



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO E APROVEITAMENTO DO BIOGÁS
EM ATERRO SANITÁRIO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:
estudo de caso no Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos –
ECOTRES

TATIANE LETÍCIA DE CARVALHO SOUZA

BELO HORIZONTE

2019

TATIANE LETÍCIA DE CARVALHO SOUZA

ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO E APROVEITAMENTO DO BIOGÁS
EM ATERRO SANITÁRIO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:
estudo de caso no Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos –
ECOTRES

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, como requisito parcial à obtenção do título
de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. MSc. André Luiz Marques Rocha

BELO HORIZONTE

2019

SOUZA, Tatiane Letícia de Carvalho.

S---

Estimativa do potencial energético e aproveitamento do biogás em aterro sanitário para a geração de energia elétrica: estudo de caso no Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos - ECOTRES/ Tatiane Letícia de Carvalho Souza, - Registro: 2019.

88f; --cm.

Orientador: MSc. André Luiz Marques Rocha

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019

1. Potencial Energético e Aproveitamento do Biogás. 2. Energia Elétrica. 3. ECOTRES I. Souza, Tatiane Letícia de Carvalho. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Estimativa do potencial energético e aproveitamento do biogás em aterro sanitário para a geração de energia elétrica: estudo de caso no Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos - ECOTRES.

CDD --- ---

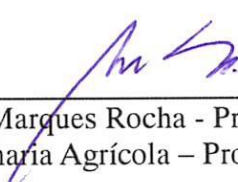
TATIANE LETÍCIA DE CARVALHO SOUZA

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO E APROVEITAMENTO DO BIOGÁS EM
ATERRO SANITÁRIO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: estudo de caso no
Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos – ECOTRES**

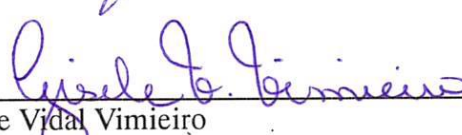
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro Ambiental e
Sanitarista.

Data de aprovação: 06 / 12 / 19

Banca examinadora:



André Luiz Marques Rocha - Presidente da Banca Examinadora
MSc. Engenharia Agrícola – Professor CEFET-MG – Orientador



Gisele Vidal Vimieiro
DSc. Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Professora CEFET-MG



Daniel Brianezi
DSc. Ciência Florestal – Professor CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, sou grata a Deus, por ter me permitido chegar até aqui, mesmo com tantas dificuldades e desafios pelo caminho. Sem a presença Dele em minha vida de nada eu seria capaz.

À minha Nossa Senhora Aparecida, por sempre caminhar ao meu lado, me dando forças para persistir e vencer.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e pela luta diária para que eu concluísse não só essa, mas todas as importantes etapas ao longo da graduação. Agradeço por toda a motivação e por me fazerem acreditar que eu seria capaz de cumprir mais esse desafio.

Aos meus irmãos, sobrinho, amigas e namorado, por entenderem a minha ausência em alguns momentos nos quais me dedicava a essa etapa importante no meu caminho acadêmico e por todo o carinho e apoio que tornaram essa jornada mais leve.

Ao professor André, pela paciência, dedicação, por compartilhar comigo os seus conhecimentos e pela confiança depositada em mim para a elaboração deste trabalho.

Ao ECOTRES, em especial à Danielle e à Thais, pela generosidade e disponibilidade em abrir as portas da instituição para que eu pudesse elaborar o meu trabalho e por se mostrarem tão solícitas a fornecer informações e esclarecimentos essenciais para a elaboração da minha pesquisa.

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para o êxito deste trabalho.

RESUMO

SOUZA, Tatiane Letícia de Carvalho, *Estimativa do potencial energético e aproveitamento do biogás em aterro sanitário para a geração de energia elétrica: estudo de caso no Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos – ECOTRES*. 2019. 88f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

A disposição final de resíduos sólidos em aterros sanitários pode resultar na produção de uma fonte de energia limpa e renovável, por meio do aproveitamento do biogás gerado pela massa de resíduos. No Brasil, a energia produzida por meio do gás metano proveniente de aterro sanitário ainda é pouco explorada e apresenta participação pouco significativa no cenário energético atual. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo estimar a produção de metano existente no biogás produzido pelo aterro sanitário do Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos (ECOTRES), localizado no município de Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais e estudar a viabilidade econômica da implantação de um projeto de aproveitamento de biogás no local, para geração de energia elétrica. Foi realizada a projeção populacional para cada município integrante do consórcio, assim como a projeção da produção de resíduos sólidos para os anos de vida útil do aterro. A produção de metano foi estimada por meio da metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC) e, posteriormente, calculada a potência e a energia totais disponíveis no aterro e estudada a viabilidade econômica do projeto com a utilização das ferramentas Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback* descontado. A vazão máxima de metano ocorrerá no ano de 2029, último ano de operação do aterro, com valor igual a $8.682.710 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$, mesmo ano em que ocorrerão os picos de potência e energia iguais a 2.421,14 kW e 21.209.147,18 kWh, respectivamente. A implantação do projeto de aproveitamento de biogás no aterro estudado, na análise realizada para o período de 14 anos, mostrou-se viável, com retorno econômico positivo. Concluiu-se, então, que o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários é uma alternativa ambientalmente adequada e, os estudos de viabilidade econômica, meios auxiliares para que essa tecnologia seja difundida e ampliada no país.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. Gás Metano. Energia Elétrica. Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

SOUZA, Tatiane Letícia de Carvalho, *Estimation of energy potential and use of landfill biogas for power generation: case study at Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos – ECOTRES*. 2019. 88f. Monography (Bachelor in Environmental and Sanitary Engineering) – Department of Environmental Science and Technology, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

The final disposal of solid waste in landfills may result in the production of a clean and renewable energy through the exploitation of biogas generated by the waste mass. In Brazil, the energy produced from landfill methane gas is still little explored and has little participation in the current energy scenario. In this sense, the present study aimed to estimate the methane production in the biogas produced by the Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos (ECOTRES) landfill, located at Conselheiro Lafaiete city, Minas Gerais, and study the economic viability of a biogas exploitation project in this place, for electric energy generation. The population projection was carried out for each municipality of the consortium, as well as the estimated solid waste production for the years of useful life of the landfill. The methane production was estimated by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) methodology, and after, calculated the total power and energy available in the landfill and studied the economic viability of the project using the Internal Rate of Return (IRR) and discounted *payback* methods. The maximum methane flow will occur in the year 2029, the last landfill's year of operation, with a value equal to $8.682.710 \text{ m}^3\text{year}^{-1}$, the same year that the power and energy peaks equals to 2.421,14 kW and 21.209.147,18 kWh will occur, respectively. The implementation of the biogas utilization project in the studied landfill, by the analysis carried out for the 14 years' period, proved viable, with positive economic return. Therefore, it was concluded that the use of biogas generated in landfills is an environmentally appropriate alternative and the economic viability studies help to make this technology diffuse and expanded in the country.

Keywords: Landfill. Methane Gas. Electric Energy. Economic Viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vazadouro a céu aberto.....	20
Figura 2 - Aterro Controlado.....	21
Figura 3 - Aterro Sanitário.....	22
Figura 4 - Produção de metano em aterro sanitário ao longo dos anos.....	27
Figura 5 - Sistema de captação de biogás e geração de energia elétrica em aterro sanitário ...	32
Figura 6 - Flare aberto e queima de biogás em aterro sanitário	33
Figura 7 - Flare enclausurado em aterro sanitário	34
Figura 8 - Localização da Unidade de Tratamento e Destinação Final dos Resíduos Sólidos Urbanos (UTRS) e dos municípios consorciados atendidos pelo aterro ECOTRES	39
Figura 9 - Bacia Sul e Bacia Norte do aterro sanitário do consórcio ECOTRES	41
Figura 10 - Células de disposição dos resíduos na Bacia Norte do aterro sanitário.....	41
Figura 11 - Curva de geração de metano no aterro ECOTRES.....	60
Figura 12 - Potência disponível no aterro ECOTRES.....	63
Figura 13 - Energia disponível no aterro ECOTRES	64
Figura 14 - Retorno do investimento do projeto.....	70
Figura 15 - Retorno do investimento do projeto com variações da taxa Selic	73
Figura 16 - VPL do projeto com variações da taxa Selic	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constituintes típicos encontrados no gás de aterro	28
Tabela 2 - Dados numéricos de geração de biogás e energia disponível em aterros sanitários	36
Tabela 3 - Ano de entrada dos municípios no consórcio ECOTRES	40
Tabela 4 - Composição gravimétrica do aterro sanitário ECOTRES no ano de 2017	42
Tabela 5 - População dos municípios conveniados e consorciados ao ECOTRES	46
Tabela 6 - Produção per capita de resíduos sólidos por município para o ano de 2017	46
Tabela 7 - Valores padrão de carbono orgânico degradável nos principais tipos de resíduos .	49
Tabela 8 - Composição gravimétrica do aterro ECOTRES para fins de cálculo de produção de metano pelo método do IPCC	49
Tabela 9 - Classificação dos locais de disposição de resíduos sólidos e fatores de correção do metano (FCM)	50
Tabela 10 - Valores padrão para a taxa constante de geração de metano (k)	51
Tabela 11 - População anual total do aterro ECOTRES	55
Tabela 12 - Quantidade total de resíduo disposta no aterro ECOTRES por ano, por dia e acumulado anual	56
Tabela 13 - Parâmetros de entrada do software Biogás, geração e uso energético - aterro	59
Tabela 14 - Metano gerado ao longo dos anos no aterro sanitário	59
Tabela 15 - Potência disponível no aterro ECOTRES	62
Tabela 16 - Energia disponível no aterro ECOTRES	63
Tabela 17 - Custo dos principais componentes do sistema de dimensionamento de aproveitamento de biogás em aterro sanitário	67
Tabela 18 - Fluxo de Caixa do projeto	68
Tabela 19 - Fluxo de caixa descontado e retorno do investimento do projeto	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

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

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

COD - Carbono Orgânico Degradável

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais

ECOTRES - Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FCM – Fator de Correção de Metano

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade

ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima

LANDGEM - *Landfill Gas Emission Model*

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MMA – Ministério do Meio Ambiente

NBR – Norma Brasileira

PCI – Poder Calorífico Inferior

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

SELIC - Sistema Especial de Liquidação e de Custódia

SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente

SMA - Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SNVS - Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

VPL – Valor Presente Líquido

USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

UTRS - Unidade de Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos Urbanos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Definição do Problema	12
1.2 Justificativa e Motivação	13
2 OBJETIVO	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Resíduos sólidos	15
3.1.1 Definição	15
3.1.2 Classificação	16
3.1.3 Propriedades	17
3.1.4 Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos	18
3.1.5 Disposição Final	19
3.1.5.1 Vazadouros a céu aberto	19
3.1.5.2 Aterros Controlados	20
3.1.5.3 Aterros Sanitários	21
3.2 Geração de Biogás em Aterro Sanitário	23
3.2.1 Digestão Anaeróbia	24
3.2.2 Fases de produção de biogás	25
3.2.3 Quantificação da geração de biogás em aterro sanitário	25
3.2.4 Composição do biogás	27
3.2.5 Fatores que influenciam a geração de biogás em aterro sanitário	28
3.3 Aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários	29
3.3.1 Energia térmica	30
3.3.2 Combustível veicular	30
3.3.3 Iluminação a gás	31
3.3.4 Energia elétrica	31
3.4 Viabilidade econômica do aproveitamento de biogás como energia elétrica	35
3.5 Potencial brasileiro para geração de energia elétrica a partir do biogás	37
4 METODOLOGIA	38
4.1 Método de Abordagem	38
4.2 Procedimentos	38

4.3 Descrição da área de estudo	39
4.4 Estimativa da população e da produção de resíduos sólidos dos municípios integrantes do consórcio ECOTRES.....	43
4.5 Estimativa da produção de gás metano no aterro sanitário	47
4.6 Cálculo da potência e energia disponíveis no aterro sanitário	51
4.7 Viabilidade econômica do projeto	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1 Estimativa da população e da produção de resíduos sólidos dos municípios integrantes do consórcio ECOTRES.....	55
5.2 Estimativa da produção de gás metano no aterro sanitário	57
5.3 Cálculo da potência e energia disponíveis no aterro sanitário	62
5.4 Viabilidade econômica do projeto	65
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A – Projeção populacional para todos os municípios do consórcio ECOTRES.....	83
APÊNDICE B – Etapas para gerar a curva de biogás por meio da utilização do Software Biogás, geração e uso energético – aterros	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição do Problema

O aumento da população urbana aliado às mudanças nos hábitos de consumo causou um aumento da produção de resíduos sólidos urbanos (ICLEI, 2009). Esses resíduos, quando dispostos de maneira inadequada, resultam em problemas de saúde pública e ambientais, como proliferação de vetores e doenças e poluição do solo, da água e do ar (FIGUEIREDO, 2011). A maior parte dos resíduos sólidos coletados no Brasil tem como destino os aterros sanitários, o que representou 59,1% do total coletado no ano de 2017 (ABRELPE, 2017), que são uma forma de disposição final ambientalmente adequada prevista pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Porém, existem alguns problemas ambientais relacionados a essa forma de disposição final, dentre eles está a geração de gases.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2019), o aterro sanitário pode ser considerado um reator biológico em que um dos principais produtos gerados são os gases que apresentam em sua composição principalmente metano e dióxido de carbono, gases esses de efeito estufa, sendo que o metano apresenta um potencial de aquecimento global 21 vezes maior que o gás carbônico (IPCC, 2013). Desta forma, percebe-se que o biogás gerado em aterro sanitário pode se caracterizar como um problema global, evidenciando, portanto, a importância do aproveitamento do mesmo como alternativa para evitar a emissão deste gás e, em contrapartida, gerar uma fonte de energia limpa, por apresentar alto potencial energético e se constituir como uma fonte de energia renovável, economicamente viável e ambientalmente correta (BIANEK et al., 2018).

Diante do cenário brasileiro de aumento na demanda e consumo final de energia, onde se observou um crescimento anual acentuado entre os anos de 1970 e 2004 e uma previsão de aumento entre 2005 a 2030 (BRASIL, 2007), percebe-se a importância e a necessidade de se diversificar a matriz energética brasileira, principalmente no que diz respeito à geração de energia elétrica. Assim, o aproveitamento energético do biogás para a geração de energia elétrica surge como uma possível alternativa para esta questão.

A matriz energética brasileira coloca o país em vantagem na geração de energia renovável, uma vez que possui uma das matrizes mais limpas do mundo (FREITAS; MAKIYA, 2012). De toda a energia elétrica produzida no país, aquela proveniente de fontes renováveis corresponde a 81,4%, enquanto no mundo 22,8% da energia é proveniente de fontes renováveis e o restante de fontes não renováveis, entretanto, a maior parte da energia

renovável produzida no Brasil advém de hidrelétricas (EPE, 2018b). Devido a matriz energética brasileira estar fundamentada na energia hídrica, não se incentiva com a mesma intensidade a geração de novas formas de energia elétrica, como a advinda do biogás (ARCADIS, 2010).

De acordo com Durão (2017), o Brasil possui o potencial para a geração de energia elétrica por meio do aproveitamento de biogás em aterros sanitários, porém esse potencial energético ainda é muito pouco explorado, sendo que a geração de energia elétrica a partir desta fonte corresponde apenas a 0,0959% do total da matriz energética do Brasil (ANEEL, 2019a). Existem poucos projetos de aproveitamento de biogás em operação no país, embora haja o potencial para o aproveitamento do mesmo, e isso se explica pela existência de algumas dificuldades principalmente relacionadas à viabilidade técnica e econômica e aos problemas operacionais do sistema (ARCADIS, 2010).

Portanto, os estudos de viabilidade técnica e econômica da implantação desta fonte de energia tornam-se importantes para promover a sua ampliação e a exploração deste potencial disponível no Brasil, tendo em vista a importância do aproveitamento energético de biogás em aterro sanitário como alternativa para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz energética brasileira.

1.2 Justificativa e Motivação

Diante do cenário atual de grande geração de resíduos sólidos e da utilização excessiva de fontes de energia não renováveis responsáveis pela liberação de gases de efeito estufa, faz-se necessário buscar alternativas que solucionem essas questões. Tendo em vista as problemáticas ambientais apresentadas, o presente trabalho sugere uma solução integrada que abrange tanto a disposição final ambientalmente correta para a demanda crescente de resíduos sólido e a consequente diminuição das emissões de metano, como uma alternativa para diversificar a matriz energética brasileira.

Desta forma, estudos referentes à utilização do biogás de aterro sanitário como fonte de energia renovável são de extrema importância, pois a partir deles, torna-se possível avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do projeto. Todos esses fatores podem ser considerados motivadores para a realização do presente trabalho, uma vez que contribuem para a melhoria das condições socioeconômicas e ambientais que envolvem essa questão.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Estimar o potencial energético do biogás produzido no aterro sanitário do Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos (ECOTRES) e a viabilidade econômica do seu aproveitamento para a produção de energia elétrica.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a projeção populacional e de resíduos sólidos produzidos pelos municípios integrantes do consórcio ECOTRES;
- Estimar a quantidade de metano produzida no aterro sanitário até 15 anos depois do encerramento do aterro;
- Calcular a potência e a energia disponíveis para geração de energia elétrica;
- Avaliar a viabilidade econômica do projeto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos sólidos

3.1.1 Definição

Com o aumento da população mundial aliado ao crescimento dos centros urbanos, observa-se a ampliação da utilização dos recursos ecossistêmicos, o que gera depleção do meio ambiente por fatores como os relacionados ao retorno dos resíduos à natureza após a sua utilização pelo homem. A quantidade de resíduos sólidos produzidos pelas populações tem relação com o nível de riqueza, refletindo na capacidade econômica para consumir, assim como com os valores e hábitos de vida. Aliado a alta geração de resíduos sólidos, está o agravamento de problemas ambientais, como a proliferação de vetores causadores de doenças e a emissão de gases de efeito estufa (GODECKE; NAIME; FIGUEIREDO, 2012).

A geração de resíduos sólidos pode ser considerada um dos problemas de maior relevância da sociedade contemporânea, tendo como agravantes o crescimento gradativo e desordenado da população, a aceleração do processo de ocupação do território urbano e o crescimento gradativo dos bens de consumo da população, devido ao aumento da produção industrial (ESCOSTEGUY, s.d.).

Os resíduos sólidos são definidos, de acordo com a Norma Brasileira (NBR) 10.004, como sendo:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, p. 1).

A Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define resíduos como:

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

economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010, p. 2).

3.1.2 Classificação

De acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), os resíduos podem ser classificados em relação à origem e à periculosidade, conforme a seguir.

Quanto à origem:

- a) Resíduos domiciliares: tem como origem as atividades domésticas residenciais;
- b) Resíduos de limpeza urbana: provenientes de varrição, limpeza de logradouros, vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) Resíduos sólidos urbanos: compreendem os itens a e b;
- d) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: são resíduos gerados nessas atividades, com exceção dos dispostos nos itens “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: são os resíduos gerados nessas atividades com exceção dos referidos na alínea “c”;
- f) Resíduos industriais: aqueles gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) Resíduos de serviço de saúde: produzidos nas atividades de serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);
- h) Resíduos da construção civil: provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, estando inclusos também os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) Resíduos agrossilvopastoris: provenientes das atividades agropecuárias e silviculturais, assim como os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) Resíduos de serviços de transportes: produzidos em portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira; e
- k) Resíduos de mineração: oriundos de atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

Quanto a periculosidade:

- a) Resíduos perigosos: apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental devido a suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, tetragenidade e mutagenidade; e
- b) Resíduos não perigosos: diz respeito àqueles que não estão compreendidos no primeiro item.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos como: Classe I – Perigoso, apresentam risco ao meio ambiente ou à saúde pública, podendo apresentar características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade; Classe II – Não perigosos, sendo subdivididos em Classe II A – Não inertes, podendo apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água; e Classe II B – Inertes, classe que diz respeito a resíduos que não apresentam constituintes que se solubilizem acima dos padrões de qualidade para água potável quando em contato com água destilada ou deionizada, com exceção para a cor, turbidez, dureza e sabor.

3.1.3 Propriedades

Os resíduos sólidos apresentam algumas propriedades físicas e químicas que foram listadas por Barros (2012). As principais propriedades físicas são:

- a) Composição gravimétrica: diz respeito ao peso percentual dos materiais que compõem uma amostra de resíduo sólido;
- b) Compressividade: é o potencial de redução do volume do resíduo por meio da aplicação de uma pressão, é importante para o dimensionamento de uma maneira geral;
- c) Peso específico aparente: é a relação entre o peso do resíduo não compactado em relação ao volume que ele ocupa e é importante para o dimensionamento de equipamentos de coleta e transporte; e
- d) Teor de umidade: é o percentual, em peso, de água em uma amostra de resíduo sólido e é importante para se determinar a velocidade de degradação aeróbia ou anaeróbia.

