

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

**Andresa Aparecida Lemes Gomes**

**Estudo do Potencial Energético da Digestão Anaeróbia da  
Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos da  
Cidade de Extrema**

**Itajubá - MG**

**Julho de 2021**

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

**Andresa Aparecida Lemes Gomes**

**Estudo do Potencial Energético da Digestão Anaeróbia da  
Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos da  
Cidade de Extrema**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Ciências em Engenharia Elétrica**

**Área de Concentração:**

**Sistemas Elétricos de Potência**

**Orientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto**

**Coorientador: Prof.<sup>a</sup>. Dra. Regina Mambeli Barros**

**Itajubá - MG**

**Julho de 2021**

## DEDICATÓRIA

*Primeiramente agradeço aos Deus, por ter chegado até aqui.*

*Á meus pais Vilma e André, minha base, minha fonte de admiração e orgulho, minha irmã Vanessa, pelo carinho e cuidado, meus sogros, Cláudia e Edson, pelo acolhimento e paciência.*

*Ao meu companheiro de vida, Rubens, pelo incentivo, amor, carinho e apoio incondicional desde o início de nossa jornada.*

*Ao meu filho Bento, razão pela qual nunca deixarei de lutar, por você todos os passos.*

*A minha professora e amiga, Carol Luz, por todo aprendizado, por todo incentivo e pela grande amizade.*

*A esta Universidade e por todos os professores do mestrado em Engenharia Elétrica, em especial meu orientador Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto, pela confiança, oportunidade de aprendizado e por toda paciência*

*A minha coorientadora Prof<sup>a</sup> Dra. Regina Mambeli Barros, pela grande inspiração e pela coordenação desse trabalho.*

*“Nunca fale dos limites do conhecimento humano. Fale apenas dos limites do seu conhecimento.”*

*Rudolf Steiner.*

## RESUMO

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos é atualmente um dos grandes problemas da sociedade, pois quando não recebem uma disposição final adequada provocam grandes problemas de saúde, sociais e ambientais. Diante disso, os aterros sanitários apresentam-se como o meio mais indicado para a disposição dos resíduos. Nos aterros, a digestão anaeróbica de resíduos sólidos urbanos que acontece naturalmente, tem aparecido como uma interessante forma de tratamento destes resíduos, visto que o biogás produzido durante o processo pode ser utilizado para a produção de energia elétrica. Durante o processo de digestão anaeróbica há a produção de metano ( $\text{CH}_4$ ) que durante a queima para a produção de energia, transforma esse metano em gás carbono ( $\text{CO}_2$ ), apresentando uma vantagem para a redução de gases de efeito estufa. Diante disso, este trabalho apresenta um estudo do potencial técnico e econômico da geração de energia para o aproveitamento do biogás do aterro da cidade de Extrema MG por meio de uma rotina desenvolvida nos programas Scilab, Microsoft Excel e LandGEM. Os resultados indicaram que há grande potencial de geração de energia no aterro além de se mostrar um empreendimento economicamente viável. Foram apresentados dois cenários de venda, para venda em leilão de energia e para venda na geração distribuída, o primeiro cenário se mostrou inviável apresentando um prejuízo de R\$ 48,81 por MWh e o segundo cenário mostrou que o empreendimento é bom investimento, apresentando um lucro de R\$ 74,29 MWh.

Palavras- chaves: Resíduos Sólidos Urbanos; Aproveitamento Energético; Biogás; Digestão anaeróbica; LandGEM. Scilab.

## ABSTRACT

The management of urban solid waste is currently one of society's greatest problems, because when they do not receive an adequate final disposal, they cause major health, social and environmental problems. Therefore, sanitary landfills are the most suitable means for the disposal of waste. In landfills, the anaerobic digestion of urban solid waste that occurs naturally, has emerged as an interesting way to treat these wastes, since the biogas produced during the process can be used to produce electricity. During the anaerobic digestion process there is the production of methane ( $\text{CH}_4$ ) which, during burning for energy production, transforms this methane into carbon gas ( $\text{CO}_2$ ), presenting an advantage for the reduction of greenhouse gases. Therefore, this work presents a study of the technical and economic potential of energy generation for the use of biogas from the landfill in the city of Extrema MG through a routine developed in the Scilab, Microsoft Excel and LandGEM programs. The results indicated that there is great potential for energy generation in the landfill, in addition to being an economically viable enterprise. Two scenarios of sale were presented, for sale in energy auction and for sale in distributed generation, the first scenario proved to be unfeasible with a loss of R\$ 48.81 per MWh and the second scenario showed that the project is a good investment, presenting a profit of R\$ 74.29 MWh.

**Keywords:** Urban Solid Waste. Energy Use. Biogas. Anaerobic digestion. LandGEM. Scilab.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Prioridade de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.....  | 16 |
| Figura 2. Geração per capita diária de RSU por região. ....   | 17 |
| Figura 3. Percentual de coleta de RSU por região.....   | 17 |
| Figura 4. Destinação Final de RSU no Brasil.....  | 18 |
| Figura 5. Evolução do índice de ocorrência dos serviços de coleta seletiva.....                       | 20 |
| Figura 6. Disposição final dos RSU por tipo de destinação.....  | 21 |
| Figura 7. Estimativa da Composição Gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil.....                | 22 |
| Figura 8. Etapas da Digestão Anaeróbia.....   | 27 |
| Figura 9. Esquema de Funcionamento de Aterro Sanitário.....   | 30 |
| Figura 10. Esquema de usina de aproveitamento energético de energia elétrica de aterro sanitário..... | 41 |
| Figura 11. Fontes Renováveis da Matriz Elétrica Brasileira.....                                       | 44 |
| Figura 12. Relação entre investimento e Potência.....   | 55 |
| Figura 13. Balanço entre produção e aproveitamento dos resíduos .....                                 | 59 |
| Figura 14. Projeção Populacional Aritmética .....   | 60 |
| Figura 15. Projeção Populacional Linear.....  | 60 |
| Figura 16. Geração anual de RSU+ lodo (ton/ano).....  | 61 |
| Figura 17. Vazão de Metano m <sup>3</sup> /ano LandGEM®.....  | 62 |
| Figura 18. Vazão de Metano m <sup>3</sup> /ano método Silva et al (2019).....                         | 63 |
| Figura 19. Geração de Metano no Biodigestor pelo programa LandGEM.....                                | 63 |
| Figura 20. Máxima de Energia método Silva et al (2019).....   | 64 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1. Comparativo Antes e Depois da Política Nacional dos Resíduos Sólidos....                           | 25 |
| Tabela 2. Composição do Biogás.....  | 29 |
| Tabela 3, Unidades Necessárias em Aterros Sanitários.....  | 31 |
| Tabela 4. Critérios para escolha do local de aterro.....   | 33 |
| Tabela 5. Projetos Registrados no UNFCCC para aproveitamento energético de biogás<br>.....                   | 37 |
| Tabela 6. Vantagens e Desvantagens na utilização das principais tecnologias de<br>conversão energética ..... | 42 |
| Tabela 7. Valores sugeridos de k conforme as precipitações anuais correspondente ao<br>local.....            | 50 |
| Tabela 8. Valores sugeridos de L <sub>0</sub> por conteúdo de resíduos orgânicos.....                        | 50 |
| Tabela 9. Equipamentos Considerados na Captação do Biogás.....   | 56 |
| Tabela 10. Dados de entrada para solução do algoritmo no Scilab®. ....                                       | 57 |
| Tabela 11. Resultado preço estabelecido último leilão.....   | 66 |
| Tabela 12. Resultado preço de venda na geração distribuída. ....   | 66 |

