Os valores relacionando a potência ótima com a potência média estão de acordo aos

encontrados por Brito et al. (2019), onde os autores encontraram uma média de 45,2% entre os consórcios estudados e por Fernandes (2016), onde a relação entre os empreendimentos estudados variou entre 39,39% e 43,69%. Em seguida, fazendo uma relação entre a potência ótima pela média dos habitantes obteve-se valores que variaram de 0,0019 kW/hab. a 0,0050 kW/hab., tendo uma média de 0,0031 kW/hab.. Em relação ao consórcio13, este apresentou o valor de 0,0032 kW/hab..

4.3.1 Resultados econômicos

Com os resultados obtidos em relação a potência a ser gerada por cada empreendimento, foi possível determinar o VPL, LCOE e TIR.

4.3.1.1 São Paulo

Na primeira análise (cenário 1), os aterros sanitários que possuíam os requisitos conforme as Resoluções da ANEEL, tiveram seus cálculos econômicos analisados considerando o sistema de compensação na GD. No entanto, oito destes aterros sanitários tem a previsão de ultrapassar a potência máxima estabelecida (5MW) durante o período de funcionamento do empreendimento, sendo desconsiderados neste cenário (aterros: 7, 11, 13, 17, 22, 31, 32 e 35). Em seguida a análise econômica foi feita considerando a venda de energia em leilão (cenário 2), conforme previamente explicado, dessa maneira todos os aterros sanitários foram analisados.

No cenário 1, os resultados mostraram-se satisfatórios e com resultados econômicos superiores para os aterros estudados, sendo que somente seis aterros não tiveram resultados econômicos favoráveis. No Cenário 2, considerando o preço de venda de energia em leilão, dez empreendimentos foram inviáveis. Quanto ao aterro 7, este apresentou resultados econômicos favoráveis quanto a venda da energia em leilões, visto que sua potência ótima ultrapassa a máxima estabelecida para a GD. Os resultados econômicos relativos ao aterro 7 estão apresentados na Tabela 12:

Tabela 12: Resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás no aterro 7

Cenário 2		
VPL (10⁶) (R\$)	LCOE (por MWh)	TIR (%)
R\$ 167,25	R\$ 229,90	18,91%

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar os resultados, em relação ao LCOE, o preço variou entre R\$ 229,90/MWh a R\$ 1536,07/MWh, apresentando uma média de R\$ 355,53/MWh, no cenário 2 e de R\$ 387,65/MWh no cenário 1, sendo este resultado superior devido a não consideração dos grandes aterros nos cálculos. Quanto ao TIR, este apresentou uma variação considerável entre os dois cenários tendo uma média de 26,51% no cenário 1 para os empreendimentos viáveis e no cenário 2, uma média de 12,34%. Isto deu-se devido a grande diferença entre o preço a ser considerado entre os dois cenários, visto que no cenário 1 o preço a ser considerado foi de R\$/MWh 518,77 e de R\$/MWh 311 no cenário 2.

Apesar do sistema de compensação apresentar melhores resultados econômicos, é importante salientar que para um aterro sanitário e/ou digestor anaeróbico entrar na GD é necessário que haja uma demanda para a utilização desta energia. Ou seja, a energia excedente pode ser compensada no consumo de outras unidades consumidoras, geração compartilhada ou autoconsumo remoto, conforme as Resoluções da ANEEL. Sendo que tais empreendimentos não podem gerar uma potência superior a 5 MW.

Para um melhor entendimento dos resultados, fez-se uma análise entre os valores de LCOE obtidos com as potências ótimas encontradas, onde com a intercessão entre as duas curvas obtêm-se a potência mínima que viabiliza tais projetos considerando o cenário 1. A equação 19 obtida pela Figura 33, apresenta esta relação para o estado de São Paulo, tendo um coeficiente de determinação de 0,8450. Os resultados mostram que a potência ótima mínima para possibilitar a viabilização de tais projetos é de 70,67 kW, o que está de acordo com os resultados obtidos pelos aterros do estado de São Paulo.

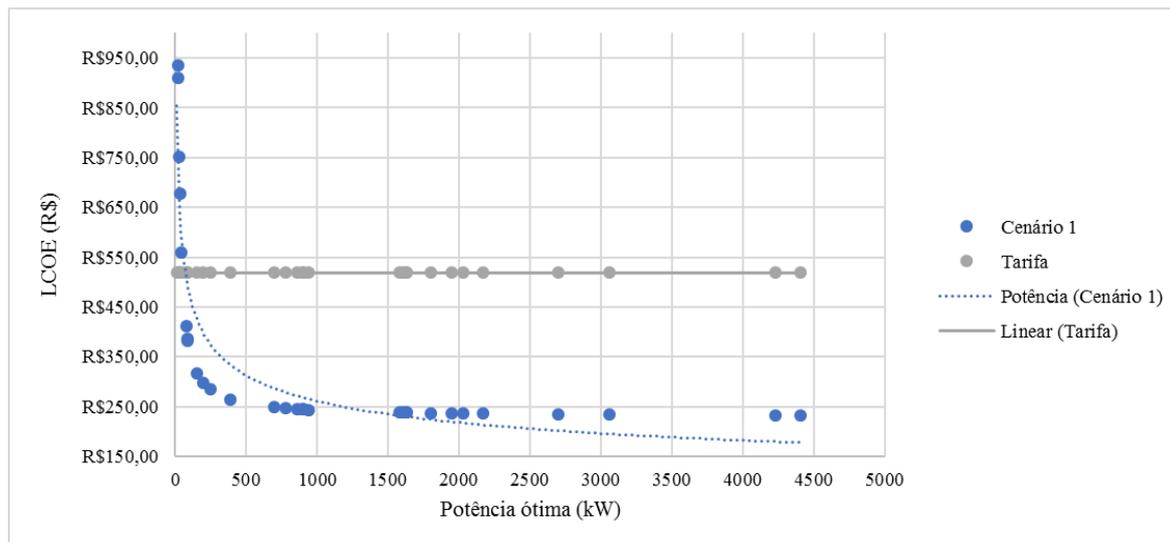


Figura 33: Relação entre LCOE e potência ótima para o estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor

$$LCOE (R\$) = 1564,8843 [\text{Potência ótima (kW)}]^{-0.2592} \quad (19)$$

$$R^2 = 0,8450$$

As informações do VPL, LCOE e do TIR obtidos pelos aterros estudados estão apresentadas no Apêndice C (cenários 1 e 2).

4.3.1.2 Minas Gerais

Nesta etapa foi possível determinar o VPL, o LCOE e o TIR dos consórcios mineiros. Todos os consórcios mineiros apresentavam os requisitos necessários para a GD. No cenário 1, somente um consórcio não apresentou resultados econômicos positivos. Em relação ao cenário 2, quatro empreendimentos não apresentaram resultados econômicos favoráveis. Quanto ao consórcio 13, que é o que atende a maior população no estado, este apresentou resultados positivos nos dois cenários, conforme informações da Tabela 13.

Tabela 13: Resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás de aterro no consórcio 13

Cenário 1			Cenário 2		
VPL (10 ⁶)	LCOE (por MWh)	TIR	VPL (10 ⁶)	LCOE (por MWh)	TIR
R\$ 43,71	R\$ 235,99	47,32%	R\$ 8,36	R\$ 235,99	18,05%

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar o LCOE, percebe-se que o preço de venda para viabilizar tais empreendimentos varia de R\$ 235,99/MWh a R\$ 808,94/MWh, possuindo um LCOE médio de R\$ 312,36/MWh. É possível observar que os valores do LCOE não se alteram entre os cenários, visto que a tarifa praticada não entra nos cálculos do LCOE, o que é considerado nos cálculos são os custos do período, que não se alteram entre os cenários. No geral, os resultados mostraram-se positivos para o aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário nos consórcios do estado de Minas Gerais, sendo viável na maioria dos consórcios de aterros estudados. Em relação ao TIR, o estado de Minas Gerais também apresentou uma considerável variação, apresentando uma média no cenário 1 de 38,46% e de 12,48% no cenário 2 para os empreendimentos viáveis. Os altos valores de TIR encontrados no cenário 1, podem ser justificados pelo alto preço praticado no estado, já que para os cálculos foi considerada que toda a energia gerada pelos empreendimentos poderia ser utilizada no sistema de compensação na geração distribuída, que como foi explicado anteriormente, nem sempre é o ideal.

Pode-se notar que os valores médios da TIR dos empreendimentos viáveis para o cenário 2 entre os dois estados apresentaram valores próximos, com uma diferença de 0,14%, isto pode ser explicado devido ao fato do valor a ser utilizado para a venda da energia ser o mesmo, ou seja R\$ 311,00/MWh.

Contudo, avaliando o mesmo cenário entre os estados (cenário 1), pôde-se notar uma variação superior entre as médias das TIR de 11,95%, visto que o preço a ser utilizado pelo sistema de compensação é diferente nos dois estados, sendo que o de Minas Gerais é superior ao do estado de São Paulo. As informações quanto aos aspectos econômicos dos empreendimentos estudados estão apresentadas nos Apêndice D (cenários 1 e 2).

Para o estado de Minas Gerais, a equação 20, apresenta a relação entre o LCOE e a potência ótima para os consórcios estudados, Figura 34, a correlação encontrada foi de 0,8811. A potência ótima mínima encontrada que viabiliza os consórcios mineiros no cenário 1 é de

21,07 kW. No entanto, apesar de possuir uma potência superior a encontrada, o consórcio 1 não foi viável.

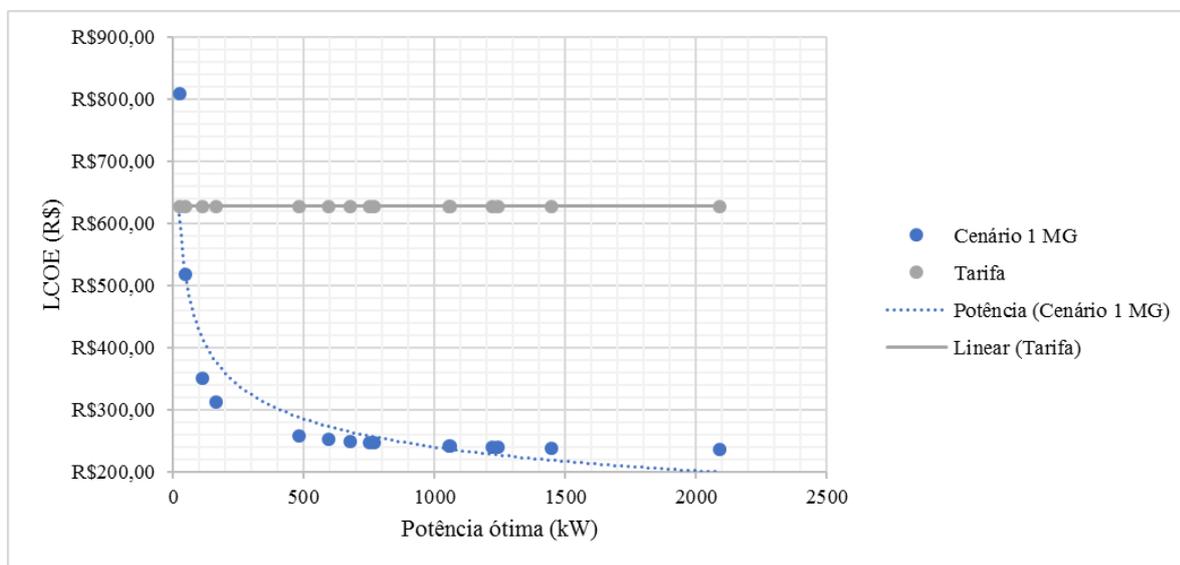


Figura 34: Relação entre LCOE e potência ótima para o estado de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor

$$LCOE (R\$) = 1341,3799 [\text{Potência ótima (kW)}]^{-0,2490} \quad (20)$$

$$R^2 = 0,8811$$

Os resultados econômicos obtidos pelos empreendimentos estudados mostram que o aproveitamento energético do biogás de aterro para a geração de energia elétrica é uma realidade possível no Brasil. A maior parte dos aterros/consórcios estudados apresentaram resultados econômicos favoráveis para a implantação deste sistema. Além disso, os resultados encontrados servem como um incentivo ao setor público e privado para o investimento neste tipo de negócio, visto que, estes empreendimentos são rentáveis, viáveis e em alguns casos apresentam uma alta taxa de atratividade. Os valores de LCOE foram satisfatórios e na maioria dos casos inferiores ao preço praticado pelo leilão considerado no estudo.

Estes resultados ressaltam que este tipo de empreendimento pode trazer impactos positivos para a economia, como a geração de receita e a geração de empregos para os municípios envolvidos, além de possibilitar a diversificação da matriz energética nacional. A geração de energia através do biogás de aterros sanitários acrescenta valor a estes

empreendimentos, além de ser um estímulo para um gerenciamento de resíduos mais eficaz e que contribua na redução dos problemas relativos a este setor no país, já que uma parcela considerável dos RSU ainda não possui uma destinação adequada.

Os aterros/consórcios que apresentaram resultados econômicos desfavoráveis são aqueles que atendem às menores populações e que possuem baixa geração de resíduos. Em consequência disto, há uma menor potência disponível nestes locais, não sendo possível tornar estes empreendimentos economicamente viáveis. Alguns casos isolados de aterros/consórcios, que apesar de atenderem uma pequena população possuem uma produção de resíduos considerável e que possibilitou a viabilidade destes empreendimentos. Neste estudo, em alguns casos empreendimentos que atendem uma população média de 30 mil habitantes apresentaram resultados favoráveis ao uso do biogás de RSU. Sendo assim, estes resultados reafirmam que o aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário é uma opção possível e interessante para o país.

4.4 Resultados relativos ao aproveitamento do biogás de digestores anaeróbios

4.4.1 Resultados energéticos

4.4.1.1 São Paulo

No estudo considerando o uso dos biodigestores, fez-se uma análise dos resíduos orgânicos a serem gerados com base nos resíduos produzidos anualmente em cada empreendimento. Em seguida, fez-se uma estimativa do biogás a ser coletado e posteriormente, a potência. Para a estimativa da potência a ser esperada pelo uso de biodigestores anaeróbios nos aterros sanitários do estado de São Paulo, foi utilizada a equação 7. A Figura 35, apresenta a vazão de metano a ser gerada por meio do uso dos biodigestores considerando todos os aterros paulistas e a Figura 36, apresenta a vazão de metano estimada para o aterro 7:

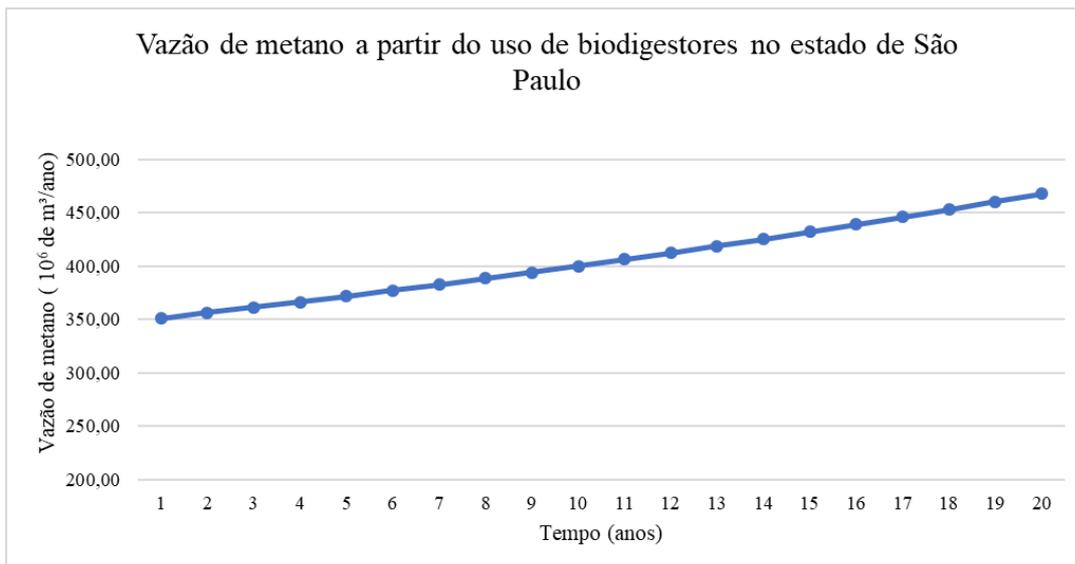


Figura 35: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

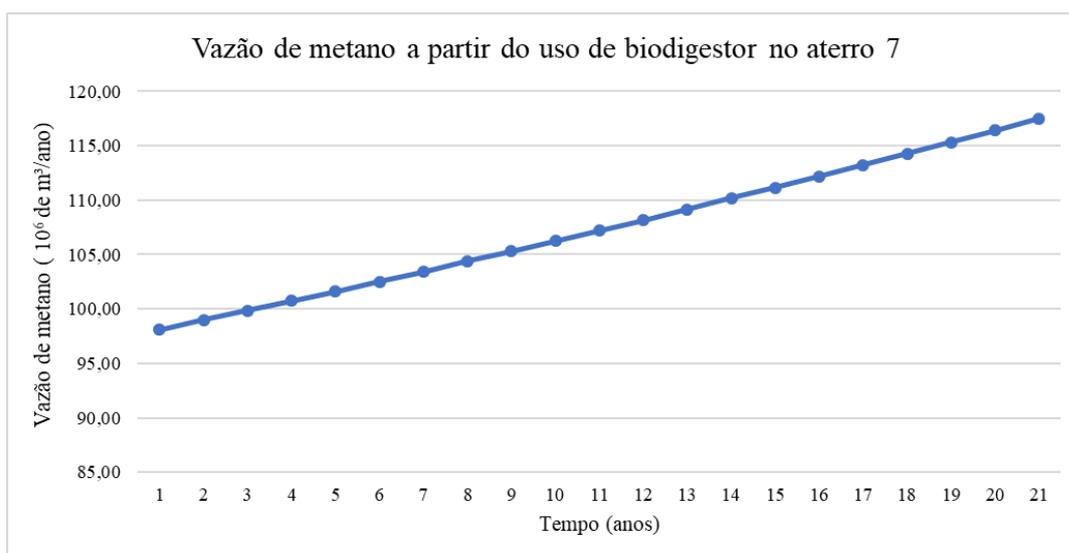


Figura 36: Vazão de metano estimada através do uso de biodigestor no aterro 7

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Analisando os resultados obtidos considerando a utilização dos biodigestores, verifica-se que há uma tendência de aumento na vazão de metano, tanto considerando a vazão total dos consórcios como para o aterro 7, que pode chegar a 467.10^6 e 117.10^6 m³ de metano, respectivamente no último ano. Com base na vazão obtida, foi possível determinar a potência

estimada para os empreendimentos estudados. A Figura 37 apresenta a potência esperada considerando o uso de digestores anaeróbios nos aterros paulistas e a Figura 38 apresenta potência esperada para o uso de biodigestores no aterro 7.