As principais propriedades químicas são:

- a) Composição química: está relacionada aos estudos de macro e micronutrientes presentes nos resíduos que são fundamentais para o metabolismo dos microorganismos durante a degradação da matéria orgânica, sendo importantes para o tratamento biológico;
- b) Potencial hidrogeniônico: diz respeito a concentração de íons H^+ e indica a alcalinidade, acidez ou neutralidade do resíduo. Está relacionado às atividades microbiológicas de degradação;
- c) Proporção Carbono/Nitrogênio (C/N): essa relação expressa o grau de decomposição de determinada massa de resíduo, aeróbia ou anaeróbia; e
- d) Poder calorífico inferior (PCI): representa a energia na forma de calor desprendida pelos resíduos ao passarem por processos térmicos.

Ademais, os resíduos sólidos urbanos também apresentam características biológicas relacionadas às populações microbianas e aos agentes patogênicos presentes na massa residual. Essas características em conjunto com as características químicas dos resíduos, permitem estabelecer a melhor forma de tratamento e disposição final para os mesmos (MONTEIRO et al., 2001).

3.1.4 Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos

O gerenciamento integrado dos resíduos sólidos constitui-se em um conjunto de medidas que envolvem a realização da limpeza urbana, a coleta, o tratamento e a disposição final dos mesmos, realizados por diferentes órgãos da administração pública e da sociedade civil, com fins de elevar a qualidade de vida da população e promover o asseio da cidade, levando em consideração características como fontes de produção, volume e tipos de resíduos, características sociais, culturais e econômicas dos cidadãos, além das peculiaridades demográficas, climáticas e urbanísticas locais (MONTEIRO et al., 2001).

As ações prioritárias para qualquer modelo de gerenciamento dos resíduos devem incluir: a coleta de todo resíduo gerado; destinação adequada; busca de formas de segregação e tratamento considerando que essas formas só darão resultado positivo e duradouro se responderem a requisitos ambientais e econômicos; conscientização da população por meio de campanhas e programas, com o objetivo de manter a limpeza da cidade e incentivo à adoção de medidas que visem à redução da geração de resíduo (VILHENA, 2018).

A limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos compreendem as atividades de coleta, transporte, transbordo, tratamento e disposição final (BRASIL, 2012).

A coleta consiste no recolhimento do resíduo acondicionado da fonte geradora para encaminhá-lo por meio de um transporte adequado a uma possível estação de transferência e a um eventual tratamento e a uma disposição final. Os resíduos são coletados para evitar que os mesmos possam causar problemas de saúde. De um modo geral, esse serviço é realizado pelo órgão municipal responsável pela limpeza urbana (MONTEIRO et al., 2001).

Já o tratamento é definido como uma série de procedimentos que atuam com o objetivo de diminuir a quantidade ou o potencial poluidor dos resíduos sólidos, pelo impedimento do descarte do resíduo em local inadequado ou transformando o material em inerte ou biologicamente estável, o que pode ocorrer, por exemplo, através da reciclagem, compostagem, incineração, entre outros (MONTEIRO et al., 2001).

E, por fim, a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, que diz respeito à distribuição ordenada de rejeitos em aterros de acordo com normas operacionais específicas com o intuito de evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010).

3.1.5 Disposição Final

As principais formas de disposição final de resíduos e rejeitos no solo são o vazadouro a céu aberto, o aterro controlado e o aterro sanitário (BRASIL, 2012).

3.1.5.1 Vazadouros a céu aberto

O vazadouro a céu aberto, ou lixão, pode ser considerado como uma forma inadequada de disposição final dos resíduos sólidos e rejeitos que se caracteriza pela descarga no solo dos resíduos sem a adoção de medidas de controle que protejam o meio ambiente e a saúde pública (BRASIL, 2012).

De acordo com Costa et al. (2016), esta forma de disposição final dos resíduos sólidos favorece o surgimento de vetores que podem transmitir doenças e causar problemas à saúde da população. Além disso, os lixões causam problemas como poluição visual das áreas circunvizinhas, aumento de processos erosivos, compactação do solo, emissão de gases de efeito estufa, contaminação do solo e do lençol freático. Todos esses impactos contribuem para um desequilíbrio ambiental.

A Figura 1, a seguir, ilustra um vazadouro a céu aberto, ou lixão, e os principais impactos ocasionados por esses locais ao meio ambiente.

Figura 1 - Vazadouro a céu aberto



Fonte: FEAM (2010)

3.1.5.2 Aterros Controlados

Consiste em uma forma de disposição final de resíduos sólidos que utiliza alguns princípios de engenharia para confinar os resíduos, em que os materiais são cobertos com uma camada de material inerte no final do período diário de trabalho. De modo geral, não possui impermeabilização da base, o que pode degradar a qualidade das águas subterrâneas, também não disponibiliza de tratamento de chorume ou do biogás gerado. É um método que se comparado ao lixão é preferível, porém apresenta qualidade bem inferior a de um aterro sanitário (VILHENA, 2018).

A diferença básica entre aterros controlados e aterros sanitários é que o último dispõe de sistema de coleta e tratamento do chorume, assim como da drenagem e queima do biogás, além da impermeabilização de base. De modo geral, utiliza-se essa forma de disposição final para cidades que coletem até 50 toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos (MONTEIRO et al., 2001).

A figura 2, a seguir, demonstra a disposição final de resíduos sólidos em aterros controlados.



Fonte: FEAM (2008)

3.1.5.3 Aterros Sanitários

Os aterros sanitários são definidos como locais adequados para receber resíduos de origem doméstica, varrição de vias públicas e comércio (ALBUQUERQUE, 2011), caracterizam-se como uma forma de disposição final sem causar danos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais e, além disso, apresenta baixo custo operacional (COSTA; RIBEIRO, 2013).

A norma NBR 8419 define aterro sanitário como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 1992, p.1).

De acordo com Monteiro et al. (2001), um aterro sanitário conta com:

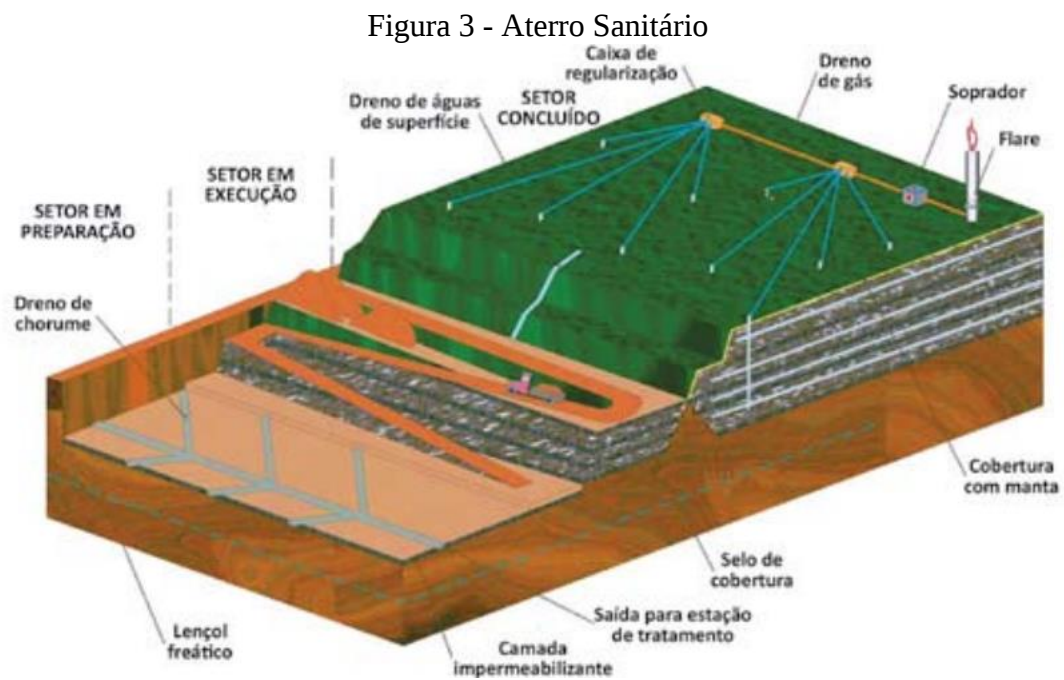
- a) Unidades operacionais: incluem células de resíduo domiciliar, células de resíduo hospitalar, impermeabilização de fundo e superior, sistema de coleta e tratamento do chorume, sistema de coleta e queima ou tratamento do biogás, sistema de

drenagem e afastamento de águas pluviais, sistema de monitoramento ambiental, fotográfico e geotécnico e pátio de estocagem de materiais;

- b) Unidades de apoio: incluem cerca e barreira vegetal, estradas de acesso e de serviços, balança rodoviária e sistema de controle de resíduos, guarita de entrada e prédio administrativo e oficina e borracharia. Além disso, é fundamental que exista um processo de seleção da área, licenciamento e projeto executivo antes de sua operação.

Para que uma área possa ser utilizada para a implantação e operação de um aterro sanitário, ela deve atender aos seguintes aspectos: declividade do local entre 1% e 30%, coeficiente de permeabilidade do solo menor que $10^{-6} \text{ cm s}^{-1}$, zona saturada com espessura maior que 3 metros, distância mínima entre o aterro e qualquer recurso hídrico de 200 metros, presença de poços de monitoramento da qualidade da água subterrânea, sendo um a montante e três a jusante e distância de 500 metros entre o aterro e qualquer residência (BARROS, 2012).

A Figura 3, a seguir, demonstra uma representação da estrutura construtiva de um aterro sanitário.



Fonte: ICLEI (2009)

Aterros sanitários que atendem a pequenos municípios apresentam custo operacional unitário muito elevado quando comparados aos que atendem maiores populações e

quantidades de resíduos. Para esses casos, a implantação de consórcios entre pequenos municípios apresenta-se como uma alternativa vantajosa, que tende a viabilizar financeiramente a gestão dos resíduos, diminuindo os custos operacionais e de investimento inicial. Os consórcios públicos são definidos como associações e coordenações entre os entes da federação formados com o objetivo de administrar em conjunto os serviços públicos, estabelecidos por meio de contrato (ARCADIS, 2010).

Segundo o mesmo autor, as principais vantagens da formação de consórcios para gerenciamento dos resíduos sólidos são as descritas a seguir:

- a) Solução compartilhada, solidária e regional para o problema de disposição de resíduos sólidos;
- b) Economia no uso de máquinas e equipamentos para operação;
- c) Divisão dos custos de instalação e operação entre os municípios;
- d) Possibilidade de adesão de municípios que ainda depositem seus resíduos em lixões;
- e) Possibilidade de instalação de projetos de captura, queima e aproveitamento energético de biogás para produção de energia elétrica, isso porque, quanto maior o volume de resíduo orgânico depositado em um único aterro, maior a geração de gás metano.

Além disso, em Minas Gerais, a Deliberação Normativa nº 52 de 14 de dezembro de 2001 do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) incentiva a criação de consórcios intermunicipais, no seu artigo 3º, com objetivo de otimização do uso de áreas e redução dos custos de implantação e operação dos sistemas de disposição final de resíduos sólidos, devendo as prefeituras darem prioridade a criação de tais sistemas (MINAS GERAIS, 2001).

Por isso, a formação de consórcios é uma iniciativa que deve ser incentivada e tem se mostrado eficiente, principalmente para municípios com populações inferiores a 100 mil habitantes (ARCADIS, 2010).

3.2 Geração de Biogás em Aterro Sanitário

O biogás de aterro sanitário é produzido por meio da decomposição anaeróbica da parcela orgânica dos resíduos sólidos, que apresenta em sua composição aproximadamente

50% de metano e 50% de gás carbônico, além de traços de outros compostos orgânicos (EPE, 2018c).

A geração de biogás em um aterro sanitário depende de diversos elementos como a umidade, a composição dos resíduos sólidos, entre outros (PECORA et al., 2008). O desenvolvimento de bactérias anaeróbicas, responsáveis pela formação do biogás, é favorecido pelo ambiente existente nos aterros sanitários, como ausência de ar, temperatura ideal e disponibilidade de água e matéria orgânica (OLIVEIRA; GOMES, 2008).

3.2.1 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é a responsável pela produção de biogás em um aterro sanitário. Ela baseia-se em uma sequência de processos metabólicos complexos que acontecem de maneira anaeróbia e dependem da ação de microorganismos para estabilizar a matéria orgânica em metano e dióxido de carbono (MADSEN; HOLM-NIELSEN; ESBENSEN, 2011). De acordo com Chernicharo (2007), a digestão anaeróbica pode ser dividida em quatro fases principais, sendo elas a hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese.

A hidrólise é a primeira etapa da digestão anaeróbia e consiste na conversão de materiais particulados a materiais dissolvidos mais simples, através de exoenzimas que são excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Os fatores que afetam essa fase são: pH, temperatura, tempo de retenção hidráulica, além do tamanho e distribuição das partículas (FARIA, 2012).

A etapa posterior é chamada acidogênese, nela as bactérias acidogênicas convertem os produtos gerados na hidrólise em substâncias orgânicas simples, como ácidos graxos, ácido acético, entre outros (AMAYA; BARRAGÁN; TAPIA, 2013).

Logo em seguida, tem-se a acetogênese que é responsável por oxidar os produtos gerados na fase anterior, através das bactérias acetogênicas, em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Os produtos gerados nesta fase são hidrogênio, dióxido de carbono e acetato (FARIA, 2012).

Por fim, ocorre a metanogênese, que é a etapa final do processo de degradação anaeróbica onde ocorre a transformação dos produtos gerados na fase anterior em metano e dióxido de carbono (NUVOLARI, 2003).

3.2.2 Fases de produção de biogás

Segundo Tchobanoglous e Kreith (2002), a formação do biogás pode ser dividida em 5 fases, sendo elas:

- a) Fase I – é a fase inicial em que a biodegradação ocorre, principalmente, em meio aeróbico;
- b) Fase II – denominada também de fase de transição. O interior do aterro transforma-se em um reator bioquímico, a disponibilidade de oxigênio diminui e inicia-se a anaerobiose. Nesta fase, os microorganismos iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos;
- c) Fase III – a fase ácida é caracterizada pelo início da formação de metano com um aumento da produção de ácidos orgânicos e menores quantidades de gás hidrogênio. É a primeira etapa onde se inicia a hidrólise de componentes com maior massa molecular, como proteínas e lipídios, em compostos mais simples, que serão utilizados pelos microorganismos como fonte de energia. No final desta fase, há a formação de gás carbônico e pequenas quantidades de gás hidrogênio;
- d) Fase IV – também conhecida como fase metânica. Nesta fase, ocorre a fermentação metanogênica, e a formação de metano pela ação de um grupo de microorganismos estritamente anaeróbicos, que converte o ácido acético e o hidrogênio em metano e dióxido de carbono; e
- e) Fase V – é a fase de maturação, em que compostos orgânicos são convertidos em metano e dióxido de carbono. Esta fase ocorre quando já existe grande quantidade de metano e dióxido de carbono formados, a taxa de geração de biogás diminui, devido à maior parte dos nutrientes já ter sido consumida pelos microorganismos.

De acordo com Augenstein e Pacey (1991) apud Fernandes (2009), o tempo de duração da fase I é de algumas horas a uma semana, a segunda fase ocorre de um mês a seis meses, a terceira fase tem duração de 3 meses a 3 anos, a quarta fase se dá ao longo de 8 anos a 40 anos e a quinta fase permanece por um período de 1 ano a mais de 40 anos.

3.2.3 Quantificação da geração de biogás em aterro sanitário

A produção de biogás nos aterros sanitários, em geral, inicia-se nos primeiros meses de funcionamento do aterro, logo após a disposição dos resíduos sólidos, já sendo encontrados

resquícios de metano, e essa geração pode se prolongar por até 20 ou 30 anos, o que irá depender do encerramento do aterro (VIEIRA et al., 2015).

A quantificação do biogás gerado em aterros sanitários pode ser feita por meio de modelos matemáticos, que utilizam dados sobre o aterro sanitário, como precipitação, massa de resíduos depositada, características do local e dos resíduos, para realizar a estimativa teórica de metano produzida (BARROS, 2012).

Existem vários métodos que estimam a quantidade de biogás produzida em aterros sanitários, desde aqueles que realizam uma aproximação grosseira e consideram somente a quantidade de resíduo que é disposta no aterro, até aqueles que levam em consideração a cinética de geração de biogás em função de alguns parâmetros, dentre eles condições climáticas locais e a composição do resíduo (CETESB/SMA, 2003).

Atualmente, os métodos mais comumente utilizados baseiam-se em equações de decaimento de primeira ordem, que incorporam o efeito do tempo na degradabilidade dos resíduos, em que a decomposição dos resíduos segue uma cinética de primeira ordem (BIANEK et al., 2018). Esses modelos consideram que a idade do resíduo tem influência sobre a produção de biogás e que ocorre um decréscimo na produção ao longo dos anos, a partir de uma determinada quantidade de resíduo disposta no aterro (ABRELPE, 2013).

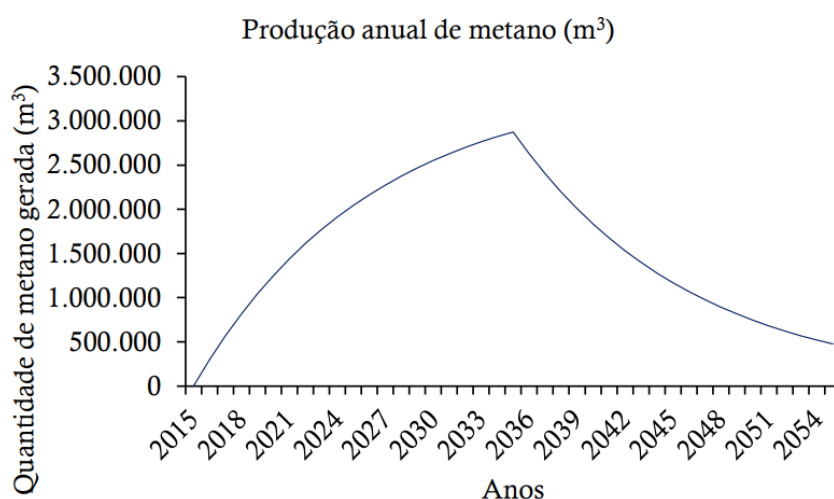
Dentre os modelos que utilizam a cinética de primeira ordem, pode-se citar o *Landfill Gas Emission Model* (LandGEM ©), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos (USEPA, 2005). Esse modelo utiliza um conjunto de dados padrão pré-estabelecidos pelo próprio modelo, obtidos por meio de experiências realizadas em aterros dos Estados Unidos. A utilização de dados *default*, sem considerar as especificidades de cada local, pode ocasionar determinada incerteza e imprecisão ao modelo quanto aos valores de geração de biogás, uma vez que, segundo Scharffe e Jacob (2006), o modelo sugerido pela USEPA não leva em conta os diferentes resíduos recebidos pelo aterro, mas sua utilização pode ser considerada quando não se possui dados específicos do local.

Pode-se citar também a metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC, 1996), metodologia esta de simples aplicação para cálculo de emissão de metano. Neste método, é estimada a quantidade de carbono orgânico degradável presente nos resíduos sólidos, para regiões específicas, necessitando de dados estatísticos sobre a população e sobre os resíduos sólidos urbanos (VIEIRA et al., 2015). Diferente da metodologia sugerida pela USEPA, citada anteriormente, a metodologia do IPCC é recomendada para locais em que se tenham disponíveis informações específicas para o aterro estudado, pois o método considera a parcela de carbono orgânico degradável das diferentes

parcelas de resíduo presente na massa residual depositada no aterro e, além da composição gravimétrica, outras particularidades do aterro sanitário também são consideradas, como a temperatura da zona anaeróbia, percentual de metano presente no biogás e as condições de disposição, operação, controle e gerenciamento dos resíduos no local, que influenciam diretamente a estimativa de produção de biogás no aterro sanitário (IPCC, 2006).

A determinação da curva de geração de biogás ao longo dos anos de vida útil do aterro leva em consideração dados a respeito da biodegradabilidade e composição química dos resíduos do aterro e, a partir disso, serão descritas as reações que ocorrem no aterro e será possível determinar a quantidade de biogás produzida (VIEIRA et al., 2015). O comportamento de emissão de metano nos aterros sanitários ao longo dos anos, em geral, segue a curva apresentada na Figura 4 a seguir, elaborada por Necker e Rosa (2013) para estimar a produção de biogás em um aterro sanitário de Ji - Paraná, Roraima.

Figura 4 - Produção de metano em aterro sanitário ao longo dos anos



Fonte: Necker e Rosa (2013)

A partir da curva apresentada, percebe-se que a produção de metano aumenta ao longo dos anos com o acúmulo de resíduos no aterro sanitário e decai no decorrer dos anos após o fechamento do aterro, sendo possível verificar que a geração de biogás permanece por muitos anos (NECKER; ROSA, 2013).