## **NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA**

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

GEE – Gases de Efeito Estufa

DA – Digestão Anaeróbica

kW- Quilowatts

COP21-21<sup>a</sup> Conferência das Partes

PNRS- Política Nacional dos Resíduos Sólidos

FORSU- Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos

ETE- Estação de Tratamento de Esgotos

UTE- Usina Termelétrica

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica

Art- Artigo

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR- Norma Brasileira

CH<sub>4</sub>- Metano

CO<sub>2</sub>- Gás Carbono

ANA- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico



## Sumário

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | INTRODUÇÃO.....  | 10 |
| 1.1   | JUSTIFICATIVA .....                                      | 12 |
| 1.2   | OBJETIVO .....   | 12 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral.....                                      | 12 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos.....                               | 13 |
| 1.3   | Estrutura do Trabalho .....                              | 13 |
| 2.    | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                               | 14 |
| 2.1   | OS RESÍDUOS SÓLIDOS .....                                | 14 |
| 2.1.1 | Definição.....   | 14 |
| 2.1.2 | Classificação de Resíduos Sólidos.....                   | 14 |
| 2.2   | RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL.....                          | 16 |
| 2.2.1 | Geração, coleta, tratamento e disposição.....            | 16 |
| 2.2.2 | Composição Gravimétrica dos RSU no Brasil. ....          | 22 |
| 2.2.3 | A fração Orgânica dos RSU.....                           | 23 |
| 2.2.4 | Tecnologias Empregadas no Tratamento dos RSU. ....       | 23 |
| 2.3   | POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....               | 24 |
| 2.4   | DIGESTÃO ANAERÓBIA.....                                  | 26 |
| 2.4.1 | Fases da Digestão Anaeróbia.....                         | 27 |
| 2.4.2 | Biogás Oriundo da Digestão Anaeróbia .....               | 28 |
| 3.    | ESTRUTURA DOS ATERROS .....                              | 30 |
| 3.1   | ATERROS SANITÁRIOS .....                                 | 30 |
| 3.1.1 | Construção e Operação dos Aterros Sanitários.....        | 30 |
| 3.2   | USINA DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO .....                | 39 |
| 3.2.1 | Biogás de Aterro Sanitário.....                          | 39 |
| 3.2.2 | Implantação de uma Usina.....                            | 40 |
| 3.2.3 | Sistemas de coleta e tratamento do Biogás de Aterro..... | 41 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2.4 Conversão energética do Biogás de Aterro.....   | 43 |
| 3.2.5 Demanda .....   | 45 |
| 3.2.6 Mercado .....   | 46 |
| 3.2.7 Regulamentação.....   | 47 |
| 3.2.8 Vantagens e Desvantagens da energia oriunda do Biogás de Aterro .....                         | 47 |
| 4. Metodologia.....   | 49 |
| 4.1 Levantamento das informações relativas ao saneamento básico no município de<br>Extrema- MG..... | 49 |
| 4.2 Projeção Populacional.....  | 49 |
| 4.3 Geração de Resíduos.....  | 51 |
| 4.4 Estimativa do Biogás a ser produzido.....   | 51 |
| 3.4.1 Biodigestor .....   | 53 |
| 4.5 Estimativa do Aproveitamento Energético .....   | 53 |
| 4.6 Análise da Viabilidade Econômica.....   | 55 |
| 4.7 Aplicação dos dados no algoritmo no Scilab®.....  | 58 |
| 4.7.1 Sobre o Scilab® .....   | 58 |
| 4.7.2 Dados de Entrada .....  | 59 |
| 5. Resultados e Discussões .....  | 61 |
| 5.1 Aterro de Extrema.....  | 61 |
| 5.2 Projeção Populacional.....  | 62 |
| 5.3 Estimativa de Produção de Resíduos Sólidos e Lodo de Esgoto .....                               | 64 |
| 5.4 Estimativa do Biogás a ser produzida e do potencial energético.....                             | 65 |
| 5.4.1 Aterro Sanitário.....   | 65 |
| 5.4.2 Biodigestor .....   | 66 |
| 5.5 Estimativa do potencial energético .....  | 67 |
| 5.6 Análise da Viabilidade Econômica.....   | 67 |
| 6. CONCLUSÕES .....   | 69 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| 7. REFERÊNCIAS ..... | 70 |
|----------------------|----|

# 1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas enfrentados pelos países sobretudo, aqueles desenvolvidos e em desenvolvimento, é causado pela crescente geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) decorrente do acelerado processo de urbanização. Isto acontece devido ao grande volume e variedade desses resíduos, além dos perigos potenciais à saúde pública e ao meio ambiente. Diante disto, vários pesquisadores ao redor do mundo vêm se esforçando a buscar técnicas cada vez mais viáveis, eficientes e que causem menor impacto para o tratamento e a disposição e desses resíduos.

No Brasil, os aterros sanitários constituem a principal alternativa para disposição dos RSU, pois apresentam uma maneira ambientalmente mais adequada de disposição final dos resíduos, com grande tendência ao crescimento nos próximos anos, visto que, a política nacional de resíduos sólidos prevê a eliminação dos lixões no Brasil (SANTOS, 2017). Em função das alternativas de gerenciamento dos RSU, pode haver ou não o aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE). Diante desse cenário, o aproveitamento energético do RSU, por meio da combustão do biogás gerado pela digestão predominantemente anaeróbia dos resíduos orgânicos dispostos nos aterros, apresenta-se como uma excelente alternativa para reduzir as emissões desses gases na atmosfera. Ainda, há que se mencionar a contribuição para a crescente demanda energética do país, mostrando-se como excelente alternativa energética oriunda de fontes renováveis. Outra alternativa constitui-se na separação prévia dos RSU pela coleta seletiva, refinada em uma central de triagem de resíduos, com a obtenção da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU). As FORSUs podem ser submetidos à Digestão Anaeróbia (DA), com a subsequente geração de biogás.

A diferença entre o aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário e de FORSUs reside no fato que os primeiros possuem vida útil limitada, sendo que o pico de produção de biogás é observado no último ano de deposição das RSUs. Na medida em que há o crescimento populacional, mais módulos de biodigestores podem ser adicionados à central de aproveitamento de biogás dos FORSUs.

O aproveitamento energético oriundo de RSU há algum tempo já vem sendo utilizada em diferentes locais, especialmente em países desenvolvidos. O biogás gerado pela DA dos FORSUs tem se tornado uma técnica cada vez mais utilizada na geração de energia elétrica ou térmica, visto que, uma estimativa de ordem global de RSU é de aproximadamente 2 bilhões

de toneladas por ano, sendo que as frações orgânicas compreendem uma maior porcentagem dos RSU em países subdesenvolvidos (entre 50 a 70% de todo resíduo) em relação aos países desenvolvidos (entre 20 a 40%) (UN Environment, 2016).

No Brasil, visto que 59,5% de RSU são destinados para os aterros sanitários (ABRELPE, 2021), o aproveitamento energético do metano produzido pela DA mostra-se como uma opção interessante. Atualmente, existem 25 empreendimentos gerando um potencial energético de 186.968,60 kW provindo de biogás de aterro (ANEEL, 2021), esse número só tende a aumentar, visto que em 2015, na 21ª Conferência das Partes (COP21), o país propôs uma redução de 37% em suas emissões de GEE, tendo como base as emissões de 2005 (EPE, 2018). Para reduzir as emissões, o Brasil se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia na matriz energética, aumentar a participação de energias renováveis, eficiência energética, entre outros (MMA, 2020). Em 2010, foi sancionada a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), uma Lei Federal no. 12.305/2010 (BRASIL, 2010a), regulamentada pelo Decreto no. 7404/2010 (BRASIL, 2010b). A PNRS objetiva reduzir os principais problemas relacionados ao manejo inadequado dos resíduos, como também incentivar a busca por práticas de gerenciamento sustentáveis, por meio da redução da geração de resíduos, reciclagem de materiais bem como o incentivo ao aproveitamento energético. Outro ponto importante abordado pela PNRS é a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida de produtos e a logística reversa, visando reduzir os impactos decorrentes do ciclo de vida dos produtos, assim como dar uma destinação adequada aos resíduos.

Em 2020, foi sancionada a Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020, conhecida como o novo marco regulatório do saneamento básico, que tem por finalidade atualizar o marco legal do saneamento básico e atribui à ANA Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico possui competências para editar normas e referências sobre o serviço de saneamento.

Neste contexto, o presente trabalho propõe avaliar o aproveitamento energético oriundo do metano, presente no biogás gerado pela DA da FORSU ou de aterro sanitário, ambos aprimorados pela inserção de lodo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da cidade de Extrema, localizada no estado de Minas Gerais. A viabilidade econômica de tais empreendimentos também foi estudada à luz das Resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de micro e minigeração distribuída, no. 482/2012 e 687/2015 (ANEEL, 2012; 2015), assim como no cenário de venda em leilões de energia elétrica. Finalmente, haverá o estudo de emissões líquidas de GEE para os cenários estudados.

Atualmente, os serviços de limpeza pública são realizados por servidores da Prefeitura de Extrema. No entanto, o município pretende a terceirização de tais atividades, a fim de melhorar a eficiência dos serviços prestados. Para isto será necessário elaborar um estudo diagnóstico da eficiência do sistema de limpeza pública atual da cidade, a fim de identificar fragilidades e necessidades de melhoria, definindo assim um novo modelo para o Plano Municipal de Limpeza Pública com um maior embasamento técnico e científico (EXTREMA, 2020).

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

O uso de fontes alternativas, como biogás oriundo de aterro sanitário, apresenta uma alternativa atraente para o atendimento da crescente demanda, como também na redução dos impactos ambientais oriundos dos GEE. Além do que, o uso dos RSU para a produção de energia vai ao encontro aos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos instituída em 2010 por meio da Lei 12305/2010 (Brasil, 2010a).

Como estudo de caso foi escolhida a cidade de Extrema/MG, que possui interesse em implementar os estudos realizados. O presente projeto visa a projetar o modelo de usina termelétrica (UTE) a partir de biogás seja da DA da FORSU ou do aterro sanitário, ambos com inserção de lodo de ETE e a geração de energia elétrica em um prazo de 20 anos. Também, haverá o estudo de emissões líquidas de GEE e energia de acordo com diferentes cenários de gerenciamento de RSU.

A UTE terá capacidade para receber 85 toneladas de resíduos por dia, sendo que o município gera em torno de 36 toneladas de resíduos por dia, podendo ser uma alternativa de disposição final para os municípios vizinhos (EXTREMA, 2020).

## **1.2 OBJETIVO**

### **1.2.1 Objetivo Principal**

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o potencial energético dos RSU do município de Extrema MG por meio da utilização do programa desenvolvido em Scilab® por Silva et al. (2019). Objetivou-se analisar o potencial energético considerando o uso do biogás produzido em aterros sanitários como o tratamento da fração orgânica destes mesmos resíduos em digestores anaeróbios, bem como a análise da viabilidade econômica destes projetos. Ambos deverão receber o lodo de ETE para aprimorar o processo de digestão anaeróbia

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Afim de alcançar o objetivo geral, propõem-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar a cidade integrante do aterro sanitário para gerenciamento dos RSU;
- Estimar o crescimento populacional da cidade estudada;
- Estimar a geração de lodo de ETE da cidade estudada;
- Estimar a geração de RSU da cidade para o aterro sanitário;
- Somar a geração anual de RSU e lodo de ETE;
- Somar a geração anual de FORSU e lodo de ETE;
- Calcular o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário com RSU e lodo de ETE;
- Calcular o potencial de geração de energia elétrica do biogás gerado da digestão anaeróbia da FORSU com lodo de ETE;
- Apresentar o projeto da usina termoelétrica;
- Verificar a viabilidade econômica da utilização do biogás por meio das Resoluções 482/2012 e 687/2015 da ANEEL (2012; 2015); e
- Calcular as emissões líquidas evitadas de GEE para os cenários estudados.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

No capítulo 2 são apresentadas a revisão bibliográfica referente aos resíduos sólidos, sua definição, classificação, composição bem como as tecnologias empregadas no tratamento dos RSU. No capítulo 3 são apresentadas as estruturas dos aterros bem como as usinas de aproveitamento energético de biogás de aterro. O capítulo 4 consiste na metodologia utilizada para os cálculos do projeto. O capítulo 5 são apresentados os resultados. Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões e o capítulo 7 o referencial bibliográfico.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 OS RESÍDUOS SÓLIDOS

#### 2.1.1 Definição

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define dentro da norma ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004) Resíduos Sólidos como resíduos nos estados sólidos ou semissólidos, que resultem de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São inclusos nessa norma, os lodos provenientes de sistemas de tratamentos de água, que são gerados por equipamentos e instalações de controle de poluição, e também líquidos com particularidades que não permitam seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água.