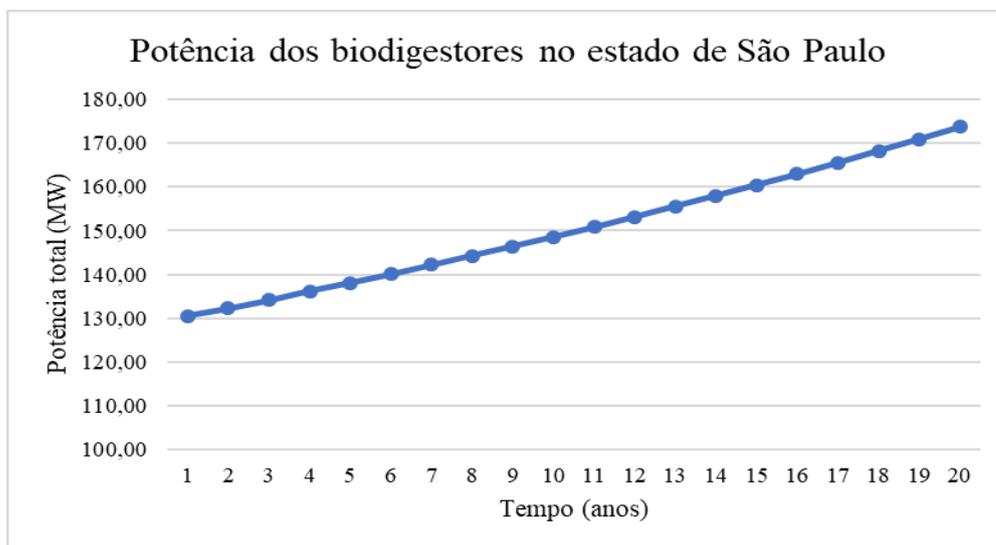


Figura 37: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

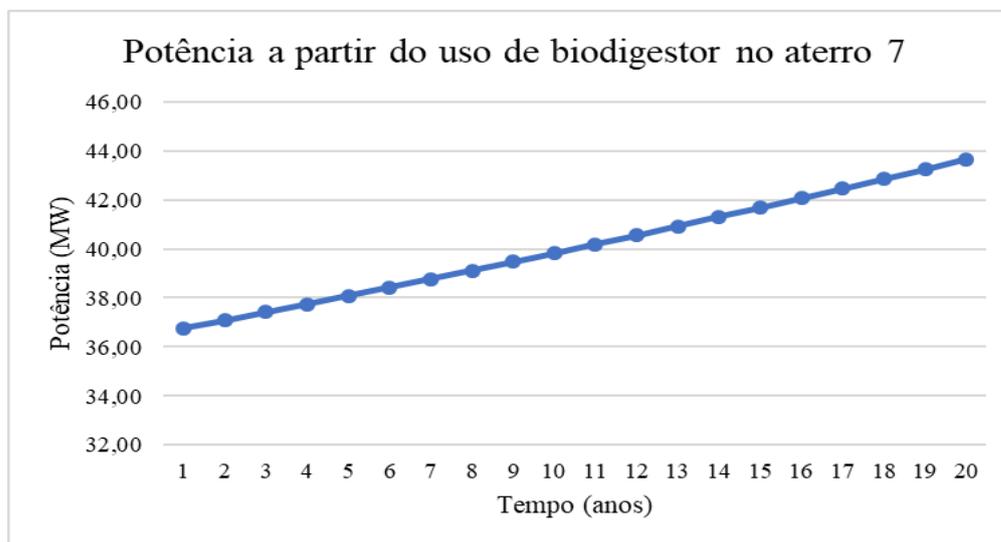


Figura 38: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Como pode-se observar, diferentemente do aterro sanitário, a potência no biodigestor apresenta um pequeno crescimento de um ano para o outro, visto que não há um acúmulo de resíduos, como no caso do aterro sanitário. Conforme os resultados apresentados, a potência esperada para o estado pode variar de 130 MW a 173,8 MW. Em relação ao consórcio 7, a potência esperada varia de 36,8 MW em 2020 a 43,6 MW no ano de encerramento do projeto.

O método da regressão linear também foi aplicado para se estabelecer uma relação entre potência e população para os dois estados estudados, considerando o uso de digestores anaeróbios. Para o estado de São Paulo, os coeficientes de determinação encontrados foram de 0,9512 na situação A e de 0,9227 na situação B. A Figura 39, apresenta a relação obtida, equação 21, situação A e equação 22, situação B para os aterros do estado de São Paulo.

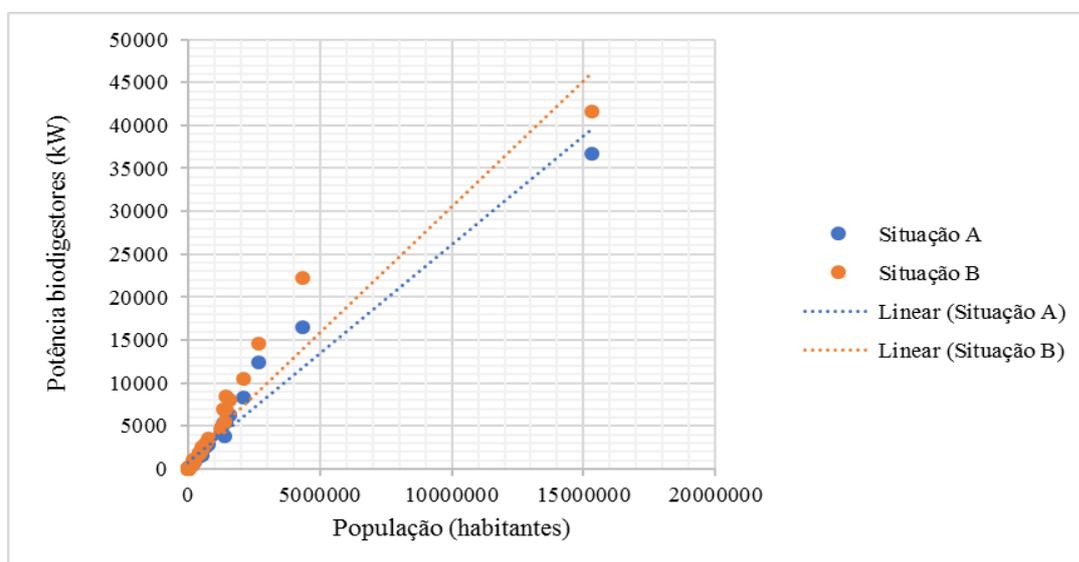


Figura 39: Relação entre população e potência no uso de biodigestores para o estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor

$$\begin{aligned} \text{Potência (kW)} &= 0,0025[\text{pop. (hab.)}] + 744,55 & (21) \\ R^2 &= 0,9512 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potência (kW)} &= 10,0029[\text{pop. (hab.)}] + 1106 & (22) \\ R^2 &= 0,9227 \end{aligned}$$

A Tabela 14, apresenta os resultados energéticos obtidos através do aproveitamento do biogás de digestores anaeróbios no estado e a Tabela 15 os resultados relativos ao aterro 7:

Tabela 14: Energia calculada para a geração de energia elétrica a partir do biogás de digestores anaeróbios no estado de São Paulo

Pot. do estado na situação A (MW)	Pot. do estado na situação B (MW)	Energia (MWh/ano) do estado sit. A	Energia (MWh/ano) do estado sit. B
130,5	160,4	878.307,5	1.085.480,1

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Tabela 15: Energia calculada para a geração de energia elétrica a partir do biogás de digestores anaeróbios no aterro 7

Pot. do aterro 7 na situação A (MW)	Pot. do aterro 7 na situação B (MW)	Energia (MWh/ano) do aterro 7 sit. A	Energia (MWh/ano) do aterro 7 sit. B
36,8	41,7	250.966,6	285.370,4

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Em relação a geração total de eletricidade estimada para São Paulo a partir do uso de digestores anaeróbios, levando em conta os 39 aterros sanitários estudados é de 878.307,5 MWh na situação A e de 1.085.480,1 na situação B. Em relação ao aterro 7, esta geração de eletricidade foi estimada em 250.966,6 MWh na situação A e 285.370,4 MWh na situação B.

Como explicitado anteriormente, os dados da EPE (2018a), apontam que em 2017, o consumo residencial de energia elétrica no estado de São Paulo foi de 38.969 GWh/ano, para um número de consumidores igual a 16.953.937 residências, através dos cálculos obteve-se uma relação entre os resultados do presente trabalho, onde a energia da situação A poderia atender a 382.118 residências e 472.251 na situação B no estado. Além disso, considerando uma média de 3,3 habitantes por domicílio, esta energia poderia ser fornecida para a 1.260.991 moradores, na situação A e 1.558.429 na situação B. Os dados referentes aos resultados energéticos dos outros aterros do estado estão no Apêndice E.

4.4.1.2 Minas Gerais

O estado de Minas Gerais também apresentou resultados positivos quanto ao uso de biodigestores. As Figuras 40 e 41, a seguir apresentam as vazões de metano estimadas para os consórcios de RSU do estado, como o esperado pelo consórcio 13, respectivamente.

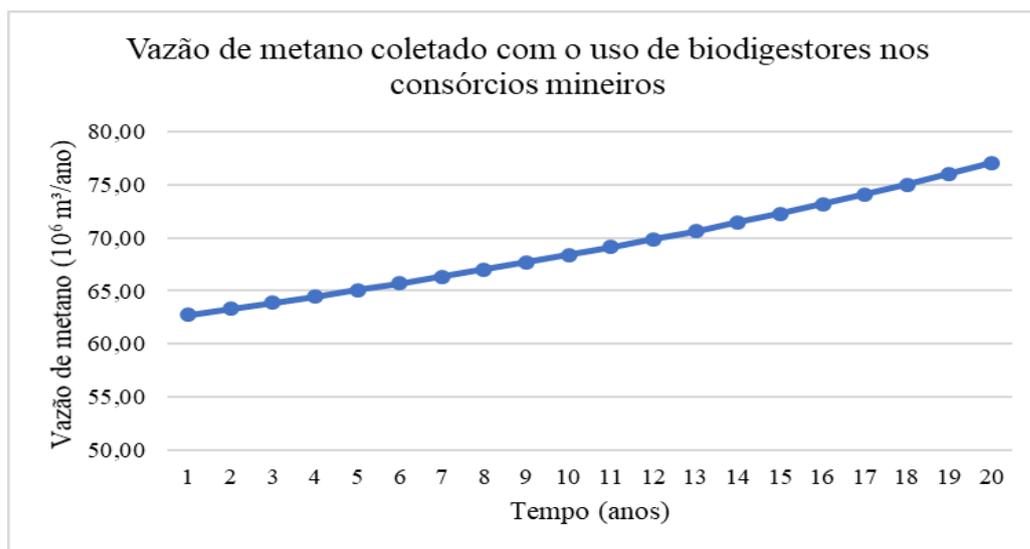


Figura 40: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

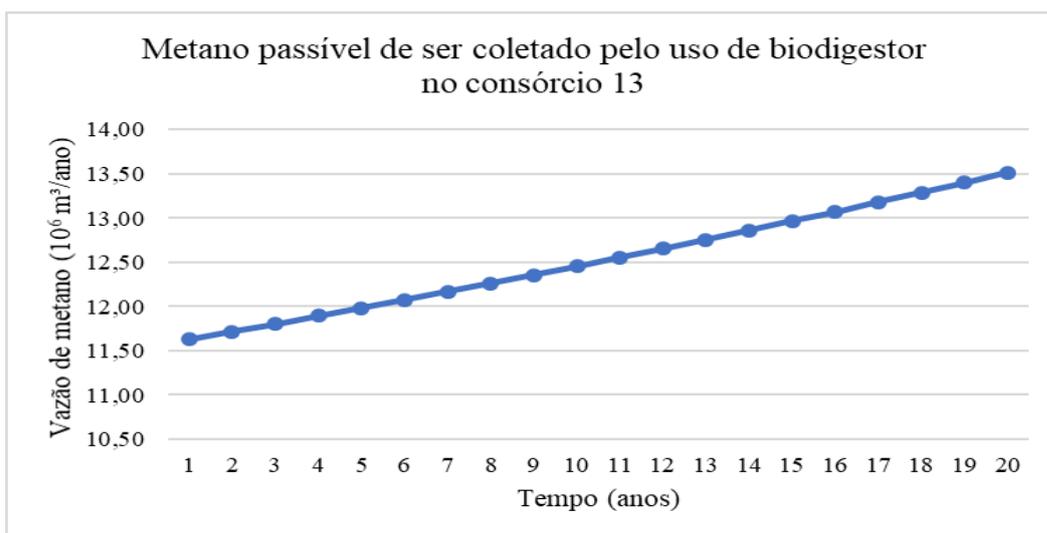


Figura 41: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

De acordo com os resultados obtidos por meio do uso da rotina de Silva et al., (2019), para os consórcios mineiros é esperado uma vazão de 77.10^6 m³ de metano e $13,5. 10^6$ m³ de metano para o consórcio 13, no vigésimo ano. Em relação a potência esperada, os resultados estão apresentados nas Figuras 42 e 43.

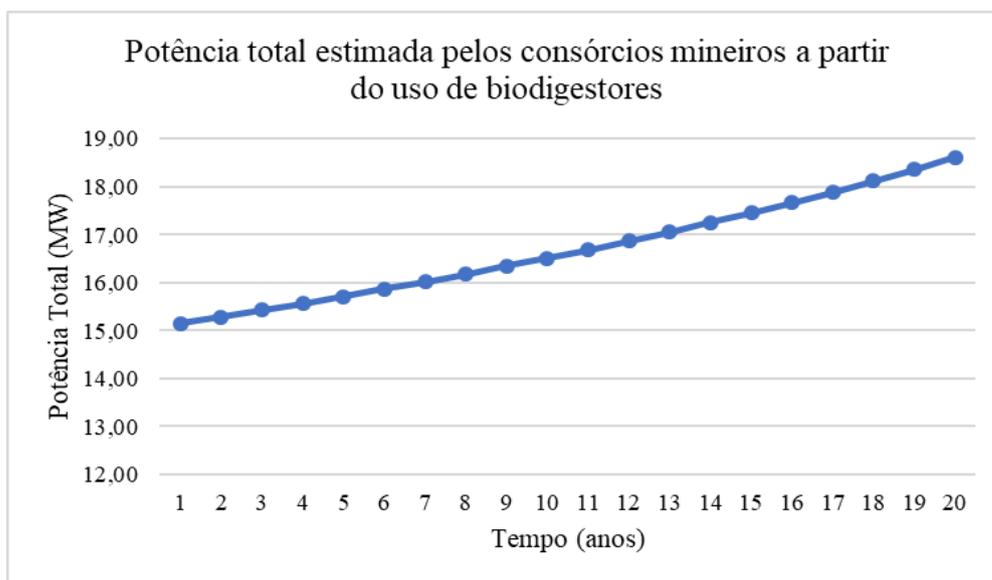


Figura 42: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

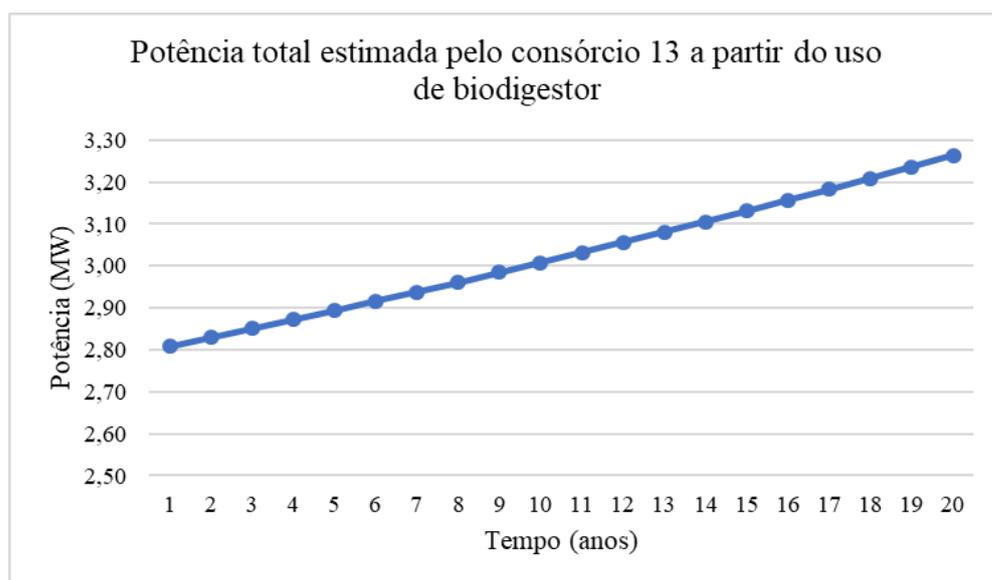


Figura 43: Potência a partir do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Conforme mostra os resultados apresentados, a potência estimada pelo uso de biodigestores, tem um crescimento modesto durante os 20 anos de projeção, do mesmo modo que os resultados apresentados pelos aterros paulistas. Para os consórcios mineiros, é estimada uma potência que varia entre 15 MW a 18 MW, e para o consórcio 13 de 2,8 MW a 3,3 MW.

Para os consórcios do estado de Minas Gerais, os coeficientes de determinação encontrados foram de 0,8874 no caso A e de 0,9157 no caso B. A Figura 44, apresenta a relação obtida, equação 23, e equação 24, para o estado de Minas Gerais, considerando as situações A e B, respectivamente.

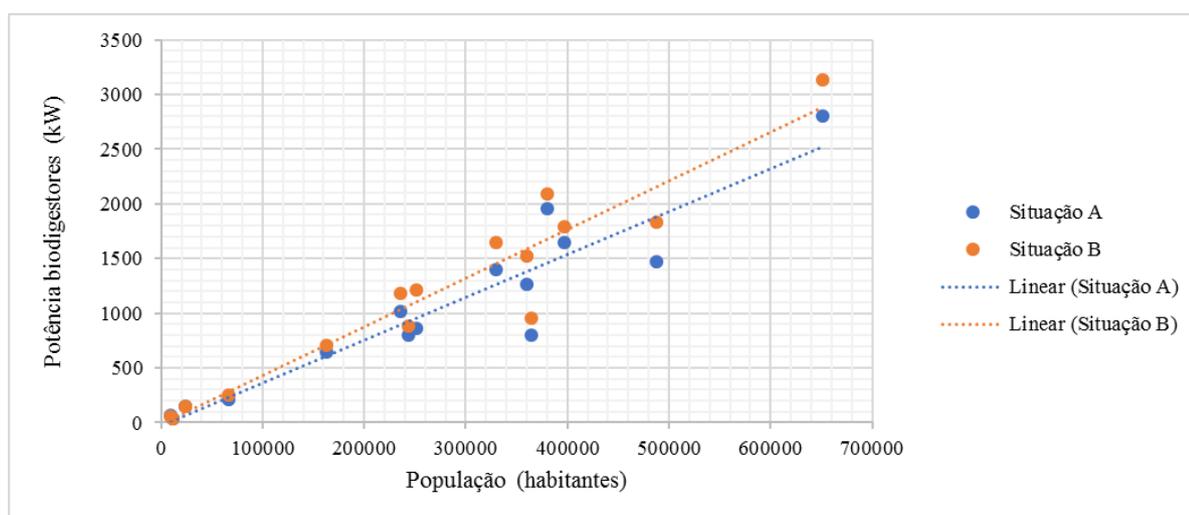


Figura 44: Relação entre população e potência no uso de biodigestores para o estado de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor

$$Potência (kW) = 0,0039[pop. (hab.)] - 23,486 \quad (23)$$

$$R^2 = 0,8874$$

$$Potência (kW) = 10,0029[pop. (hab.)] + 1106 \quad (24)$$

$$R^2 = 0,9157$$

A Tabela 16, apresenta os dados obtidos quanto aos resultados energéticos para os consórcios mineiros e a Tabela 17, apresenta os resultados referentes ao consórcio 13. Os resultados referentes aos outros consórcios estão disponíveis no Apêndice F.