3.2.4 Composição do biogás

O biogás de aterro sanitário é constituído por vários gases, alguns presentes em grandes quantidades, que são os gases principais, e outros presentes em quantidades muito

pequenas, que são os gases traços. Conforme apresenta a Tabela 1 a seguir, os gases presentes no biogás de aterro incluem a amônia (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), metano (CH_4), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) (TCHOBANOGLIOUS; KREITH, 2002). As quantidades percentuais típicas correspondentes a cada gás são listadas, a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1 - Constituintes típicos encontrados no gás de aterro	
Componentes	Percentual (%)
Metano	45 – 60
Dióxido de Carbono	40 – 60
Nitrogênio	2 – 5
Oxigênio	0,1 – 1
Amônia	0,1 – 1
Enxofre, mercaptanas	0 – 1
Hidrogênio	0 – 0,2
Monóxido de Carbono	0 – 0,2
Gases em menor concentração	0,01 – 0,6

Fonte: Tchobanoglous e Kreith (2002)

3.2.5 Fatores que influenciam a geração de biogás em aterro sanitário

De acordo com Van Elk (2007), existem diversos fatores que afetam a formação de metano nos aterros sanitários, dentre eles pode-se citar aqueles relacionados com os ambientes externo e interno da célula de disposição e os relacionados com a estrutura construtiva do aterro, assim como as características do resíduo que chega ao aterro.

A umidade é um desses fatores, pois para que ocorra uma atividade microbiana satisfatória, é necessário a presença de certa quantidade de umidade no aterro (VAN ELK, 2007), uma vez que a geração de biogás é aumentada em umidades elevadas, entre 60% e 90%, sendo esse fator essencial para a vida das bactérias decompositoras (USEPA, 1991; USEPA, 1996).

Outro fator que tem influencia direta na geração de biogás em aterros sanitários é a temperatura, existindo uma faixa de temperatura ideal para a geração de metano entre 30°C e 40°C, sendo que temperaturas abaixo de 10°C dificultam a ação das bactérias metanogênicas (VAN ELK, 2007).

Assim como a temperatura, o pH também é considerado importante na formação de metano, pois a atividade das bactérias metanogênicas é sensível a suas variações, sendo a faixa de pH ideal para que ocorra maior produtividade deste grupo entre 6,8 e 7,2 (USEPA, 1991; USEPA, 1996).

A composição dos resíduos e a quantidade são fatores importantes, pois a quantidade de metano gerada aumenta com o aumento da fração orgânica biodegradável presente nos resíduos (VAN ELK, 2007).

O tamanho das partículas apresenta influência tanto na digestão aeróbia quanto na anaeróbia, sendo que, quanto menor o tamanho das partículas, maior é a velocidade de degradação. Por este motivo, observa-se o incentivo ao uso de trituradores para diminuição do tamanho das partículas (VAN ELK, 2007).

A estrutura construtiva dos aterros também apresenta influencia sobre a geração de metano, sendo que aterros com altura elevada e com eficiente sistema de impermeabilização da camada de cobertura criam ambiente propício para a atividade das bactérias anaeróbicas, responsáveis pela formação de metano, assim como o aumento da compactação e consequente aumento da densidade do resíduo diminuem a fase aeróbia, favorecendo a geração de gás metano (VAN ELK, 2007).

3.3 Aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2019), o aproveitamento energético do biogás tem como objetivo transformá-lo em outras formas de energia como elétrica, a vapor, combustíveis para caldeiras ou fogões, combustível veicular ou para abastecimento de gasodutos. O potencial energético do biogás é devido ao elevado teor de metano no mesmo, o que faz com ele apresente diversas aplicações no âmbito de geração de energia (ICLEI, 2009).

O seu beneficiamento apresenta diversos pontos positivos, dentre eles pode-se citar a geração de energia, diminuição das emissões de gases de efeito estufa, além de uma melhoria socioambiental, devido à geração de empregos e capacitação do trabalhador para lidar com uma nova tecnologia, bem como promove a segurança do aterro e das populações do entorno (SÃO PAULO, 2014).

O manual para aproveitamento de biogás desenvolvido pelo Governos Locais pela Sustentabilidade – Brasil (ICLEI, 2009) apresenta algumas alternativas para o aproveitamento de biogás em aterro sanitário, dentre elas estão a produção de energia térmica por meio das tecnologias de ciclo a vapor ou evaporador de chorume, uso veicular, iluminação a gás e energia elétrica, convertida por meio das tecnologias de Motor Ciclo de Otto ou Microturbina.

3.3.1 Energia térmica

As tecnologias existentes para conversão de biogás em energia térmica são: ciclo a vapor e evaporador de chorume. O primeiro funciona de acordo com o ciclo Rankine, com a presença de uma caldeira, uma turbina, um condensador e uma bomba. Neste sistema, utiliza-se em uma caldeira o calor proveniente da combustão do biogás para a geração de vapor. O vapor gerado não consegue ser transportado para longas distâncias e, por esse motivo, as unidades cogeradoras devem localizar-se em uma região próxima dos locais que farão uso da energia térmica (ICLEI, 2009).

No caso dos evaporadores de chorume, o sistema é constituído por soprador de ar de combustão, tubo de combustão, câmara de vaporização, sistema de exaustão e sistema de descarga de sólidos. Dentro do equipamento, ocorre a evaporação da água do percolado e a sedimentação dos sólidos que irão constituir um lodo, que será disposto no aterro. Após essa etapa, os vapores gerados passam por um filtro, para posteriormente serem lançados para a atmosfera. Este processo apresenta como vantagens a possibilidade do tratamento do chorume de maneira eficaz, utilização de um combustível renovável e não poluente para tratar o chorume e, além disso, evita que o biogás seja lançado na atmosfera (LANDIM; AZEVEDO, 2008).

3.3.2 Combustível veicular

O biogás não é equivalente ao gás fóssil para uso final, devido às características físico químicas do mesmo (VEIGA; MERCEDES, 2015). Para a utilização deste gás como combustível de veículos, é necessário remover alguns dos seus componentes, como a umidade, o ácido sulfídrico (H_2S), o dióxido de carbono (CO_2) e partículas (ICLEI, 2009). Desta forma, processos cada vez mais sofisticados vem sendo implantados com o objetivo de purificar o biogás, processos esses que equiparam o biogás ao gás natural, dando origem ao Biometano, que é um gás que apresenta alto teor de metano e possui qualidade suficiente para ser utilizado de maneira viável em automóveis (VEIGA; MERCEDES, 2015).

Esse método apresenta como vantagens a possibilidade de utilização do biogás como combustível para a frota de caminhões do próprio aterro sanitário, diminuindo os custos com outras fontes de combustível, além de diminuir a utilização de derivados de petróleo, porém apresenta como desvantagens o elevado custo de implantação e a inexistência de tecnologias nacionais eficientes para essa finalidade (ICLEI, 2009).

3.3.3 Iluminação a gás

O sistema de iluminação a gás utilizando biogás de aterro sanitário tem como objetivo iluminar o local onde será implementado. Neste sistema, ocorre a queima direta do biogás, o número de postes a serem implementados no aterro depende da necessidade de iluminação local e da quantidade de biogás produzida. Os postes não deverão ser construídos próximos aos dutos de biogás, para evitar a ocorrência de explosões. Esse sistema apresenta como vantagem a economia de dinheiro em relação à energia comprada da concessionária, porém tem as desvantagens de possuir alto custo de investimento (ICLEI, 2009).

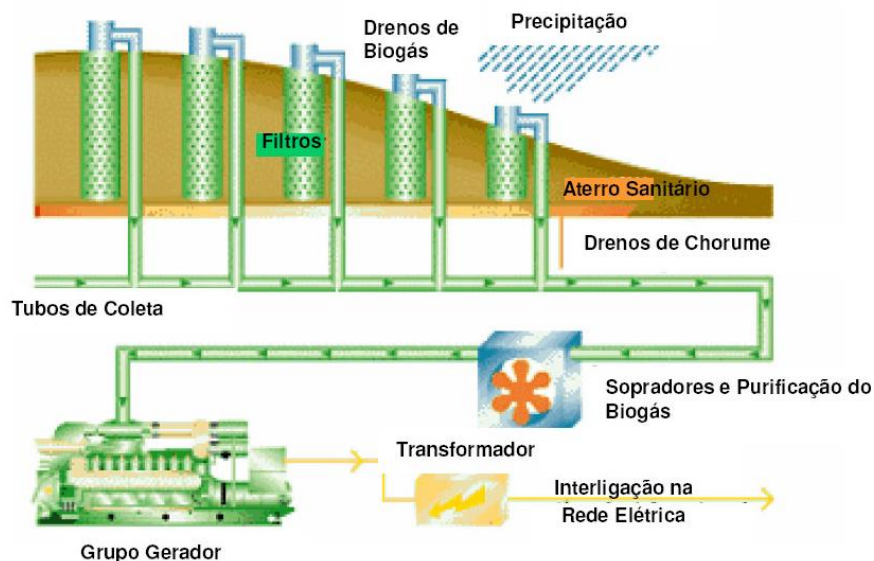
3.3.4 Energia elétrica

Em um aterro sanitário ocorre a conversão da energia química presente nas moléculas de matéria orgânica em energia mecânica e essa energia mecânica ativa um gerador, produzindo então a energia elétrica. O metano é o constituinte do biogás empregado para alimentar os motores e geradores para produção de energia elétrica em aterros sanitários, diminuindo os impactos negativos gerados pela sua emissão por meio da combustão completa para fins energéticos (LANDIM; AZEVEDO, 2008).

A energia elétrica obtida a partir do biogás é vantajosa por ser uma forma de energia renovável e de baixo custo e contar com a possibilidade de gerar energia descentralizada, próxima aos pontos de distribuição, diminuindo perdas e custos na transmissão (FIGUEIREDO, 2011).

Existem estruturas e componentes básicos necessários para a instalação de um sistema de aproveitamento de biogás em aterros sanitários para fins de geração de energia elétrica, como é demonstrado na Figura 5. De acordo com ICLEI (2009), o sistema de extração de biogás conta com drenos verticais e horizontais, sopradores, filtros responsáveis por remover material particulado e tanques separadores de condensado, e para a geração de energia elétrica, são utilizados grupos geradores, como as microturbinas e os motores de combustão interna.

Figura 5 - Sistema de captação de biogás e geração de energia elétrica em aterro sanitário



Fonte: Pecora, González e Coelho (2009)

O aterro sanitário deve apresentar um sistema de impermeabilização superior, com o objetivo de evitar que o biogás escape para a atmosfera, sistema este que geralmente é feito com argila compactada (VAN ELK, 2007).

Além disso, devem existir poços de drenagem de biogás, estruturas obrigatórias em aterros sanitários (VAN ELK, 2007), responsáveis pela coleta do biogás gerado, em geral separados entre si por uma distância de 50 metros (CETESB, 2006). Esses drenos são colocados diretamente sobre a massa de resíduos por meio de poços perfurados, e devem ser feitos com tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) perfurados e envolvidos com brita ou cascalho (ENGEBIO, 2009). Em aterros já em funcionamento, é possível adaptar os drenos já existentes e interligá-los ao sistema de captação. Essa adaptação consiste na impermeabilização da parte superior dos drenos com a instalação de um cabeçote e interligação ao sistema de coleta (ICLEI, 2009). Além disso, é necessário realizar a instalação na extremidade superior dos drenos de um sistema de monitoramento, assim como válvulas que permitam o controle da vazão entre o dreno e a tubulação de coleta (ENGEBIO, 2009).

As redes de coleta também são estruturas necessárias, responsáveis por levar o biogás drenado dos poços para o local onde ocorrerá o aproveitamento energético do mesmo. Essa rede, em geral, é constituída por tubos de polietileno de alta densidade e deve ser aterrada para que acidentes sejam evitados (VAN ELK, 2007). De acordo com ICLEI (2009), as tubulações que saem dos drenos são ligadas a pontos que regulam o fluxo de biogás e logo após interligadas a uma rede principal, onde o gás será levado para a queima ou para o sistema de aproveitamento energético. Ainda segundo o autor, a força que impulsiona o

biogás para que o mesmo seja extraído é uma pressão negativa gerada pela presença de um soprador interligado a tubulação principal do sistema.

Outro sistema importante é o sistema de tratamento do biogás, que deve ser realizado para a remoção da umidade, material particulado, compostos gasosos como orgânicos, de enxofre, não metanos e orgânicos voláteis, bem como para a remoção de dióxido de carbono. O sistema de remoção de umidade é responsável por remover também o material particulado que possa estar presente no biogás, pois essas partículas estão envoltas pelas partículas de umidade (BARROS, 2012);

Assim como o sistema de compressão, que gera uma pressão negativa responsável por retirar o biogás do aterro e fornecer uma pressão positiva para o armazenamento, queima e aproveitamento energético (CETESB, 2006).

Mesmo em sistemas em que ocorra o aproveitamento energético do biogás, é necessária a instalação de queimadores, uma vez que em casos de falhas no sistema de geração de energia ou manutenção do sistema, ele evitará a emissão de metano para a atmosfera (ICLEI, 2009). Esse dispositivo é responsável pela ignição e queima do biogás no aterro sanitário, transformando o CH_4 em CO_2 , proporcionando ganho ambiental, devido à diminuição das emissões de metano, que possui maior potencial de aquecimento global do que o dióxido de carbono. Os flares em aterros sanitários podem ser abertos ou enclausurados (ENGEBIO, 2009). A Figura 6, a seguir, demonstra um *flare* aberto e a queima do biogás na superfície do aterro sanitário.

Figura 6 - Flare aberto e queima de biogás em aterro sanitário



Fonte: ICLEI (2009)

Os *flares* enclausurados são os recomendados em casos da existência de sistemas de aproveitamento de biogás em aterros sanitários. Eles são fabricados em aço carbono e, na parte interior, possuem fibra cerâmica para o isolamento, além de apresentarem queimadores

internos presos em um coletor inferior, que é interligado ao ducto de biogás, sendo que este ducto apresenta uma bifurcação que permite o desvio do biogás para o sistema de geração de energia elétrica antes da queima (ICLEI, 2009). Esse sistema deve contar com equipamentos para a medição da vazão, da composição do biogás, da pressão e da temperatura do gás, assim como válvulas que controlem as pressões que irão para os sistemas de queima em *flare* ou aproveitamento energético (ENGEBIO, 2009). Na Figura 7, a seguir, pode ser observado um exemplo de *flare* enclausurado.

Figura 7 - Flare enclausurado em aterro sanitário



Fonte: ICLEI (2009)

E, por fim, os grupos de geradores, no caso de sistemas utilizados para a geração de energia elétrica, que utilizam o biogás como combustível (VAN ELK, 2007). Dentre as tecnologias disponíveis para conversão energética de biogás, destacam-se os motores de combustão interna – Ciclo de Otto e as microturbinas (ICLEI, 2009).

Uma das formas de conversão da energia química presente no biogás à energia elétrica é através dos motores à combustão interna, utilizado até mesmo para geração de pequena capacidade. O princípio de funcionamento desta tecnologia consiste na expansão de gases para exercer trabalho mecânico, empurrando um pistão dentro de um cilindro (BRAUN; TRENDEWICZ, 2013). Dentre os tipos de motor à combustão interna, existem os de ciclo de Otto (VISAKHAMOORTHY et al., 2012), sendo este o equipamento mais utilizado para queima de biogás, devido ao maior rendimento elétrico e menor custo quando comparado às outras tecnologias (ICLEI, 2009). Neste modelo, a queima se inicia no interior da câmara de combustão do motor, por meio de ignição por centelha, ou faísca (VISAKHAMOORTHY et al., 2012). Essa tecnologia para conversão de biogás apresenta algumas vantagens, como a

possibilidade da energia elétrica produzida ser consumida no próprio aterro, economia em relação a utilização da energia advinda da concessionária e possibilidade de venda da energia gerada, porém apresenta também algumas desvantagens, como necessidade de importação de motores de grande porte elevando os custos de investimento, baixo rendimento e altos valores de emissão de NO_x (ICLEI, 2009).

Outra tecnologia que pode ser utilizada para conversão de biogás em energia elétrica são as microturbinas a gás. Os sistemas de microturbinas incluem um compressor, uma câmara de combustão e uma roda de microturbina. O compressor tem a função de comprimir o ar ambiente em pressão atmosférica para alta pressão, e no interior da câmara de combustão, o combustível é queimado para produção dos gases em alta pressão e alta velocidade (CHEN et al., 2009). Esses gases produzidos são expandidos na turbina e o calor remanescente desses gases pode ser utilizado para o aquecimento do ar de combustão. As vantagens desse sistema são a presença de baixos níveis de ruídos e vibrações, flexibilidade de combustível, dentre eles o biogás, menores emissões de NO_x se comparado aos motores à combustão interna e dentre as desvantagens apresentadas por essa tecnologia pode-se citar alto custo de operação e manutenção e um rígido sistema de limpeza de biogás e remodelação da microturbina para a sua queima pois é um gás de baixo poder calorífico (ICLEI, 2009).

3.4 Viabilidade econômica do aproveitamento de biogás como energia elétrica

A implantação de sistemas de geração de energia elétrica em aterros sanitários requer a realização de estudos de viabilidade técnica e econômica, a fim de se verificar o potencial de geração de biogás no aterro sanitário, devido à quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos e avaliar os custos de geração de energia elétrica quando comparados ao valor da concessionária de energia elétrica (VAN ELK, 2007).

Existem alguns fatores que indicam a possibilidade de um aterro ser viável ou não para instalação de projetos de aproveitamento energético do biogás. Dentre eles, pode-se citar a população atendida de no mínimo 200 mil habitantes (BARROS; TIAGO FILHO; SILVA, 2014; ARCADIS, 2010), recebimento de uma quantidade diária de resíduos mínima de 200 toneladas e 500 mil toneladas totais durante toda a sua vida útil (JOHANNESSEN, 1999).

Além desses fatores, o tempo do projeto com produção e aproveitamento de biogás deve ser de no mínimo 10 a 15 anos, para que o mesmo tenha retorno econômico positivo. Esse período está relacionado a dois fatores principais, o primeiro deles ao contrato da prestação do serviço de venda de energia elétrica, que tem característica de longo prazo e o

segundo ponto relaciona-se ao fato do investimento inicial para implantação desse tipo de tecnologia ser relativamente alto e necessitar de um período de tempo longo para a amortização em casos de financiamento (ARCADIS, 2010).

Estudos realizados para aproveitamento do biogás para utilização como energia elétrica demonstraram os resultados apresentados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Dados numéricos de geração de biogás e energia disponível em aterros sanitários

Local	Número de habitantes	Vazão de metano (m³_{CH4} ano⁻¹)	Potência disponível (MW)	Energia disponível (MWh dia⁻¹)	Referência bibliográfica
CTR Caieiras: Aterro Essencis	-	132.910.464,34	41,99	876,73	Pecora, González e Coelho (2009)
Aterro Municipal de Santo André	650.000	21.107.273,31	2,59	54,05	ICLEI (2009)
Aterro Sanitário da Bacia Leiteira	249.704	149.083,61	-	0,504	Costa (2016)

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

A partir da análise realizada por Pecora, González e Coelho (2009) e ICLEI (2009), notou-se que a geração de biogás seria suficiente para gerar energia elétrica que tornaria o projeto viável tecnicamente para os fins propostos por cada um deles.

De acordo com Costa (2016), a implantação de consórcios intermunicipais viabiliza a implantação de projetos de aproveitamento energético de biogás, uma vez que municípios que atendam demandas pequenas de habitantes geram uma quantidade de energia advinda do biogás pequena, o que pode tornar o projeto pouco viável.

Além dos dados apresentados acima, ICLEI (2009), ao realizar a análise de viabilidade do projeto, verifica que o mesmo seria viável economicamente com retorno do investimento ocorrendo em 5 anos e 10 meses, com a venda da energia elétrica produzida e com a venda de créditos de carbono.

Os estudos apresentados, seguindo a mesma linha de pesquisa do presente trabalho, demonstram que o aproveitamento energético do biogás para utilização como energia elétrica pode ser viável, mas dependerá de diversas condições relacionadas à escolha do aterro sanitário para implantação do projeto, o que deve ser feito seguindo critérios de população,

quantidade de resíduo recebido, parcela orgânica do resíduo, dentro outros que possibilitem a implantação e operação do aproveitamento de biogás na estrutura do aterro sanitário.

3.5 Potencial brasileiro para geração de energia elétrica a partir do biogás

Em países populosos como o Brasil, onde se produz grandes quantidades de resíduos sólidos por ano, a utilização de biogás como fonte alternativa de energia é uma opção interessante (SANTOS, 2015). De acordo com Barros, Tiago Filho e Silva (2014), o Brasil apresenta potencial energético para o aproveitamento de biogás em aterros sanitários próximo a 5 TeraWatt-hora (TWh) de energia, em cenários mais favoráveis para 2040.

Porém, o Brasil deixa de utilizar por ano em torno de 89,2 milhões de MegaWatt-hora (MWh), o que pode ser considerado mais do que uma usina hidrelétrica de Itaipú de energia. Ou seja, atualmente há um grande desperdício do biogás gerado em aterros sanitários (LIMA, 2017).

Em outros países do mundo, a conversão energética de biogás já vem sendo implantada, como é o caso da Noruega, que até o ano de 2013, importava os resíduos de outros países para alimentar seus biodigestores anaeróbicos (LIMA, 2017).

A partir dos dados fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019a), pode-se perceber que a matriz energética brasileira ainda é muito dependente de hidrelétricas e a potência instalada de usinas que utilizam biogás de resíduos sólidos urbanos é muito pouco significativa, representando apenas 0,0959% do total de energia elétrica produzida no país, com 22 usinas instaladas e uma potência instalada igual a 168.599 kW.