#### 2.1.2 Classificação de Resíduos Sólidos

De acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS, 2010), os resíduos sólidos são classificados quanto a sua origem e quanto a periculosidade, conforme listado a seguir:

##### **D) Quanto à origem:**

- a) Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) Resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas a e b;
- d) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas b, e, g, h e j;
- e) Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea c;
- f) Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);



- h) Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira; e
- k) Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

## **II) Quanto a Periculosidade:**

Quanto à periculosidade, a PNRS (BRASIL,2010a), classifica os resíduos sólidos em:

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

Os resíduos não perigosos podem ainda ser classificados em dois grupos (BRASIL, 2010)

- a) Não Inertes: Que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- b) Inertes: São quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004).

## 2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

O Brasil vem tomando como base uma hierarquia de gerenciamento de RSU semelhante à de países desenvolvidos, como Estados Unidos e países da União Europeia (NASCIMENTO, 2015). De acordo com a PNRS a não geração e redução, a reutilização e a reciclagem são prioridades, após as alternativas prioritárias, examinam-se as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos economicamente viáveis e disponíveis e, por fim, não apresentando outro modo que não seja a disposição final ambientalmente adequada. A Figura 1 apresenta a ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos sólidos.

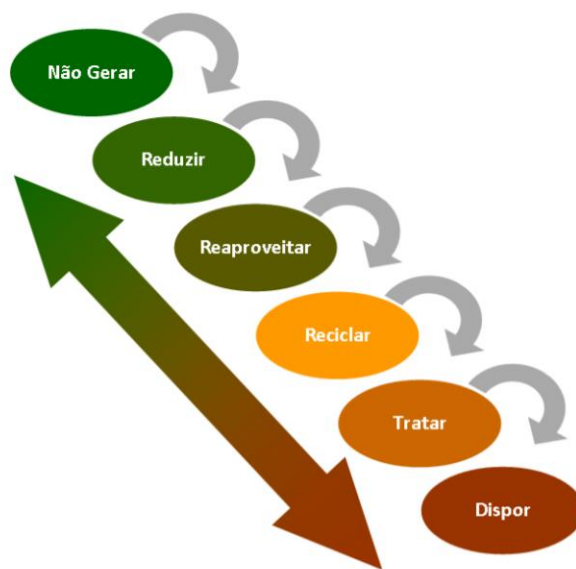


Figura 1: Prioridade de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.

Fonte: COPEL, 2015.

### 2.2.1 Geração, coleta, tratamento e disposição

No Brasil, em 2018, foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos, um aumento de pouco menos de 1% em relação ao ano anterior, sendo a geração per capita em média de pouco mais de 1 quilo por dia. Estes valores são diferentes para cada região brasileira. Em ordem crescente de geração per capita por dia de resíduos sólidos estão: Sudeste com 1,23 quilos, que diferente das outras regiões, produz resíduos em proporção maior que sua concentração populacional, com 40% dos habitantes produzindo 50% de todo resíduo nacional. Depois a região Centro-Oeste com 0,990 quilos, Nordeste com 0,951 quilos, Norte com 0,884 quilos e Sul com 0,759 quilos (ABRELPE, 2019). A Figura 2 apresenta o gráfico da geração per capita por dia das regiões brasileiras.



Figura 2: Geração per capita diária de RSU por região.

Fonte: ABRELPE, 2018.

Nas áreas urbanas, a coleta de resíduos alcança quase que a totalidade dos domicílios em todas as regiões brasileiras; porém, considerando as áreas rurais, o índice de alcance da coleta de RSU diminui consideravelmente, principalmente nas regiões Nordeste e Norte que possuem as menores taxas de coleta dentre todas as regiões brasileiras (NASCIMENTO, 2015). A região Sudeste apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta no país, com 53,2% do total de RSU coletados em 2018, um aumento de 0,2% comparado ao ano anterior, conforme ilustrado na Figura 3. Em 2017, os municípios da região sudeste geraram diariamente 105.794 toneladas de RSU, sendo que desse total 98,1 % foram coletados (ABRELPE, 2019).

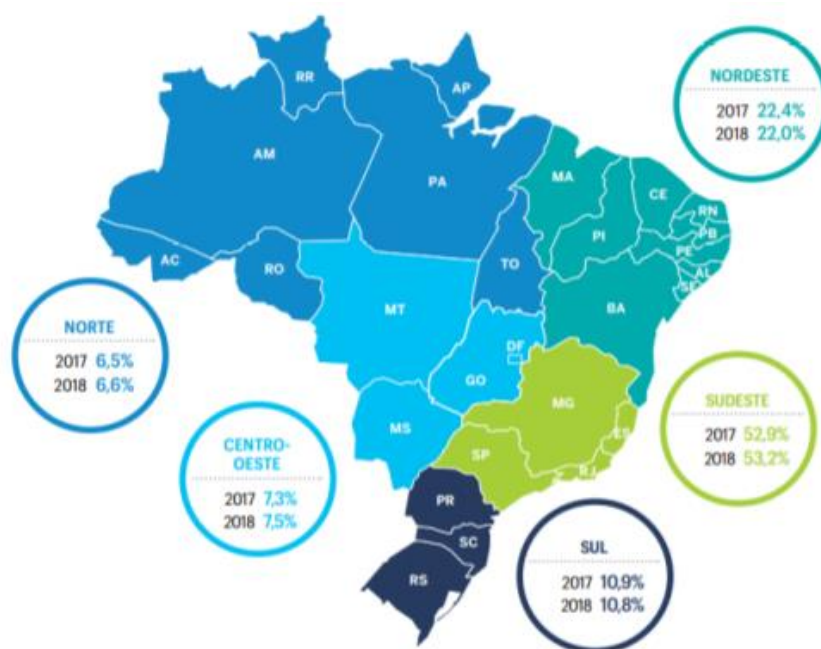


Figura 3: Percentual de coleta de RSU por região.

Fonte: ABRELPE, 2019.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE,2019), de 79 milhões de toneladas de resíduos gerados em 2018,

aproximadamente 92% foram coletados, cerca de 72,7 milhões de toneladas, apresentando um percentual de cobertura de 92,01% no país. Sobre a disposição destes resíduos, 59,5% dos RSU coletados foram enviados para os aterros sanitários, 23% em aterros controlados e 17,5% em lixões, como apresentado na Figura 4.

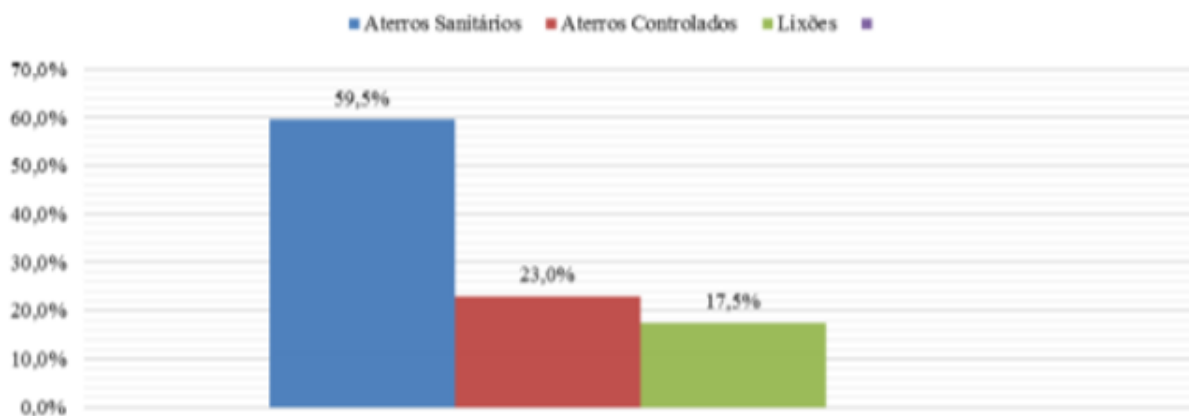


Figura 4: Destinação Final de RSU no Brasil.

Fonte: ABRELPE, 2019.

A coleta seletiva acontece em aproximadamente, três quartos dos municípios brasileiros e, somando todos os tipos de coletas no ano de 2018, houve um acréscimo de 1,66 % em relação ao ano de 2017. O aumento da coleta foi maior que aumento de geração do referido ano. A quantidade de cidades que dispõem de tal serviços elevou-se em todo território nacional com destaque para as regiões Centro-Oeste e Nordeste, com uma ampliação de 8% e 9%, respectivamente. A comparação entre a quantidade gerada e coletada mostra que aproximadamente, 6,3 milhões de toneladas deixaram de ser coletados e provavelmente, tiveram um destino impróprio (ABRELPE, 2019).

Os RSU podem ser tratados por meio de várias técnicas como gaseificação, pirólise, incineração, plasma, compostagem, reciclagem e DA (MARCHEZETTI, 2011). Essas técnicas podem ser usadas simultaneamente e apresentam algumas vantagens e desvantagens na utilização.