Tabela 16: Energia calculada para a geração de energia elétrica a partir do biogás de digestores anaeróbios no estado de Minas Gerais

Pot. do estado na situação A (MW)	Pot. do estado na situação B (MW)	Energia (MWh/ano) do estado sit. A	Energia (MWh/ano) do estado sit. B
15,2	17,5	100.938,2	116.162,9

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

Tabela 17: Energia calculada para a geração de energia elétrica a partir do biogás de digestores anaeróbios no consórcio 13

Pot. do consórcio 13 na situação A (MW)	Pot. do consórcio 13 na situação B (MW)	Energia (MWh/ano) do consórcio 13 sit. A	Energia (MWh/ano) do consórcio 13 sit. B
2,8	3,1	19.049,1	20.993,0

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

A partir dos dados observados pela Tabela 16, a geração total de eletricidade estimada para todos os consórcios mineiros foi de 100.938,2 MWh/ano na situação A e de 116.162,9 MWh/ano na situação B. Quanto ao Consórcio 13 a geração de eletricidade esperada é de 19.049,1 MWh/ano e de 20.993,0 MWh/ano, nas situações A e B respectivamente.

Relacionando estes resultados com os dados da EPE (2018a), onde que em 2017, o consumo residencial de energia elétrica no estado de Minas Gerais foi de 10.724 GWh/ano, para um número de consumidores igual a 7.230.052 residências, através dos cálculos obteve-se uma relação entre os resultados do presente trabalho, onde a energia da situação A poderia atender a 68.052 residências no estado de Minas Gerais e 78.316 na situação B. Em relação a população, considerando 3,3 habitantes por domicílio, esta energia poderia atender a 224.571 moradores, na situação A e 258.444 na situação B.

O estudo de Brito et al. (2019), também estimou a potência gerada pelos 27 consórcios mineiros através da utilização de digestores anaeróbios. Segundo o estudo supracitado a potência estimada foi de 3.274 kW, ou 3,27 MW. Os resultados encontrados por Brito et al. (2019), foram bem inferiores aos encontrados neste estudo. Fatores como a metodologia utilizada para o estudo pelos autores para estimar a geração de metano bem como o potencial

energético pelo uso de digestores anaeróbios podem ter impactado na grande diferença dos resultados obtidos em relação ao presente trabalho, além de outros parâmetros que foram considerados pelos autores.

Os resultados obtidos pelo uso de digestores anaeróbios foram positivos para ambos os estados estudados, em especial para o estado de São Paulo, que apresentou melhores resultados, visto que, como já citado anteriormente, entre os aterros paulistas estudados, há a presença de cidades populosas, diferentemente do estado de Minas Gerais.

4.4.2 Resultados Econômicos

Considerando a utilização de biodigestores anaeróbios foram feitas duas análises, uma considerando o primeiro ano de produção de energia (situação A) e a outra utilizando como base o décimo quinto ano (situação B). Como explicitado anteriormente, a medida que os anos passam a potência tende a aumentar, visto que há um crescimento da população atendida o que impacta diretamente na geração de resíduos. Sendo assim, considerando o ano inicial, indiferente da potência do biodigestor aumentar, o valor máximo será aquele obtido pelo ano inicial. No entanto, ao considerar o décimo quinto ano, o empreendimento estará apto a trabalhar com as potências que vão aumentando conforme a vida útil do projeto. Desta forma, os resultados obtidos por ambos estados estão apresentados nos tópicos a seguir:

4.4.2.1 São Paulo

Na análise do Cenário 1, além dos mesmos aterros apresentados na seção 4.3.1.1, o aterro 26 na situação B, não apresentava os requisitos para participar deste cenário. Desta forma, nos resultados econômicos relacionados ao sistema de compensação, somente 9 aterros não apresentaram resultados econômicos favoráveis quanto ao uso de biodigestores, em ambas situações. Quanto ao LCOE, este apresentou um valor médio de R\$ 959,02/MWh com base na situação A e de R\$ 1062,37/MWh na situação B. Estes altos valores encontrados em relação aos LCOE médio, pode ser explicado devido aos altos valores de LCOE encontrados para

alguns aterros sanitários estudados, conforme observa-se no Apêndice G. Os valores referentes ao TIR, apresentou uma média de 20,29% na situação A e 16,42% na situação B.

No Cenário 2, os resultados tiveram uma maior variação considerando as situações A e B. Na situação A, 15 projetos não foram viáveis, no entanto analisando a situação B, 37 projetos. Quanto ao LCOE, os valores médios encontrados nas situações A e B foram respectivamente: R\$ 820,25/MWh e R\$892,69/MWh. Ainda neste cenário, os valores médios de TIR encontrados nos empreendimentos viáveis em ambas as situações analisadas foram: 9,13% e 6,41%, nas situações A e B, respectivamente.

A relação entre o LCOE com as potências analisadas foi obtida. A Figura 45, apresenta esta relação, onde a equação 25 representa a situação A com uma correlação de 0,7923, e a equação 26, situação B, com uma correlação de 0,7388 para o estado de São Paulo. Os resultados mostram que para a potência mínima para viabilizar os projetos no cenário 1, situação A é de 395,4 kW e de 568,22 kW na situação B. Estes valores estão encontrados são superiores as potências mínimas que viabilizaram tais projetos.

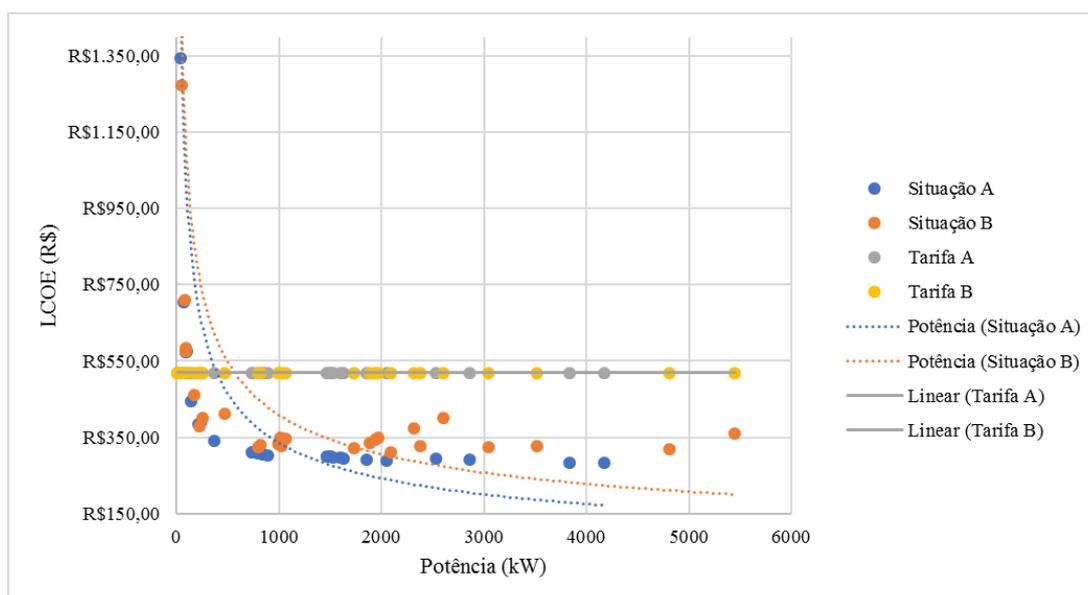


Figura 45: Relação entre potência e LCOE no uso de biodigestores para o estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor

$$LCOE (R\$) = 8625,2556[Potência(kW)]^{-0.4700} \quad (25)$$

$$R^2 = 0,7923$$

$$LCOE (R\$) = 7543,5312[Potência(kW)]^{-0.4220} \quad (26)$$

$$R^2 = 0,7388$$

Ao analisarmos de forma mais abrangente ambos cenários, foi notável que a situação A obteve melhores resultados econômicos que a situação B. Isto pode ter ocorrido devido ao investimento inicial (e, conseqüentemente, os custos de operação e manutenção) no segundo caso apresentar-se consideravelmente superior ao primeiro, visto que, em sua maioria, o décimo quinto ano possui na maioria dos casos uma potência superior ao ano inicial, portanto demandando de investimentos mais elevados. Por conseguinte, embora a situação B consiga aproveitar os possíveis incrementos no potencial energético ano a ano, mostrou-se menos atrativa.

O aterro 7 somente foi analisado no cenário 2, apresentando bons resultados, o que já era de se esperar, visto que é o aterro que recebe a maior quantidade de resíduos. As informações referentes ao cenário 2, do aterro 7 estão apresentadas na Tabela 18:

Tabela 18: Resultados referentes ao aterro 7 para o Cenário 2

VPL A (10⁶)	VPL B (10⁶)	LCOE A (por MWh)	LCOE B (por MWh)	TIR A	TIR B
R\$ 67,93	R\$ 28,39	R\$ 275,41	R\$ 296,84	13,35%	11,21%

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o aterro 7, a situação A, apresentou os melhores resultados em todos os parâmetros analisados. Todavia, apesar das perdas econômicas relativas a situação B, é importante levar em conta os ganhos ambientais decorrentes de sua aplicação, visto que uma menor área de aterro é utilizada. Pois, os resíduos excedentes da situação A são aproveitados na situação B, já que o dimensionamento do empreendimento está preparado para gerenciar o aumento estimado no volume de resíduos. Quanto as outras informações, estas podem ser conferidas no Apêndice G (cenário 1) e Apêndice H (cenário 2).

4.4.2.2 Minas Gerais

No estado de Minas Gerais, todos os consórcios estudados foram analisados nos dois cenários, uma vez que todos apresentaram suas potências dentro do estabelecido pelas resoluções anteriormente citadas. Não diferentemente dos resultados obtidos pelo estado de São Paulo, o cenário 1 apresentou os melhores resultados para os consórcios estudados. Neste caso somente 2 aterros sanitários não apresentaram viabilidade em seus projetos, tanto na situação A quanto na situação B. Em relação ao LCOE, o valor médio encontrado foi de R\$ 444,40/MWh, com base na situação A e de R\$ 467,22/MWh na situação B, em ambos cenários. Em relação ao TIR, os valores tiveram uma média de 28,03% na situação A e 24,26% na situação B, conforme Apêndice I.

Em relação ao cenário 2, na situação A, somente 5 empreendimentos mostraram-se inviáveis. No entanto, na situação B, 12 empreendimentos não apresentaram resultados econômicos favoráveis, conforme apresenta, Apêndice J. Neste cenário, os valores médios de TIR encontrados nos empreendimentos viáveis em ambas as situações analisadas foram: 8,38% e 6,39%, nas situações A e B respectivamente. Assim como esperado, a situação B foi menos interessante economicamente, nas análises como ocorreu com os aterros paulistas.

Quanto ao Consórcio 13, este apresentou resultados positivos para a produção de eletricidade através da implantação de digestores anaeróbios, em ambos cenários. A Tabela 19, apresenta os resultados referentes ao cenário 1 e a Tabela 20, referentes ao cenário 2:

Tabela 19: Resultados referentes ao consórcio 13 para o Cenário 1

VPL A (10⁶)	VPL B (10⁶)	LCOE A	LCOE B	TIR A	TIR B
		(por MWh)	(por MWh)		
R\$ 50,13	R\$ 47,73	R\$ 282,01	R\$ 309,49	37,74%	32,73%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 20: Resultados referentes ao consórcio 13 para o Cenário 2

VPL A (10⁶)	VPL B (10⁶)	LCOE A (por MWh)	LCOE B (por MWh)	TIR A	TIR B
R\$ 4,19	R\$ 0,23	R\$ 258,88	R\$ 284,30	12,67%	10,13%

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores médios da TIR dos empreendimentos viáveis para o cenário 2 entre os dois estados apresentaram valores próximos, com uma diferença de 0,75% na situação A e 0,02% na situação B, resultado justificado pelo fato do valor a ser utilizado para a venda da energia ser o mesmo, ou seja R\$ 311,00.

Todavia, avaliando o mesmo cenário entre os estados (cenário 1), pôde-se notar uma variação superior entre as médias das TIR de 7,42% e 7,5% nas situações A e B respectivamente, pois o preço a ser utilizado pelo sistema de compensação se difere nos dois estados, sendo maior em Minas Gerais. Estes resultados foram coerentes e estão de acordo aos encontrados considerando o aproveitamento energético do biogás de aterro.

Quanto aos valores médios de LCOE, nota-se uma grande variação entre os dois estados, pois os valores médios encontrados para os aterros do estado de São Paulo são quase que o dobro das encontradas pelos consórcios mineiros. Isto deve-se ao fato de que no estado de São Paulo ocorreu uma maior variação nos valores encontrados pelo LCOE entre os aterros estudados, sendo que alguns empreendimentos apresentaram valores superiores a R\$ 4.000/MWh.

Para o estado de Minas Gerais a relação entre o LCOE com as potências analisadas também foi obtida. A Figura 46, apresenta esta relação, onde a equação 27 apresenta o caso A com uma correlação de 0,8098, e a equação 28, o caso B, com uma correlação de 0,7811. Os resultados mostram que para a potência mínima para viabilizar os projetos no cenário 1, situação A é de 135,75 kW e de 568,22 kW na situação B. Estes valores encontrados são superiores as potências mínimas encontradas que possibilitaram a viabilização de tais projetos.

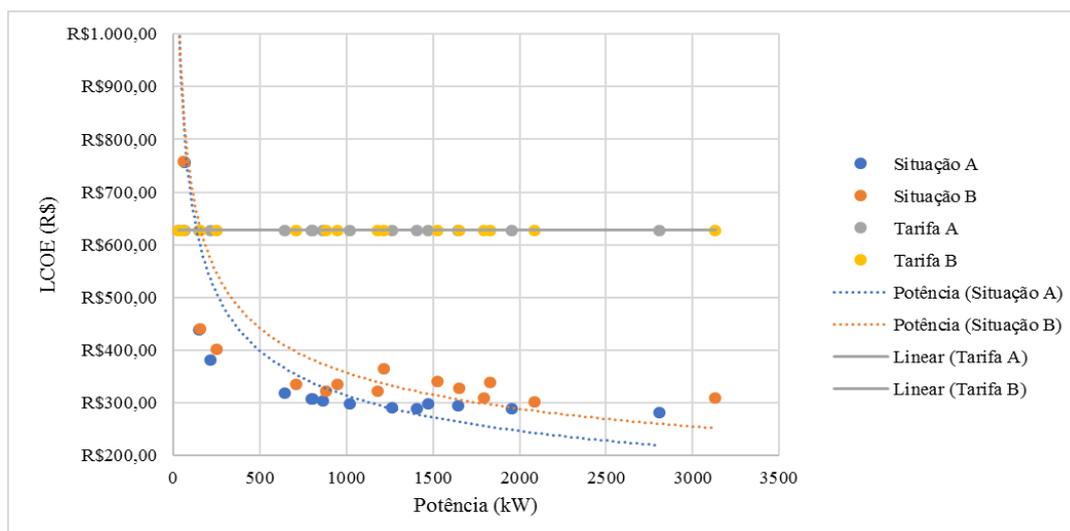


Figura 46: Relação entre LCOE e potência para o estado de Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor

$$LCOE (R\$) = 3448,0382[Potência (kW)]^{-0.3468} \quad (27)$$

$$R^2 = 0,8098$$

$$LCOE (R\$) = 2761,9840[Potência (kW)]^{-0.3066} \quad (28)$$

$$R^2 = 0,7811$$

Os resultados econômicos em relação ao uso do biogás de digestores anaeróbios foram menos atrativos do que os encontrados pelo uso do biogás de aterro sanitário, o que era de se esperar, visto que há um maior investimento para a implantação deste tipo de empreendimento. Uma parcela considerável dos aterros/consórcios não apresentou bons resultados econômicos, em especial considerando a venda da energia excedente em leilões, devido ao preço praticado. O uso de digestores anaeróbios para a geração de eletricidade mostrou-se mais oneroso e sendo menos promissor, como os resultados encontrados por Brito et al. (2019), o que pode dificultar a expansão desta tecnologia no país.

Considerando as situações estudadas, em todos os casos a situação A mostrou-se mais interessante que a situação B. Muitos empreendimentos tiveram bons resultados na situação A e o mesmo não ocorreu ao serem analisados na situação B. Apesar dos ganhos energéticos e ambientais, a situação B mostra-se menos atrativa para a maior parte dos empreendimentos estudados.

4.5 Análise de Sensibilidade

Uma análise de sensibilidade foi feita para mensurar qual o impacto médio de variações nos preços dos componentes do fluxo de caixa analisados (investimento inicial, tarifa de venda, custos de operação e manutenção e custos relativos a troca do motor) no VPL dos empreendimentos estudados. A Tabela 21 apresenta o valor médio de sensibilidade encontrado nos diferentes sistemas, considerando uma variação de 10% nos preços.

Tabela 21: Análise de sensibilidade (média entre os estados)

Local	Investimento Inicial (10⁶ R\$)	Tarifa (10⁶ R\$/kW)	Custos O&M (10⁶ R\$)	Custo de troca de motores (10⁶ R\$)
Aterros-SP	-R\$ 4,02	-R\$ 5,93	-R\$ 1,11	-R\$ 0,43
Aterro-MG	-R\$ 0,98	-R\$ 1,37	-R\$ 0,27	-R\$ 0,10
Biodigestores-SP A	-R\$ 4,49	-R\$ 5,33	-R\$ 1,24	-R\$ 0,40
Biodigestores-SP B	-R\$ 5,49	-R\$ 5,76	-R\$ 1,51	-R\$ 0,49
Biodigestores-MG A	-R\$ 1,42	-R\$ 1,59	-R\$ 0,39	-R\$ 0,12
Biodigestores-MG B	-R\$ 3,10	-R\$ 3,12	-R\$ 1,93	-R\$ 1,63

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos mostram que há maior sensibilidade de todos os componentes estudados no sistema de biodigestores. Os empreendimentos do estado de São Paulo são notadamente, aqueles que sofrem maior impacto em seus resultados econômicos com as possíveis flutuações de preços. As variáveis de maior sensibilidade foram a tarifa e o investimento inicial, respectivamente. Os custos de operação e manutenção obteve sensibilidade considerável. Já os custos relativos a troca dos motores foi aquela que apresentou o menor impacto entre os componentes analisados. É possível notar também que a diferença da sensibilidade do investimento inicial com relação a tarifa torna-se mais estreita no sistema de biodigestores, isso pode ser explicado pelo considerável acréscimo no volume de investimentos necessários à implantação desse sistema comparativamente aos aterros.