Com isso, percebe-se que o Brasil apresenta grande potencial para geração de energia elétrica a partir do aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário, mas necessita ser mais explorado para que ocorra uma ampliação da utilização desta tecnologia no país.

4 METODOLOGIA

4.1 Método de Abordagem

Esta pesquisa pode ser considerada como um estudo de caso, pois busca analisar a viabilidade de implantação de uma tecnologia em um local específico, no caso o aterro sanitário do Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos (ECOTRES), localizado no município de Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais. A presente pesquisa tem enfoque quantitativo, buscando avaliar de forma numérica a produção de metano presente no biogás em um aterro sanitário, a capacidade de geração de energia elétrica e a viabilidade econômica do projeto.

4.2 Procedimentos

A estimativa da produção de metano e aproveitamento de biogás no aterro sanitário localizado no município de Conselheiro Lafaiete para fins de geração de energia elétrica e a análise de viabilidade econômica do projeto foram realizadas, inicialmente, a partir de uma pesquisa bibliográfica que auxiliou na identificação das características necessárias para a escolha de um local ideal para a realização do projeto, sendo que esta escolha foi baseada na possibilidade de implantação real do aproveitamento energético do biogás para a geração de energia elétrica levando em consideração parâmetros de população e quantidade de resíduo depositado no aterro. Assim como a escolha do aterro em questão baseou-se em um local onde ainda não contasse com essa tecnologia, sendo possível, portanto, propor a implantação da mesma no local, em caso de viabilidade positiva. Além disso, o levantamento bibliográfico auxiliou na escolha do método a ser utilizado para a quantificação do biogás produzido no aterro sanitário, assim como proporcionou um maior conhecimento sobre o assunto abordado.

Posteriormente, foi realizada uma visita ao local, no dia 03 de outubro de 2019, no período da tarde. A visita foi realizada com o intuito de conhecer o aterro sanitário, a sua estrutura e as atividades desenvolvidas dentro da unidade, além da realização do levantamento de dados secundários e de documentação junto aos responsáveis pelo aterro, necessários para a realização dos cálculos referentes à estimativa de produção de metano presente no biogás do aterro.

A próxima etapa consistiu na quantificação, em si, do metano produzido no aterro sanitário ao longo dos anos de vida útil do mesmo até o seu fechamento por meio da

metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC) e posterior estimativa da potência e da energia disponíveis para geração de energia elétrica. Para tanto, foram necessários dados referentes à população, obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e dados quantitativos e qualitativos dos resíduos sólidos, como composição gravimétrica e quantidade de resíduo depositada no aterro por ano, que foram obtidos junto à administração do aterro sanitário objeto da pesquisa e calculados tendo como base a população de cada ano e a geração per capita fornecida pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

E, por fim, foi avaliada a viabilidade econômica do projeto e verificada a possibilidade de implantação do aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica no aterro sanitário do consórcio ECOTRES.

4.3 Descrição da área de estudo

O aterro sanitário objeto do presente estudo localiza-se no município de Conselheiro Lafaiete e foi viabilizado por meio do ECOTRES, sendo integrantes do consórcio os municípios de Conselheiro Lafaiete, Congonhas e Ouro Branco. Sua implantação ocorreu no segundo semestre de 2005 e o mesmo foi transformado em consórcio público em maio de 2008, entrando em operação em agosto de 2014, com licença de operação definitiva em janeiro de 2017¹. A localização do aterro sanitário é demonstrada na Figura 8 abaixo.

Figura 8 - Localização da Unidade de Tratamento e Destinação Final dos Resíduos Sólidos Urbanos (UTRS) e dos municípios consorciados atendidos pelo aterro ECOTRES



Fonte: Minas Gerais (2011)

¹ Informações obtidas por meio do acervo documental fornecido à autora pelo ECOTRES.

O consórcio foi criado com o objetivo de regularizar a situação de disposição final dos três municípios que destinavam os seus resíduos de forma irregular para lixões (MINAS GERAIS, 2011).

Além dos municípios consorciados, o aterro conta com a participação de municípios conveniados, sendo eles Itaverava, Ressaquinha, Alto Rio Doce, Barbacena, Senhora de Oliveira, Rio Espera, Rio Casca, Lamim, Jeceaba, Catas Altas e Carandaí². O ano de entrada de cada um dos municípios conveniados e consorciados é apresentado na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Ano de entrada dos municípios no consórcio ECOTRES

Município	Consortiados/Conveniados a partir de:
Congonhas	2008
Conselheiro Lafaiete	2008
Ouro Branco	2008
Barbacena	2014
Itaverava	2017
Ressaquinha	2017
Alto Rio Doce	2018
Rio Espera	2018
Senhora de Oliveira	2019
Rio Casca	2019
Lamim	2019
Jeceaba	2019
Catas Altas	2019
Carandaí	2019

Fonte: Acervo ECOTRES (2019)

O aterro é dividido em duas áreas de disposição, sendo elas a Bacia Norte e a Bacia Sul, com áreas de 4,5 e 10,3 hectares, respectivamente. A previsão de projeto era que os resíduos fossem depositados durante quatro anos e um mês na Bacia Norte e durante os dez anos e sete meses restantes na Bacia Sul. Inicialmente a Bacia Norte foi projetada para contar com quatro células de disposição, e a Bacia Sul será composta por 9 células de resíduos (MINAS GERAIS, 2011), mas atualmente está sendo estudada a implantação de uma quinta célula na bacia Norte. As Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, as Bacias Sul e Norte e as células de disposição da bacia norte.

² Informações obtidas por meio do acervo documental fornecido à autora pelo ECOTRES.

Figura 9 - Bacia Sul e Bacia Norte do aterro sanitário do consórcio ECOTRES



Fonte: Acervo ECOTRES

Figura 10 - Células de disposição dos resíduos na Bacia Norte do aterro sanitário



Fonte: Acervo ECOTRES

O acesso ao aterro a partir de Conselheiro Lafaiete e de Ouro Branco é através da Estrada Real, MG – 443, no local denominado Varginha, com uma distância de dois quilômetros em estrada de terra da rodovia até a área, e a partir de Congonhas o acesso ocorre pelo distrito de Gagé (ECOTRES, 2019). O aterro possui uma área total de 60,5 hectares, com coordenadas 20° 36' 11.97" S e 43° 45' 41.68" O (MINAS GERAIS, 2011) .

A Unidade de Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos Urbanos (UTRS) do ECOTRES possui as seguintes unidades: Aterro Sanitário, Unidade de Triagem, Unidade de Compostagem e Ecoponto. O aterro sanitário do local, por sua vez, é composto pelas seguintes estruturas: Unidade de apoio, Sistema de pesagem, Sistema de acessos, Sistema de impermeabilização, Sistema de drenagem das águas pluviais, Sistema de drenagem dos gases,

Sistema de drenagem dos líquidos percolados e Unidades complementares (ECOTRES, 2019).

Em relação ao sistema de drenagem dos gases, o aterro não conta com nenhum tipo de tecnologia para o aproveitamento do gás gerado, existindo somente um sistema de queima em que o gás é transportado por meio de drenos, que atuam em um raio de no máximo 25 metros, desde a sua formação no maciço do aterro até a superfície, local onde são queimados por meio de *flare*, ou queimadores de gás (ECOTRES, 2019).

Dados fornecidos referentes ao acervo documental da empresa demonstram que os resíduos recebidos pelo aterro foram divididos em seis categorias, sendo elas: resíduos orgânicos, reciclável, resíduo de co-processamento, rejeito, resíduos eletrônicos e diversos. A composição gravimétrica é indicada na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Composição gravimétrica do aterro sanitário ECOTRES no ano de 2017
(continua)

Categorias		Alguns exemplos	Peso (kg)	Percentual (%)
Resíduo Orgânico	Resto de Comida	Restos alimentares, casca de legumes e frutas	433,75	42,96
	Poda	Flores, podas de árvores, grama		
Reciclável	Plástico	Sacos, sacolas, embalagens de refrigerante, água e leite, recipientes de produtos de limpeza, esponjas, isopor, utensílios de cozinha, látex, sacos de rafia	209,85	20,78
	Papel e Papelão	Caixas, revistas, jornais, cartões, papel, pratos, cadernos, livros, pastas, embalagens longa vida	117,15	11,60
	Vidro	Copos, garrafas, pratos, espelhos, embalagens de produtos alimentícios	10,8	1,07
	Metal ferroso	Palha de aço, alfinetes, embalagens de produtos alimentícios	14,35	1,42
	Metal não ferroso	Latas de bebida, fiação elétrica		
Co-Processamento	Pedra, terra, louça e cerâmica	Vasos de Flores, pratos, xícaras, restos de construção, terra, tijolos, cascalho, pedras decorativas	0	0,00
	Madeira	Caixas, tábuas, palitos de fósforo, palitos de picolé, tampas, móveis, lenha	7,65	0,76

Tabela 4 - Composição gravimétrica do aterro sanitário ECOTRES no ano de 2017
(conclusão)

Categorias		Alguns exemplos	Peso (kg)	Percentual (%)
Co-Processamento	Couro e borracha	Bolsas de couro, mochilas, sapatos, tapetes, luvas, cintos, balões	18,4	1,82
	Têxtil	Aparas, roupas, panos, tecidos, bolsas	30,6	3,03
Rejeito	Contaminant e biológico	Papel higiênico, cotonetes, algodão, fraldas descartáveis, absorventes higiênicos, lâminas de barbear, cabelos, pelos	156,15	15,46
	Contaminant e químico	Cosméticos, vidros de esmalte, canetas com carga, papel carbono, filme fotográfico	8,6	0,85
Resíduo eletrônico	Equipament os eletrônicos	Computadores, laptops, celulares, rádio, liquidificadores, mouses, teclados	0	0,00
Diversos	Diversos	Velas de cera, restos de sabão e sabonete, carvão, giz, pontas de cigarro, rolhas, cartões de crédito, lápis de cera, embalagens metalizadas, sacos de aspirador de pó, lixas e outros materiais de difícil identificação	2,4	0,24
Total			1.009,7	100

Fonte: Acervo ECOTRES (2017)

De acordo com dados fornecidos no dia da visita pela engenheira responsável pelo aterro, o mesmo apresenta a capacidade de receber atualmente uma quantidade máxima de resíduos igual a 250 toneladas por dia.

4.4 Estimativa da população e da produção de resíduos sólidos dos municípios integrantes do consórcio ECOTRES

Os dados referentes aos resíduos sólidos dispostos no aterro desde o primeiro mês de operação, agosto de 2014, até setembro de 2019 foram disponibilizados pela empresa. Os dados subsequentes foram estimados com base na projeção populacional para os anos seguintes até o ano de encerramento do aterro, assim como com base em dados de produção per capita de resíduos sólidos de cada município.

De acordo com informações fornecidas pelo ECOTRES, os municípios consorciados começaram a dispor seus resíduos no aterro a partir do ano em que integraram o consórcio,

com exceção de Congonhas, que apesar de fazer parte do consórcio desde o ano de 2008 ainda não encaminha seus resíduos para o ECOTRES, pois o mesmo possui aterro próprio e começará a destinar seus resíduos para Conselheiro Lafaiete a partir do ano de 2020. Portanto, considerou-se a colaboração deste município no somatório da projeção de resíduos apenas a partir de 2020.

Existem diversas metodologias para estimar a população de um município, dentre elas pode-se citar aquelas baseadas em fórmulas matemáticas (QASIM, 1985 apud von SPERLING, 2005), sendo elas:

- a) Crescimento aritmético: modelo que assume um crescimento da população à taxa constante igual à taxa de crescimento dos dois últimos anos dos quais se possui dados. As Equações 1 e 2, a seguir, representam as fórmulas matemáticas utilizadas para tal método.

$$P_{(t)} = P_0 + K_a(t - t_0) \quad (1)$$

$$K_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0} \quad (2)$$

- b) Crescimento geométrico: este modelo assume que a população cresce proporcionalmente a seu valor atual. As Equações 3 e 4 representam as fórmulas matemáticas utilizadas para este método.

$$P_{(t)} = P_0 \cdot e^{K_g(t - t_0)} \quad (3)$$

$$K_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t_2 - t_0} \quad (4)$$

- c) Taxa decrescente de crescimento: esse modelo considera que existe um valor de saturação para a população, onde há um crescimento contínuo, porém decrescente, como é demonstrado pelas Equações 5, 6 e 7.

$$P_{(t)} = P_0 + (P_s - P_0) \cdot [1 - e^{-K_d(t - t_0)}] \quad (5)$$

$$P_s = \frac{2P_0P_1P_2 - P_1^2(P_0 + P_2)}{(P_0P_2 - P_1^2)} \quad (6)$$

$$K_d = \frac{-\ln[(P_s - P_2)(P_s - P_0)]}{t_2 - t_0} \quad (7)$$

- d) Crescimento logístico: este método assume que o crescimento da população segue uma relação matemática logística. As Equações 8, 9, 10 e 11 representam as fórmulas utilizadas por esse método.

$$P_{(t)} = \frac{P_s}{1 + c e^{K_1(t-t_0)}} \quad (8)$$

$$c = \frac{(P_s - P_0)}{P_0} \quad (9)$$

$$K_1 = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left[\frac{P_0(P_s - P_1)}{P_1(P_s - P_0)} \right] \quad (10)$$

$$P_s = \frac{2P_0P_1P_2 - P_1^2(P_0 + P_2)}{(P_0P_2 - P_1^2)} \quad (11)$$

em que:

$P_{(t)}$ = população estimada no ano t (hab.);

K_a , K_g , K_d , K_1 , c = coeficientes;

t_0 , t_1 e t_2 = anos dos últimos censos demográficos;

P_2 , P_1 e P_0 = populações nos anos t_2 , t_1 e t_0 (hab.); e

P_s = População de saturação (hab).

Para que os métodos Taxa decrescente de crescimento e Crescimento logístico possam ser aplicados, a população estudada deve atender a duas condições, sendo elas: $P_0 < P_1 < P_2$ e $P_0 * P_2 < P_1^2$ (QASIM, 1985 apud von SPERLING, 2005).

Como a população de vários municípios participantes do consórcio não atendiam tais condições, foi descartada a utilização de ambos os métodos. Optou-se então pela utilização do método de Crescimento aritmético, uma vez que o método de Crescimento geométrico apresenta números muito elevados para o crescimento populacional e poderia resultar em uma taxa de geração de metano superestimada.

Os dados populacionais referentes aos últimos dois censos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), correspondentes aos anos de 2000 e 2010, são apresentados na Tabela 5. Para o cálculo da estimativa de produção de metano, foram considerados os valores referentes à população urbana, uma vez que, segundo dados fornecidos pelo ECOTRES referentes à declaração do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) ecológico dos municípios, a população atendida por eles corresponde à população urbana em sua totalidade (100%).

Tabela 5 - População dos municípios conveniados e consorciados ao ECOTRES

Município	População ano 2000 (hab.)		População ano 2010 (hab.)	
	Total	Urbana	Total	Urbana
Congonhas	41.256	39.458	48.519	47.236
Conselheiro Lafaiete	102.836	99.515	116.512	111.266
Ouro Branco	30.383	26.303	35.268	31.609
Itaverava	6.388	2.418	5.799	2.565
Ressaquinha	4.557	2.503	4.711	3.023
Alto Rio Doce	13.858	4.912	12.159	5.070
Barbacena	114.126	103.669	126.284	115.568
Senhora de Oliveira	5.643	2.722	5.683	3.256
Rio Espera	6.942	2.238	6.070	2.403
Rio Casca	15.260	11.477	14.201	11.334
Lamim	3.587	1.362	3.452	1.511
Jeceaba	6.109	2.831	5.395	2.988
Catas Altas	4.241	2.970	4.846	4.240
Carandaí	21.057	15.781	23.346	18.205

Fonte: IBGE (2000, 2010)

Uma vez calculadas as populações para os municípios até o ano de encerramento do aterro sanitário, foi possível realizar o cálculo de geração de resíduos sólidos depositados a cada ano. Para isso, utilizou-se dados de geração per capita de resíduos sólidos domiciliares e públicos em relação à população urbana atendida, publicados pelo SNIS referentes ao ano de 2017, último ano do qual se possui dados do “Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos”. A Tabela 6, a seguir, apresenta os dados obtidos para cada município do ECOTRES.

Tabela 6 - Produção per capita de resíduos sólidos por município para o ano de 2017

Município	Produção per capita (kg hab ⁻¹ dia ⁻¹)
Congonhas	0,59
Conselheiro Lafaiete	0,56
Ouro Branco	0,66
Itaverava	0,49
Ressaquinha	0,09
Alto Rio Doce	1,64
Barbacena	0,51
Senhora de Oliveira	0,42
Rio Espera	0,21
Rio Casca	0,62
Lamim	0,69
Jeceaba	0,55
Catas Altas	0,82
Carandaí	0,63

Fonte: BRASIL (2017)

É importante destacar que existem valores estabelecidos por empresas de pesquisa para a geração per capita de resíduos sólidos no Brasil, como os que são apresentados pelo Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil em 2017, desenvolvido pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017), em que considerou uma média de geração no Brasil igual a $1,035 \text{ kg hab}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, porém, no presente estudo, não foi considerada a média brasileira e sim valores reais para cada município, a fim de se obter valores mais próximos possíveis da realidade do local de estudo.

Considerou-se, como proposto por Barros (2012), um acréscimo de 1% sobre o índice per capita por ano, ou seja, a cada ano a geração per capita de resíduo sofre um aumento de 1% em relação ao ano anterior. Multiplicando-se a população de cada município pela massa de resíduos gerada por habitante obtêm-se o total de resíduos gerados por dia. Para o ano de 2019, a estimativa foi realizada apenas para os meses de outubro, novembro e dezembro, uma vez que para os meses anteriores existiam dados reais fornecidos pelo aterro sanitário. Para os demais anos, a geração diária foi multiplicada por 365 dias para obtenção da geração anual de resíduos. Os cálculos realizados seguiram a Equação 12 a seguir.

$$R_{(t)} = \frac{P_{(t)} \cdot I_g \cdot 365}{1000} \quad (12)$$

em que:

$R_{(t)}$ = geração de resíduo no ano t (t ano^{-1});

$P_{(t)}$ = população no ano t (hab.); e

I_g = índice de geração per capita ($\text{kg hab}^{-1} \text{ dia}^{-1}$);

A soma da geração anual para todos os municípios participantes do consórcio resultou no total de resíduo depositado a cada ano de operação do aterro sanitário e, consequentemente, no total acumulado ao longo dos anos.

4.5 Estimativa da produção de gás metano no aterro sanitário

Para estimar o potencial de geração de gás metano, foi utilizado o método sugerido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC, 1996), que é um modelo que projeta, de maneira teórica, o volume de metano a ser gerado em determinado tempo. A emissão de metano no aterro sanitário foi calculada a partir da Equação 13.

$$Q_x = K \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(X-T)} \quad (13)$$

em que:

Q_x = Emissão de metano ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$);

K = Constante de decaimento;

$R_x = R_{(t)}$ = Fluxo de resíduos do ano (t);

L_0 = Potencial de geração de metano do resíduo ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$);

X = Ano atual; e

T = Ano de deposição do resíduo no aterro (início de operação).

A equação do IPCC, citada anteriormente, é aplicada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2006) no software Biogás, geração e uso energético – aterros® e foi utilizado para a obtenção da curva de geração de metano.

Para estimar a emissão de metano é necessário conhecer a potência de geração de gás metano (L_0). Esse parâmetro depende da composição dos resíduos, principalmente a parcela orgânica dos mesmos, e o seu valor é estimado a partir do teor de carbono dos resíduos e da sua fração biodegradável e de um fator para a conversão estequiométrica de CO_2 em CH_4 (IPCC, 2006). Foi realizado o cálculo por meio da equação proposta por IPCC (2006), uma vez que esta considera as particularidades do aterro, como a composição gravimétrica, o que permite a obtenção de dados mais próximos da realidade. A Equação 14 representa o potencial de geração de gás metano.

$$L_0 = FCM \cdot COD \cdot COD_f \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (14)$$

em que:

L_0 = potencial de geração de metano do resíduo ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$);

FCM = fator de correção de metano;

COD = carbono orgânico degradável;

COD_f = fração de COD dissociada;

F = fração do metano presente no biogás em volume; e

$(16/12)$ = fator de conversão do carbono em metano.

Para efetuar os cálculos referentes ao potencial de geração de metano, a variável quantidade de carbono orgânico degradável (COD) torna-se de importante conhecimento. Ela

representa o carbono orgânico dos resíduos que está disponível para decomposição bioquímica. O cálculo da mesma foi realizado a partir da Equação 15, a seguir.

$$COD = (0,40.A) + (0,17.B) + (0,15.C) + (0,30.D) \quad (15)$$

em que:

A - fração de papel, papelão e têxtil dos resíduos;

B - fração de detritos de parques e jardins dos resíduos;

C - fração de restos de alimentos dos resíduos; e

D - fração de madeira dos resíduos.