Independente da técnica utilizada, é necessária realizar a caracterização da composição gravimétrica dos resíduos, que significa demonstrar o percentual de cada componente de uma amostra de lixo em relação ao peso total desta amostra, sendo os componentes mais comuns de ocorrerem, papel, metal, vidro, plástico e matéria orgânica. De acordo com IPEA, em 2012, foi construída uma tabela a partir da média da composição gravimétrica de 93 municípios brasileiros, entre os anos de 1995 e 2008 e a média da composição dos RSU do Brasil é formada

por 31,9% de material reciclável, sendo este composto por, 2,9% de metal, 13,1% de papel, papelão e tetrapak, 13,5% de plástico, 2,4% de vidro. A composição de matéria orgânica apresenta 51,4% dos RSU e 16,7% de outros, que são rejeitos que não são recicláveis ou que são materiais que utilizam técnicas economicamente inviáveis para a reciclagem (IPEA,2012).

Devido ao impacto sobre o meio ambiente, o tratamento e a gestão de RSUs devem ser observados com cautela e planejamento (Santibañez-Aguilar et al., 2013). Os processos mais importantes para o tratamento dos resíduos sólidos são a reciclagem e a compostagem, ambos salientados na literatura técnico-científica e na PNRS (NASCIMENTO, 2015). Os dois processos envolvem alteração de algumas propriedades físicas, químicas ou biológicas dos resíduos, objetivando transformá-lo em insumos ou novos produtos. Algumas vantagens e desvantagem na utilização de ambos tratamentos, são apresentados a seguir:

#### **Compostagem:**

- **Vantagem:** A prática da compostagem da matéria orgânica diminui a quantidade de resíduos que devem ser depositados nos aterros sanitários, gera um composto, que quando não contaminado, pode ser utilizado na agricultura por ser muito rico em nutrientes. Esse composto tem a capacidade de melhorar a estrutura dos solos, aumentando a capacidade de retenção de água e controlando alguns processos erosivos.
- **Desvantagem:** São necessárias grandes áreas para implementação em grande escala e o processo pode liberar odores desagradáveis se as condições aeróbicas não forem mantidas, exigindo uma grande vigilância e manutenção constantes das pilhas de compostagem. Para que o adubo, proveniente desse processo tenha seu uso na agricultura, é necessário que os resíduos orgânicos não sejam contaminados com outros materiais. Outro ponto de desvantagem é a limitada comercialização desse composto no Brasil.

#### **Reciclagem:**

- **Vantagem:** A prática da reciclagem é um importante componente do processo de logística reversa, além de preservar o meio ambiente por meio da valorização dos resíduos, minimizando a utilização, utilizando de forma racional as fontes naturais e gerando riquezas por intermédio da geração de emprego e renda.
- **Desvantagem:** A coleta seletiva pode ser pouco eficiente e os matérias recicláveis podem estar contaminadas, resultando em uma diminuição no seu

valor comercial de venda. Outro ponto importante é que nem sempre os materiais reciclados são mais baratos relativamente à retirada da matéria prima da natureza. Há algumas baixas demandas para compra de recicláveis, e pode haver também, a ausência de infraestrutura e incentivos públicos (NASCIMENTO, 2015)

No ano de 2018, foram reciclados no Brasil aproximadamente 38,1 % de todo material disponível (SNIS, 2018), um aumento de 3,9% comparado ao ano anterior, entretanto a coleta seletiva ainda não é uma realidade em grande parte dos municípios brasileiros. De 3.468 municípios cadastrados no SNIS, verifica-se que 1.322 ou seja 38,1% dispõem de alguma forma de coleta seletiva, em contramão também há 2.146 ou seja 61,9% que declaram não dispor de coleta seletiva. A Figura 5 apresenta a evolução do índice de ocorrência dos serviços de coleta seletiva.

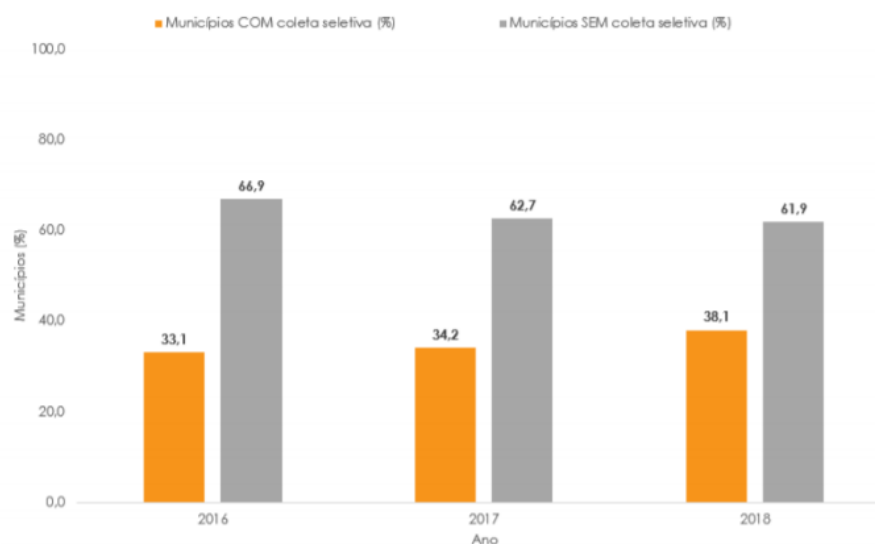


Figura 5: Evolução do índice de ocorrência dos serviços de coleta seletiva.

Fonte: SNIS, 2018.

O Brasil perde anualmente cerca de R\$ 8 bilhões ao enterrar os RSUs que poderiam ser reciclados, conforme estudo acerca dos aspectos econômicos da reciclagem, realizado pelo Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicada (IPEA,2012). A expectativa é de crescimento do mercado dos recicláveis no Brasil, baseado na coleta seletiva e na formação de cooperativas de catadores com investimento público e privado, fundamentado principalmente na logística reversa e em outras ferramentas relacionadas a implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Esse é o contexto em que se insere a Proposta

do Plano Nacional de Resíduos Sólidos e os planos municipais de gerenciamento integrado de resíduos sólidos.

Outro ponto importante que deve ser considerado nos RSU é a reutilização da matéria orgânica. Atualmente, o Brasil possui 260 usinas de compostagem, responsáveis pela compostagem de 4% dos RSO gerados no país, sendo 1 no Norte, 19 no Nordeste, 6 no Centro-Oeste, e Sudeste e Sul, ambas regiões, com 117 usinas (PIRES; FERRÃO, 2017). A principal dificuldade desse processo deve-se à ausência da separação dos RSOs na fonte e consequentemente, sua contaminação inviabiliza a sua reciclagem como composto.

Conforme aponta o diagnóstico sobre catadores de matérias primas recicláveis (Ipea,2012), 75% dos ganhos totais do setor de reciclagem são destinados às indústrias, porém 90% de todo resíduo reciclado passa pela mão de catadores e de catadoras, seja organizados em cooperativas de reciclagem ou trabalhando isoladamente nas ruas e lixões.

Unidades inadequadas ainda têm participação significativa na destinação dos RSUs no Brasil. Em 2018, cerca de 23% dos RSU foram enviados de modo inadequado aos aterros controlados e 17,5%, aos lixões. Os aterros sanitários são obras de engenharia projetadas sobre critérios técnicos, cuja finalidade é garantir a disposição final do RSU sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente. São consideradas uma das técnicas mais seguras e mais eficientes de destinação de resíduos sólidos (MMA, 2007). Em 2018, cerca de 59,5% dos resíduos coletados no Brasil tiveram disposição final adequada e foram encaminhadas para os aterros sanitários, um aumento de 0,4% comparado a mesma disposição do ano anterior. A figura 6 apresenta um gráfico das disposições finais do ano de 2017 e 2018.

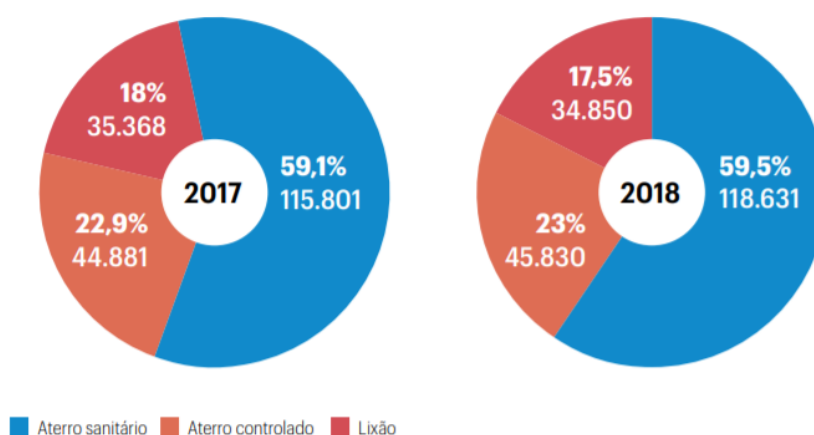


Figura 6: Disposição final dos RSU por tipo de destinação.

Fonte: SNIS, 2018.

Percebe-se que houve um aumento na quantidade e na porcentagem dos RSU dispostos em aterros sanitários no Brasil; porém, ainda existe uma grande quantidade de resíduos sendo dispostos de maneira inadequada, podendo causar impactos negativos a sociedade e ao meio ambiente.

### 2.2.2 Composição Gravimétrica dos RSU no Brasil.

A composição gravimétrica refere-se ao percentual de cada componente em relação ao peso total dos resíduos, sendo de suma importância a sua identificação para a implantação de soluções adequadas (MMA, 2012).