As Figuras apresentadas a seguir têm por objetivo explicitar o impacto da variação dos preços de cada componente no VPL, para cada empreendimento analisado por estado. Foram

adotadas variações gradativas de 10%, conforme a Tabela 21, em cenários otimistas e pessimistas (de 70% a 130% do valor base) (Santos et al., 2019), sendo o VPL encontrado no Cenário 2 aquele considerado o valor base (100%):

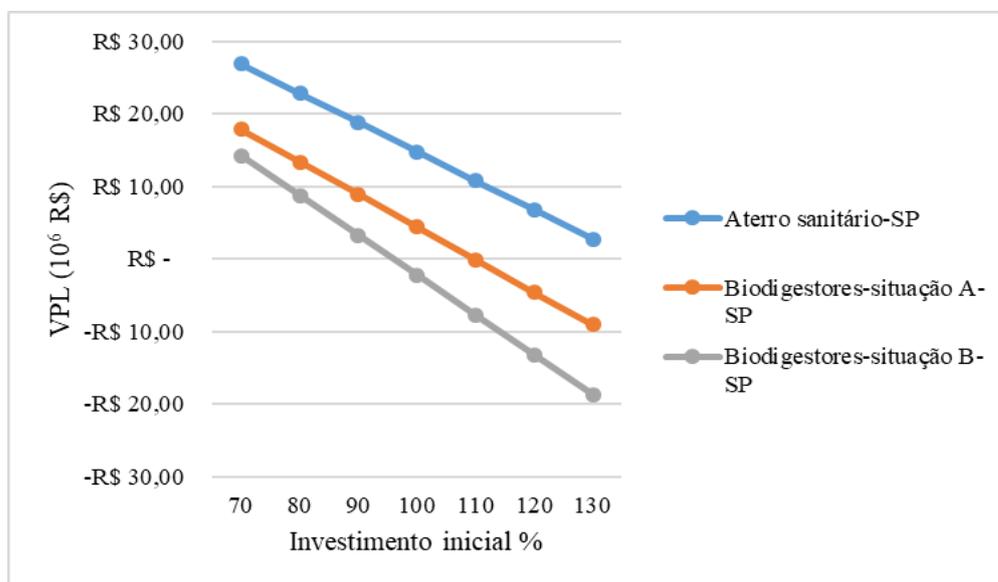


Figura 47: Análise de sensibilidade relacionando o investimento inicial ao VPL em São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor

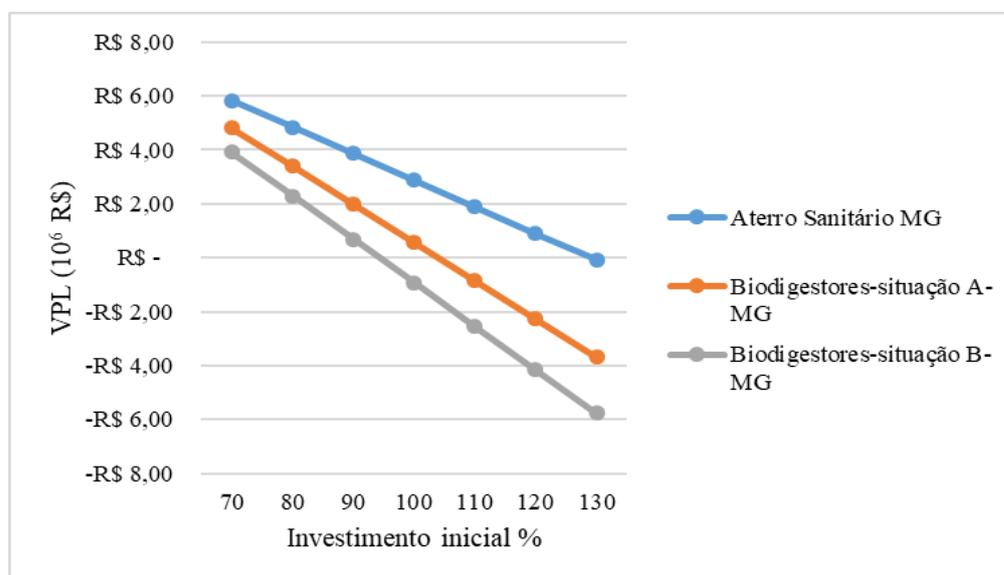


Figura 48: Análise de sensibilidade relacionando o investimento inicial ao VPL em Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 47 e 48, mostram o investimento inicial tem um impacto considerável nos sistemas estudados, em especial o sistema de digestores anaeróbios e o que é justificável visto que o investimento inicial para a sua implantação é maior.

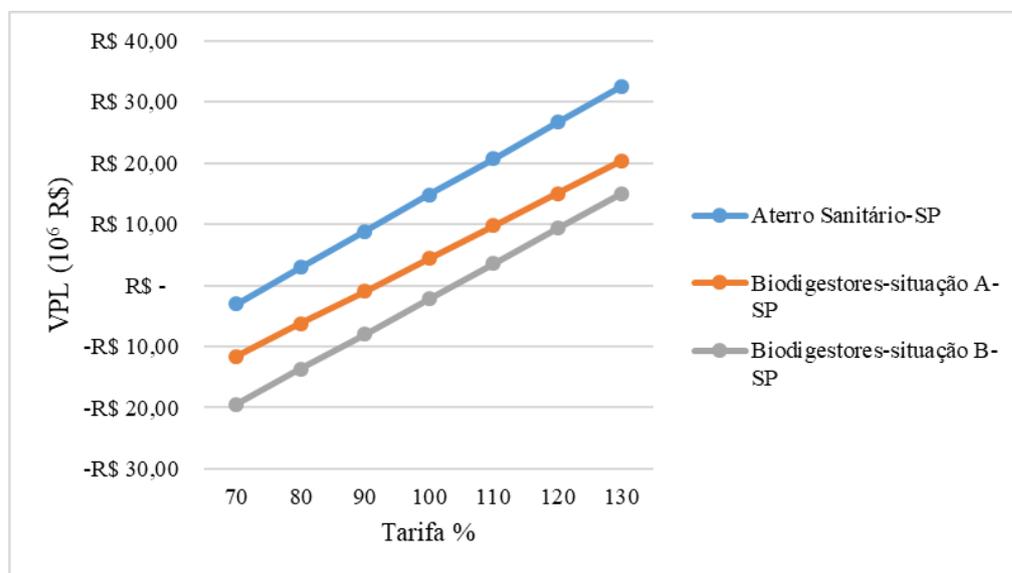


Figura 49: Análise de sensibilidade relacionando a tarifa ao VPL em São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor

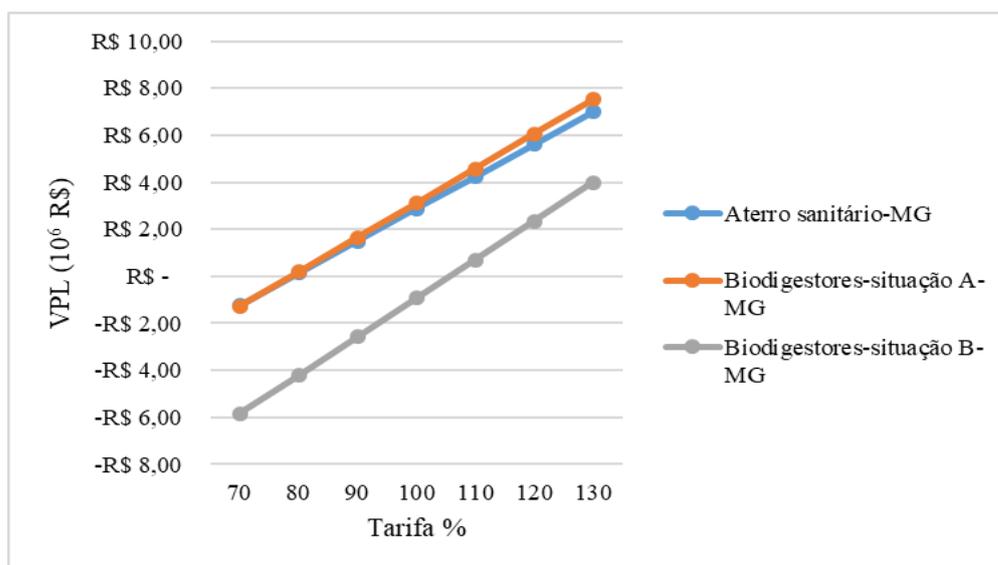


Figura 50: Análise de sensibilidade relacionando a tarifa ao VPL em Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 49 e 50, apresentam o impacto da tarifa de energia nos sistemas estudados. A tarifa foi o parâmetro mais sensível, o que enfatiza como as variações na tarifa, impactam na viabilidade destes empreendimentos.

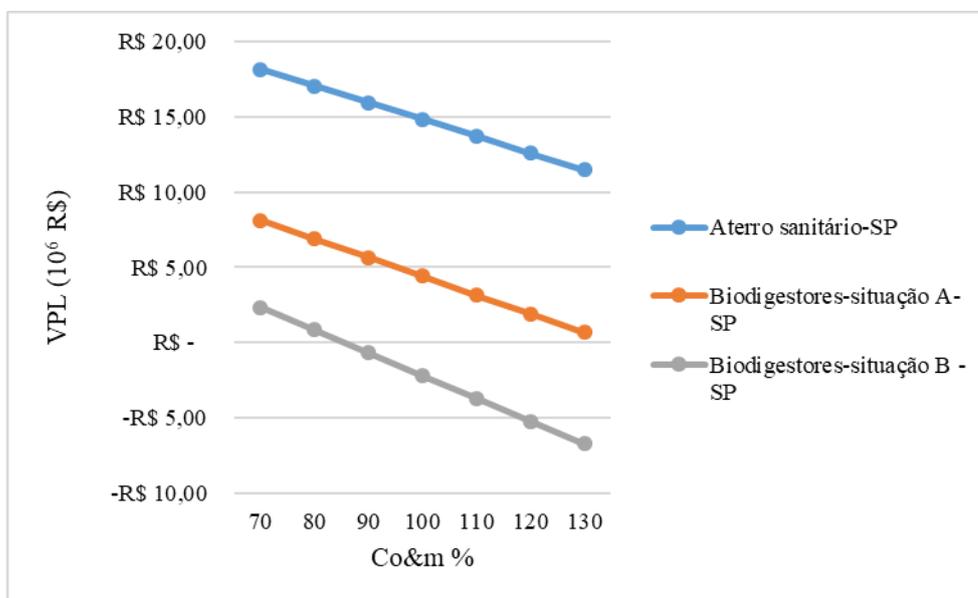


Figura 51: Análise de sensibilidade relacionando os CO&M ao VPL em São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor

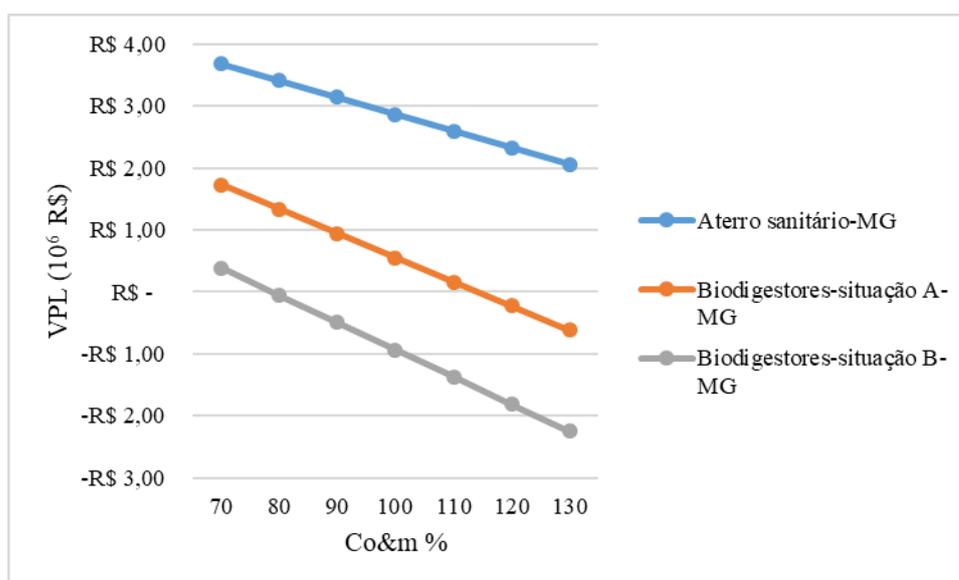


Figura 52: Análise de sensibilidade relacionando os CO&M ao VPL em Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 51 e 52 apresentam o impacto dos custos de manutenção e operação no VPL dos empreendimentos estudados. As variações neste parâmetro foram mais significativas no sistema de digestores anaeróbios, em especial na situação B.

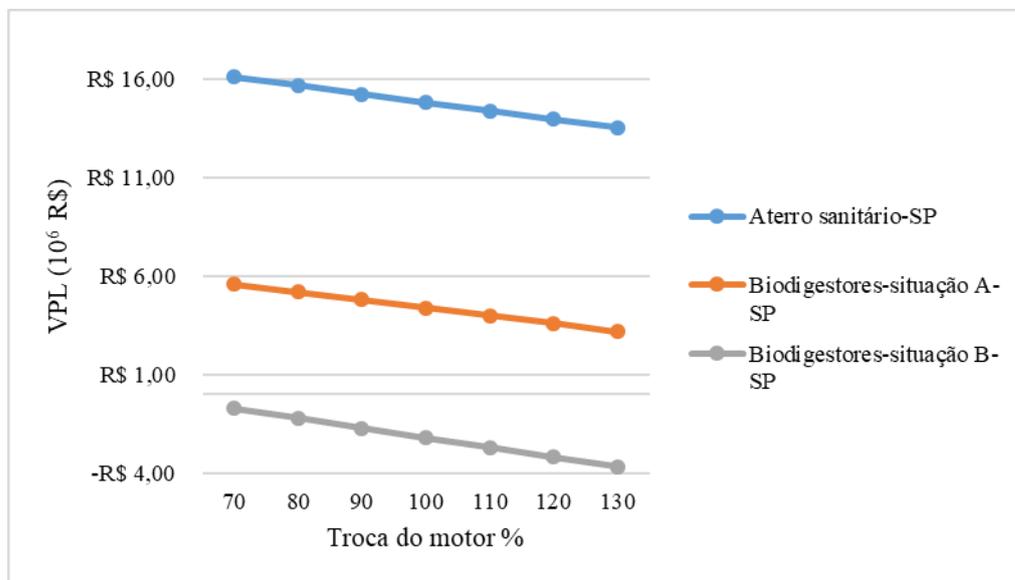


Figura 53: Análise de sensibilidade relacionando os Custos relativos a troca do motor ao VPL em São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor

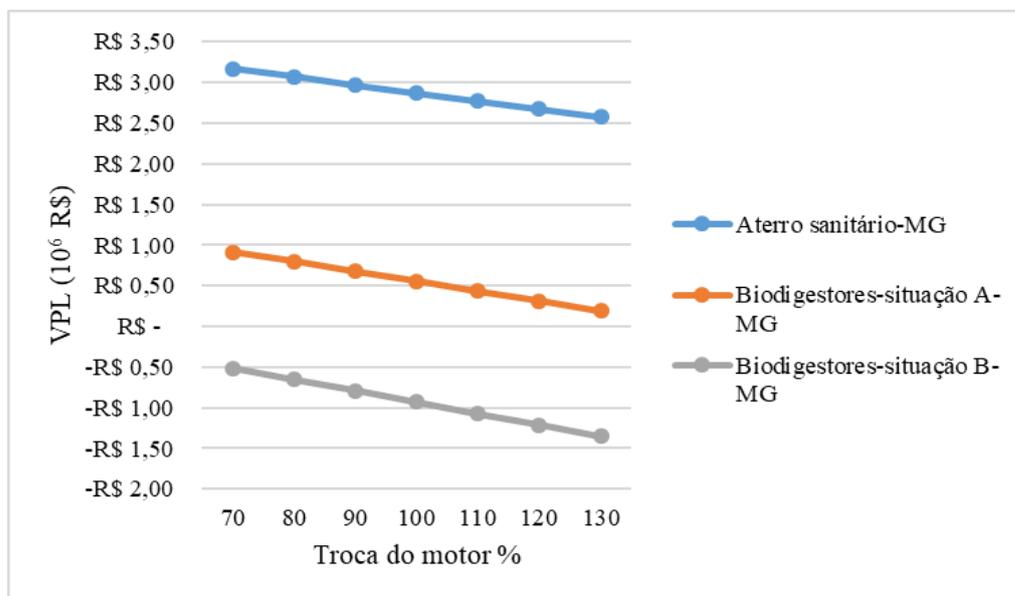


Figura 54: Análise de sensibilidade relacionando os Custos relativos a troca do motor ao VPL em Minas Gerais

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com as Figuras 53 e 54, observa-se que a troca de motor é o parâmetro menos sensível nos dois sistemas, causando uma pequena variação no VPL.

4.6 Emissão de Gases de Efeito Estufa evitados

Neste tópico foi feita uma análise considerando os empreendimentos viáveis para se obter as emissões evitadas com a utilização do biogás para a geração de eletricidade, conforme mostra a Figura 55:

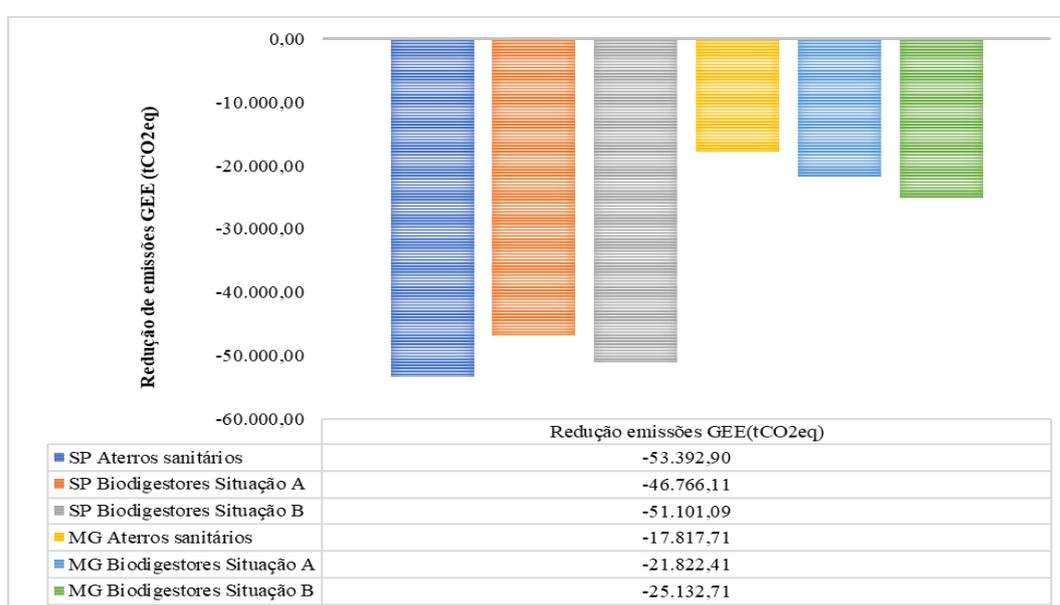


Figura 55: Emissões de GHG evitadas com o uso destes sistemas

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os resultados obtidos a emissão de GHG evitados anualmente, seria de 53.392,90 tonCO_{2eq}/MWh no estado de São Paulo e de 17.817,71 tonCO_{2eq}/MWh para o estado de Minas Gerais, considerando o aproveitamento do biogás de aterro sanitário. Com base no consumo residencial de energia elétrica pelos estados em 2017 (EPE, 2018a), estas emissões de GEE evitadas correspondem a 0,63% do total emitido pelo estado de São Paulo e 0,77% do total emitido pelo estado de Minas Gerais.