Os valores percentuais de COD para cada tipo de resíduo são estabelecidos pelo IPCC (1996), conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores padrão de carbono orgânico degradável nos principais tipos de resíduos

Tipo de resíduo	Porcentagem de COD
A – Papel e Têxtil	40
B – Detritos de parques e jardins	17
C – Resto de alimentos	15
D – Madeira*	30

Fonte: Traduzido de IPCC (1996)

*exceto lignina

O percentual de cada resíduo, referente à composição gravimétrica do local, utilizado para o cálculo de COD é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição gravimétrica do aterro ECOTRES para fins de cálculo de produção de metano pelo método do IPCC

Categoria	Percentual (%)
Papel e Papelão	11,60
Detritos de parques e jardins/ Restos de alimentos	42,96
Tecido	3,03
Madeira	0,76

Fonte: Adaptado do acervo ECOTRES (2017)

De acordo com Bingemer e Crutzen (1987), a fração de COD dissociada pode ser obtida pela Equação 16. O COD_f corresponde a fração do COD que pode se decompor de forma anaeróbia.

$$COD_f = 0,014.T + 0,28 \quad (16)$$

em que:

COD_f - fração de COD dissociada; e

T - temperatura na zona anaeróbia (°C)

O valor para o Fator de Correção de Metano (FCM), necessário para o cálculo de L_0 , está relacionado às condições de disposição dos resíduos sólidos, ao controle da operação e ao gerenciamento do local. Adotou-se os valores *default* propostos por IPCC (2006). O IPCC (2006) considera, para o estabelecimento do valor de FCM, que locais de disposição de resíduos sólidos não gerenciados apresentam uma capacidade menor de geração de metano quando comparados a locais gerenciados em condições anaeróbias, uma vez que, em locais não gerenciados, uma parte maior dos resíduos se decompõe em condições aeróbias na superfície. Além disso, nos locais não gerenciados com disposição profunda e/ou lençol freático elevado, a parcela de resíduo decomposta em condições aeróbicas é menor do que em locais pouco profundos. Já os ambientes semi-aeróbicos são locais em que existe a introdução de ar na camada de resíduos, em que é criado um ambiente interno semi-aeróbico. Os valores propostos para o FCM são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação dos locais de disposição de resíduos sólidos e fatores de correção do metano (FCM)

Tipo	FCM
Gerenciado – anaeróbico	1,0
Gerenciado – semi-aeróbico	0,5
Não gerenciado – profundo (> 5 m de resíduos) e/ou lençol freático elevado	0,8
Não gerenciado – pouco profundo (< 5 m de resíduos)	0,4
Não categorizado	0,6

Fonte: Traduzido de IPCC (2006)

Além do parâmetro L_0 , o conhecimento da constante de decaimento k também torna-se importante. Essa constante está relacionada ao tempo necessário para que uma parcela de COD presente no resíduo decaia para a metade da sua massa inicial. A constante k foi adotada de acordo com o que é proposto por IPCC (2006). Esse parâmetro é determinado de acordo com a composição do resíduo, com os níveis de precipitação média anual local, com as temperaturas médias anuais e com a evapotranspiração potencial. A Tabela 10 apresenta os valores padrão propostos para esse parâmetro.

Tabela 10 - Valores padrão para a taxa constante de geração de metano (k)

Tipo de resíduo	Zona Climática			
	Temperada (MAT < 20°C)		Tropical (MAT > 20°C)	
	Seco (MAP/PET < 1)	Úmido (MAP/PET > 1)	Seco (MAP < 1000 mm)	Úmido (MAP > 1000 mm)
	Valores Padrão			
Papel e Têxtil	0,04	0,06	0,045	0,07
Madeira e palha	0,02	0,03	0,025	0,035
Outros putrescíveis exceto alimentos/ detritos de jardim e parques	0,05	0,1	0,065	0,17
Restos de alimentos/lodo de esgoto	0,06	0,185	0,085	0,4
RSU como um todo	0,05	0,09	0,065	0,17

Fonte: Adaptado e traduzido de IPCC (2006)

MAT: Temperatura média anual; MAP: Precipitação média anual ; PET: Evapotranspiração potencial; RSU: Resíduo sólido urbano.

Assim, a partir do L_0 , da constante de decaimento k e do fluxo de resíduo no ano, utilizou-se a Equação (13) para estimar a quantidade de metano emitida por ano no aterro.

4.6 Cálculo da potência e energia disponíveis no aterro sanitário

O cálculo da potência disponível foi realizado a partir da Equação 17, a seguir, modificado de CETESB (2006) apud Barros (2012).

$$Px = Q_x \cdot E \cdot E_c \cdot P_{CH_4} \cdot \frac{1}{31536000} \cdot \frac{1}{1000} \quad (17)$$

em que:

P_x = potência disponível a cada ano (kW);

Q_x = vazão de metano a cada ano ($m^3 \text{ ano}^{-1}$);

P_{CH_4} = poder calorífico do metano ($J \text{ m}^{-3}$);

E_c = eficiência de coleta de biogás (%);

E = eficiência do motor (%);

31536000 = número de segundos em um ano; e

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

Para o cálculo da energia disponível foi utilizada a Equação 18 (CETESB, 2006).

$$E = P_x \cdot t \quad (18)$$

em que:

E = energia disponível (kWh ano⁻¹);

P_x = potência disponível (kW);

t = Tempo de Operação do motor = (h ano⁻¹).

4.7 Viabilidade econômica do projeto

Para avaliar a viabilidade econômica do projeto realizou-se uma análise a partir da composição do fluxo de caixa, que inclui os custos do projeto e as receitas obtidas. Os custos do projeto foram contabilizados considerando o investimento inicial e despesas com operação e manutenção, já as receitas incluíram a venda da energia elétrica.

Os custos de investimento foram calculados de acordo com o que é proposto por CETESB (2006), que apresenta um dimensionamento simplificado de um projeto de recuperação e uso energético de biogás, considerando os seguintes elementos: sistema de coleta, sistema de tratamento e purificação, compressão, queima do biogás e geração de eletricidade. Para isso, algumas características do aterro precisaram ser conhecidas, como o número de drenos e o comprimento da tubulação de coleta, elementos esses que constituem o sistema de coleta de biogás, e foram calculados por meio das Equações 19, 20 e 21.

De acordo com CETESB (2006), o número de drenos do aterro pode ser calculado por meio da Equação 19 a seguir.

$$N_D = \frac{A_A}{A_D} \quad (19)$$

em que:

N_D = Número de drenos;

A_A = Área do aterro (m²); e

A_D = Área de abrangência de um dreno (m²).

Sendo que a área de abrangência de um dreno pode ser calculada por meio da Equação 20 a seguir.

$$A_D = \pi r^2 \quad (20)$$

em que:

A_D = área de abrangência de um dreno; e

r = raio de abrangência do dreno (m).

Para o cálculo da tubulação, utilizou-se a Equação 21 a seguir (CETESB, 2006).

$$T_D = (N_D - 1) \cdot d \quad (21)$$

em que:

T_D = Total da tubulação de drenagem (m);

N_D = número de drenos; e

d = distância entre os drenos (m).

Desta forma, a partir da composição do fluxo de caixa, foram utilizadas as ferramentas Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback* descontado para a realização da avaliação econômica do projeto. Esses métodos, em especial a TIR e o VPL, são os mais conhecidos e utilizados na análise de investimentos (SAMANEZ, 2002).

O VPL é uma técnica sofisticada de orçamento de capital, que considera explicitamente o valor do dinheiro no tempo e foi calculado de acordo com a Equação 22, a seguir, modificada de Gitman (2010). Esse método é utilizado com o objetivo de verificar se o projeto apresentará valor maior para o investidor do que o custo despendido por ele (SAMANEZ, 2002).

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TMA)^t} - FC_0 \quad (22)$$

em que:

VPL = valor presente líquido;

n = tempo de desconto do último fluxo de caixa;

t = tempo de desconto de cada entrada de caixa;

TMA = taxa mínima de atratividade;

FC_t = valor presente do fluxo de caixa; e

FC_0 = investimento inicial do projeto.

Os resultados obtidos a partir do cálculo do VPL foram analisados da seguinte forma: se $VPL > 0$, o projeto deve ser aceito; e se $VPL < 0$, o projeto deve ser rejeitado (GITMAN, 2010).

Além disso, foi calculada a TIR, que é uma taxa utilizada para análise de investimento e representa o retorno anual que a empresa obterá caso decida investir no projeto (GITMAN, 2010). A TIR é calculada igualando o Valor Presente Líquido (VPL) à zero, de acordo com a Equação 23.

$$VPL = 0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - FC_0 \quad (23)$$

em que:

VPL = valor presente líquido;

n = tempo de desconto do último fluxo de caixa;

t = tempo de desconto de cada entrada de caixa;

TIR = taxa interna de retorno;

FC_t = valor presente do fluxo de caixa; e

FC_0 = investimento inicial do projeto.

Utilizou-se a metodologia multi-índice, que consiste na comparação entre a TIR e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), podendo ser economicamente viável, economicamente inviável ou indiferente ao investimento (MOTTA; CALÔBA, 2002). A TMA é uma taxa de juros que representa o mínimo que um investidor pretende ganhar ao realizar um investimento e, portanto, é única para cada investidor e não existe fórmula para calculá-la, uma vez que ela pode variar com o tempo (CASAROTTO FILHO; KOPITTKE, 1994). A comparação entre as duas taxas pode ser feita da seguinte forma: se $TIR > TMA$, o investimento é viável; se $TIR < TMA$; o investimento não é viável; e se $TIR = TMA$, é indiferente investir.

Calculou-se também o *payback* descontado, com o objetivo de se verificar o tempo de retorno do investimento, sendo mais um meio de se medir a viabilidade econômica do projeto. Esse método baseia-se no tempo necessário para que o valor presente dos fluxos de caixa previstos pela empresa se iguale ao valor do investimento inicial realizado (SAMANEZ, 2002). O *payback* descontado foi calculado a partir do valor presente do fluxo de caixa descontado a cada ano, calculando-se o saldo até que ele se tornasse positivo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Estimativa da população e da produção de resíduos sólidos dos municípios integrantes do consórcio ECOTRES

Com o auxílio do software Microsoft Excel e utilizando-se os dados populacionais dos censos dos anos de 2000 e 2010 e a metodologia de Crescimento Aritmético, Equações 1 e 2, foi possível calcular a projeção para todos os municípios consorciados para os anos de 2019 a 2029, apresentada no apêndice A. A Tabela 11, a seguir, apresenta a população total atendida pelo consórcio ECOTRES, para cada ano de vida útil do aterro.

Tabela 11 - População anual total do aterro ECOTRES

Ano	Total
2019	398.178
2020	402.389
2021	406.601
2022	410.812
2023	415.024
2024	419.235
2025	423.447
2026	427.658
2027	431.870
2028	436.081
2029	440.293

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Alguns autores afirmam em seus estudos que a população mínima para que um projeto de aproveitamento de biogás seja viável economicamente deve ser igual a 200 mil habitantes (BARROS; TIAGO FILHO; SILVA, 2014; ARCADIS, 2010), o que é atendido pelo presente estudo, demonstrando a tendência de se obter resultados positivos quanto à viabilidade de implantação desta tecnologia no ECOTRES. Acredita-se que este valor pré-estabelecido de população esteja relacionado à quantidade de resíduos sólidos depositada no aterro e à parcela orgânica presente nos mesmos, que têm influencia direta sobre o volume de metano gerado e, consequentemente, sobre a viabilidade econômica do projeto.

A projeção anual para a deposição de resíduos sólidos, referente a cada município do consórcio, foi calculada a partir da Equação 12. A massa total para cada ano, correspondente a soma dos resíduos gerados em todos os municípios referentes àquele ano, a deposição diária

em cada ano e o acúmulo anual de resíduos sólidos podem ser observados na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 - Quantidade total de resíduo disposta no aterro ECOTRES por ano, por dia e acumulado anual

Ano	Quantidade de resíduos anual de todos os municípios (t ano⁻¹)	Quantidade de resíduos diária de todos os municípios (t dia⁻¹)	Acumulado (t ano⁻¹)
2014	20.276,00	135,17	20.276,00
2015	57.302,86	157,00	77.578,86
2016	54.449,87	149,18	132.028,73
2017	55.512,73	152,09	187.541,46
2018	59.482,00	162,96	247.023,46
2019	67.215,25	184,15	314.238,71
2020	86.652,17	237,40	400.890,87
2021	88.424,19	242,26	489.315,07
2022	90.230,88	247,21	579.545,95
2023	92.064,86	252,23	671.610,81
2024	93.926,50	257,33	765.537,30
2025	95.816,16	262,51	861.353,46
2026	97.734,22	267,76	959.087,68
2027	99.681,07	273,10	1.058.768,75
2028	101.657,07	278,51	1.160.425,82
2029	103.662,63	284,00	1.264.088,45

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Os valores referentes ao início da operação, agosto de 2014, a setembro de 2019 são dados reais disponibilizados pelo aterro sanitário, sendo a projeção feita para o último trimestre de 2019 e para os anos seguintes até o fim da vida útil, prevista para 2029. Pode-se perceber que houve um aumento significativo da disposição de resíduos sólidos no aterro sanitário a partir de 2019 e, principalmente, 2020. Isso se deve ao fato de que, a partir de 2019, iniciou-se a participação da grande maioria dos municípios do consórcio, assim como ao fato de que Congonhas, apesar de fazer parte do consórcio desde o ano de 2008, começará a dispor seus resíduos no aterro a partir do ano de 2020, e este apresenta participação significativa na geração de resíduos uma vez que apresenta uma das maiores populações do consórcio. Percebe-se, portanto, a relação de proporcionalidade existente entre essas duas variáveis.

Assim como para a população, existe uma quantidade mínima de resíduos que o aterro sanitário deve receber para que seja interessante implantar projetos de aproveitamento

energético de biogás com retorno econômico positivo. De acordo com dados fornecidos nos estudos de Johannessen (1999), essa quantidade é igual a 200 t dia^{-1} , valor este que provavelmente está relacionado à vazão de biogás produzida pela parcela orgânica presente neste montante, que tornará o projeto atrativo economicamente. Analisando a quantidade de resíduos recebida a cada ano, separadamente, apenas a partir do ano de 2020 o aterro sanitário começa a receber a quantidade mínima de resíduos sólidos por dia. Por outro lado, o aterro sanitário receberá o montante de resíduos superior a 500.000 toneladas durante toda a sua vida útil, valor este também estabelecido pelo mesmo autor.

A média diária de disposição de resíduos sólidos no aterro do consórcio ECOTRES, considerando o valor total de resíduos recebidos durante toda a sua vida útil, é igual a $216,45 \text{ t dia}^{-1}$, e o acúmulo total de resíduos ao longo dos 15 anos de operação do aterro é igual a 1.264.088,45 toneladas.

5.2 Estimativa da produção de gás metano no aterro sanitário

Para estimar a produção de gás metano presente no biogás do aterro sanitário, foi necessário conhecer o potencial de geração de metano L_0 e, conseqüentemente, o percentual de carbono orgânico degradável (COD) e a fração de COD dissociada. A partir da composição gravimétrica apresentada na Tabela 8, percebe-se que não há a separação entre os resíduos referentes à fração de restos de alimentos e a fração de detritos de parques e jardins, portanto adaptou-se a Equação 15, obtendo-se a Equação 24 a seguir, para o cálculo do COD.

$$COD = (0,40.A) + (0,16.(B + C)) + (0,30.D) \quad (24)$$

$$COD = (0,40.14,63) + (0,16.(42,96)) + (0,30.0,76)$$

$$COD = 12,95\%$$

$$COD = 0,1295$$

Considerando a Equação 16 e admitindo-se uma temperatura da zona anaeróbica de 35°C (BIRGEMER; CRUTZEN, 1987), obteve-se o valor de COD_f abaixo.

$$COD_f = 0,014.(35) + 0,28$$

$$COD_f = 0,77$$

Por fim, calculou-se o valor de L_0 a partir da Equação 14, considerando o valor do Fator de Correção de Metano (FCM) igual a 1, para aterros sanitários gerenciados anaeróbios, proposto pelo IPCC (2006). Esse autor considera como locais bem gerenciados anaeróbios de disposição de resíduos sólidos aqueles que possuem descarte controlado dos resíduos, incluindo pelo menos um dos seguintes itens: material de cobertura, compactação mecânica ou nivelamento dos resíduos. Desta forma, o aterro de Conselheiro Lafaiete inclui-se nessa categoria e, portanto, o FCM atribuído foi igual a 1.

A fração de metano presente no biogás (F) foi considerada igual a 50%, também proposto pelo IPCC (2006).

Desta forma, tem-se:

$$L_0 = (1)(0,1295)(0,77)(0,5) \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 0,0664 \text{ kg}_{CH_4} / \text{kg}_{resíduo}$$

Para se obter L_0 na unidade em que é solicitado, foi necessário dividir o valor encontrado pela massa específica do metano, igual a $0,0007168 \text{ t m}^{-3}$ (ICLEI, 2009), desta forma obteve-se:

$$L_0 = 92,63 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$$

Em seguida, foi estabelecido o valor da constante de decaimento (k), que determina a taxa de geração de metano para a massa de resíduo no aterro. Considerando que a precipitação média anual para o município de Conselheiro Lafaiete, com dados históricos de 30 anos, é de 1436 mm ano^{-1} (CLIMATEMPO, 2019) e adotando-se os valores propostos por IPCC (2006) para resíduos úmidos, para locais com precipitação maior que 1000 mm ano^{-1} , clima tropical, com temperaturas médias maiores que 20°C e o tipo de resíduo RSU como um todo, o valor de k utilizado para cálculos foi igual a $0,170 \text{ ano}^{-1}$.

Foi utilizado o *software* desenvolvido pela CETESB (2006) para a obtenção da curva de geração de metano ao longo dos anos no aterro sanitário. Esse programa utiliza a Equação 13 proposta por IPCC (1996). As etapas para a geração da curva por meio do *software* são apresentadas no apêndice B.

Desta forma, têm-se como dados de entrada do *software* os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros de entrada do software Biogás, geração e uso energético - aterro

Parâmetro	Entrada
Ano de abertura do aterro	2014
Ano de encerramento	2029
k (ano ⁻¹)	0,170
L ₀ (m ³ t ⁻¹)	92,63
Concentração de CH ₄ no biogás (%)	50
Massa de resíduo depositada por ano (t ano ⁻¹)	Tabela 12

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

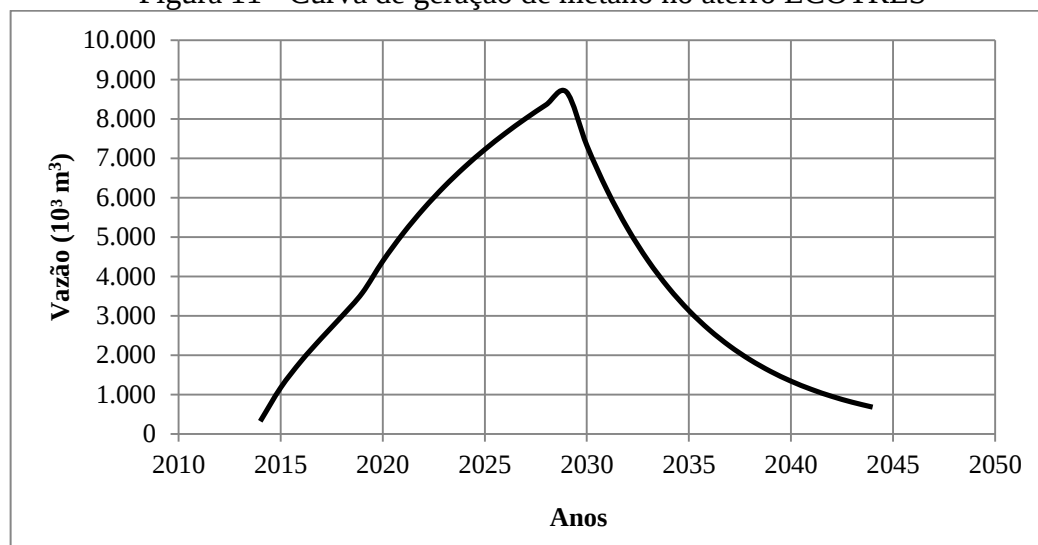
Os parâmetros de entrada apresentados foram aplicados na Equação 13 por meio do *software*, considerando uma produção de biogás por mais 15 anos após o encerramento das operações do aterro, mesmo intervalo de tempo no qual o aterro permaneceu recebendo resíduos sólidos. Desta forma, foram obtidos os valores da vazão de metano apresentados na Tabela 14 e na Figura 11 a seguir.

Tabela 14 - Metano gerado ao longo dos anos no aterro sanitário

Ano	Qx (10³ m³ ano⁻¹)	Ano	Qx (10³ m³ ano⁻¹)
2014	319,29	2030	7.325,30
2015	1.171,73	2031	6.180,10
2016	1.845,98	2032	5.213,93
2017	2.431,55	2033	4.398,81
2018	2.988,09	2034	3.711,12
2019	3.579,38	2035	3.130,94
2020	4.384,32	2036	2.641,47
2021	5.091,32	2037	2.228,51
2022	5.716,24	2038	1.880,12
2023	6.272,35	2039	1.586,19
2024	6.770,82	2040	1.338,21
2025	7.221,13	2041	1.129,00
2026	7.631,24	2042	952,50
2027	8.007,89	2043	803,59
2028	8.356,78	2044	677,96
2029	8.682,71		

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 11 - Curva de geração de metano no aterro ECOTRES



Fonte: Elaborado pelo autora (2019)

A produção de metano aumenta ao longo do tempo na medida em que os resíduos sólidos são dispostos no mesmo e decai após o seu encerramento, atingindo o seu valor máximo no ano de encerramento do recebimento de resíduos, com valor de $8.682.710 \text{ m}^3$ de metano gerado. A partir de então, ocorre o decréscimo da geração de metano, o que se deve a cessação do acúmulo de resíduos no local, assim como a outros fatores, como a recalcitrância microbiana que corresponde à incapacidade dos microorganismos de degradarem e realizarem a reciclagem de nutrientes (BARRAK, 2017).