A composição dos RSU gerados apresenta uma composição bem variada, que muda em função de vários fatores, como o nível socioeconômico da população, a época do ano e a forma de coleta existente (REICHERT, 2005). Quanto maior o desenvolvimento econômico e a taxa de urbanização de uma região, conseqüentemente maior será a quantidade de resíduos gerados (HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, 2012). Para se estimar a composição gravimétrica dos RSU produzidos no Brasil, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), fez uso de diferentes dados de pesquisas realizadas entre os anos de 1995 e 2008 (BRASIL, 2012). A Figura 7 apresenta a estimativa da composição gravimétrica média dos RSU coletados no país.

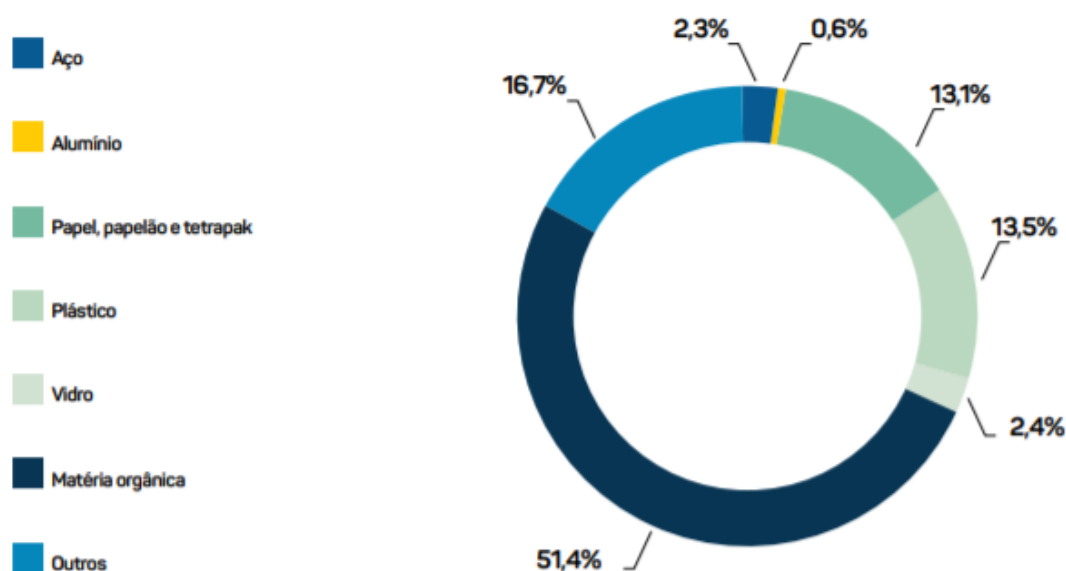


Figura 7: Estimativa da Composição Gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil.

Fonte: MMA, 2012.



Observa-se que mais da metade dos RSU gerados no Brasil constitui-se de material orgânico, cerca de 51,4%; porém, ainda são descartados de forma misturada, inviabilizando ações específicas para o aproveitamento de tal fração, contribuindo para o acréscimo nas emissões de GEE. Diante disto, é de suma importância a implementação de estratégias regionalizadas para o aproveitamento das diferentes frações de resíduos (MMA, 2012). Reforça-se, dessa forma, que o investimento em novas tecnologias para a recuperação e o aproveitamento energético de resíduos estão de acordo com os objetivos da PNRS.

### **2.2.3 A fração Orgânica dos RSU**

Como anteriormente mencionado, a fração orgânica dos resíduos sólidos compõe uma parte significativa dos RSU no Brasil, e é constituída basicamente por restos de alimentos e vegetais descartados. Pode ser de diversas origens, por exemplo, domiciliar ou urbana (restos de alimentos, jardinagem ou podas), agrícola ou industrial (resíduos de agroindústria alimentícia, indústria madeireira, frigoríficos) e de saneamento básico (lodo de estação de tratamento de esgotos).

Em pequenas quantidades e em ambientes naturais, esses materiais se degradam espontaneamente reciclando nutrientes presentes em processos como os ciclos dos nitrogênios e do carbono. Porém, quando derivados de atividades humanas em ambientes urbanos, acabam constituindo um grave problema ambiental pela quantidade e velocidade em que são gerados, principalmente, quando são dispostos em locais e de maneira inadequados.

Atualmente, a principal disposição desses resíduos no país é a disposição final em aterros sanitários. Os aterros sanitários são a terceira maior fonte antropogênica de metano, perdendo apenas para a produção e distribuição de combustíveis fósseis (gás e carvão) e as atividades agrícolas e silvo pastoril. Sendo assim, alternativamente à disposição final em aterros sanitários, os resíduos orgânicos podem ser reciclados e valorizados, sendo as principais alternativas de aproveitamento a compostagem e a digestão anaeróbia (MMA, 2020).

### **2.2.4 Tecnologias Empregadas no Tratamento dos RSU.**

Diversas tecnologias são empregadas para o tratamento dos resíduos, sendo, no Brasil, a disposição final dos RSU em aterros sanitários, o método mais comumente utilizado para a disposição e tratamento (BARROS *et all*, 2014); porém, existem outras técnicas que podem ser empregados no tratamento de RSU como tratamentos térmicos e biológicos.

O tratamento térmico de RSU consiste na utilização de calor para a redução do volume de resíduos, por meio de técnicas como incineração, pirólise, plasma e gaseificação, assim como a tecnologia de micro-ondas, esta em fase inicial, para o tratamento de RSU em grande escala. A utilização do tratamento térmico visa à recuperação de energia dos RSU, tendência mundial conhecida como “*Waste-to-Energy (WtE) Plants*” (BARROS, 2013). Dentre todas as técnicas, a incineração, em diversos países, é a mais utilizada, mesmo apresentando elevado custo de implantação e sofrendo grande rejeição por parte da sociedade (CENBIO, 2001). Porém, essa técnica apresenta diversas vantagens, como a redução do volume em 90% e a redução de massa em 70%, a redução de patógenos e na geração de calor, que pode ser utilizada para o aquecimento de água, além da geração de energia elétrica (LINO; ISMAIL; 2017). No Brasil, a incineração é utilizada como destino final de uma parcela considerável dos resíduos do serviço de saúde (RSS), sendo que, em 2018, foram enviados para incineração 40,2% dos RSS (ABRELPE, 2018/2019) e de uma pequena parcela dos resíduos industriais perigosos (LOUREIRO; ROVERE; MAHLER, 2018).

Os tratamentos biológicos são indicados para o tratamento de resíduos orgânicos biodegradáveis, pois estes apresentam grande teor de umidade (LEITE *et al*, 2009). Mencionam-se a compostagem, a fermentação e a digestão anaeróbia como as técnicas utilizadas em tratamentos biológicos. Nessas técnicas são utilizados enzimas e micro-organismos que decompõem a matéria orgânica produzindo gases como biogás e outros subprodutos. Essas técnicas apresentam inúmeras vantagens por se tratarem de processos naturais que necessitam de pouca energia e, comparadas a outras técnicas, causam baixo impacto ambiental (KONDUSAMY; KALAMDHAD, 2014).

## **2.3 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Instituída pela Lei Nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010a) a Política Nacional de Resíduos Sólidos, contém instrumentos importantes no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes da gestão inadequada de resíduos sólidos (MMA, 2020). Além disso, a supracitada lei prevê a redução na geração de resíduos sólidos, tendo em vista um propósito de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de práticas para aumentar a reciclagem e a reutilização de resíduos sólidos, além da destinação ambientalmente adequada do resíduo que não possa ser reciclado ou reutilizado.

Além disso, a PNRS incentiva a gestão integrada de resíduos sólidos, incluindo sua recuperação e aproveitamento energético. Desse modo, a PNRS traz um fomento para a

recuperação e aproveitamento dos RSU tanto em aterros sanitários, biodigestores, ou ainda o desenvolvimento de novas tecnologias objetivando a geração de energia por meio de sistemas de tratamento sanitário, trazendo assim, oportunidades e melhorias para esse setor no país.

A referida lei institui a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos, dos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, o cidadão e titulares de serviços de manejo dos RSUs na logística reversa dos resíduos e embalagens pós consumo (MMA, 2020).

A PNRS também cria metas para a eliminação dos lixões, pois, no Art.47, há proibição dos destes, e instituição instrumentos de planejamento em diversos níveis, desde nacional até municipal, impondo que os mesmos elaborem seus Planos de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos. A Tabela 1 apresenta um comparativo de como era antes e como ficou depois da PNRS, em relação ao poder público, a população e aos catadores.