Quanto ao uso de biogás de digestores anaeróbios, os resultados quanto as emissões de GHG evitados anualmente são estimados em 46.766,11 tonCO_{2eq}/MWh na situação A e de

51.101,09 tonCO_{2eq}/MWh na situação B no estado de São Paulo, o que corresponde a 0,55% e 0,60% do total emitido pelo estado nas duas situações respectivamente. Em relação ao estado de Minas Gerais, estes valores seriam de 21.822,41 tonCO_{2eq}/MWh na situação A o que corresponde a 0,94% e de 25.132,71 tonCO_{2eq}/MWh na situação B que representa 1,08% dos GEE emitidos pelo estado em 2017. Tais resultados enfatizam que o aproveitamento do biogás de resíduos é importante não só na geração de energia elétrica como também na mitigação na emissão de GEE.

4.7 Análise entre os resultados obtidos pelo Aterro Sanitário e Digestores

Anaeróbios

Na análise energética os aterros e os biodigestores apresentaram valores próximos quanto a geração de energia elétrica. A situação B para o uso de digestores anaeróbios obteve uma geração de energia elétrica superior à esperada pela geração de energia elétrica através de aterros sanitários. Tais resultados mostram que o aproveitamento energético dos RSU em ambos sistemas deve ser considerado, visto que é uma alternativa atraente para a geração de energia elétrica.

Quanto à análise econômica, o aterro sanitário obteve os melhores resultados, visto que o investimento inicial é inferior ao necessário para a implantação dos digestores anaeróbios. Dos 54 empreendimentos estudados, no cenário 1, 47 empreendimentos apresentaram resultados favoráveis a geração de energia elétrica através dos aterros sanitários, enquanto no cenário 2, 40. Ao analisar a geração de energia elétrica através de digestores anaeróbios, houve grandes variações devido as diferentes situações. No cenário 1, na situação A e B, 43 empreendimentos foram viáveis. Quanto ao cenário 2, na situação A, 32 empreendimentos apresentaram-se viáveis enquanto na situação B este número cai para 5. O número de empreendimentos cai consideravelmente devido à queda no preço a ser considerado para a venda da energia, que é de R\$ 311,00/MWh e também devido ao dimensionamento para o último ano ser muito oneroso, e muitos empreendimentos possuem os valores da TIR próximo de 10%. O cenário 1, considerando o sistema de compensação da GD, foi aquele que proporcionou melhores resultados econômicos tanto para os aterros quanto para os digestores

anaeróbicos, vistos que as taxas de venda de energia consideradas neste são superiores às utilizadas no segundo cenário.

Quanto aos valores encontrados pelo LCOE, pode-se traçar um comparativo com Santos et al (2019), que desenvolveram um estudo de viabilidade econômica considerando três diferentes sistemas para o gerenciamento de resíduos na cidade de São José dos Campos, sendo estes sistemas: biogás de aterro sanitário, uso de digestores anaeróbios e incineração. No caso do sistema de aterro sanitários o valor do LCOE encontrado pelo estudo previamente citado foi de R\$ 371/MWh, o que é um valor próximo aos encontrados neste estudo, que variaram entre R\$ 312,36/MWh e R\$ 387,65/MWh. Quanto ao sistema de digestores anaeróbios, o LCOE encontrado por Santos et al. (2019) foi de R\$ 543,62/MWh, e, no presente estudo, estes valores ficaram entre R\$ 444,40/MWh e R\$ 1039,73/MWh. Desta forma, fica evidente que os valores encontrados neste estudo se apresentaram consideravelmente próximos daqueles apresentados em Santos et al. (2019). Faz-se necessário explicitar que, no presente estudo, foi analisado uma gama de empreendimentos com diferentes faixas e comportamentos populacionais e geração de resíduos bastante distinta.

O LCOE encontrado considerando o sistema de incineração por Santos et al. (2019), foi de R\$ 620,25/MWh e para o sistema de incineração combinado com o uso de digestores anaeróbios foi de aproximadamente R\$ 586,08/MWh. Um outro estudo realizado por Silva et al. (2020) encontrou um valor de LCOE mínimo de R\$ 257,25/MWh para uma população de 3 milhões de habitantes, que possibilitaria viabilizar empreendimentos para a geração de energia elétrica através da incineração de resíduos.

Estes altos valores de LCOE encontrados indicam que em outros sistemas para o tratamento de RSU (como os digestores anaeróbios), há barreiras financeiras para a sua implantação e expansão no Brasil, em especial para o atendimento de pequenas faixas populacionais. Isto pode ser enfatizado ao se analisar os preços tetos estabelecidos pelos leilões entre 2018 (EPE, 2018b) e 2019 (EPE, 2019b) que variaram entre R\$ 292,00/MWh e R\$ 329,00/MWh, para energia elétrica através da biomassa e termelétrica a biomassa, considerando novos empreendimentos. Estes baixos valores estabelecidos não contribuem para que sistemas mais modernos de tratamento de RSU possam ser implementados no Brasil. Os insumos e equipamentos utilizados para a implantação destes empreendimentos são em sua maioria importados, desta forma estão sujeitas as flutuações cambiais e aos impostos sobre importações.

O alto custo envolvido para a implantação destes empreendimentos, faz com que a sua utilização somente seja interessante para grandes cidades, mostrando a necessidade de incentivos governamentais para que haja um maior interesse no uso destes sistemas.

Os resultados obtidos pelo presente trabalho mostram que o sistema de compensação na geração distribuída conforme as resoluções da ANEEL apresentadas é o mais atrativo para ambos os sistemas analisados no presente estudo, o que facilitou os bons resultados econômicos apresentados por uma parte dos empreendimentos estudados, em especial ao sistema de digestores anaeróbios. Desta forma estas tecnologias de gerenciamento de resíduos podem ter impactos positivos na matriz elétrica destes locais e podem colaborar no desenvolvimento da geração distribuída nas cidades como preconiza Santos et al. (2019). Quanto aos impactos econômicos estes empreendimentos possibilitam a geração de receita e a geração de empregos para os municípios envolvidos.

Capítulo 5

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial energético de RSU a partir do uso do biogás de aterro sanitário e de digestores anaeróbios na produção de energia elétrica, bem como uma análise econômica destes empreendimentos, para os estados de São Paulo e Minas Gerais. Para o estado de São Paulo, foram analisados 39 aterros sanitários que atendem 139 cidades e 15 consórcios de aterros para o estado de Minas Gerais, que abrangem 203 cidades. Segundo os resultados, a população dos dois estados apresentou um crescimento considerado para os próximos 20 anos, bem como a geração de resíduos.

Em relação ao aproveitamento do biogás de aterro, os resultados apresentados foram em sua maioria positivos, sendo que o estado de São Paulo apresentou melhores resultados, apresentando uma capacidade de potência instalada de 139,5 MW e o estado de Minas Gerais de 21,9 MW. No entanto, vale destacar que os valores obtidos aqui podem ser inferiores ao potencial dos dois estados, visto que o estudo não abrangeu todas as cidades existentes. Os resultados econômicos também apresentaram resultados favoráveis para a maioria dos empreendimentos, pois a maior parte dos projetos estudados apresentaram-se economicamente viáveis.

Quanto ao uso de biodigestores anaeróbios, as potências ficaram entre 130 MW e 173,8 MW em São Paulo e entre 15 MW e 18 MW em Minas Gerais. Quanto aos aspectos econômicos as análises considerando o sistema de compensação na geração distribuída foram mais satisfatórios em relação aos preços praticados em leilão, onde uma parte considerável dos empreendimentos apresentaram bons resultados econômicos. No entanto, no cenário 2, menos da metade dos empreendimentos estudados apresentou resultados econômicos positivos, em relação ao uso de digestores anaeróbios no Brasil, o que mostra que são necessários mais esforços governamentais para tornar o seu uso uma realidade possível para o tratamento de RSU no país. Além disso, tanto nos cenários 1 e 2, a situação A, apresentou os melhores resultados econômicos o aproveitamento energético, visto que uma maior quantidade de empreendimentos se apresentaram como viáveis. A análise de sensibilidade mostrou que a tarifa de energia é o

parâmetro de maior impacto no VPL. Com base na energia utilizada pelos dois sistemas a emissão GEE a ser evitada pode alcançar o valor de $-216,032,93 \text{ tonCO}_{2\text{eq}}/\text{MWh}$.

O aproveitamento energético do biogás proveniente de RSU apresenta uma potencial fonte de energia renovável, além de mitigar os impactos ambientais e a emissão de GEE decorrentes do gerenciamento destes resíduos. Não diferentemente é uma alternativa interessante para o Brasil, tanto no aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário quanto na implantação de digestores anaeróbios para o tratamento de resíduos.

Apesar de esforços do governo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, no intuito de acabar com os problemas relacionados ao gerenciamento dos resíduos no país, ainda há muito o que ser feito, visto que ainda uma porção considerável dos resíduos produzidos no país não possuem uma destinação adequada. O Brasil tem um longo caminho a percorrer para se alcançar um melhor gerenciamento e destinação de RSU no país. Neste contexto trabalhos como este servem de incentivos para que os gestores busquem alternativas ambientalmente adequadas e lucrativas para o gerenciamento de seus resíduos, bem como possibilita a expansão do uso energético de RSU na matriz energética nacional. O uso do algoritmo feito por Silva et al. (2018) no *software Scilab* mostra-se eficaz para o fornecimento de informações referentes ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, pois os resultados obtidos estão coerentes ao que é proposto e este trabalho mostra que sua aplicabilidade é eficaz e pode ser utilizado na análise de diferentes projetos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste tópico serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Uma proposta de trabalho seria uma análise do potencial energético de outros estados, pois muitos trabalhos concentram-se na região sudeste, então seria interessante conhecer a situação de outras regiões do país, em especialmente naquelas com maior geração de resíduos oriundos da produção pecuária;
- Uma análise ambiental comparando diferentes sistemas de gerenciamento de RSU em diferentes aterros sanitários;

- Um estudo que abordasse possíveis incentivos governamentais, para que esta prática se expanda de forma efetiva no país, pois a porcentagem de biogás de RSU utilizado ainda é muito pequeno;
- Um estudo de aproveitamento energético do biogás de diferentes fontes em Minas Gerais, visto que o estado possui práticas na agricultura e pecuária, de modo a mostrar o impacto do uso desta energia na matriz energética nacional;
- Análises econômicas levando em consideração a separação e reciclagem de materiais;
- Considerar na viabilidade econômica outros grupos geradores para a produção de energia elétrica nos aterros e consórcios estudados.

7. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019. 64p. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro 1992. 7 p.

_____. Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação - NBR 13.896. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 12p.

_____. BR 10004:2004 **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 77 p, 2004.

_____. Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento - NBR 15.849. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento - NBR 8419/1992 **Errata1/1996**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ALIBABA. Industrial Household Organic Waste Shredder. 2020a. Disponível em: <https://www.alibaba.com/product-detail/industrial-household-Organic-Waste-Shredder_1516865947.html?bypass=true>. Acesso em: 24 de ago. 2020

_____. MSW Municipal Solid Waste Sorting Trommel Screen Machine for Organic Fertilizer. 2020b. Disponível em: <https://www.alibaba.com/product-detail/industrial-household-Organic-Waste-Shredder_1516865947.html?bypass=true>. Acesso em: 24 de ago. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril 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, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 de abr. de 2012. Seção 1, p. 53, 2012.

_____. Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 02 de dez .de 2015. Seção 1, p. 45, 2015.

ANEEL, C. T. (2014). Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação-Cedoc.

_____. Superintendência de Concessões e Autorizações para Geração - SCG. Matriz por Fonte e Combustível Final.. Matriz de Energia Elétrica. Data de referência dos dados:

21/04/2020. Disponível em: <
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>>. Acesso em 21 de abr. 2020.

_____. Tarifas Residenciais. 2020. Disponível em:
 <<https://www.aneel.gov.br/dados/tarifas>>. Acesso em 24 de abr. 2020

AGÊNCIA FAPESP. 2019. Mapas interativos mostram potencial de geração de energia do biogás em SP. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/mapas-interativos-mostram-potencial-de-geracao-de-energia-do-biogas-em-sp/31264/>>: Acesso em: 22 de abr. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Biometano. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/institucional/linha-do-tempo-anp>>. Acesso em 04 de out. 2019.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Calculadora do Cidadão, 2020a. Disponível em:<<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>>. Acesso em 29 de abr. 2020.

_____. Cotações e Boletins, 2020b. Disponível em:<<https://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?frame=1>>. Acesso em: 27 de maio 2020

BANCO MUNDIAL. Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. Conestoga-Rovers & Associates, 2004. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/954761468011430611/pdf/332640handbook.pdf>> Acesso e: 24 de jun. 2019.

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciencia; Minas Gerais: Acta, 2012.

BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; SILVA, Tiago Rodrigo da. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 65, p.150-164, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>.

BEYLOT, Antoine; VILLENEUVE, Jacques; BELLENFANT, Gaël. Life Cycle Assessment of landfill biogas management: Sensitivity to diffuse and combustion air emissions. *Waste Management*, [s.l.], v. 33, n. 2, p.401-411, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.017>.

BHARATHIRAJA, B. et al. RETRACTED: Biogas production–A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 90, p.570-582, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093>.

BIANEK, Julia et al. COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS USEPA E IPCC PARA ESTIMATIVA TEÓRICA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO MUNICIPAL. **Biofix Scientific Journal**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.34-40, 18 dez. 2017. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v3i1.56038>.

BIDART, C. (2013). A Techno-economic Assessment of the Generation and Usage of Biogenic Gases in Chile as a Substitute of Natural Gas (Doctoral dissertation, KIT-Bibliothek).

BLUESTEM, 2004. Anaerobic Digestion Feasibility Study. iowadnr.gov/waste/policy/files/bluestem.pdf . Acesso em: 5 fev. 2020. (não disponível online).

BOVE, Roberto; LUNGHI, Piero. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 47, n. 11-12, p. 1391-1401, jul. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2005.08.017>.

BRANKER, K.; PATHAK, M.j.m.; PEARCE, J.m.. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 9, p.4470-4482, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Edição extra.

_____. Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 03 de ago. 2010. Seção 1, p. 3, 2010.

_____. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 dez. 2010. Seção 1, Edição Extra.

_____. Lei Nº 12.490, de 16 de setembro de 2011. Altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999, que dispõem sobre a política e a fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis; o § 1º do art. 9º da Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993, que dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores; as Leis nºs 10.336, de 19 de dezembro de 2001, e 12.249, de 11 de junho de 2010; o Decreto-Lei nº 509, de 20 de março de 1969, que dispõe sobre a transformação do Departamento dos Correios e Telégrafos em empresa pública; a Lei nº 10.683, de 28 de maio de 2003, que dispõe sobre a organização da Presidência da República e dos Ministérios; revoga a Lei nº 7.029, de 13 de setembro de 1982; e dá outras providências.. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 de set. 2011. Seção 1, p. 4, 2011.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 2012. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf. Acesso em: 13 de Ago. 2018.

_____. Agência Nacional do Petróleo. Resolução Nº 8, de 30 de janeiro de 2015. Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, parte integrante desta Resolução. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 de fev. de 2015. Seção 1, p. 100, 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Orientações para elaboração de Plano Simplificado de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PSGIRS - para municípios com população inferior a 20 mil habitantes. In: Plano Simplificado de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PSGIRS – Manual de orientação. 3ª Ed. Brasília: MMA – Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, 2016. p. 89.

_____. Agência Nacional do Petróleo. Resolução Nº 685, de 29 de junho de 2017. (2017a). Estabelece regras para a aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 30 de jun. de 2017. Seção 1, p. 69, 2017.

_____. Resolução Normativa Nº 786, de 17 de outubro de 2017. (2017b) Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 27 de out. de 2017. Seção 1, p. 94, 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>>. Acesso em: 17 de set. 2018.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Acordo de Paris. 2019. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 7 de out. 2019.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações.: Fatores de Emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - Ano Base 2019. 2020a. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html>. Acesso em: 29 mai. 2020.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações.: Fatores de Emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - Ano Base 2017. 2020b. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html>. Acesso em: 31 jul. 2020.

BRITO, R. C.; BARROS, R. M.; SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, S. P. G. Energy potential of biogas landfill use and anaerobic digesters from the 1 municipal solid waste organic fraction of Minas Gerais State, Brazil, Journal of Material Cycles and Solid Waste Management, artigo submetido, 2019.

BUSINESSWIRE. 2019. Himark BioGás to Build Three (3) Integrated Anaerobic Digestion Plants in the US. Disponível em: <<https://www.businesswire.com/news/home/20140722005301/en/Himark-BioGas-Build-3-Integrated-Anaerobic-Digestion>>. Acesso em 16 de ago. de 2019.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE), 2018. Tipos de leilões. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/tipos_leiloes_n_logado?_afzLoop=68112887555041&_adf.ctrl-state=prhvknlut_14#!%40%40%3F_afzLoop%3D68112887555041%26_adf.ctrl-state%3Dprhvknlut_18.

CARNEIRO, P. H., SOUTO, B. G. D'A., POVINELLI, J. III-064 digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos em sistema de duas fases utilizando mistura de percolado de aterro sanitário e lodo anaeróbio como inóculo. 2005. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

CASSINI, S. T, 2003. Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás. Rede cooperativa de pesquisas. Disponível em: <<https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabStulio.pdf>>. Acesso em 13 de set. 2019.

CASTILHOS JR, A. B. de. et al. Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS JR, A. B. de. Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. 1 ed. Florianópolis: ABES, RIMA, 2003.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2001. Nota Técnica VII - Geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos urbanos e rurais. Disponível em <www.cenbio.com.br>. Acesso em: 09 de mai. 2019.

CEPEL. Estudo comparativo de microssistemas de geração baseados em combustíveis. Relatório técnico, DPP/PER- 1165/01. Rio de Janeiro, Brasil. 2001.

CHEN, Yu et al. Household biogas use in rural China: A study of opportunities and constraints. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.545-549, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.019>.

CHEN, Shaoqing; CHEN, Bin; SONG, Dan. Life-cycle energy production and emissions mitigation by comprehensive biogas–digestate utilization. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 114, p.357-364, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.084>.

CHERNICHARO, C.A.L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Reatores Anaeróbios, v. 5. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 1997. 246 p.

COELHO, S. T et al. (2006). Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Biogás - Pesquisas e Projetos no Brasil. 2006a. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/livrobiogas.pdf>>. Acesso em: 30 de jan. 2020.

_____. Biogás – geração e uso energético – aterros versão 10.1. Manual do usuário do programa de computador. 2006b. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/software/>>. Acesso em: 30 de jan. 2020.