Considerando a quantidade mínima de resíduo diária que deve ser disposta no aterro sanitário para que se obtenha um projeto viável de aproveitamento de biogás igual a 200 toneladas (JOHANNESSEN, 1999), adotando as mesmas características do aterro sanitário do consórcio ECOTRES, com valores de L_0 igual a $92,63 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ e $k = 0,170 \text{ ano}^{-1}$ e aplicando a Equação 13, pode-se dizer que a vazão de metano mínima para que o projeto de aproveitamento de biogás com vistas à comercialização seja viável economicamente é igual a $1.149.538 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$. Observando-se a Tabela 14, nota-se que esse valor é atendido do ano de 2015 a 2040 e, portanto, acredita-se que a implantação de um projeto dentro deste intervalo de tempo possa trazer retorno econômico positivo para o aterro sanitário.

Valores de vazão de metano, em aterros sanitários, superiores e inferiores aos encontrados no presente estudo são verificados na literatura, como os apresentados na Tabela 2 deste trabalho. Essa variação está relacionada, principalmente, à população atendida pelo aterro sanitário que está sendo estudado por cada autor e à parcela orgânica presente nos resíduos, mas também pode ter relação com o método empregado para a realização da estimativa, uma vez que existem metodologias que propõem valores pré-definidos para o

parâmetro L_0 , sem considerar a composição da massa residual de cada aterro, que se super ou subestimado pode resultar em valores maiores ou menores de vazão. Pereira e Castilhos Junior (2018), em seus estudos, mostram que para uma mesma população, aplicando diferentes metodologias para diferentes valores de L_0 , quanto maior forem os valores desse parâmetro, maior será a quantidade de biogás gerada e, portanto, essa variável tem grande influência nas estimativas de geração desse gás e deve-se ter cautela na escolha desse valor. O método do IPCC, por levar em consideração a composição gravimétrica dos resíduos de cada localidade no cálculo de L_0 , traz resultados mais próximos da realidade.

Em estudo realizado por Chicone Neto et al. (2016), em que estimou-se a produção de biogás para o consórcio ECOTRES, em Conselheiro Lafaiete, MG, mesmo local de estudo do presente trabalho, utilizou-se a metodologia proposta pela Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) por meio do software LandGEM, utilizando valores de L_0 e k pré-estabelecidos pelo modelo, iguais a $170 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ e $0,05 \text{ ano}^{-1}$, obtendo uma vazão máxima de metano igual a $4.430.000 \text{ m}^3$, valor bem inferior ao encontrado no presente estudo. Observa-se que, mesmo sendo utilizado um valor de L_0 maior do que utilizado nesta pesquisa, foram encontrados valores menores de vazão, fato que pode ser explicado pela utilização por Chicone Neto et al. (2016) de apenas 3 populações do consórcio referentes aos 3 principais municípios integrantes, Conselheiro Lafaiete, Ouro Branco e Congonhas, não contabilizando os demais municípios. Nota-se, portanto, a importância da formação de consórcios que abranjam vários pequenos municípios, elevando a produção de biogás à medida que aumenta-se a população atendida e, conseqüentemente, a geração de resíduos sólidos.

É importante ressaltar que esta é uma estimativa teórica de produção de biogás e que resultados mais exatos podem ser obtidos por meio de pesquisas e medições em campo, possibilitando a aquisição de parâmetros como vazão de biogás e concentração presente de metano os mais próximos possíveis da realidade do aterro.

Destaca-se que nem todo biogás produzido no aterro sanitário será capturado e aproveitado (WORLD BANK, 2004). Uma eficiência de coleta igual a 100% depende de diversos fatores que melhorem a extração de biogás e impeçam a entrada de ar no aterro, como a colocação de camada de solo argiloso espessa ou manta de polietileno de alta densidade (PEAD) e uma rede de drenos e de coleta que atendam toda a massa de resíduo depositada no aterro, sem obstruções na coleta do biogás (ENSINAS, 2003). Uma eficiência normalmente encontrada de coleta de biogás em aterro sanitário é definida por WORLD BANK (2004) igual a 75% para aterros que possuem sistemas de coleta bem projetados, construídos e operados, podendo alcançar valores acima deste.

Desta forma, foi considerado, no presente estudo, que 75% do metano gerado será capturado para fins de aproveitamento energético.

5.3 Cálculo da potência e energia disponíveis no aterro sanitário

Os motores de combustão interna são as tecnologias mais utilizadas em projetos que visam à geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro, devido à compatibilidade da potência com a viabilidade econômica do projeto (BARROS, 2012), apresentando maior rendimento elétrico e menor custo quando comparado a outras tecnologias (ICLEI, 2009), e por esse motivo, esta foi a tecnologia utilizada para conversão energética. Porém, esse sistema produz uma alta quantidade de poluentes gasosos, como monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio (BARROS, 2012), e, portanto, deve-se atentar para o controle de emissão dos mesmos.

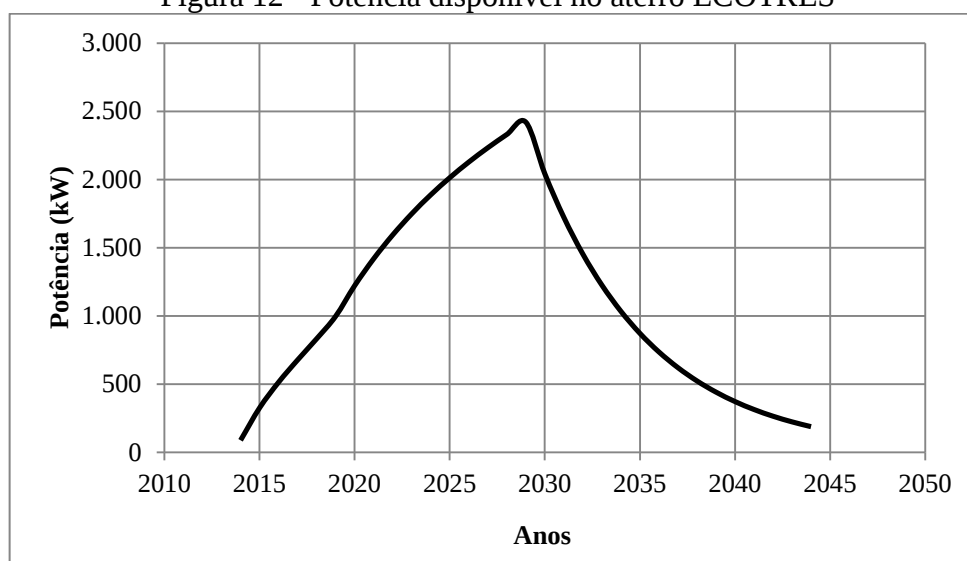
Para estimar a potência disponível, foi utilizada a Equação 17 adotando os valores de 75% de eficiência de coleta de biogás, poder calorífico do metano igual a $35,53 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}$ (CETESB, 2006), eficiência do motor de combustão interna igual a 33% (WORLD BANK, 2004) e vazão do metano a cada ano de acordo com a Tabela 14. A Tabela 15, a seguir, apresenta os valores obtidos de potência disponível no aterro sanitário e a Figura 12 demonstra o comportamento da curva de potência ao longo dos anos da estimativa.

Tabela 15 - Potência disponível no aterro ECOTRES

Ano	Potência disponível (kW)	Ano	Potência disponível (kW)
2014	89,03	2030	2.042,63
2015	326,73	2031	1.723,29
2016	514,74	2032	1.453,88
2017	678,03	2033	1.226,59
2018	833,22	2034	1.034,83
2019	998,09	2035	873,05
2020	1.222,55	2036	736,56
2021	1.419,69	2037	621,41
2022	1.593,99	2038	524,26
2023	1.749,02	2039	442,30
2024	1.888,01	2040	373,15
2025	2.013,58	2041	314,82
2026	2.127,94	2042	265,60
2027	2.232,96	2043	224,08
2028	2.330,25	2044	189,05
2029	2.421,14		

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 12 - Potência disponível no aterro ECOTRES



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

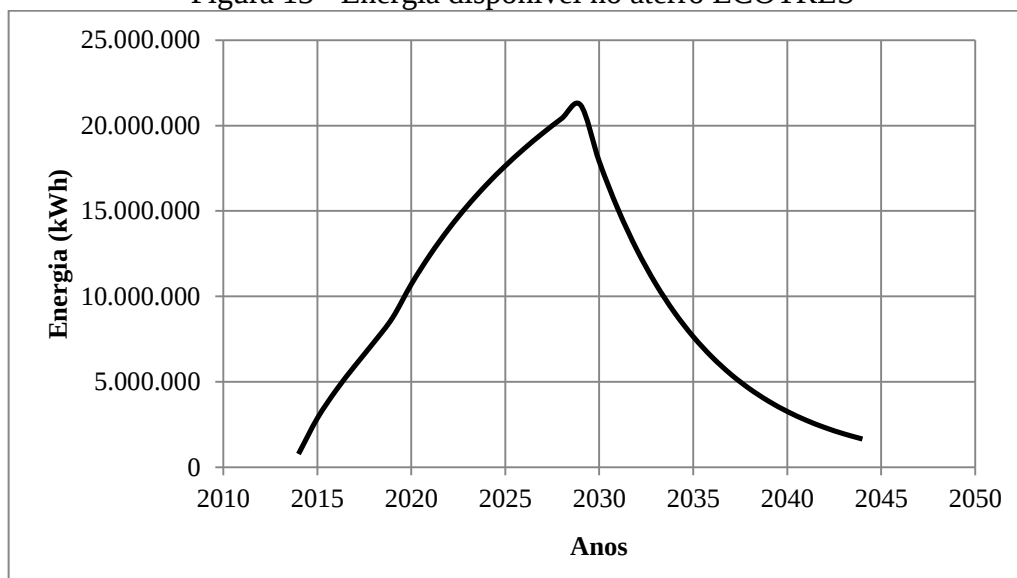
Em seguida, a energia disponível foi calculada a partir da Equação 18, utilizando os dados obtidos para as potências a cada ano e considerando que a operação dar-se-á 24 horas por dia durante 365 dias. A Tabela 16, a seguir, e a Figura 13 apresentam os valores obtidos para a energia disponível no aterro sanitário.

Tabela 16 - Energia disponível no aterro ECOTRES

Ano	Energia disponível (kWh)	Ano	Energia disponível (kWh)
2014	779.925,69	2030	17.893.418,74
2015	2.862.170,22	2031	15.096.053,02
2016	4.509.152,27	2032	12.736.001,64
2017	5.939.516,79	2033	10.744.918,20
2018	7.298.970,09	2034	9.065.106,44
2019	8.743.306,78	2035	7.647.908,00
2020	10.709.523,66	2036	6.452.285,75
2021	12.436.503,72	2037	5.443.553,52
2022	13.962.988,00	2038	4.592.545,62
2023	15.321.390,94	2039	3.874.566,49
2024	16.538.997,38	2040	3.268.828,84
2025	17.638.963,99	2041	2.757.794,19
2026	18.640.734,56	2042	2.326.659,84
2027	19.560.772,80	2043	1.962.919,25
2028	20.413.002,05	2044	1.656.044,42
2029	21.209.147,18		

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 13 - Energia disponível no aterro ECOTRES



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Observa-se que, tanto a potência, quanto a energia disponíveis aumentaram ao longo dos anos de operação do aterro, atingindo valores máximos de 2.421,14 kW e 21.209.147,18 kWh, respectivamente, no mesmo ano em que ocorre o pico de geração de biogás. A potência e energia médias encontradas, de acordo com a estimativa, foram iguais a 1.112,40 kW e 9.744.634,52 kWh, respectivamente.

Considerando que toda a potência produzida anualmente no aterro seja aproveitada para gerar energia elétrica e sabendo-se que o consumo médio por residência no Brasil é de aproximadamente 123,6 kWh mês⁻¹ (EPE, 2018a), pode-se dizer que a energia gerada pelo aterro do consórcio ECOTRES, no ano de maior pico, seria capaz de abastecer aproximadamente 14.300 residências.

Realizando-se outra análise neste sentido, considerando a média anual de energia gerada segundo a estimativa realizada, igual a 9.744.634,52 kWh, seria possível atender ao consumo de energia de 6.570 residências. Considerando o número médio de pessoas por residência no Brasil igual a quatro pessoas (IBGE, 2010), toda a energia produzida no aterro sanitário ECOTRES, seria capaz de atender a uma população de 26.280 pessoas, população maior do que as populações de 10 municípios integrantes do consórcio. Com isso, percebe-se o potencial existente no local para a geração de energia elétrica por meio do metano produzido a partir dos resíduos sólidos depositados no aterro sanitário.

No aterro sanitário de Conselheiro Lafaiete ainda não existia um projeto instalado de aproveitamento de biogás até a data de finalização deste estudo, portanto, o aproveitamento energético poderá ser estimado para ocorrer apenas a partir do ano de 2020.

Como foi observado na Tabela 15 e na Figura 12, a potência produzida sofre uma variação ao longo dos anos no aterro sanitário, porém nem toda a potência produzida será aproveitada, pois deve ser realizado um investimento inicial em que a usina de geração de energia é dimensionada para uma vazão constante de biogás (ou com uma faixa de variação conhecida). Então, torna-se necessário escolher uma potência para a implantação da usina, assim como o número de grupos geradores. A escolha da potência a ser instalada, que gere um benefício máximo, ainda não é muito abordada na literatura atual quando trata-se de aproveitamento energético de biogás e, na maioria dos casos, é feita de maneira arbitrária, sem uma metodologia definida (SANTOS, 2015).

No presente trabalho, foi proposta a utilização de um único grupo gerador com potência fixa de 1.200 kW, capaz de operar durante 14 anos, atendendo a demanda de potência já no ano de 2020 até 2033. Como exposto anteriormente, o período mínimo recomendado para aproveitamento de biogás compreende um projeto com 10 anos de operação e, portanto, o período proposto de 14 anos para o consórcio ECOTRES atende essa especificação. Além disso, a escolha da potência proposta pode ser justificada por ser próxima a potência média obtida pela curva apresentada na Figura 12, igual a 1.112,40 kW, e pela existência de grupos moto-geradores no mercado movidos a biogás com potência compatível a essa geração³. A aquisição de um novo grupo gerador para os anos posteriores a 2033, para que atendessem a potência do período, não foi levada em consideração, pois, em consonância com o que é descrito por ABRELPE (2013), como a vazão de metano tende a diminuir após o ano de 2029, e, conseqüentemente, apresenta um potencial decrescente de aproveitamento do biogás gerado, adquirir um novo grupo gerador elevaria muito os custos para um aproveitamento que estaria decaindo e deixando de ser lucrativo.

O aproveitamento do biogás gerado utilizando a potência de 1,2 MW para o período de 2020 a 2033 compreende 66% do total produzido de metano. A energia equivalente a essa potência, calculada por meio da Equação 18, é igual a 10.512 MWh por ano de projeto e a vazão correspondente, calculada a partir da Equação 17, é igual a 368,45 m³ h⁻¹.

5.4 Viabilidade econômica do projeto

Para a análise da viabilidade econômica do projeto, foi necessário realizar o fluxo de caixa do mesmo, composto pelos custos de investimento, operação e manutenção e pelas

³ Modelo “CG170-12” da Caterpillar – CAT (CAT, 2019) e Modelo “Vita” da Dreyer & Bosse Kraftwerke GmbH (DB, 2014) são exemplos de modelos que atendem a essa potência.

receitas com a venda da energia elétrica. Foram considerados os custos de investimento com o sistema de coleta, sistema de tratamento e purificação, compressão, queima do biogás e geração de eletricidade, sendo necessário conhecer o número de drenos e o comprimento da tubulação de coleta.

Aplicando as equações 19 e 20, considerando o raio de abrangência do dreno igual a 25 metros (CETESB, 2006), obtêm-se:

$$A_D = \pi 25^2$$

$$A_D = 1.963,495 \text{ m}^2$$

Desta forma, o aterro sanitário conta com o seguinte número de drenos:

$$N_D = \frac{148.000}{1.963,495}$$

$$N_D = 75,4 \text{ drenos}$$

Adotou-se, portanto, o número de drenos igual a 76.

Foi utilizada a Equação 21 para o cálculo do comprimento da tubulação, adotando-se uma distância entre os drenos igual a 50 metros (CETESB, 2006), desta forma a tubulação de coleta de transporte de biogás apresentou o seguinte comprimento:

$$T_D = (76 - 1) \cdot 50$$

$$T_D = 3.750 \text{ m}$$

Utilizando-se os valores calculados acima, sabendo-se que a vazão consumida pelo motor de 1.200 kW é igual a $368,45 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, que será necessário um queimador (*flare* enclausurado)⁴, e adotando os valores de custo propostos pela CETESB (2006), obteve-se os seguintes valores para os componentes do sistema de dimensionamento do aproveitamento de biogás, dispostos na Tabela 17.

⁴ Existem queimadores no mercado, em unidade única, capazes de atender a vazão de projeto, como os da marca BTS Termodinâmica de Sistemas Ltda., aplicáveis para vazões de até $12000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (BTS, 2019), e por isso a adoção de apenas um queimador.

Tabela 17 - Custo dos principais componentes do sistema de dimensionamento de aproveitamento de biogás em aterro sanitário

Sistema de Coleta			
Componente	Quantidade	Custo*	Total
Drenos	76 unidades	R\$ 2.199,04/unidade	R\$ 167.127,04
Tubulação	3750 m	R\$ 549,76/m	R\$ 2.044.557,44
Sistema de Tratamento e Purificação			
Componente	Quantidade	Custo	Total
H ₂ O filtro coalescente	45.186,3 10 ³ m ³	R\$ 0,02/m ³	R\$ 903.725,92
H ₂ S/Siloxina	45.186,3 10 ³ m ³	R\$ 0,02/m ³	R\$ 903.725,92
CO ₂	45.186,3 10 ³ m ³	R\$ 0,02/m ³	R\$ 903.725,92
Compressão			
Componente	Quantidade	Custo	Total
Compressão baixa	368,45 m ³ h ⁻¹	R\$ 1.092,35/m ³ /h	R\$ 402.472,69
Queimador			
Componente	Quantidade	Custo	Total
Flare	1 unidade	R\$ 436.941,26/unidade	R\$ 436.941,26
Geração de eletricidade			
Componente	Quantidade	Custo	Total
Grupo moto-gerador	1200 kW	R\$ 2.184,71/kW	R\$ 2.621.652,00
Total Geral			R\$ 8.383.928,18

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

*Os valores foram corrigidos por meio da calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2019a), de 06/2016 (CETESB) para 09/2019.

O custo de investimento do projeto apresentou um valor final igual a R\$ 8.383.928,18. Os valores referentes aos custos de operação e manutenção de cada um dos sistemas foram adotados de acordo com o que é proposto por ICLEI (2009), que utiliza o valor de 3% e 2% do valor total do investimento para despesas com a manutenção dos poços e despesas com a manutenção do *flare* e sistema de extração, respectivamente. Além disso, foi adotado um valor de 5% do investimento inicial para despesas com manutenção do motor gerador de eletricidade (SANTOS, 2015). Logo, os custos com operação e manutenção, considerados fixos para todos os anos, foram de R\$ 838.392,82. Não foram contabilizados custos com salário de operadores, gerenciamento e administração.

As receitas contabilizadas com a venda do biogás, para o valor calculado de 10.512 MWh por ano, considerando a tarifa de venda da energia igual a R\$ 187,9/MWh, valor este obtido no leilão de energia A-6 da Agência Nacional de Energia Elétrica para novos empreendimentos de fonte de energia térmica a biomassa (ANEEL, 2019b), apresentaram valor anual igual a R\$ 1.975.204,80, valor este que foi considerado fixo para todos os anos de projeto. É importante ressaltar que a tarifa com a venda da energia elétrica foi considerada constante para todos os anos de projeto, porém a mesma varia de acordo com os leilões

realizados, sendo, neste trabalho, considerado o valor do leilão mais recente desenvolvido pela ANEEL no ano de 2019.

Para realizar a análise de investimentos do projeto a TIR (Taxa Interna de Retorno) foi comparada a taxa Selic (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia), que é o custo de oportunidade mais conservador na economia brasileira, definida pelo Banco do Brasil, representando a taxa de juros do retorno esperado de um fundo de investimento de baixo risco no Brasil e, de acordo com ABRELPE (2013), é aplicável para investimentos em aproveitamento energético de biogás.