**Tabela 1 – Comparativo Antes e Depois da Política Nacional dos Resíduos Sólidos.**

|                      | <b>Antes</b>  | <b>Depois</b>  |
|----------------------|---|--|
| <b>Poder Público</b> | <p>Os resíduos sólidos urbanos tinham pouca prioridade.</p> <p>Grande maioria dos municípios destinavam os rejeitos para lixões a céu aberto.</p> <p>Não há fomento ao aproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos (RSO).</p> <p>Coleta seletiva por vezes, ineficiente e pouco expressiva.</p> | <p>Municípios devem traçar um plano para o melhor gerenciamento possível dos resíduos sólidos, buscando a inclusão de catadores.</p> <p>Lixões passam a ser proibidos e devem ser erradicados até 2014, porém com o novo marco do saneamento o prazo foi estendido para 2024; criação de aterros que sigam as normas ambientais.</p> <p>Municípios devem instalar a compostagem para o tratamento dos Resíduos Sólidos Orgânicos (RSOs).</p> <p>Prefeituras devem organizar a coleta seletiva de recicláveis e orgânicos para atender à toda a população, fiscalizar e controlar os custos desse processo.</p> |

**Tabela 1 – Comparativo Antes e Depois da Política Nacional dos Resíduos Sólidos.**

|                  | <b>Antes</b>  | <b>Depois</b>  |
|------------------|---|--|
| <b>População</b> | <p>Separação inexpressiva de RSU reciclável nas residências.</p> <p>Falta de informação.</p> <p>Coleta seletiva por vezes, ineficiente.</p>   | <p>População deve separar a parcela reciclável de RSUs nas residências.</p> <p>Realização de campanhas educativas sobre o tema dos resíduos sólidos e a sua importância.</p> <p>A coleta seletiva deverá ser expandida.</p>  |
| <b>Catadores</b> | <p>Manejo dos RSUs feito por atravessadores, com grandes riscos à saúde.</p> <p>Setor predominantemente informal.</p> <p>Problemas relacionados com a quantidade e qualidade dos resíduos.</p> <p>Catadores sem qualificação.</p> | <p>Catadores deverão se organizar em cooperativas de forma a melhorar o ambiente de trabalho, reduzir os riscos à saúde e aumentar a renda.</p> <p>Cooperativas deverão estabelecer parcerias com empresas e prefeituras para realizar a coleta e reciclagem.</p> <p>Aumento do volume e melhora da qualidade dos resíduos que serão reaproveitados ou reciclados.</p> <p>Treinamento dos trabalhadores para melhorar a produtividade.</p> |

Fonte: Adaptado (NASCIMENTO, 2015)

## **2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA**

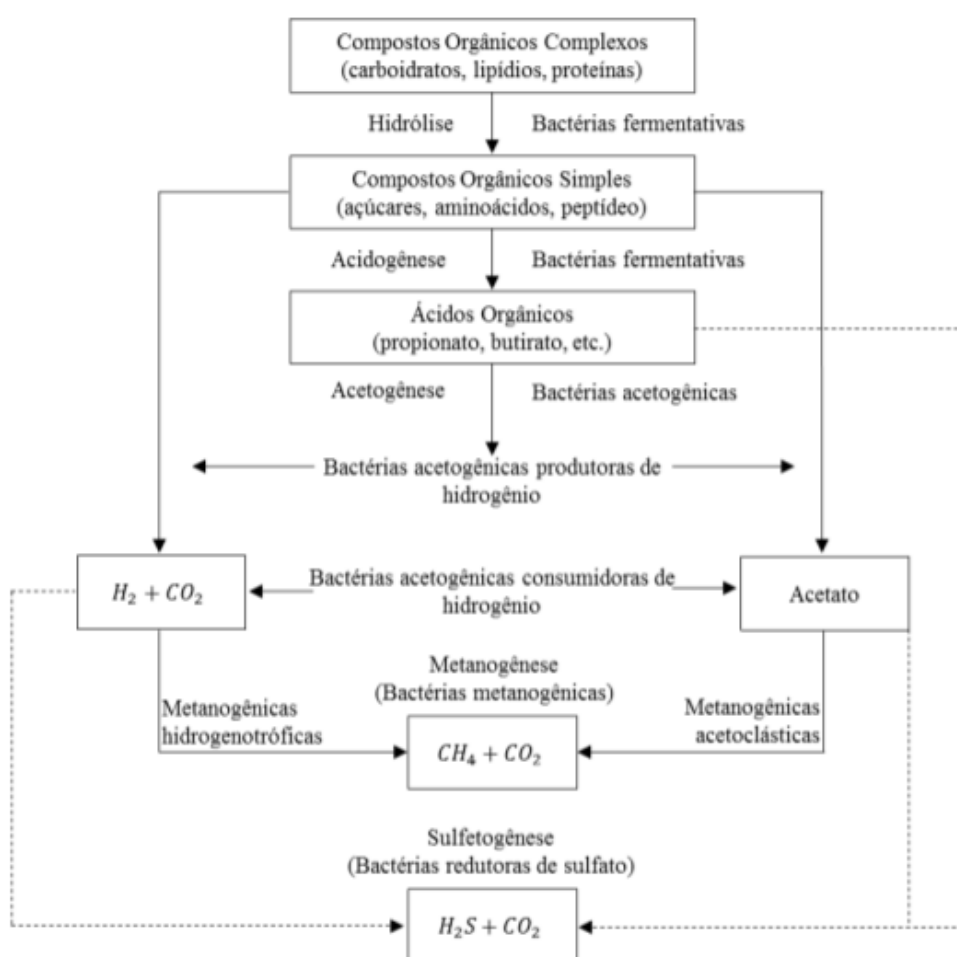
Chernicharo (2005) afirma que a digestão anaeróbia pode ser considerada um ecossistema no qual diversos grupos de microrganismos trabalham na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás sulfídrico, gás carbônico, água e amônia, além de novas células bacterianas.

A DA baseia-se na ação de atividades enzimáticas e de diversos microrganismos, em meios com a ausência de oxigênio (O<sub>2</sub>), para conversão biológica da matéria orgânica complexa em compostos químicos simples, sendo o metano (CH<sub>4</sub>) o principal produto obtido (CHONG; CHONG, 2008). Esse processo ocorre naturalmente em aterros sanitários, assim como de forma

controlada em biodigestores, que criam condições adequadas como aquecimento e circulação de matéria orgânica, para que ocorra a DA (DEFRA,2004). No processo da digestão anaeróbia existem quatro fases principais que envolvem diferentes estágios entre os substratos e as bactérias e arqueas metanogênicas (CHERNICHARO,2005).

### 2.4.1 Fases da Digestão Anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia de métodos biodegradáveis consiste basicamente nas etapas de: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (BHARATHIRAJA et al., 2018), além da sulfetogênese (CHERNICHARO, 1997). A Figura 8 apresenta as etapas da DA.



**Figura 8:** Etapas da Digestão Anaeróbia.

**Fonte:** Chernicharo, 1997.

As supracitadas etapas são apresentadas a seguir:

- Hidrólise: a primeira etapa do processo de degradação da matéria orgânica, inicia-se com a hidrólise. Nessa etapa ocorre a redução de polímeros orgânicos como proteínas, lipídios e polímeros de carboidratos em moléculas simples que sejam solúveis em água, como ácidos graxos de cadeia longa e açúcares (LI; PARK; ZHU, 2011).
- Acidogênese: essa é a segunda etapa do processo da DA também conhecida como acidificação. Nessa etapa acontece a conversão de produtos hidrolisados em moléculas simples com baixo peso molecular como Ácidos Graxos Voláteis, AGVs (ácido acético, propiônico e butílico), álcoois, aldeídos e gases como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub> (KONDUSAMY; KALAMDHAD, 2014).
- Acetogênese: é a terceira etapa do processo da DA. Nessa etapa os produtos gerados na etapa anterior são convertidos em ácidos acéticos, hidrogênio e CO<sub>2</sub> por bactérias acetogênicas (KONDUSAMY; KALAMDHAD, 2014).
- Metanogênese: essa é a etapa final da DA conduzida por um grupo de organismos denominada como metanogênicos, nessa etapa as arqueas metanogênicas consomem acetato, dióxido de carbono e hidrogênio para produzir metano (LI; PARK; ZHU, 2011). As arqueas metanogênicas são divididas em dois grupos; as metanogênicas acetoclásticas e as metanogênicas hidrotróficas. O primeiro grupo são assim denominadas, pois consomem o acetato e produzem metano e CO<sub>2</sub>, o segundo grupo utiliza o hidrogênio como doador e CO<sub>2</sub> como aceptor de elétrons para produzir metano (THEMELIS e ULLOA, 2006).
- Sulfetogênese: essa etapa ocorre na DA em resíduos que contém enxofre em sua composição. Nessa fase, sulfatos, sulfitos e compostos sulfaturados são reduzidos em sulfetos por meio de um grupo de bactérias redutoras de sulfato (BRS) ou sulforredutoras. Essa etapa é mais eficiente que a metanogênese na remoção da demanda química de oxigênio (DQO) da fase líquida. Porém, com a remoção da DQO na sulfetogênese acontece a produção de gás sulfídrico, responsável por corrosão de componentes e maus odores, enquanto que, a produção de metano pode ser utilizada para aproveitamento energético (CHERNICHARO, 2005). A Sulfetogênese não é desejada que se ocorra (NUVOLARI, 2003).

#### **2.4.2 Biogás Oriundo da Digestão Anaeróbia**

O biogás é um composto gasoso resultante da decomposição anaeróbia de matéria orgânica dos resíduos sólidos depositados em aterros, esgotos domésticos e afluentes industriais, e é principalmente formado por metano e dióxido de carbono, normalmente em partes iguais de volume (GOLDEMBERG, 2006). Porém, a composição desse gás varia de

acordo com a composição do resíduo presente no processo (ABNT, 1992). Quanto maior o volume de metano, mais energia por unidade de massa o biogás contém. Nessa composição, existem dezenas de substâncias, como o gás sulfídrico causador do mau cheiro, traços de siloxanos, que reduzem a vida útil dos equipamentos de uso energético, e vapor d'água (GOLDEMBERG, 2006). A Tabela 2 apresenta a composição média de biogás.

**Tabela 2:** Composição do Biogás.

| <b>Gás</b>                                 | <b>Percentual em Volume (%)</b> |
|--|---------------------------------|
| Metano CH <sub>4</sub>                     | 50 - 75                         |
| Dióxido de Carbono CO <sub>2</sub>         | 24 - 45                         |
| Vapor d'água H <sub>2</sub> O <sub>g</sub> | 1 - 2                           |
| Monóxido de Carbono CO                     | 0 - 0,3                         |
| Nitrogênio N <sub>2</sub>                  | 1 - 5                           |
| Gás Sulfídrico H <sub>2</sub> S            | 0,1 - 0,5                       |
| Hidrogênio H <sub>2</sub>                  | 0 - 3                           |

**Fonte:** (SANTOS, 2015).

A pureza do gás, bem como seu poder calorífico, está diretamente ligado a porcentagem de metano presente no composto gasoso (SUZUKI, 2011). O biogás é um combustível com alto teor energético, podendo ser utilizado na geração de energia elétrica, térmica ou mecânica (SOUZA et al., 2004).