_____. Usina biotérmica levará energia limpa a mais de 200 mil pessoas no Rio Grande do Sul, São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2015/06/29/usina-biotermica-levara-energia-limpa-a-mais-de-200-mil-pessoas-no-rio-grande-do-sul/>>. Acesso em: 5 de set. 2019.

_____. Inventário de Resíduos Sólidos Urbanos. 2017, Série relatórios, São Paulo, Brasil.

_____. Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos. São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/wp-content/uploads/sites/26/2018/06/inventario-residuos-solidos-urbanos-2017.pdf>>. Acesso em 9 de fev. 2019

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS (CRVR). (2016) Central de Resíduos do Recreio. Área de atuação. Disponível em: <<http://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-residuos-do-recreio/>>. Acesso em: 05 de set. 2019.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA (CONFAZ). Ministério da Economia. Convênio ICMS 101/97. 2020. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/1997/CV101_97>. Acesso em 21 de mai. 2020.

COSTA, David Freire da. **Geração de Energia Elétrica a partir do biogás de tratamento de esgotos**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COSTA, Thaís Faria; SANTOS, Ivan Felipe; MENSAH, Johnson Herlich Roslee. Algoritmo para cálculo da potência ótima e do máximo benefício líquido de Pequenas Centrais Hidrelétricas: Desenvolvimento e aplicação usando o software Scilab. 2018. Conference: XIII Seminário de Meio Ambiente e Energias Renováveis, At Itajubá, Minas Gerais (Brasil)

DE BAERE, L.; MATTHEEUWS, B. (2010). Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste in Europe. *BioCycle*, v. 51, n. 2, p. 24-26, 2010.

DEFRA, U. (2004). Review of environmental and health effects of waste management: Municipal solid waste and similar wastes.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 443 p

DOGAN, Eylem; DEMIRER, Göksel N.. Biogas generation by two-phase anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Journal Of Renewable And Sustainable Energy**, [s.l.], v. 4, n. 6, p.0631311-0631318, nov. 2012. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4769203>.

EDELMANN, W.; BAIER, U.; ENGELI, H.. Environmental aspects of the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes and of solid agricultural wastes. **Water Science And Technology**, [s.l.], v. 52, n. 1-2, p.203-208, jul. 2005. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2005.0518>.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica ano base 2017. 2018a. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas>>. Acesso em 01 de mai. 2020.

_____. Leilões de energia elétrica de 2018. Apresentando os resultados e avaliando os caminhos do planejamento energético. 2018b. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/Informe%20Leil%C3%B5es%202018_Final.pdf. Acesso em 20 de mai. 2020.

_____. Informe Leilões de Geração de Energia Elétrica. Leilão de Geração A4/2019. 2019a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-355/Informe%20Resultado%20da%20Habilita%C3%A7%C3%A3o%20T%C3%A9cnica%20e%20Vencedores-%20Leil%C3%A3o%20A-4%20de%202019_v3.pdf>. Acesso em: 05 de mar. 2020.

_____. Leilões de energia elétrica de 2019. Apresentando os resultados e avaliando os caminhos do planejamento energético. 2019b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-451/Informe%20Leil%C3%B5es%202019_v3.pdf>. Acesso em 20 de mai. 2020.

FARQUHAR, G.J. & ROVERS, F.A. *Water Air Soil Pollut* (1973) 2: 483. <https://doi.org/10.1007/BF00585092>.

FAULHABER, C. R.; RAMAN, D. R.; BURNS, R. T.. An Engineering-Economic Model for Analyzing Dairy Plug-Flow Anaerobic Digesters: Cost Structures and Policy Implications. **Transactions Of The Asabe**, [s.l.], v. 55, n. 1, p.201-209, 2012. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.41247>.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2018. Panorama da destinação dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais em 2017. Belo Horizonte, 2018.

FERNANDES FILHO, A. C. ; SANTANA, C. O. S.; GATTAMORTA, M. A. Utilização de biodigestores para geração de energia elétrica a partir de dejetos de suínos no Brasil. 2018. *INOVAE - Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation* (ISSN 2357-7797), 6(1), 67-84.

FERNANDES, Giovanna Loiola. **Aproveitamento energético do biogás de aterros sanitário: um estudo de viabilidade econômica em função da população.** 2016. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação) – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

FERREIRA, Bernardo Ornelas. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás.** 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FERREIRA, L.r.a. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 94, p.440-455, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>.

FERREIRA, Wemerson Rocha. **Análise do potencial energético territorial do biogás proveniente de aterros sanitários para inserção na matriz elétrica do estado de minas gerais no horizonte de 2050.** 2018. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

FNR. Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung. 5th ed. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.; 2010.

GARCEZ, Catherine Gucciardi. Distributed electricity generation in Brazil: An analysis of policy context, design and impact. **Utilities Policy**, [s.l.], v. 49, p.104-115, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jup.2017.06.005>.

HAUBERT, J. S., BENATTI, J. C. B., GARCIA, B. H. Y., PEREIRA, A. C., PARENTE, P. A. Caracterização Gravimétrica do RSU do município de SINOP – MT para classes de baixa renda. 2018. IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. São Bernardo do Campo /SP.

HENRÍQUEZ, Aline Isabel Melo. **Análise de ciclo de vida (ACV) de sistemas integrados de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos para cidades de médio porte.** 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 2016.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Washington, DC: World Bank, 2012. 116 p. (Urban Development Series, No. 15).

ICLEI - CONSELHO INTERNACIONAL PARA AS INICIATIVAS AMBIENTAIS LOCAIS. Manual para Aproveitamento de Biogás Volume 1 - Aterros Sanitários. São Paulo, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Séries históricas.** 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?=&3Bt=series-historicas&t=o-que-e>>. Acesso em: 15 fev. 2019.

_____. (IBGE). Produto Interno Bruto – PIB. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>. Acesso em: 19 de jun. 2019.

_____. (IBGE). Comissão Nacional de Classificação – CONCLA. Curiosidades: Estados mais Populosos do Brasil. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/en/component/content/article/97-7a12/7a12-voce-sabia/curiosidades/1632-estados-mais-populosos.html>. Acesso em 21 de abril 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. Capítulo 6: Wastes, 1996. Disponível em <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6ref1.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2019.

JAIN, Siddharth et al. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 52, p.142-154, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.091>.

KALYANI, Khanjan Ajaybhai; PANDEY, Krishan K.. Waste to energy status in India: A short review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 31, p.113-120, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.020>.

KONDUSAMY, Dhamodharan; KALAMDHAD, Ajay S.. Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – A review. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 2, n. 3, p. 1821-1830, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.024>.

LEITE, Valderi D. et al. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 13, n. 2, p.190-196, abr. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662009000200013>.

LEME, Marcio Montagnana Vicente et al. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 87, p.8-20, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>.

LI, Y., LIEW, L.N., 2011. Solid-state Anaerobic Digestion for Energy Production from Organic Waste. Ohio State University Station Available at: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/aex-653-11>, Acesso em: 5 fev. 2020.

LI, Yebo; PARK, Stephen Y.; ZHU, Jiyong. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.821-826, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>.

LINHARES, D. C. et al. 2017. Iii-345- Prospecção tecnológica de processos de biodigestão anaeróbia com recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

LINO, F.a.m.; ISMAIL, K.a.r.. Incineration and recycling for MSW treatment: Case study of Campinas, Brazil. **Sustainable Cities And Society**, [s.l.], v. 35, p.752-757, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.028>.

LIU, Guangqing et al. Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 100, n. 21, p.5103-5108, nov. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.081>.

LIU, Xiao et al. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste and waste activated sludge in China: Effect of organic loading rate. **Waste Management**, [s.l.], v. 32, n. 11, p.2056-2060, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.003>.

LOPES, Matheus Martins. **Aproveitamento energético em aterros sanitários: análise da viabilidade técnica e econômica para o uso de biogás e instalação de painéis fotovoltaicos**. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós - Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal Itajubá, Itajubá, 2017.

LOUREIRO, S.m.; ROVERE, E.l.l.; MAHLER, C.f.. Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil, in the state and city of Rio de Janeiro. **Waste Management**, [s.l.], v. 33, n. 5, p.1302-1312, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.024>.

LUSK, P. Methane recovery from animal manures the current opportunities casebook. 1998. No. NREL/SR-580-25145; ON: DE00009526. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).

MACHADO, Sandro L. et al. Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. **Waste Management**, [s.l.], v. 29, n. 1, p.153-161, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.017>.

MALINOWSKY, C. Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos da UFSC através de biodigestor anaeróbio. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MARTINS, Alessandra da Silva. **Digestão anaeróbia de resíduos alimentares: Efeito da carga orgânica e da adição de elementos traço sobre a produção de metano e a diversidade microbiana**. 2018. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Saneamento, Meio ambiente e recursos hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

MATA-ALVAREZ, J; MACÉ, S; LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 74, n. 1, p.3-16, ago. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0960-8524\(00\)00023-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00023-7).

MATHIAS, Melissa Cristina Pinto Pires; MATHIAS, João Felipe Cury Marinho. Biogas in Brazil: A Governmental Agenda. **Journal Of Energy And Power Engineering**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.1-15, 28 jan. 2015. David Publishing Company. <http://dx.doi.org/10.17265/1934-8975/2015.01.001>.

MELLO, Andriele Rimoldi. **Avaliação do potencial energético do biogás gerado em aterros sanitários que atendem diferentes faixas populacionais**. 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Pós Graduação em Bioenergia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2016.

MELLO JR. A. C. e FAGÁ, M. T. W. Substituição de motores elétricos por motores de combustão interna de ciclo Otto a gás natural em instalações de bombeamento de petróleo e seus derivados. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005.

MENDES, Sara Raquel Machado Pimenta. **A análise de investimentos em novas tecnologias: a importância da utilização de diferentes métodos de avaliação**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Industrial, Universidade do Minho, 2017.

MENEZES, Rosana Oliveira; CASTRO, Samuel Rodrigues; SILVA, Jonathas Batista Gonçalves; TEIXEIRA, Gisele Pereira; SILVA, Marco Aurélio Miguel. Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de juiz de fora, minas gerais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 271-282, abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019177437>.

NAKABAYASHI, Renny Kunizo. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa et al. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.143-155, 1 abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019171125>.

NG, Wendy Pei Qin et al. Waste-to-Energy (WTE) network synthesis for Municipal Solid Waste (MSW). **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 85, p.866-874, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.004>.

NIELSEN, Malene; OLE-KENNETH, Malene and PLEJDRUP, Marlene. Danish emission inventories for stationary combustion plants. Inventories until year 2011. No. 102. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 2014.

PAVI, Suelen. **Produção de biogás a partir da co-digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e resíduos hortifrutigranjeiros**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

PECORA, Vanessa. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – estudo de caso**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Interunidade de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA, Ielon Oliveira; SANTOS, Ivan Felipe Silva; SANTOS, Rafaela Ediene. Estudo energético e econômico do aproveitamento do biogás de um aterro sanitário em uma turbina a gás de 5,4 MW. **Engevista**, [s.l.], v. 20, n. 4, p.523-536, 2018.

PIN, Bruno Vasconcelos Rosa et al. Waste management studies in a Brazilian microregion: GHG emissions balance and LFG energy project economic feasibility analysis. *Energy Strategy Reviews*, [s.l.], v. 19, p.31-43, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2017.11.002>.

PIÑAS, Jean Agustin Velásquez; VENTURINI, Osvaldo Jose; LORA, Electo Eduardo Silva; OLIVEIRA, Michele Aparecida de; ROALCABA, Orly Denisse Calle. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos landgem (epa) e biogás (cetesb). : comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de População**, [s.l.], v. 33, n. 1, p. 175-188, 10 maio 2016. Associação Brasileira de Estudos Populacionais. <http://dx.doi.org/10.20947/s0102-309820160009>.

PIVA, Marina Reis. **Análise energética e econômica da gaseificação de resíduos sólidos urbanos da cidade de Pouso Alegre**. 2019. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação) – Graduação em Química, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

PREFEITURA DE SÃO PAULO, Aterro São João e Bandeirantes, 2012. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/comite_do_clima/c40/indicativas/index.php?p=47655>. Acesso em: 13 de set. 2019

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DA VARGINHA. 2013. Unidade de triagem e compostagem. Disponível em: <<http://www.saojosedavarginha.mg.gov.br/sem-categoria/usina-de-triagem-e-compostagem-de-lixo/>>. Acesso em: 05 fev. 2020

PROBIOGÁS, 2015. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: Substratos, Digestores e uso do biogás. Ministério das cidades, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-tecnologias-biogas.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2019.

REICHERT, G. A. Aplicação da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos: uma revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23ª ed., 2005, Campo Grande. Anais... ABES: Campo Grande, 2005.

REIS, Alexsandro dos Santos. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, 2012.

RESENDE, M. G. Desenvolvimento de um programa computacional em Scilab® baseado no método *Pinch* de integração energética. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Química, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2013.

SALOMON, K. R. Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade. 2007. 219 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Itajubá, Itajubá, 2007.

SALOMONI, C. et al. Enhanced methane production in a two-phase anaerobic digestion plant, after CO₂ capture and addition to organic wastes. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 102, n. 11, p.6443-6448, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.079>.

SANTOS, Ivan Felipe Silva dos. Proposta de um método escalonado para a motorização do Aproveitamento do Biogás Gerado por Aterros Sanitários para Fins de Geração de Energia Elétrica. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 2015.

SANTOS, Ivan Felipe Silva dos et al. Uso de biogás de aterros sanitários para geração de eletricidade: Um estudo dos custos de implantação. In: THE XI Latin-american congress electricity generation and transmission - clagtee 2015 "bioenergy for electricity generation and ecological issues in power plants", 2015, Anais do THE XI Latin-american congress electricity generation and transmission, 2015.

SANTOS, Ivan Felipe Silva dos et al. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation And Recycling*, [s.l.], v. 131, p.54-63, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>.

SANTOS, Ivan F.S.; BARROS, Regina M.; TIAGO FILHO, Geraldo L.. Biogas Production From Solid Waste Landfill. Reference Module In Materials Science And Materials Engineering, [s.l.], p.1-10, 2018a. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.10585-5>.

SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio. Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. **Sustainable Cities And Society**, [s.l.], v. 41, p. 587-600, ago. 2018b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.029>.

SANTOS, Rafaela Ediene dos et al. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 231, p.198-206, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>.

SANTOS, Raimar Barbosa; LIMA, Ana Katherine de Carvalho. Análise comparativa do biogás: processo em biodigestores e de aterro sanitário. *Revista Eletrônica de Energia*, Salvador, v. 6, n. 1, p.48-57, jan. 2017.

SÃO PAULO, SÃO PAULO: Potência em história, economia e cultura e turismo. 2019. Disponível em: < <http://www.saopaulo.sp.gov.br/conhecasp/>>. Acesso em: 13 de set. 2019.

SCILAB – Open source software for numerical computation. 2020. Disponível em:< <https://www.scilab.org/>>. Acesso em 27 de mai. 2020.

SEIGNEUR, V. J. L., BONGRAIN, T., DAVID, R., MOREAU, S., BRUDER, O., TENNENHAUS, S., GUILLIER, A. G. M. A. (2017). The state of renewable energies in Europe. Edition 2016. 16. EurObserv'ER Report.

SHA'ATO, R. et al. Survey of solid waste generation and composition in a rapidly growing urban area in Central Nigeria. **Waste Management**, [s.l.], v. 27, n. 3, p.352-358, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.02.008>.

SILVA, Wellington Regis. Estudo Cinético do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos vegetais. 2009. 175 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Química, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba/campus I, João Pessoa, 2009.

SILVA, L. A., FARIAS, G. B. L., LIMA, F. D. M. Caracterização Gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do município de Bragança Paulista - Pará. 2018. IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. São Bernardo do Campo /SP.

SILVA, Tiago Rodrigo. Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG. 2012. 161 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal Itajubá, Itajubá, 2012.

SILVA, Tiago Rodrigo; BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos, Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill, *Waste Management*, v. 65, p. 75-91, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.018>

SILVA, Tiago Nascimento; FREITAS, Fernando Souza Nazareth de; CANDIANI, Giovano. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.95-104, jun. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522013000200001>.

SILVA, Tiago Nascimento. Diagnóstico da produção de biogás em um aterro sanitário: Estudo de caso do aterro Bandeirantes. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2006.

SILVA, Tiago Rodrigo et al. Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill. **Waste Management**, [s.l.], v. 65, p.75-91, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.018>.

SILVA, Samuel Plácido Galdinoda.; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio. 2019. Avaliação Energético-Econômica de Projetos de Geração de Energia de Resíduos Sólidos Orgânicos. Rotina elaborada em Scilab®. Itajubá/Minas Gerais, 2019. 10.536 bytes.

SILVA, Leo Jaymee de Vilas Boas da; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; MENSAH, Johnson Herlich Roslee; GONÇALVES, Andriani Tavares Tenório; BARROS, Regina Mambeli. Incineration of municipal solid waste in Brazil: an analysis of the economically viable energy potential. : An analysis of the economically viable energy potential. *Renewable Energy*, [s.l.], v. 149, p. 1386-1394, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.134>.

SLORACH, Peter C. et al. Environmental sustainability of anaerobic digestion of household food waste. *Journal Of Environmental Management*, [s.l.], v. 236, p.798-814, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.001>.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Série histórica. 2019. Disponível em: <http://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em 19 de jun. 2019.

SOUZA, G. C., GUADAGNIN, M. R. Caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos sólidos domiciliares: o método de quarteamento na definição da composição gravimétrica em Cocal do Sul-SC.. 2009. 3º Seminário Regional Sul de Resíduos Sólidos. Caxias do Sul, Rio Grande do Sul.

SOUZA, N. M. S. et al. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v.26, n.2, p. 127-133, 2004.

SUZUKY, A., B., P. Uso de biogás em motores de combustão interna. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, Guarapuava-PR, v.4, **n.1**, p.221–237, 2011.

TERMOVERDE SALVADOR. Termoverde Salvador, Unidade de Valorização sustentável. Disponível em: <<http://www.termoverde.com.br/termoverdesalvador>>. Acesso em 5 de set. 2019.

THEMELIS, Nickolas J.; ULLOA, Priscilla A.. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 32, n. 7, p.1243-1257, jun. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020>.

TSAI, W.t. Bioenergy from landfill gas (LFG) in Taiwan. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.331-344, fev. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2005.01.001>.

UN ENVIRONMENT, **Global Waste Management Outlook**, 2016, UN, New York, <https://doi.org/10.18356/765baec0-en>.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. 2005. Disponível em:< <https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302-guide.pdf>>. Acesso em: 24 de abr. 2019.

_____. Landfill Methane Outreach Program (LMOP). Landfill Gas Energy Cost Model: LFGcost-web - User Manual. Washington, USA, 2016. Disponível em <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/lfgcost-webv3_manual.pdf>. Acesso: 19 de jun. 2019.

_____. LFG Energy Project Development Handbook. 2017. Disponível em:< https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf>. Acesso em: 24 de abr. 2019.

URBANIZADORA MUNICIPAL S. A. Estudo de Caracterização Gravimétrica São José dos Campos – SP. 2018.

VAN FAN, Yee et al. Anaerobic digestion of municipal solid waste: Energy and carbon emission footprint. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 223, p.888-897, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.005>.