O valor da taxa Selic mais recente, referente a novembro de 2019, é igual a 5% a.a. (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2019b). Essa taxa foi utilizada, também, para o cálculo do valor presente do fluxo de caixa, para a obtenção do *payback* descontado e para aplicação da equação 22, que se refere ao VPL. Para fins de cálculo do presente estudo, a taxa Selic foi considerada fixa, porém a mesma apresenta frequente variação e esta oscilação pode influenciar diretamente na viabilidade econômica do projeto, uma vez que valores muito altos para esta taxa podem inviabilizar projetos de investimento.

O fluxo de caixa foi calculado, para os 14 anos de projeto, considerando as receitas subtraídas dos custos, acima relacionados, como é demonstrado pela Tabela 18 a seguir.

Tabela 18 - Fluxo de Caixa do projeto

Ano	Custos	Receita	Fluxo de Caixa
2019	R\$ 8.383.928,18		-R\$ 8.383.928,18
2020	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2021	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2022	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2023	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2024	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2025	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2026	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2027	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2028	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2029	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2030	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2031	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2032	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98
2033	R\$ 838.392,82	R\$ 1.975.204,80	R\$ 1.136.811,98

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

O valor do VPL obtido, a partir da aplicação da equação 22, foi igual a R\$ 2.868.965,45, portanto, como $VPL > 0$, deve-se aceitar o projeto, ou seja, é viável investir no mesmo.

Em seguida, foi calculada a TIR, igualando o Valor Presente Líquido (VPL) a zero, Equação 23, como é descrito a seguir.

$$\frac{-R\$ 8.383.928,18}{(1+TIR)^0} + \frac{R\$ 1.136.811,98}{(1+TIR)^1} + \frac{R\$ 1.136.811,98}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{R\$ 1.136.811,98}{(1+TIR)^{14}} = 0$$

A TIR apresentou valor igual a 10% a.a., portanto, considerando a Taxa Mínima de Atratividade igual à taxa Selic, 5% a.a., e aplicando a metodologia multi-índice, pode-se considerar o que investimento é viável, uma vez que a seguinte relação é verdadeira: $TIR > TMA$.

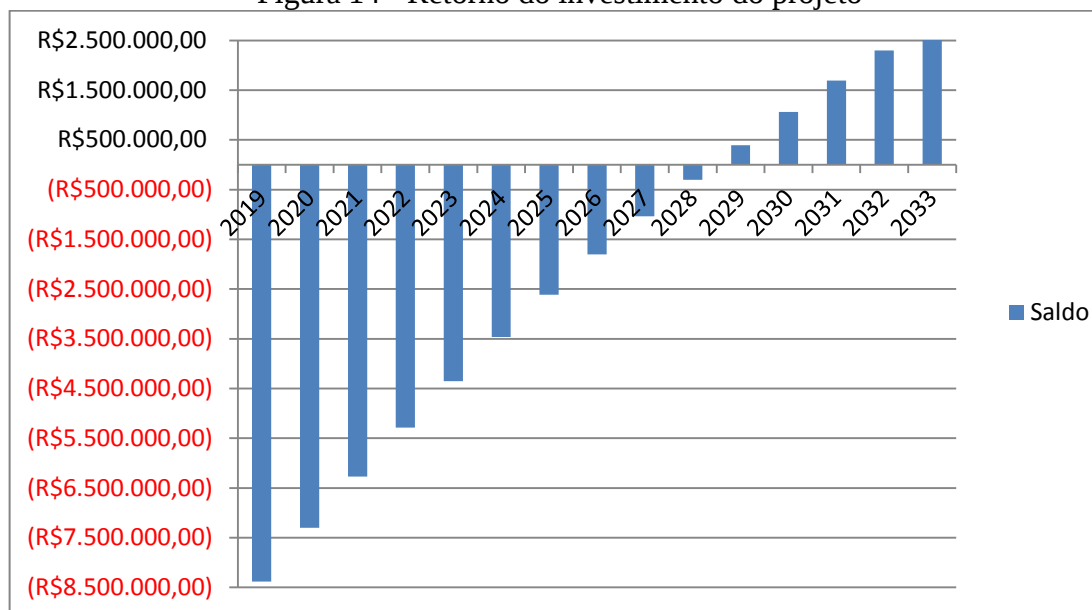
O *payback* descontado também foi calculado com o objetivo de se conhecer o tempo de retorno do investimento realizado. Para isso foi necessário calcular o fluxo de caixa descontado, trazendo-o para o valor presente, obtendo-se assim o saldo a cada ano até que o valor se torne positivo. O tempo necessário para que o investimento no projeto seja pago é igual a 10 anos, 5 meses e 7 dias, o que corresponde ao ano de 2029. A Tabela 19 e a Figura 14 a seguir mostram o ano em que o saldo torna-se positivo.

Tabela 19 - Fluxo de caixa descontado e retorno do investimento do projeto

Ano	Fluxo de caixa (5% a.a.)	Saldo
2019	-R\$ 8.383.928,18	-R\$ 8.383.928,18
2020	R\$ 1.082.678,08	-R\$ 7.301.250,10
2021	R\$ 1.031.121,98	-R\$ 6.270.128,12
2022	R\$ 982.020,93	-R\$ 5.288.107,19
2023	R\$ 935.258,03	-R\$ 4.352.849,15
2024	R\$ 890.721,93	-R\$ 3.462.127,22
2025	R\$ 848.306,60	-R\$ 2.613.820,62
2026	R\$ 807.911,05	-R\$ 1.805.909,56
2027	R\$ 769.439,10	-R\$ 1.036.470,47
2028	R\$ 732.799,14	-R\$ 303.671,33
2029	R\$ 697.903,94	R\$ 394.232,62
2030	R\$ 664.670,42	R\$ 1.058.903,04
2031	R\$ 633.019,45	R\$ 1.691.922,49
2032	R\$ 602.875,67	R\$ 2.294.798,15
2033	R\$ 574.167,30	R\$ 2.868.965,45

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 14 - Retorno do investimento do projeto



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Ressalta-se que diversos autores contabilizam os créditos de carbono em suas receitas nos estudos de viabilidade econômica, como ICLEI (2009), que estudou separadamente a viabilidade de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica com a venda de créditos de carbono e sem a venda dos mesmos e concluiu que somente com a venda da energia elétrica o projeto não seria viável, com período de retorno do investimento muito maior do que quando comparado ao que considera a venda dos créditos de carbono. Assim como em estudo realizado por Leme et al. (2011), em que os resultados econômicos considerando um mercado para a venda de créditos de carbono foram muito mais favoráveis, com um aumento significativo da TIR e alcance de um VPL positivo em caso de juros altos. Os mesmos autores atribuem os melhores resultados para os cenários de venda de crédito de carbono aos baixos custos de implantação de um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) quando comparado às receitas obtidas pelo mesmo, uma vez que nos projetos de aproveitamento de biogás para produção de energia elétrica todas as estruturas para queima do metano já estarão instaladas no aterro sanitário, porém, a existência e continuidade dos projetos de créditos de carbono no futuro é incerto e ainda discutido, por isso é importante que sejam avaliados cenários que não levem esse mercado em consideração (LEME et al., 2011).

No presente trabalho, realizado no aterro do consórcio ECOTRES, o mercado de crédito de carbono não foi considerado, uma vez que não era o objetivo central da pesquisa, mas considera-se avaliar esta possibilidade em estudos futuros.

Além disso, é importante enfatizar que foi realizada uma análise simplificada dos custos de investimento, operação e manutenção, considerando apenas os componentes principais do sistema de aproveitamento energético de biogás para fins de produção de energia elétrica. Em estudos mais aprofundados, deve-se levar em consideração outros fatores como os citados por USEPA (2008), que incluem no investimento inicial os custos com engenharia, jurídicos, comerciais, contábeis e outros serviços profissionais, transporte e entrega dos equipamentos e interconexão com a rede elétrica; e custos anuais, que incluem, além dos contabilizados neste estudo, trabalho operacional e segurança, gerenciamento e administração, seguros, licenças, taxas e serviços profissionais, por exemplo. Sugere-se que em estudos futuros sejam analisados todos esses e demais fatores que gerem custos e receitas ao projeto.

Portanto, para os fins propostos para o presente estudo, considerando os custos e receitas avaliados e relacionados para a implantação do projeto no aterro sanitário do consórcio ECOTRES, o retorno econômico será positivo e sugere-se, então, que seja adotado o aproveitamento energético no local. Contudo, ressalta-se que estudos mais aprofundados e detalhados, no que diz respeito aos custos e receitas do projeto, devem ser elaborados a fim de estabelecer se tais valores adicionais inviabilizariam a ocorrência do projeto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos atenderam a todos os objetivos propostos no trabalho, com a obtenção da estimativa de geração de metano presente no biogás do aterro sanitário, as respectivas potências e energias disponíveis e a comprovação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do mesmo para o caso estudado em Conselheiro Lafaiete, MG, que diz respeito ao consórcio ECOTRES.

A formação de consórcios entre pequenos municípios é fundamental para viabilizar, tanto uma disposição final adequada dos resíduos sólidos, quanto para possibilitar a implantação de sistemas de aproveitamento energético, tendo em vista que o aumento da população é diretamente proporcional ao aumento da produção de resíduos sólidos e, consequentemente, eleva-se a produção de metano no aterro sanitário, vide curvas e tabelas apresentadas no presente trabalho, que comprovam a relação de proporcionalidade entre essas variáveis.

Os resíduos sólidos depositados a cada ano no aterro, segundo projeção realizada, foram capazes de gerar um aproveitamento de biogás suficiente para a geração de energia elétrica, em que no ano de maior pico de produção de metano, pode colaborar com o consumo de aproximadamente 14300 residências.

O projeto de aproveitamento de biogás, com duração de 14 anos e potência disponível igual a 1.200 kW/ano, mostrou-se viável mesmo que apenas 66% da potência total disponível no período tenha sido utilizada, com uma TIR igual a 10% a.a. e *payback* igual a 10 anos, 5 meses e 6 dias.

Destaca-se a importância do aproveitamento de biogás em aterros sanitários, como uma alternativa ambientalmente adequada, que concilia tanto a destinação final prevista pela legislação brasileira para os resíduos sólidos, quanto o aproveitamento do gás gerado pela massa de resíduos para geração de uma fonte de energia limpa, trazendo a possibilidade de diversificar a matriz energética brasileira e evitar a emissão de gases agravadores do efeito estufa.

Estudos como este, que avaliem economicamente a implantação de projetos de aproveitamento energético do biogás em aterros brasileiros, são fundamentais para fornecer material técnico que sirva como incentivo à adoção dessa tecnologia, principalmente de pequenos municípios, como é o caso do ECOTRES, e devem ser incentivados, promovendo a ampliação da utilização desse potencial existente no Brasil, mas pouco explorado.

7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que, para próximos trabalhos, considere-se a comercialização de créditos de carbono nas receitas do projeto, uma vez que autores que o consideraram encontraram resultados positivos para viabilidade econômica. É importante ressaltar que é necessário avaliar as incertezas de continuidade desse mercado.

Além disso, para obtenção de resultados mais próximos da realidade, a realização de medições *in situ* é recomendada, sempre que possível.

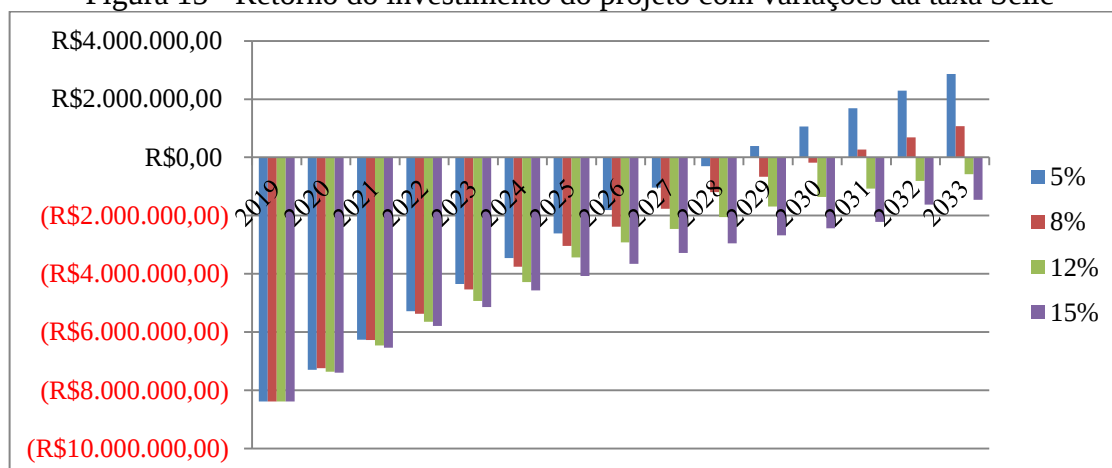
Avaliar outras combinações de potência e grupos geradores que maximizem o aproveitamento de biogás, determinando uma potência ótima que gere maior benefício líquido para o projeto, também torna-se importante, pois estudos nessa área, apesar de existentes, são escassos.

Estudos mais aprofundados e detalhados de viabilidade econômica, que englobem todos os custos e receitas envolvidos no projeto, devem ser realizados, a fim de se comprovar que o mesmo trará retorno positivo.

Deve-se considerar, também, a variação nos valores dos leilões de energia elétrica, uma vez que no, presente estudo, foram considerados fixos, porém sofrem variações a cada leilão realizado.

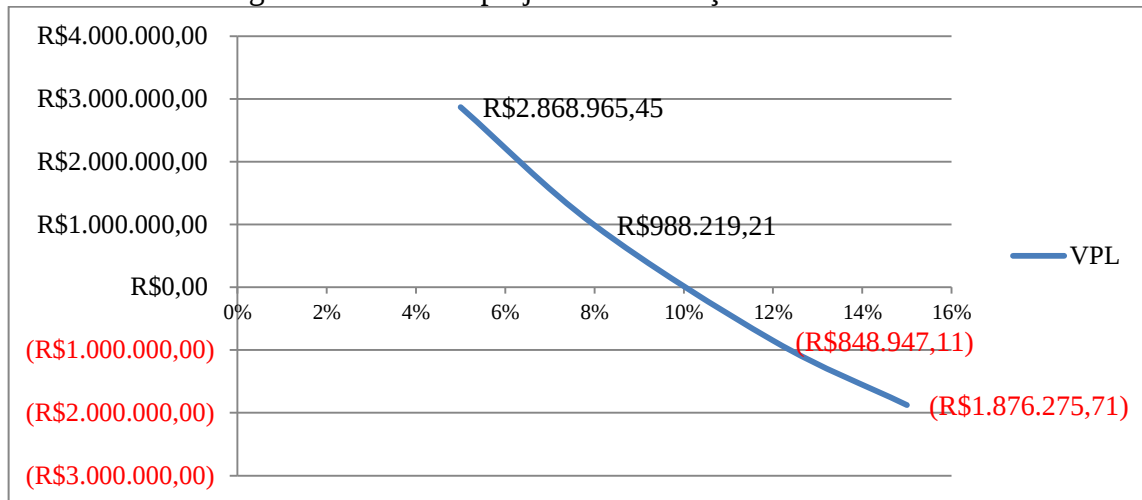
Por fim, é importante considerar as variações constantes na taxa Selic, pois o valor da mesma tem influência direta na viabilidade econômica do projeto. Realizando uma breve análise para os valores de 5% a.a., 8% a.a., 12% a.a. e 15% a.a., é possível perceber que as oscilações nessa taxa conferem alterações nos valores do VPL e do *payback* descontado do projeto, como é demonstrado nas Figuras 15 e 16 a seguir.

Figura 15 - Retorno do investimento do projeto com variações da taxa Selic



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 16 - VPL do projeto com variações da taxa Selic



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Com o aumento da taxa Selic, os valores do VPL diminuem, podendo tornar-se negativos, e ocorre um aumento no tempo de retorno do investimento do projeto, podendo, em alguns casos, não apresentar retorno dentro do período estipulado para o projeto, tornando-o inviável economicamente. Por esse motivo, torna-se importante que, em trabalhos futuros, considere-se essa variação ao longo dos anos de projeto, a fim de verificar se o mesmo permanecerá com viabilidade econômica positiva.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. 2019a. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em:

<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>.

Acesso em: 05 abr. 2019.

_____. **Resultados de leilões**. 2019b. Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/pt/resultados-de-leiloes>. Acesso em: 25 out. 2019.

ALBUQUERQUE, J. B. T. de. **Resíduos sólidos**. Leme: Independente, 2011. 793 p.

AMAYA, O. M.; BARRAGÁN, M. T .C.; TAPIA, F. J. A. Chapter 18-Microbial Biomass in Batch and Continuous System. **Biomass Now: Sustainable Growth and Use**, 2013.

ARCADIS, T. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. São Paulo: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2010. 56 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. São Paulo: ABRELPE, 2013, 172 p

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. São Paulo: ABRELPE, 2017. 74 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Projeto de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – **NBR 8419**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **Resíduos sólidos - NBR 10004**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

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

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do cidadão**, 2019a. Disponível em:

<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>. Acesso em: 10 out. 2019.

_____. **Taxa Selic**, 2019b. Disponível em:

<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em: 8 nov. 2019.

BARRAK, E. Análise do potencial teórico da geração de energia a partir do biogás no aterro sanitário de Varginha/MG. **Natural Resources**, [s.i], v.7, n.1, p.61-72, 2017.

BARROS, R.M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2012. 374p.

BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, T. R. da. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, [s.i], v. 65, p. 150-164, feb. 2014

BIANEK, J.; SCHIRMER, W. N.; CABRAL, A. R.; MAYER, C. L. D.; EURICH, P. H. M.; MARTINS, E. H. Comparação entre metodologias USEPA e IPCC para estimativa teórica de produção de biogás em aterro municipal. **Biofix Scientific Journal**, [s.i], v. 3, n. 1, p.34-40, 2018.

BINGEMER, H. G.; CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. **Journal of geophysical research**, Washington: v. 92, p.2181-2187, feb. 1987. Disponível: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JD092iD02p02181>. Acesso em: 15 abr. 2019.

BRASIL. 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 União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.mncr.org.br/box_2/instrumentos-juridicos/leis-e-decretos-federais/Lei%20%2012.305-2010%20Politica%20de%20Residuos%20Solidos.pdf/view. Acesso em: 25 mar. 2019.

_____. Ministério das Cidades - MCIDADES . Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos**. 2017. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2017>. Acesso em: 10 out.2019.

_____. Ministério de Minas e Energia - MME. **Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética**. Brasília: MME : EPE, 2007. 372 p.

_____. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário**. 2019. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>. Acesso em: 05 abr. 2019.

_____. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MMA, 2012.

BRAUN, R. J.; TRENDEWICZ, A. A. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities. **Journal of Power Sources**, [s.i], v. 233, p. 380–393, jul. 2013.

BTS. Termodinâmica de Sistemas Ltda. **Tochas de chama enclausurada para queima de biogás proveniente de aterros sanitários (Enclosed Landfill Flares)**. 2019. Disponível em: http://www.bts.ind.br/equip_flarestochas_enc.htm. Acesso em: 01 nov. 2019.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de Investimentos**. São Paulo: Atlas, 1994.

CAT. **Grupos geradores a gás - CG170-12**. 2019. Disponível em: https://www.cat.com/pt_BR/products/new/power-systems/electric-power/gas-generator-sets/18487630.html. Acesso em: 01 nov. 2019.

CHEN, C. H.; HSIAO, J.; LEE, C.; YANG, C. Numerical analyses and experiment investigations of an annular micro gas turbine power system using fuels with low heating values. **Science in China, Series E: Technological Sciences**, [s.i], v. 52, n. 12, p. 3565–3579, dec. 2009.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. 2. ed. ver. e ampl. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, v. 5, 2007. 377 p.

CHICONE NETO, F.; ANDRADE, G. G. de; PIRES, L. S. de O.; KILLER, M. E.; FORMIGA, V. S. Geração de Energia Através de Biogás para o Consórcio Ecotres. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [s.i], v. 5, n. 3, p.374-391, jan. 2016.

CLIMATEMPO. **Climatologia, Conselheiro Lafaiete – MG**. 2019. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/129/conselheiolafaiete-mg>. Acesso em: 22 out. 2019.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Biogás, geração e uso energético** – aterros, versão 1.0/CETESB, Secretaria de Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia. São Paulo: SMA : CETESB : MCT. CD-ROM. Manual, vol. 1-2, programas executáveis e código-fonte. 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo – SMA. **Relatório técnico n.º 2 do convênio SMA/MCT n.º 01.0052.00/2001**: aterros. São Paulo, 2003. 349 p.

CONSÓRCIO PÚBLICO INTERMUNICIPAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS – ECOTRES. **Especificações**. 2019. Disponível em: http://www.ecotres.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=203&Itemid=576. Acesso em: 11 set. 2019.

COSTA, B. S.; RIBEIRO, J. C. J. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**: direitos e deveres. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2013. 253p.

COSTA, T. G. A.; IWATA, B. de F.; CASTRO, C. P. de; CLEMENTINO, G. E. dos S.; COELHO, J. V.; CUNHA, L. M.. Impactos ambientais de lixão a céu aberto no Município de Cristalândia, Estado do Piauí, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [s.i], v. 3, n. 4, p.79-86, jun. 2016.