## **3. ESTRUTURA DOS ATERROS**

### **3.1 ATERROS SANITÁRIOS**

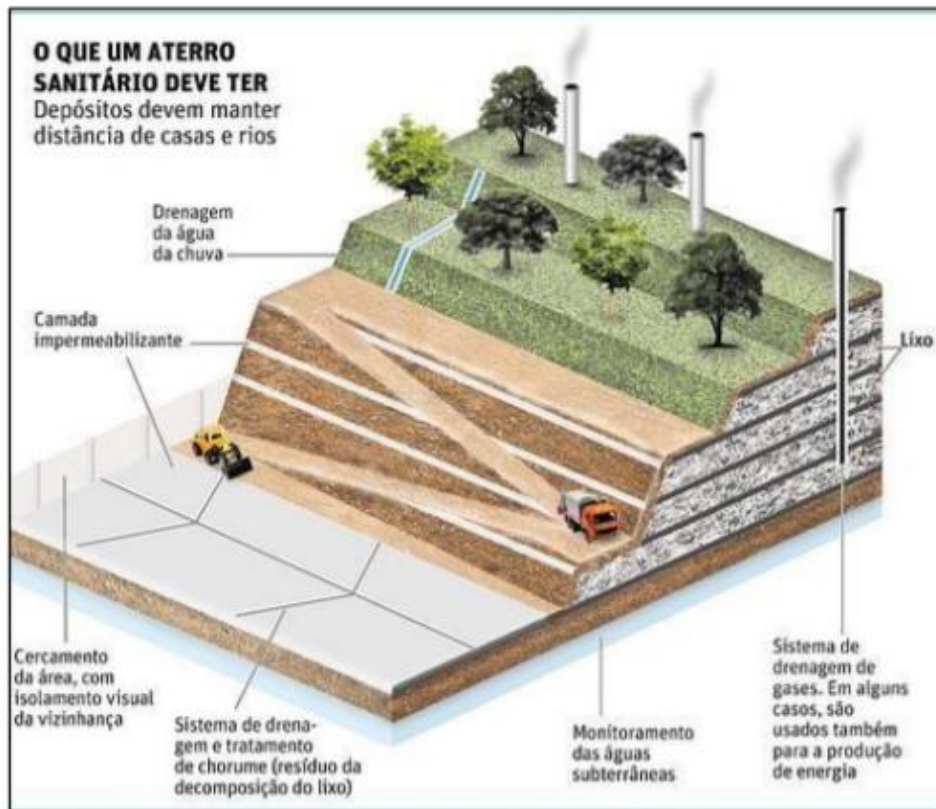
O aterro sanitário é um aprimoramento do aterramento que é uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para descartes de resíduos (SANTOS, 2015). Atualmente, o aterro sanitário é considerado a forma mais segura e eficiente para disposição dos RSU, que tem por objetivo acomodar no solo resíduos no menor espaço possível, causando o mínimo dano à saúde pública e um menor impacto ao meio ambiente. De acordo com a CETESB (2015), essa técnica se dá pela compactação dos resíduos no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte. Um aterro de resíduos sólidos pode ser comparado a um reator biológico, em que se tem a entrada de resíduos sólidos e água e as principais saídas são os gases e o chorume (MMA, 2014).

#### **3.1.1 Construção e Operação dos Aterros Sanitários**

A operação de um aterro sanitário envolve o atendimento à prática de compactação dos resíduos sólidos; como o recobrimento diário dos resíduos sólidos com argila compactada, manutenção de acessos, manutenção das instalações e equipamentos, programa de monitoramento de águas subterrâneas, análises dos resíduos e conformidade com as normas ABNT NBR 15849:2010 e ABNT NBR 13896:1997 que são diretrizes e critérios para localização, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários, afim de que não haja o risco de disposição inadequada de resíduos perigosos no aterro sanitário, ou a incompatibilidade entre resíduos aterrados (BARROS, 2013).

Os aterros sanitários são construídos com técnicas de disposição de resíduos, que garantem a coleta e o tratamento de gases de chorume, mediante técnicas de impermeabilização das áreas que receberão os resíduos, a fim de proteger o solo e as águas subterrâneas e superficiais do seu entorno (ECOURBIS, 2020). A Figura 9 apresenta o funcionamento de um aterro sanitário.





**Figura 9:** Esquema de Funcionamento de Aterro Sanitário.

**Fonte:** Ecourbis, 2020.

A operação de um aterro sanitário deve ser procedida do processo de seleção de áreas, licenciamento, projeto executivo e implantação.

Segundo Monteiro et al (2001), um aterro sanitário deve contar necessariamente com os dois grupos de unidades; que são as unidades operacionais e as unidades de apoio, apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3:** Unidades necessárias em Aterros Sanitários.

| Unidades Operacionais | Unidades de Apoio |
|-----------------------|-------------------|
|-----------------------|-------------------|

|   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Células de RSU domiciliares</li> <li>• Impermeabilização de fundo e superior</li> <li>• Sistema de coleta e tratamento dos líquidos percolados (chorume)</li> <li>• Sistema de coleta e queima (ou beneficiamento) do biogás;</li> <li>• Sistema de drenagem e afastamento das águas pluviais;</li> <li>• Sistema de monitoramento ambiental, topográfico e geotécnico;</li> <li>• Pátio de estocagem de materiais.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cerca e barreira vegetal</li> <li>• Estradas de acesso e de serviço</li> <li>• Balança rodoviária e sistema de controle de resíduos</li> <li>• Guarita de entrada e prédio administrativo</li> <li>• Oficina e borracharia.</li> </ul> |
|---|---|

**Fonte:** adaptado de (MONTEIRO, 2001).

Para que uma área seja escolhida para a implantação de aterros sanitários não é nada fácil, tendo em vista a quantidade de requisitos necessários. De acordo com Barros (2013), para que uma área seja utilizada para a construção de um aterro sanitário deve-se atentar aos seguintes requisitos normativos conforme ABNT (1997; 2010):

- Local de construção com declividade entre 1 e 30%;
- Solo de coeficiente de permeabilidade menor que  $10^{-6}$  (cm/s);
- Espessura da zona saturada maior que 3 (m);
- Distância mínima de 200 (m) entre o aterro sanitário e qualquer recurso hídrico passível de ser afetado;
- Poços de monitoramento (1 a montante e três a jusante) da qualidade da água subterrânea;
- Distância mínima de 500(m) de quaisquer núcleos residenciais.

Os aterros sanitários podem ser classificados com relação ao método de operação utilizado, sendo os mais utilizados; método da trincheira, método da escavação progressiva e método da área ou aterro do tipo superficial (BIDONE e POVINELLI, 1999). Ainda segundo os autores, o método da trincheira é indicado quando a produção diária de resíduos não ultrapassa 10 toneladas, sendo considerado um método propício para pequenas comunidades, podendo ser aplicado em grandes comunidades quando a estrutura local se adequa mais a esse modelo. Para a aplicação desse método, é necessário que o terreno seja plano ou pouco

inclinado e onde o lençol freático seja situado a uma profundidade superior em relação a superfície (MONTEIRO et al., 2001).

O segundo método, método da escavação progressiva, é utilizado em áreas de encostas, aproveitando o material escavado do próprio local para cobertura do RSU ali depositado. Para esse método, deposita-se um volume de RSU no solo, posteriormente este é compactado por um trator de esteiras em várias camadas, que varia entre 3 m e 4 m de altura; em seguida, o trator escora, na parte oposta da operação, o material para a cobertura do RSU compactado, formando as células sanitárias (BIDONE e POVINELLI, 1999). Para a terceira técnica, método da área ou aterro do tipo superficial, forma-se uma elevação tranco-piramidal através do descarregamento e compactação dos resíduos. Essa técnica foi muito utilizada em grandes centros, pois estes não disponibilizavam de grandes áreas para esse fim (BIDONE E POVINELLI, 1999).

Segundo Monteiro (2001), os critérios utilizados para a escolha de um local para área de aterro, são divididos em três grupos: técnico, econômico-financeiro e político-social. A Tabela 4 apresenta esses critérios.