WATERMOLEN, B. T. et al. Methane Emission, Oxidation and Collection Efficiency at a Southeastern USA Landfill. Global Waste Management Symposium. Veolia Environmental Services. North America Solid Waste, 2012. Disponível em <<http://dnr.wi.gov/topic/Waste/documents/swip/20121115/MethaneEmissionsUpdate.pdf>>. Acesso em 15 de abr. 2019.

WORLD BANK, 2004. Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. Energy Sector Management Assistance Programme paper series, Prepared by: Conestoga-Rovers & Associates, 651. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/18081>>. Acesso em 25 de nov. 2019.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION – WBA. Biogas - an important renewable energy source. 2013. Disponível em: <<https://worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%20-%20Biogas.pdf>> Acesso em 13 de set. 2019.

ZILOTTI, Hécio Alexandre Rodrigues. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

ZHU, Baoning et al. Characteristics and biogas production potential of municipal solid wastes pretreated with a rotary drum reactor. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 100, n. 3, p.1122-1129, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.08.024>.

ANEXO A – Quadro com os aterros sanitários em operação no estado de São Paulo

Aterros Sanitários	Municípios
Aterro 1: Avaré	Avaré, Iaras.
Aterro 2: Barra do Chapéu	Barra do Chapéu, Ribeiras.
Aterro 3: Barra do Turvo	Barra do Turvo e Iporanga.
Aterro 4: Botucatu	Botucatu, Itatinga e Pardinho.
Aterro 5: Bragança Paulista A.P.	Bragança Paulista e Vargem.
Aterro 6: Cachoeira Paulista A.P.	Aparecida, Areias, Cachoeira Paulista, Canas, Cruzeiro, Cunha, Guaratinguetá, Lavrinhas, Lorena, Potim, Queluz, Roseira, São José do Barreiro e Silveiras.
Aterro 7: Caieiras - A.P.	Bom Jesus dos Perdões, Caieiras, Cajamar, Embu-Guaçu, Francisco Morato, Franco da Rocha, Iguape, Ilha Comprida, Itapeverica da Serra, Juquitiba, Miracatu, Osasco, São Lourenço da Serra, São Paulo, Sete Barras e Taboão da Serra.
Aterro 8: Catanduva	Adolfo, Ariranha, Catanduva, Catiguá, Elisiário, Embaúba, Guaçuara, Ibitinga, Itajobi, Mendonça, Mirandópolis, Novais, Novo Horizonte, Olímpia, Palmares Paulista, Paraíso, Pindorama, Pitangueiras, Pongaí, Santa Adélia, Tabapuã, Uru e Urupês.
Aterro 9: Cesário Lange A.P.	Cesário Lange, Itapetininga, Jumirim, Laranjal Paulista, Pereiras, Porangaba, Quadra, Tatuí e Torre de Pedra
Aterro 10: Guará - A.P	Cravinhos, Guará, Ituverava, Miguelópolis, Monte Alto e Pedregulho.
Aterro 11: Guataparã-A.P.	Américo Brasiliense, Analândia, Araraquara, Barrinha, Bebedouro, Descalvado, Dumont, Guataparã, Pradópolis, Ribeirão Preto e Rincão.
Aterro 12: Indaiatuba-A.P	Elias Fausto, Indaiatuba e Montemor.
Aterro 13: Iperó - A.P	Alambari, Alumínio, Araçoiaba da Serra, Boituva, Capela do Alto, Iperó, Porto Feliz, Salto de Pirapora, Sarapuí, Sorocaba e Tietê.

Aterro 14: Itapevil - A.P.	Jandira, Mairinque, Piedade, São Roque e Vargem Grande Paulista.
Aterro 15: Jambeiro - A.P.	Caraguatatuba, Ilha Bela, Jambeiro, Paraíbuna, Redenção da Serra, Santa Branca, São Sebastião e Ubatuba.
Aterro 16: Jardinópolis-A.P	Brodowsky, Jardinópolis, Morro Agudo, Pontal, Serrana e Sertãozinho.
Aterro 17: Mauá - A.P.	Diadema, Ferraz de Vasconcelos, Itanhaém, Juquiá, Mauá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul.
Aterro 18: Meridiano	Fernandópolis, Macaubal, Magda, Meridiano, Ouroeste, São João de Iracema, Sebastianópolis do Sul, Valentim Gentil, Votuporanga.
Aterro 19: Onda Verde	Altair, Bady Bassitt, Cedral, Guapiaçu, Ipiranga, Jaci, José Bonifácio, Monte Aprazível, Neves Paulista, Nhandeara, Nova Aliança, Nova Granada, Onda Verde, Palestina, São José do Rio Preto e Uchoa.
Aterro 20: Paranapuã	Dolcinópolis e Paranapuã.
Aterro 21: Piriquera	Cananéia e Piriquera -Açu.
Aterro 22: Paulínia	Águas de Lindóia, Americana, Amparo, Araras, Arthur Nogueira, Campinas, Conchal, Cosmópolis, Engenheiro Coelho, Espírito Santo do Pinhal, Holambra, Hortolândia, Ipeúna, Iracemápolis, Itupeva, Jaguariuna, Lindóia, Louveira, Mogi Mirim, Monte Alegre do Sul, Morungaba, Nova Odessa, Paulínia, Pinhalzinho, Santa Cruz da Conceição, Santo Antônio de Posse, Santo Antônio do Jardim, São Pedro, Serra Negra, Sumaré, Tuiuti, Valinhos, Vinhedo.
Aterro 23: Piacatu	Piacatu e Santópolis do Aguapeí
Aterro 24: Piratininga	Águas de Santa Bárbara, Álvaro de Carvalho, Arandu, Arealva, Avaí, Bariri, Bauru, Bocaina, Boracéia, Cabralia Paulista, Cafelândia, Duartina, Espírito Santo do Turvo, Fernão, Itaporanga, Jaú, Lins, Lucianópolis, Lupércio, Marília, Pederneiras, Piraju, Piratininga, Santa Cruz do Rio Pardo e Ubirajara
Aterro 25: Quatá	Assis, Bastos, Borá, Estrela do Norte, Iacri, João Ramalho, Lucélia, Lutécia, Maracá, Matinópolis, Narandiba, Paraguaçu Paulista,

	Platina, Pirapozinho, Promissão, Quatá, Rancharia, Tarumã e Vera Cruz
Aterro 26: Rio das Pedras	Águas de São Pedro, Capivari, Conchas, Cotia, Itapevi, Mombuca, Piracicaba, Rafard, Rio das Pedras, Saltinho, Santa Gertrudes e Santa Maria da Serra.
Aterro 27: Riolândia	Paulo de Faria e Riolândia.
Aterro 28: Sales Oliveira	Altinópolis, Batatais, Cajuru, Itirapuã, Nuporanga, Orlândia, Sales Oliveira e São Joaquim da Barra
Aterro 29: Santa Fé do Sul	Rubinéia e Santa Fé do Sul.
Aterro 30: Santa Rita d'Oeste	Aspásia e Santa Rita d'Oeste
Aterro 31: Santana de Parnaíba	Araçariguama, Barueri, Carapicuíba, Jundiaí, Pirapora do Bom Jesus e Santana de Parnaíba
Aterro 32: Santos	Bertioga, Cubatão, Guarujá, Mongaguá, Praia Grande, Santos e São Vicente
Aterro 33: São Francisco	Santa Albertina e São Francisco.
Aterro 34: São Manuel	Areiópolis e São Manuel.
Aterro 35: São Paulo	Atibaia, Arujá, Itaquaquecetuba, Mairiporã, Nazaré Paulista, Piracaia, Poá e Suzano.
Aterro 36: Tapiratiba	Águas da Prata, Caconde, Divinolândia, São João da Boa Vista, São José do Rio Pardo e Tapiratiba.
Aterro 37: Tremembé	Biritiba Mirim, Caçapava, Campos do Jordão, Lagoinha, Monteiro Lobato, Natividade da Serra, Salesópolis, Santo Antônio do Pinhal, São Bento do Sapucaí, Taubaté e Tremembé.
Aterro 38: Uberaba	Buritizal e Casa Branca.
Aterro 39: Urânia	Santa Salete e Urânia.

Fonte: Elaborada conforme dados de Cetesb (2017)

ANEXO B - Quadro com os Consórcios intermunicipais em operação no estado de Minas Gerais

Sigla	Nome do Consórcio	Municípios integrantes do consórcio	Outros municípios que utilizam o empreendimento compartilhada pelo consórcio
Consórcio 1: CONRESOL	Consórcio Intermunicipal para Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos	São Miguel do Anta e Canaã	
Consórcio 2: CIMASAS	Consórcio Intermunicipal dos Municípios do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário	Itajubá, Brasópolis, Cachoeira de Minas, Cristina, Delfim Moreira, Gonçalves*, Maria da Fé, Marmelópolis, Piranguçu, Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí, São José do Alegre e Wenceslau Brás.	
Consórcio 3: CONVALE	Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Regional	Água Comprida, Campo Florido, Comendador Gomes, Conceição das Alagoas, Conquista, Delta, Pirajuba, Planura, Nova Ponte*, Sacramento, Santa Juliana*, Uberaba* e Veríssimo	Ibiá, Perdizes, Pratinha, Tapira

Consórcio 4: CPGRS	Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos	João Monlevade, Alvinópolis, Bela Vista de Minas, Nova Era, Rio Piracicaba e São Domingos do Prata	
Consórcio 5: ECOTRES	Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos	Congonhas*, Conselheiro Lafaiete e Ouro Branco	Barbacena, Itaverava e Ressaquinha
Consórcio 6: CIDERSU	Consórcio Intermunicipal para o Desenvolvimento Regional Sustentável	Alfenas, Alterosa*, Carvalhópolis, Elói Mendes*, Machado, Paraguaçu*, Poço Fundo, São João da Mata*, Serrania, Silvianópolis* e Turvolândia	Ijaci, Lavras, Monte Belo e Santana da Vargem
Consórcio 7: CONCASS	Consórcio Intermunicipal para a Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos	Seritinga, Aiuruoca e Serranos	
Consórcio 8: CPGIRS	Consórcio Público para Gestão Integrada de Resíduos Sólidos	Andradas, Albertina, Caldas, Ibitiúra de Minas* e Santa Rita de Caldas*	

<p>Consórcio 9: CIESP</p>	<p>Consórcio Intermunicipal de Especialidades</p>	<p>Bicas, Descoberto*, Guarará, Mar de Espanha, Maripá de Minas, Pequeri, Piraúba, Rochedo de Minas, São João Nepomuceno e Senador Cortes</p>	<p>Leopoldina, Amparo da Serra, Antônio Carlos, Antônio Prado de Minas, Aracitaba, Astolfo Dutra, Barão do Monte Alto, Brás Pires, Cajuri, Chácara, Chiador, Coronel Pacheco, Dona Eusébia, Dorés do Turvo, Eugenópolis, Goianá, Guarani, Itamarati de Minas, Laranjal, Miraí, Oliveira Fortes, Paiva, Palma, Patrocínio do Muriaé, Pedra do Anta, Pedra Dourada, Piau, Rio Novo, Rio Pomba, Rodeiro, Santa Bárbara do Tugúrio, Santana de Cataguases, Santana do Deserto, São Francisco do Glória, São Sebastião da Vargem Alegre, Silveirânia, Tabuleiro, Teixeiras, Tocantins e Vieiras.</p>
--------------------------------------	---	---	---

<p>Consórcio 10: CIGIRS</p>	<p>Consórcio Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos</p>	<p>Resplendor e Itueta</p>	
<p>Consórcio 11: CIMDOCE</p>	<p>Consórcio Intermunicipal para o Desenvolvimento Sustentável da Região do Médio Rio Doce</p>	<p>Alpercata, Fernandes Tourinho, Galiléia, Governador Valadares e Sobrália</p>	<p>Alvarenga, Cuparaque, Engenheiro Caldas, Frei Inocêncio, Itanhomi, Mathias Lobato, São Geraldo da Piedade, Sardoá e Tarumirim</p>
<p>Consórcio 12: CIMVA</p>	<p>Consórcio Intermunicipal Multifinalitário do Vale do Aço</p>	<p>Córrego Novo, Naque, Periquito, Pingo D'água, Belo Oriente e Ipatinga</p>	<p>Antônio Dias, Bom Jesus do Galho, Braúnas, Bugre, Dionísio, Dom Cavati, Entre Folhas, Iapu, Ipaba, Joanésia, São João do Oriente e Ubaporanga .</p>

<p>Consórcio 13: CIMVALPI</p>	<p>Consórcio Intermunicipal Multissetorial do Vale do Piranga</p>	<p>Mariana, Barra Longa e Santa Cruz do Escalvado</p>	<p>Abre-Campo, Acaiaca, Amparo do Serra, Araponga, Cajuri, Caputira, Catas Altas, Coimbra, Congonhas, Diogo de Vasconcelos, Guaraciaba, Itabirito, Jequeri, Matipó, Oratórios, Ouro Preto, Paula Cândido, Piedade de Ponte Nova, Ponte Nova, Porto Firme, Raul Soares, Rio Casca, Rio Doce, Santo Antônio do Grama, São José do Goiabal, São Pedro dos Ferros, Sem Peixe, Sericita, Urucânia, Vermelho Novo, Viçosa e Visconde do Rio Branco</p>
<p>Consórcio 14:COMDIN</p>	<p>Consórcio de Municípios para o Desenvolvimento Integrado</p>	<p>Antônio Dias, Coronel Fabriciano, Jaguarapu, Marliéria e Timóteo</p>	

<p>Consórcio 15: CIDES-LESTE</p>	<p>Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Econômico e Social do Leste de Minas</p>		<p>Bom Jesus do Galho, Caratinga, Córrego Novo, Entre Folhas, Imbé de Minas, Inhapim, Piedade de Caratinga, Santa Bárbara do Leste, Santa Rita de Minas, São Domingos das Dores, São Sebastião do Anta, Ubaporanga, Vargem Alegre, Vermelho Novo, Conceição de Ipanema, Ipanema, Pocrane, São João do Oriente, Dom Cavati, Ipaba, Mutum, Taparuba, Pingo D'água, Iapú</p>
---	---	--	---

*Municípios integrantes do consórcio e que não estão dispondo seus RSU em empreendimento compartilhado pelo consórcio.
Feam (2018)

APÊNDICE A- Tabela com os resultados obtidos pelos aterros sanitários do estado de São Paulo para a geração de energia elétrica através de aterros

Aterro Sanitário	População média	Geração média de RSU (ton/ano)	Vazão média de metano (10 ⁶ m ³ /ano)	Potência máxima (kW)	Potência ótima (kW)	Energia (MWh/ano)
1	154.515,40	32.735,1	1,17	869,83	389,4	2.729,10
2	9.249,90	859,99	0,03	22,17	10,3	72,23
3	10.900,40	1.497,79	1,02	38,07	19,1	133,68
4	212.778,20	71.144,2	2,55	1.876,62	860,6	6.030,83
5	221.033,50	74.739,1	2,68	1.971,75	903,5	6.331,49
6	503.491,75	151.265	5,45	3.933,82	1947,1	13.645,11
7	15.335.211,40	3.015.300	108,58	78.458,3	38.689,6	27.1136,65
8	554.264,75	170.970	6,15	4.460,8	2.169,5	15.203,70
9	430.787,30	132.885	4,77	3.492,91	1.632,2	11.438,62
10	200.050,90	59.923,4	2,16	1.555,36	776,6	5.442,63
11	1.446.427,20	594.860	21,34	15.704,3	7.172,1	50.262,00
12	530.328,70	170.950	6,09	4.640,12	2.029,8	14.224,83
13	1.325.526,80	484.445	17,36	12.848,1	5.727,3	40.137,00
14	454.251,50	135.240	4,85	3.574,41	1.623,7	11.379,17
15	517.050,85	157.365	5,63	4.203,75	1.800,8	12.620,25
16	420.033,80	135.670	4,86	3.600,08	1.599,7	11.210,82
17	2.674.385,95	1.042.795	37,52	27.222,9	1.3195,5	92.474,28
18	234.825,60	70.924,1	2,52	1.852,48	896,0	6.279,49
19	786.676,30	248.425	8,92	6.525,21	3.062,0	21.458,61
20	6203,00	1.641,52	0,06	42,253	19,8	138,68
21	32.235,15	7.092,68	0,26	182,59	85,6	599,84
22	4.349.049,00	1.526950	54,70	40.596,9	17.904,9	125.477,67
23	12.418,25	3.265,85	0,12	85,56	40,7	285,17
24	1.250.620,55	3.46425	12,47	9.031,01	4.408,4	30.893,75
25	427.982,25	124.500	4,48	3.246,94	1.582,4	11.089,50
26	1.388.314,15	370.010	13,23	9.888,63	4.228,4	29.632,75
27	25.621,20	6.019,21	0,22	158,11	74,3	520,47
28	250.398,60	73.756,6	2,65	1.923,16	937,8	6.571,83
29	39.202,50	12.154,5	0,44	316,84	154,7	1.084,00
30	3.992,85	6.919,14	0,25	175,77	88,3	619,14
31	1.586.957,60	557.520	20,00	14.728,5	6.717,3	47.074,83
32	2.084.081,85	739.12	26,53	1.9491,7	8.986,0	62973,67
33	8.667,70	2.120,47	0,08	54,45	25,8	181,02

34	53.370,60	1.6673,5	0,60	430,62	198,0	1.387,27
35	1.441.245,15	488.290	17,52	12.886,2	5.897,9	41.332,15
36	203.305,05	58.716,6	2,12	1.518,38	693,3	4.858,84
37	678.679,50	216.480	7,78	5.671,06	2.698,8	18.913,48
38	69.124,75	18.911,5	0,68	490,47	245,9	1.723,35
39	10.451,75	2.463,34	0,10	63,21	30,1	210,89

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

APÊNDICE B - Tabela com os resultados energéticos referentes ao aproveitamento do biogás de aterro sanitário dos Consórcios estudados do estado de Minas Gerais

Consórcio	População média	Geração média de RSU (ton/ano)	Vazão média de metano (10^6 m ³ /ano)	Potência máxima (kW)	Potência ótima (kW)	Energia (MWh/ano)
1	11.336,2	1903,12	0,16	48,84	23,2	162,9
2	243.881,8	51.005,78	4,09	1.322,38	595,6	4.174,3
3	250.850,5	65.536,97	4,96	1.751,07	751,6	5.267,1
4	163.246,5	41.184,94	3,30	1.068,25	479,8	3.362,5
5	364.968	53.861,74	4,25	1.408,19	677,1	4.745,1
6	329.533,5	93.665,95	7,40	2.447,19	1.055,1	7.394,4
7	9.371,45	3.697,21	0,31	94,22	46,6	326,4
8	66.755,15	14.389,69	1,14	375,69	162,6	1.139,8
9	380.071,1	122.060,00	9,85	3.154,43	1.446,4	10.136,1
10	23.539,45	9.108,90	0,74	234,04	110,7	775,6
11	396.440,2	104.244,85	8,38	2.699,91	1.222,2	8.565,4
12	487.458,3	102.281,03	7,94	2.702,74	1.244,0	8.718,3
13	650.829	180.560,00	14,44	4.689,93	2.091,9	14.660,3
14	235.290,3	67.454,07	5,35	1.759,40	766,0	5.367,9
15	359.546	85.942,32	6,70	2.265,84	1.059,1	7.422,2