COSTA, T. S. **Estimativa de geração de biogás no aterro sanitário da bacia leiteira do estado de Alagoas**. 2016. 46 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia da Biomassa, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2016.

DREYER & BOSSE KRAFTWERKE GMBH: Dreyer & Bosse - DB. **Strom und Wärme mit Gewinn biogene Gase**. Gorleben. 2014. Disponível em: http://www.dreyer-bosse.de/fileadmin/inhalte/Download-Dateien/imagebiogas2014_kl_es_31.3.2014.pdf. Acesso em: 01 nov. 2019.

DURÃO, J. V. **Transição para o uso do biogás no brasil:** análise baseada na perspectiva multinível. 2017. 327 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica:** ano base 2017. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro: EPE, 2018a.

_____. **Balanco Energético Nacional 2018:** ano base 2017/ Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro: EPE, 2018b.

_____. **Nota técnica DEA 019/2018:** estudo sobre a economicidade do aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos em aterro para produção de biometano. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro: EPE, 2018c.

ENGEBIO ENGENHARIA S/S LTDA. **Análise da pré-viabilidade técnica, econômica e ambiental do aproveitamento energético de biogás do aterro sanitário de Contagem:** estudo de caso. Porto Alegre: ENGBIO, 2009.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP.** 2003. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ESCOSTEGUY, P. A. V. **Gerenciamento de resíduos sólidos e seus impactos ambientais:** uma visão do contexto atual. Passo Fundo, s.e.,s.d.

FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto:** estudo de caso. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental.** 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009

FIGUEIREDO, N. J. V. de. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica** - Estudo de caso. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FREITAS, C. O. de; MAKIYA, I. K. Potencial energético a partir do biogás proveniente de aterros sanitários do Estado de São Paulo. In: XXXII encontro nacional de engenharia de produção. Desenvolvimento Sustentável e Responsabilidade Social: as contribuições da engenharia de produção. **Anais...** Bento Gonçalves-RS, 2012.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. **Orientações técnicas para atendimento à deliberação Normativa 118/2008 do Conselho Estadual de Política Ambiental.** Fundação Estadual do Meio Ambiente. 3. ed. Belo Horizonte: FEAM, 2008.

_____. **Reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos.** Fundação Estadual do Meio Ambiente; Fundação Israel Pinheiro. Belo Horizonte: FEAM, 2010.

GITMAN, L. J. **Princípios da administração financeira.** 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 801p.

GODECKE, M. V.; NAIME, R. H.; FIGUEIREDO, J. A. S. O consumismo e a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s.i], v. 8, n. 8, p.1700-1712, set./dez. 2012.

GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE - ICLEI. **Manual do Aproveitamento do Biogás:** Volume um, Aterros Sanitários. Secretariado para a América Latina e Caribe, Escritório de Projetos no Brasil: São Paulo, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico:** Tabela 200 – população residente, por sexo, situação e grupos de idade – amostra – características gerais da população. 2000 e 2010. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/200>. Acesso em: 2 out. 2019.

_____. **Censo Demográfico:** Tabela 3451 - média de moradores em domicílios particulares permanentes (pessoas). 2010. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3451>. Acesso em: 14 dez. 2019.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S.; Buendia L.; Miwa K.; Ngara T.; Tanabe K. (eds). Volume 5 – Waste. Chapter 2: Waste Generation, Composition, and Management Data and Volume 3: Solid Waste Disposal. Japan: IGES, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol5.html>. Acesso em 20 mai. 2019.

_____. **Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Disponível em: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf. Acesso em: 4 jun. 2019.

_____. **Revised 1996 IPCC Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories.** Volume 6 – Waste. Chapter 3: Reference Manual. United Kingdom: IPCC, 1996. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>. Acesso em: 2 mai. 2019.

JOHANNESSEN, L. M. **Guidance Note On Recuperation Of Landfill Gas From Municipal Solid Waste Landfills.** Washington, D.C: The World Bank. 1999.

LANDIM, A. L. P. F.; AZEVEDO, L. P. de. O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o útil ao sustentável. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro: n. 27, p. 59-100, mar. 2008.

LEME, M. M. V.; VENTURINI, O. J. ; LOPES, B. M.; LORA, E. E. S.; SILVA, C. H. ; ROCHA, M. H. Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos no Brasil: uma abordagem econômica e ambiental. In: IV Congresso de Inovação Tecnológica (CITENEL) da ANEEL. **Anais...** 2011.

LIMA, A. de; BORBA, E. O. R.; OLIVEIRA, I. C. B.; GONZAGA, N. V. M.; MARTINS, P. F.; SANTOS, R. M.; CAMPOS, F. Análise da recuperação energética do biogás de aterros sanitários. **Interfacehs – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, São Paulo: v. 12, n. 1, p.68-81, jul. 2017.

MADSEN, M.; HOLM-NIELSEN, J. B.; ESBENSEN, K. H. Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.i], v. 15, n. 6, p. 3141–3155, aug. 2011.

MINAS GERAIS. Superintendência Regional de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável SUPRAM - CM. **Parecer Único SUPRAM-CM nº 201/2011**. Processo nº 00127/2005/002/2010. SUPRAM - CM. Belo Horizonte: SPRAM, 2011. 32 p.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM nº 52, de 14 de dezembro de 2001. Convoca os municípios para o licenciamento ambiental de sistema adequado de disposição final de lixo e dá outras providências. **Minas Gerais: Diário do Executivo**, Belo Horizonte, 15 de dez. de 2001. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5479>. Acesso em: 06 out. 2019.

MONTEIRO, J. H. P.; FIGUEIREDO, C.E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F. de; BRITO, J. C. X. de; ALMEIDA, T. P. F. de; MANSUR, G. L. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MOTTA, R. R.; CALÔBA, G. M. **Análise de investimentos**: tomada de decisão em projetos industriais. São Paulo: Atlas, 2002. 392 p.

NECKER, H. S; ROSA, A. L. D. da. Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná - RO. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s.i], v. 17, n. 17, p.3416-3424, dez. 2013.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário**: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. 562 p.

OLIVEIRA, K. T. L. L.; GOMES, R. A. Contribuições da Recuperação do Biogás de Aterro Sanitário: uma análise para Goiânia. **Boletim Trimestral Conjuntura Econômica Goiânia**, 2008.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Aproveitamento do Biogás Proveniente de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás. In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais – INDUSCON. **Anais...** Poços de Caldas, 2008.

PECORA, V.; GONZÁLEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: Estudo de caso em São Paulo. In: IV Congresso Internacional de Bioenergia. **Anais...** Curitiba, 2009.

PEREIRA, M. W.; CASTILHOS JUNIOR, A. B. de. Simulação da geração de biogás: estudo de caso aterro de Brusque/ SC. **Revista Rede**, [s.i], v. 12, n. 3, p.30-42, 2018.

QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants: planning, design and operation**. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1985.

SAMANEZ, C. P. **Matemática Financeira: Aplicações à Análise de Investimentos**. 3. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 380 p.

SANTOS, I. F. S. 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. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Resíduos sólidos**. Col. Cadernos de Educação Ambiental. 2. ed. v. 6. São Paulo, 2014. 164 p.

SCHARFF, H. & JACOBS, J. Applying guidance for methane emission estimation for landfills. **Waste Management**, v. 26, n. 4, p. 417-429.

TCHOBANOGLOUS, G., KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. 2. ed. USA: McGrawHill Handbooks, 2002, 834p.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. **A guide for methane mitigation projects – Gas to energy at landfills and open dumps**. Draft jan/96, USEPA - Office of air and radiation, editors: Mark Orlic and Tom Kerr, 1996, 67 p.

_____. **Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills: Background Information for Proposed Standards and Guidelines**. Emission Standards Division. 1991.

_____. Landfill Methane Outreach Program. **Landfill Biogas Recovery and Utilization at the Solid Waste Treatment Center BR-040 Belo Horizonte, Brazil: Final Assessment Report**. Methane to Markets Contract: EP-W-06-22 TO 008 and 021. 2008.

_____. **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) version 3.02 User's Guide**, EPA-600/R-05/47. United States: USEPA, 2005.

VAN ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro: Ibam, 2007. 44 p

VEIGA, A. P. B.; MERCEDES, S. S. Biometano de gás de aterros no brasil: potencial e perspectivas. In: 10º Congresso sobre geração distribuída e energia no meio rural. **Anais...** São Paulo: IEE - USP, 2015.

VIEIRA, G. E. G.; CAMPOS, C. E. A; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n. 26, p.193-204, jul./dez. 2015.

VILHENA, A. (Coord). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4. ed. São Paulo: CEMPRE, 2018.

VISAKHAMOORTHY, S.; TZANETAKIS, T.; HAGGITH, D.; SOBIESIAK, A.; WEN, J. Z. Numerical study of a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine fueled with biogas. **Applied Energy**, [s.l], v. 92, p. 437–446, abr. 2012.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

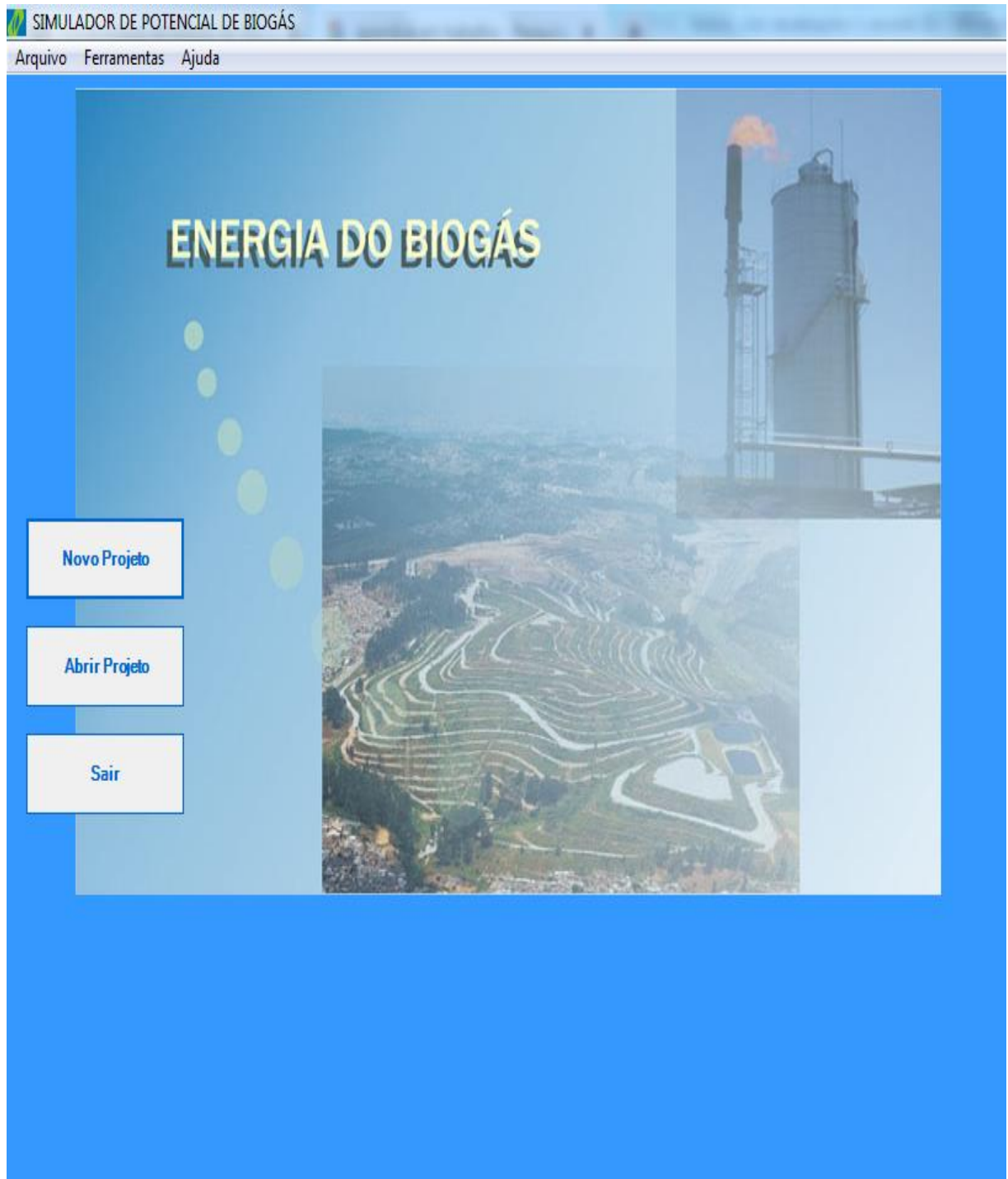
WORLD BANK. Energy Sector Management Assistance Programme. **Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean**. Canadá: Conestoga-Rovers & Associates, 2004.

APÊNDICE A – Projeção populacional para todos os municípios do consórcio ECOTRES

Ano	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Congonhas	54.236,20	55.014,00	55.791,80	56.569,60	57.347,40	58.125,20	58.903,00	59.680,80	60.458,60	61.236,40	62.014,20
Conselheiro Lafaiete	121.841,90	123.017,00	124.192,10	125.367,20	126.542,30	127.717,40	128.892,50	130.067,60	131.242,70	132.417,80	133.592,90
Ouro Branco	36.384,40	36.915,00	37.445,60	37.976,20	38.506,80	39.037,40	39.568,00	40.098,60	40.629,20	41.159,80	41.690,40
Itaverava	2.697,30	2.712,00	2.726,70	2.741,40	2.756,10	2.770,80	2.785,50	2.800,20	2.814,90	2.829,60	2.844,30
Ressaquinha	3.491,00	3.543,00	3.595,00	3.647,00	3.699,00	3.751,00	3.803,00	3.855,00	3.907,00	3.959,00	4.011,00
Alto Rio Doce	5.212,20	5.228,00	5.243,80	5.259,60	5.275,40	5.291,20	5.307,00	5.322,80	5.338,60	5.354,40	5.370,20
Barbacena	126.277,10	127.467,00	128.656,90	129.846,80	131.036,70	132.226,60	133.416,50	134.606,40	135.796,30	136.986,20	138.176,10
Senhora de Oliveira	3.736,60	3.790,00	3.843,40	3.896,80	3.950,20	4.003,60	4.057,00	4.110,40	4.163,80	4.217,20	4.270,60
Rio Espera	2.551,50	2.568,00	2.584,50	2.601,00	2.617,50	2.634,00	2.650,50	2.667,00	2.683,50	2.700,00	2.716,50
Rio Casca	11.205,30	11.191,00	11.176,70	11.162,40	11.148,10	11.133,80	11.119,50	11.105,20	11.090,90	11.076,60	11.062,30
Lamim	1.645,10	1.660,00	1.674,90	1.689,80	1.704,70	1.719,60	1.734,50	1.749,40	1.764,30	1.779,20	1.794,10
Jeceaba	3.129,30	3.145,00	3.160,70	3.176,40	3.192,10	3.207,80	3.223,50	3.239,20	3.254,90	3.270,60	3.286,30
Catas Altas	5.383,00	5.510,00	5.637,00	5.764,00	5.891,00	6.018,00	6.145,00	6.272,00	6.399,00	6.526,00	6.653,00
Carandaí	20.386,60	20.629,00	20.871,40	21.113,80	21.356,20	21.598,60	21.841,00	22.083,40	22.325,80	22.568,20	22.810,60
Total	398.178	402.389	406.601	410.812	415.024	419.235	423.447	427.658	431.870	436.081	440.293

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

**APÊNDICE B – Etapas para gerar a curva de biogás por meio da utilização do Software
Biogás, geração e uso energético – aterros**



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

**APÊNDICE B – Etapas para gerar a curva de biogás por meio da utilização do Software
Biogás, geração e uso energético – aterros**

Características do Aterro Sanitário -Cronologia do Aterro Sanitário

Cronologia do Aterro Sanitário

Ano de abertura do aterro: 2014

Ano de fechamento do aterro: 2029

Conhece o Histórico do Aterro ?

☒ Sim

☐ Não

Fluxo anual	
Ano	Fluxo (t/ano)
2014	20276
2015	57303
2016	54450
2017	55513
2018	59482
2019	67215
2020	86652
2021	88424
2022	90231
2023	92065
2024	93927
2025	95816
2026	97734
2027	99681
2028	101657
2029	103663

Conhece os fluxos anuais de resíduos

☒ Sim

☐ Não

Ano: 0

Fluxo de RSD (t/ano):

Adicionar

Excluir

Limpar a tabela

Ok

Cancelar

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

**APÊNDICE B – Etapas para gerar a curva de biogás por meio da utilização do Software
Biogás, geração e uso energético – aterros**

Dados para estimativa de geração de metano no aterro sanitário

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

Dados para geração de metano

Q = Vazão de metano (m³/ano)

☒ k = Constante de decaimento (1/ano)

☐ Lo = Potencial de geração de biogás (m³/kg)

☐ Rx = Fluxo de resíduo (t/ano)

x = Ano atual (ano)

T = ano de deposição do resíduo (ano)

Confirmação de dados

k (1/ano): 0,17

Lo (m³ CH4/kg): 0,09263

Fluxo médio de resíduo no período (t/ano): 79.006

Ok

Precipitação (k)

Seco Úmido



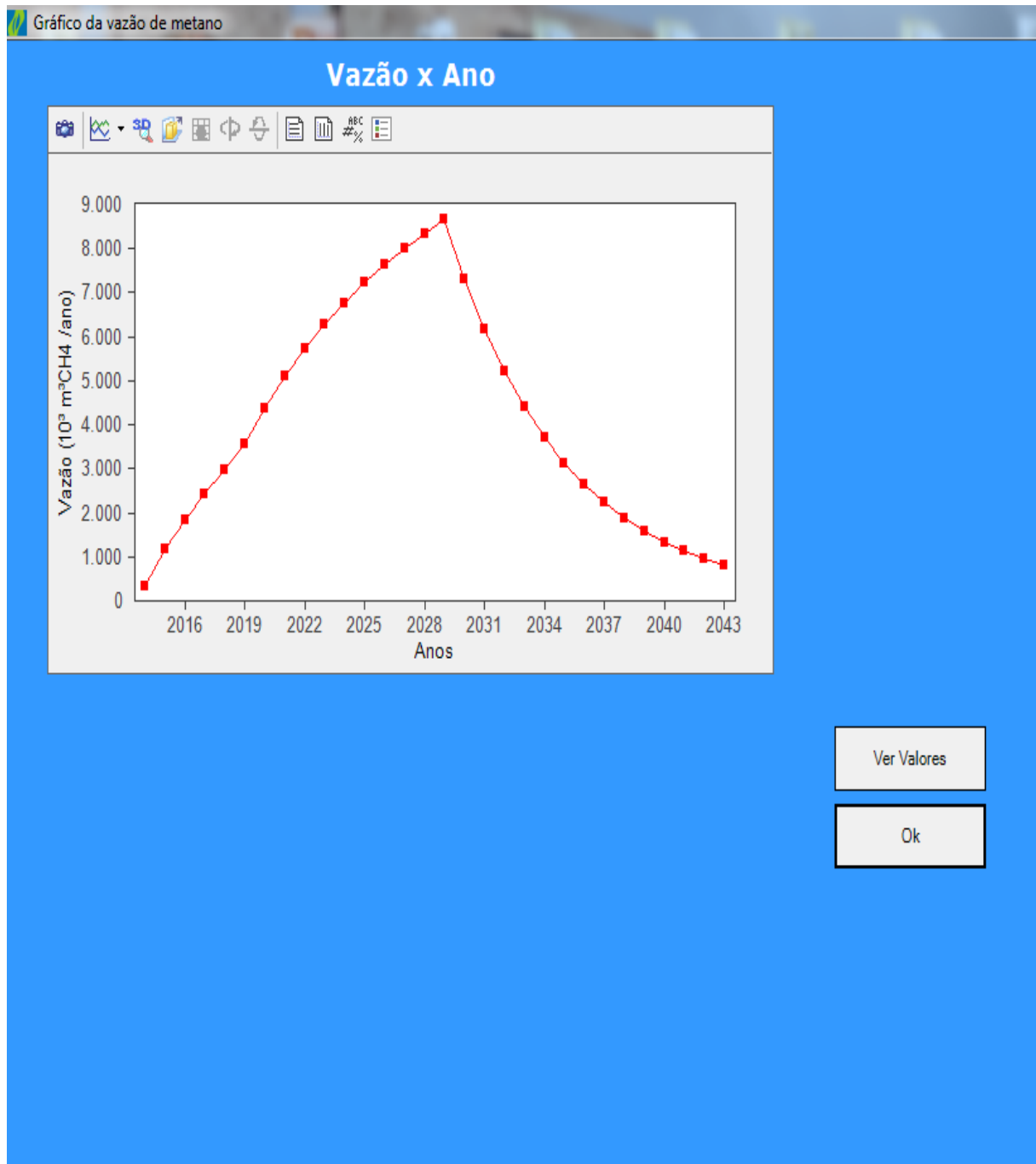
☐ Valor sugerido

k (1/ano) **Ok**

Voltar

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

APÊNDICE B – Etapas para gerar a curva de biogás por meio da utilização do Software
Biogás, geração e uso energético – aterros



Fonte: Elaborado pela autora (2019)