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

APÊNDICE C – Tabela com os resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás de aterro dos empreendimentos estudados no estado de São Paulo (Cenários 1 e 2)

Aterro	Cenário 1			Cenário 2		
	VPL (R\$)	LCOE (R\$/MWh)	TIR (%)	VPL (R\$)	LCOE (R\$/MWh)	TIR (%)
1	5.290.541,91	264,13	32,32	972.921,93	264,13	14,56
2	-558.744,48	1536,07	-17,30	-673.013,11	1.536,07	---
3	-423.450,87	935,46	-3,63	-634.942,75	935,46	-18,29
4	1.255.9502,53	245,20	35,75	3.018.340,16	245,20	16,83
5	1.322.1420,13	244,46	35,90	3.204.597,65	244,46	16,92
6	29.322.826,91	236,47	37,53	7.735.384,47	236,47	17,99
7	-----	-----	-----	167.251.354,29	229,90	18,91
8	32.754.156,32	235,76	37,68	8.700.928,80	235,76	18,08
9	24.465.100,61	237,80	37,25	6.368.465,26	237,80	17,80
10	11.264.542,49	246,89	35,42	2.653.950,40	246,89	16,61
11	-----	-----	-----	30.419.542,48	231,43	18,69
12	30.599.128,56	236,19	37,59	8.094.523,94	236,19	18,03
13	-----	-----	-----	24.147.105,33	231,90	18,63
14	24.334.226,28	237,84	37,24	6.331.638,43	237,84	17,80
15	27.066.529,15	237,03	37,42	7.100.483,17	237,03	17,91
16	23.963.593,62	237,97	37,22	6.227.345,83	237,97	17,78
17	-----	-----	-----	56.570.043,95	230,57	18,82
18	1.310.6936,34	244,58	35,88	3.172.382,97	244,58	16,91
19	46.524.759,88	233,95	38,07	12.575.849,18	233,95	18,34
20	-412.456,07	910,04	-3,01	-631.848,91	910,04	-17,16
21	602.828,63	386,87	18,21	-346.157,20	386,87	4,57
22	-----	-----	-----	77.015.639,30	230,30	18,86
23	-89.942,12	560,47	8,08	-541.096,47	560,47	-3,89
24	67.296.822,24	232,61	38,37	18.420.915,24	232,61	18,53
25	23.696.491,25	238,06	37,20	6.152.185,70	238,06	17,77
26	64.520.649,79	232,74	38,34	17.639.726,02	232,74	18,51
27	428.092,42	410,86	16,39	-395.326,35	410,86	3,16
28	13.750.543,79	243,91	36,01	3.353.488,15	243,91	16,99
29	1.668.740,41	316,61	24,99	-46.219,49	316,61	9,53
30	645317,79	381,97	18,61	-334.201,14	381,97	4,87
31	-----	-----	-----	28.445.093,10	231,56	18,68
32	-----	-----	-----	38.294.421,47	231,05	18,75
33	-319.230,91	750,86	1,28	-605.616,21	750,86	-11,02

34	2.336.413,17	297,57	27,35	141.657,45	297,57	11,18
35	-----	-----	-----	24.887.501,82	231,84	18,64
36	9.979.298,14	248,97	35,03	2.292.294,53	248,97	16,35
37	40.921.494,55	234,54	37,95	10.999.142,18	234,54	18,25
38	3.076.303,96	284,31	29,18%	349.855,87	284,31	12,44
39	-253.464,08	677,01	3,62	-587.110,04	677,01	-8,34

--- Valores de IRR muito negativos

----- Aterros com Potência superior a 5MW (Não aptos para o sistema de compensação da GD)

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

APÊNDICE D - Tabela com os resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás de aterro sanitário dos empreendimentos estudados no estado de Minas Gerais (Cenários 1 e 2)

Consórcio	Cenário 1			Cenário 2		
	VPL (R\$)	LCOE (R\$/MWh)	TIR (%)	VPL (R\$)	LCOE (R\$/MWh)	TIR (%)
1	-224.154,94	808,94	3,96	-616.859,13	808,94	-13,15
2	11.932.850,31	252,16	43,49	1.868.191,87	252,16	15,96
3	15.244.994,94	247,47	44,55	2.545.237,59	247,47	16,54
4	9.472.825,60	257,62	42,31	1.365.330,62	257,62	15,30
5	13.662.793,14	249,44	44,10	2.221.814,83	249,44	16,29
6	21.691.974,52	242,31	45,76	3.863.084,60	242,31	17,20
7	271.545,91	518,63	15,10	-515.531,39	518,63	-2,14
8	2.736.563,93	312,34	32,89	-11.649,44	312,34	9,89
9	30.000.912,67	238,86	46,60	5.561.540,32	238,86	17,66
10	1.632.883,22	351,22	28,02	-237.256,22	351,22	6,90
11	25.240.735,80	240,57	46,18	4.588.497,86	240,57	17,43
12	25.704.143,68	240,38	46,23	4.683.224,49	240,38	17,46
13	43.712.252,14	235,99	47,32	8.364.317,57	235,99	18,05
14	15.550.204,31	247,13	44,63	2.607.626,38	247,13	16,58
15	21.776.279,15	242,27	45,77	3.880.317,57	242,27	17,21

Fonte Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

APÊNDICE E - Tabela com os resultados obtidos pelos aterros sanitários do estado de São Paulo para a geração de energia elétrica através de digestores anaeróbios

Aterro Sanitário	Potência Situação A (kW)	Potência Situação B (kW)	Energia Situação A (MWh/ano)	Energia Situação B (MWh/ano)
1	363,8	470,1	2.385,11	2.975,63
2	11,1	11,6	-37,94	-34,35
3	20,9	19,4	30,83	20,64
4	797,9	1.017,4	5.269,34	6.807,55
5	837,5	1.069,2	5.546,80	7.170,45
6	1.854,3	2.086,5	12.364,16	13.991,44
7	3.6767,4	41.676,7	250.966,57	285.370,39
8	2.052,6	2.379,0	13.753,62	15726,23
9	1.522,9	1884,2	10.041,95	12.573,88
10	740,8	823,3	4.868,92	5.447,01
11	6.644,1	8.521,5	44.684,02	57.840,74
12	1.599,2	2.605,2	10.576,60	17.311,29
13	5.267,2	7.011,9	35.041,72	47.261,07
14	1.502,5	1.941,8	9.898,87	12.977,46
15	1.634,3	2.316,2	10.822,34	15.292,70
16	1.469,3	1.966,5	9.666,18	13.150,71
17	12.465,2	14.535,1	83.610,41	98.116,20
18	846,6	989,4	5.610,64	6.611,02
19	2.861,8	3.515,6	19.109,24	23.691,23
20	21,3	22,1	33,77	38,96
21	92,2	95,3	530,73	551,92
22	16.462,1	22.180,8	111.620,40	15.1697,33
23	38,2	45,9	151,98	206,28
24	4.174,0	4.812,2	28.305,54	31.852,57
25	1.498,2	1.730,6	9.868,39	11.497,53
26	3.837,8	5.449,1	25.949,53	36.316,36
27	69,6	85,1	371,84	480,84
28	887,4	1.025,1	5.896,78	6.861,84
29	146,4	168,8	910,49	1.067,61
30	96,9	89,7	563,30	512,88
31	6.236,1	7.985,9	41.824,33	54.086,85
32	8.384,6	10.533,0	56.881,33	71.937,01

33	27,9	28,3	79,98	82,80
34	212,2	226,1	1.371,68	1.468,98
35	5.469,0	6.987,6	36.455,67	47.090,84
36	742,2	798,8	4.879,12	5.275,74
37	2.533,6	3.043,9	16809,51	20.385,59
38	234,9	259,3	1.481,26	1.652,36
39	32,5	32,8	112,46	114,49

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

APÊNDICE F - Tabela com os resultados obtidos pelos aterros sanitários do estado de Minas Gerais para a geração de energia elétrica através de digestores anaeróbios

Consórcio	Potência Situação A (kW)	Potência Situação B (kW)	Energia Situação A (MWh/ano)	Energia Situação B (MWh/ano)
1	31,7	32,0	106,41	108,51
2	801,4	880,3	5.293,59	5.846,79
3	863,3	1.213,8	5.727,31	8.183,68
4	644,9	711,8	4.200,75	4.669,27
5	804,0	950,0	5.312,09	6.335,02
6	1.404,0	1.649,1	9.516,55	10.926,30
7	64,1	60,9	333,69	311,37
8	216,6	252,9	1.402,10	1.656,85
9	1.954,7	2.088,9	13.068,10	14.008,13
10	150,6	153,6	940,05	960,54
11	1.645,9	1.794,9	10.904,03	11.948,08
12	1.474,5	1.830,0	9.702,29	12.194,09
13	2.808,2	3.130,6	19.049,13	20.992,98
14	1.021,5	1.182,6	6.835,98	7.965,37
15	1.265,5	1.524,9	8.546,16	10.055,90

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®

APÊNDICE G - Tabela com os resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás através do uso de digestores anaeróbios no estado de São Paulo (Cenário 1)

Aterro	Cenário 1					
	VPL A (R\$)	VPL B (R\$)	LCOE A (R\$/MWh)	LCOE B (R\$/MWh)	TIR A (%)	TIR B (%)
1	3.242.801,55	1.998.522,31	340,25	412,38	22,49	15,93
2	-1.321.116,45	-1.323.204,26	4.059,64	4.229,09	---	---
3	-1.203.345,28	-1.207.680,58	6.394,21	8.212,54	---	---
4	8.450.376,18	7.537.799,60	308,16	348,77	26,09	20,90
5	8.987.724,11	8.023.094,62	305,97	346,91	26,36	21,07
6	21.390.364,94	20.421.401,58	291,55	311,64	28,25	25,18
7	-----	-----	-----	-----	---	---
8	24.081.267,82	20.898.444,62	288,80	326,42	28,62	23,42
9	16.893.052,30	15.410.441,51	297,83	334,07	27,42	22,40
10	7.674.916,70	7.353.574,64	311,76	328,76	25,66	23,32
11	-----	-----	-----	-----	---	---
12	17.928.482,86	11.382.281,74	296,14	400,83	27,64	16,31
13	-----	-----	-----	-----	---	---
14	16.615.958,57	14.739.385,26	298,31	342,70	27,36	21,43
15	18.404.397,59	13.571.197,39	295,42	372,56	27,74	18,62
16	16.165.323,14	14.017.216,34	299,13	349,88	27,25	20,67
17	-----	-----	-----	-----	---	---
18	9.111.363,16	8.519.684,98	305,49	331,39	26,42	22,86
19	33210697,30	30.517.305,14	290,51	325,74	28,39	23,27
20	-1.182.247,28	-1.185.136,67	5121,67	4.885,48	---	---
21	-219.804,23	-231.323,24	573,45	575,47	7,50	7,44
22	-----	-----	-----	-----	---	---
23	-953.319,14	-984.644,10	1.343,70	1.272,95	-13,05	-9,45
24	51.020.720,85	44.066.916,45	282,02	319,30	29,58	24,21
25	16.556.932,38	15.611.268,65	298,42	322,76	27,34	23,82
26	46.457.938,00	-----	283,62	-----	29,35	-----
27	-527.521,46	-594.437,82	705,52	709,43	2,60	2,94
28	9.665.521,84	9.118.235,14	303,50	327,18	26,67	23,34
29	515.661,31	427.010,66	444,54	461,01	14,16	13,02
30	-233.269,42	-254.370,53	575,39	584,21	7,34	7,04
31	-----	-----	-----	-----	---	---
32	-----	-----	-----	-----	---	---
33	-1.092.760,71	-1.094.279,46	2.315,38	2.294,46	---	---

34	1.408.814,46	1.356.109,63	383,97	380,25	18,50	17,69
35	-----	-----	-----	-----	---	---
36	7.694.670,41	7.474.728,71	311,66	323,45	25,67	24,01
37	28.756.917,00	26.686.756,79	294,08	325,23	27,91	23,41
38	1.492.356,80	1.397.849,26	386,54	400,01	18,31	17,05
39	-1.029.845,80	-1.030.950,61	1722,92	1.716,18	-23,75	-22,99

Nota: ----- Aterros com Potência superior a 5MW (Não aptos para o sistema de compensação da GD)

--- refere-se a valores de TIR muito negativos

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE H - Tabela com os Resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás através do uso de biodigestores no estado de São Paulo (Cenário 2)

Aterro	Cenário 2					
	VPL A (R\$)	VPL B (R\$)	LCOE A (R\$/MWh)	LCOE B (R\$/MWh)	TIR A (%)	TIR B (%)
1	-530.591,42	-1.900.429,04	340,25	412,38	7,68	3,45
2	-1.261.100,28	-1.265.238,56	4.059,64	4.229,09	---	---
3	-1.245.947,31	-1.240.331,03	6.394,21	8.212,54	---	---
4	113.947,53	-1.672.563,11	308,16	348,77	10,24	7,23
5	212.331,90	-1.674.222,78	305,97	346,91	10,43	7,36
6	1.829.465,18	-62.612,79	291,55	311,64	11,75	9,95
7	67.927.322,34	28.381.574,02	275,41	296,84	13,35	11,21
8	2.322.149,27	-1.672.808,34	288,80	326,42	12,01	8,78
9	1.006.041,04	-1.922.893,61	297,83	334,07	11,16	8,24
10	-28.033,27	-686.477,25	311,76	328,76	9,94	8,59
11	9.412.285,23	-5.927.579,09	283,31	326,78	12,55	8,78
12	1.195.620,59	-8.652.589,28	296,14	400,83	11,32	4,41
13	6.017.285,22	-8.388.353,37	288,42	339,03	12,05	7,92
14	955.307,26	-2.650.261,29	298,31	342,70	11,12	7,65
15	1.282.757,00	-5.705.310,70	295,42	372,56	11,39	5,81
16	872.799,30	-3.222.627,16	299,13	349,88	11,05	7,19
17	17.672.757,31	996.216,05	283,21	309,53	12,56	10,12
18	234.969,28	-925.798,50	305,49	331,39	10,48	8,41
19	2.978.642,08	-2.327.997,19	290,51	325,74	11,85	8,85
20	-1.235.674,38	-1.241.591,37	5.121,67	4.885,48	---	---
21	-1.059.458,29	-108.3.432,24	573,45	575,47	-4,56	-4,49
22	27.604.714,75	-20.357.322,54	278,49	332,34	13,03	8,39
23	-1.193.759,36	-1.256.288,97	1.343,70	1.272,95	---	---
24	6.239.523,53	-1.832.319,27	282,02	319,30	12,67	9,33
25	944.500,01	-935.109,99	298,42	322,76	11,11	9,06
26	5.404.112,29	-10.948.578,38	283,62	360,72	12,52	6,54
27	-1.115.799,01	-1.243.737,72	705,52	709,43	-9,61	-8,27
28	336.431,57	-769.268,50	303,50	327,18	10,65	8,72
29	-924.800,08	-1.104.539,52	444,54	461,01	1,28	0,82
30	-1.093.770,44	-1.065.787,12	575,39	584,21	-5,09	-5,00
31	8.398.278,11	-6.123.346,19	284,60	328,46	12,42	8,66

32	13.737.281,62	-4.251.802,21	279,25	320,01	12,95	9,29
33	-1.219.290,06	-1.222.477,65	2.315,38	2.294,46	---	---
34	-761.270,45	-871.269,96	383,97	380,25	4,71	4,29
35	6.518.653,18	-5.929.221,53	287,49	330,37	12,14	8,52
36	-24.416,51	-475.852,08	311,66	323,45	9,94	8,99
37	2.163.188,38	-1.959.317,95	294,08	325,23	11,51	8,88
38	-851.084,70	-1.045.609,08	386,54	400,01	4,54	3,90
39	-1.207.770,82	-1.210.069,70	1.722,92	1.716,18	---	---

Nota: --- refere-se a valores de TIR muito negativos

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE I - Tabela com os Resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás através do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais (Cenário 1)

Consórcio	VPL A (R\$)	VPL B (R\$)	LCOE A (R\$/MWh)	LCOE B (R\$/MWh)	TIR A (%)	TIR B (%)
1	-953.359,92	-953.890,09	1.805,96	1.798,10	-16,52	-16,11
2	12.886.053,37	12.734.256,47	307,96	323,30	33,65	30,96
3	14.085.607,90	13.167.484,48	304,66	364,47	34,13	25,21
4	9.871.669,44	9.748.353,35	319,04	334,86	32,12	29,51
5	12.937.228,75	12.657.380,26	307,80	335,24	33,68	29,08
6	24.565.550,33	22.434.026,69	288,62	327,99	36,61	30,0
7	-324.770,17	-320.665,00	755,96	757,66	5,46	5,32
8	2.630.161,37	2.561.641,91	381,37	402,72	25,01	22,51
9	33.587.923,90	33.319.756,39	290,08	301,27	36,41	34,19
10	1.352.264,70	1.347.649,90	438,87	441,04	20,21	19,99
11	27.602.733,16	27.332.525,38	295,18	309,62	35,60	32,85
12	24.279.046,61	23.047.584,20	299,00	339,24	35,02	28,47
13	50.129.739,13	47.373.191,88	282,01	309,42	37,74	32,73
14	17.151.874,12	16.847.524,81	298,12	322,39	35,11	30,76
15	2.1881.748,95	19.181.089,03	291,37	340,90	36,17	28,46

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE J - Tabela com os resultados econômicos relativos ao aproveitamento do biogás através do uso de biodigestores no estado de Minas Gerais (Cenário 2)

Consórcio	VPL A (R\$)	VPL B (R\$)	LCOE A (R\$/MWh)	LCOE B (R\$/MWh)	TIR A (%)	TIR B (%)
1	-1.209.918,77	-1.212.243,53	1.805,96	1.798,01	---	---
2	122.546,17	-495.238,19	307,96	323,30	10,26	9,04
3	276.338,49	-2.587.654,79	304,66	362,79	10,55	6,42
4	-256.872,67	-793513,68	319,04	334,86	9,33	8,13
5	129.107,26	-1.047.815,35	307,80	335,24	10,27	8,13
6	1.619.949,47	-1.270.541,96	288,62	327,99	12,03	8,66
7	-1.129.328,62	-1.104.642,36	755,96	757,66	-11,46	-12,07
8	-750.483,18	-1.042.995,53	381,37	402,72	4,88	3,84
9	2.079.072,44	1.024.248,76	290,08	301,27	11,89	10,86
10	-914.319,57	-937.405,67	438,87	441,04	1,57	1,51
11	1.311.723,95	118.141,43	295,18	309,62	11,41	10,12
12	885.601,21	-2.253.569,49	299,00	339,24	11,06	7,86
13	4.199.863,15	234.434,35	282,01	309,42	12,67	10,13
14	669.457,91	-627.662,97	298,12	322,39	11,14	9,09
15	1.275.865,04	-1.997.967,31	291,37	340,90	11,76	7,73

Nota: --- refere-se a valores de TIR muito negativos

Fonte: Elaborado pelo autor