Tabela 4 – Critérios para escolha do local de aterro.

|                | Critério                                   | Observação  |
|----------------|--|---|
| <b>Técnico</b> | Uso do solo                                | As áreas têm que se localizar numa região onde o uso do solo seja rural (agrícola) ou industrial e fora de qualquer Unidade de Conservação Ambiental.   |
|                | Proximidade a cursos d'água relevantes     | As áreas não podem se situar a menos de 200 metros de corpos d'água relevantes, tais como, rios, lagos, lagoas e oceano. Também não poderão estar a menos de 50 metros de qualquer corpo d'água, inclusive valas de drenagem que pertençam ao sistema de drenagem municipal ou estadual.  |
|                | Proximidade a núcleos residenciais urbanos | As áreas não devem se situar a menos de mil metros de núcleos residenciais urbanos que abriguem 200 ou mais habitantes.   |
|                | Proximidade a aeroportos                   | As áreas não podem se situar próximas a aeroportos ou aeródromos e devem respeitar a legislação em vigor.   |
|                | Distância do lençol freático               | As distâncias mínimas recomendadas pelas normas federais e estaduais são as seguintes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para aterros com impermeabilização inferior através de manta plástica sintética, a distância do lençol freático à manta não poderá ser inferior a 1,5 metro.</li> <li>• Para aterros com impermeabilização inferior através de camada de argila, a distância do lençol freático à camada impermeabilizante não poderá ser inferior a 2,5 metros e a camada impermeabilizante deverá ter um coeficiente de permeabilidade menor que <math>10^{-6}</math>cm/s.</li> </ul> |
|                | Vida útil mínima                           | É desejável que as novas áreas de aterro sanitário tenham, no mínimo, cinco ou dez anos de vida útil.   |
|                | Permeabilidade do solo natural             | É desejável que o solo do terreno selecionado tenha uma certa impermeabilidade natural, com vistas a reduzir as possibilidades de contaminação do aquífero. As áreas selecionadas devem ter características argilosas e jamais deverão ser arenosas.  |

Tabela 4 – Critérios para escolha do local de aterro.

|                              | <b>Critério</b>                                      | <b>Observação</b>  |
|------------------------------|--|--|
|                              | Extensão da bacia de drenagem                        | A bacia de drenagem das águas pluviais deve ser pequena, de modo a evitar o ingresso de grandes volumes de água de chuva na área do aterro.  |
|                              | Facilidade de acesso a veículos pesados              | O acesso ao terreno deve ter pavimentação de boa qualidade, sem rampas íngremes e sem curvas acentuadas, de forma a minimizar o desgaste dos veículos coletores e permitir seu livre acesso ao local de vazamento mesmo na época de chuvas muito intensas. |
|                              | Disponibilidade de material de cobertura             | Preferencialmente, o terreno deve possuir ou se situar próximo a jazidas de material de cobertura, de modo a assegurar a permanente cobertura dos RSUs a baixo custo.  |
| <b>Econômico- Financeiro</b> | Distância ao centro geométrico de coleta             | É desejável que o percurso de ida (ou de volta) que os veículos de coleta fazem até o aterro, através das ruas e estradas existentes, seja o menor possível, com vistas a reduzir o seu desgaste e o custo de transporte dos RSUs.                         |
|                              | Custo de aquisição do terreno                        | Se o terreno não for de propriedade da prefeitura, deverá estar, preferencialmente, em área rural, uma vez que o seu custo de aquisição será menor do que o de terrenos situados em áreas industriais.   |
|                              | Custo de investimento em construção e infraestrutura | É importante que a área escolhida disponha de infraestrutura completa, reduzindo os gastos de investimento em abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos, drenagem de águas pluviais, distribuição de energia elétrica e telefonia.             |
|                              | Custos com a manutenção do sistema de drenagem       | A área escolhida deve ter um relevo suave, de modo a minimizar a erosão do solo e reduzir os gastos com a limpeza e manutenção dos componentes do sistema de drenagem.   |

Tabela 4 – Critérios para escolha do local de aterro.

|                        | <b>Critério</b>   | <b>Observação</b>  |
|------------------------|---|--|
| <b>Político-Social</b> | Distância de núcleos urbanos de baixa renda                   | Aterros são locais que atraem pessoas desempregadas, de baixa renda ou sem outra qualificação profissional, que buscam a catação dos RSUs como forma de sobrevivência. Tais pessoas passam a viver desse tipo de trabalho em condições insalubres, gerando, para a prefeitura, uma série de responsabilidades sociais e políticas. Por isso, caso a nova área se localize próxima a núcleos urbanos de baixa renda, deverão ser criados mecanismos alternativos de geração de emprego e/ou renda que minimizem as pressões sobre a administração do aterro em busca da oportunidade de catação. Entre tais mecanismos, poderão estar iniciativas de incentivo à formação de cooperativas de catadores. Os catadores podem trabalhar em instalações de reciclagem dentro do próprio aterro ou mesmo nas ruas da cidade, de forma organizada, fiscalizada e incentivada pela prefeitura. |
|                        | Acesso à área através de vias com baixa densidade de ocupação | O tráfego de veículos transportando RSUs é um transtorno para os moradores das ruas por onde estes veículos passam, sendo desejável que o acesso à área do aterro passe por locais de baixa densidade demográfica.   |
|                        | Inexistência de problemas com a comunidade local              | É desejável que, nas proximidades da área selecionada, não tenha havido nenhum tipo de problema da prefeitura com a comunidade local, com organizações não-governamentais (ONG's) e com a mídia, pois esta indisposição com o poder público irá gerar reações negativas à instalação do aterro.  |

Fonte: adaptado de MONTEIRO(2001).

O aterro sanitário é uma técnica de disposição final de RSU ambientalmente correta, visto que possui uma série de critérios para implementação, sistemas de impermeabilização do solo, sistema de coleta e tratamento de lixiviado, além de possuir um sistema de coleta e queima de gás.

Segundo Barros (2013), as normas ABNT (1997; 2010) mencionam que a área do terreno deve continuar a ser avaliada pelo sistema de monitoramento de águas subterrâneas e

gases drenados, pois mesmo após o término de vida útil do aterro ainda há ocorrência de atividades microbianas.

### **3.1.2 Aterros sanitários que fazem aproveitamento energético do Biogás no País**

No Brasil, até o ano de 2016, foram registrados na Convenção Quadro das Nações Unidas (UNFCCC, em inglês) 30 projetos de usinas de aproveitamento energético do gás de aterro sanitário (UNFCCC,2020), com um potencial de geração de 286,04 MW.

Os projetos pioneiros no Brasil de usina de geração de energia elétrica de biogás de aterro sanitário, foram instalados em 2004 no aterro Bandeirantes, em São Paulo (SILVA,2006), e o aterro sanitário Nova Gerar, em Nova Iguaçu (RJ) (NASCIMENTO et al, 2019). E em 2008 no aterro São João, em São Paulo, que gera o equivalente a 7% da energia consumida na cidade (NASCIMENTO, *et al*, 2019).

No ano de 2011, começa a funcionar sob responsabilidade do Consórcio Horizonte ASJA, a usina termoelétrica de biogás da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 em Belo Horizonte (NASCIMENTO et al., 2019). E também nesse mesmo ano, foi implantada a primeira termoelétrica de biogás de aterro sanitário do Nordeste, a usina Termoverde Salvador, operada pelo Grupo Solvi no aterro Metropolitano Centro - AMC, com uma potência instalada de 19,73 MW (TERMOVERDE SALVADOR, 2019).

Desde 2015, a central de Resíduos do Recreio (CRR), que opera na cidade de Minas do Leão pela empresa Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos - CRVR, gera eletricidade a partir do biogás, sendo a primeira no estado do Rio Grande do Sul (CETESB, 2015).

Dos 30 projetos registrados para geração de energia elétrica pela UNFCCC, apenas sete foram implementados. A Tabela 5 apresenta essa relação, que juntos geram um total de 56,1 MW, sendo esses: Centrais de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS) BR 040 e Uberlândia I/II em Minas Gerais; Bandeirantes e Sítio São João e Guatapé, em São Paulo; e Canhanduba, em Santa Catarina; porém, somente três obtiveram o Reduções Certificadas de Emissões (RCE) (NASCIMENTO et al., 2019).

Tabela 5 – Projetos Registrados no UNFCCC para aproveitamento energético de biogás.

| Região        | UF                              | Aterro de resíduos                        | Município           | Nº UNFCCC/ano           | Início de obtenção de crédito | Potência Máxima (MW) | Status em 2015 (UNFCCC)                  |                          |
|---------------|---------------------------------|---|---------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------|--|--------------------------|
| Sudeste       | ES                              | AS da Marca                               | Cariacica           | 0137/2006               | 01/07/2004                    | 11,0                 | CER(2004 a 2011/queimada)                |                          |
|               | MG                              | CTRS/BR-040                               | Belo Horizonte      | 3464/2011               | 04/06/2011                    | 4,5                  | CER (2011/energia)                       |                          |
|               |                                 | berlândia I e II                          | Uberlândia          | 7110/2012               | 01/08/2012                    | 2,8                  | Registrado                               |                          |
|               |                                 | Macaúbas                                  | Sabará              | 4311/2012               | 01/01/2013                    | 12,8                 | Retirada de projeto                      |                          |
|               |                                 | <b>Total do Estado de Minas Gerais</b>    | <b>3 Projetos</b>   |                         |                               |                      | <b>20,1</b>                              |                          |
|               | RJ                              | Nova Gerar                                | Nova Iguaçu         | 0008/2004               | 01/07/2004                    | 12,5                 | 8 CER (2004 a 2014/queima)               |                          |
|               |                                 | CTR Santa Rosa                            | Seropédica          | 6573/2012               | 22/07/2010                    | 25,5                 | 1 CER (2012 a 2013/queima)               |                          |
|               |                                 | Gramacho                                  | Duque de Caxias     | 9087/2012               | 01/01/2013                    | 8.900 <sup>2</sup>   | Registrado                               |                          |
|               |                                 | ESTRE Itaboraí                            | Itaboraí            | 408/2012                | 01/07/2013                    | 27,0                 | Registro em validação                    |                          |
|               |                                 | <b>Total do Estado do Rio de Janeiro</b>  | <b>4 Projetos</b>   |                         |                               |                      | <b>65,0</b>                              |                          |
|               | SP                              | Bandeirantes                              | São Paulo           | 0164/2006               | 22/05/2007                    | 22,2                 | CER (2010 a 2012/energia)                |                          |
|               |                                 | Sítio São João                            | São Paulo           | 0373/2006               | 01/01/2006                    | 20,0                 | CER(2007 a 2012/energia)                 |                          |
|               |                                 | CGR Tremembé                              | Tremembé            | 0027/2005               | 01/01/2003                    | -                    | CER (2003 a 2007/ evaporação de chorume) |                          |
|               |                                 | CTL São Paulo                             | São Paulo           | 5947/2012               | 01/07/2012                    | 19,2                 | CER (2013 a 2014/queima)                 |                          |
|               |                                 | Lara                                      | Mauá                | 0091/2006               | 15/09/2006                    | 11,0                 | CER (2006 a 2009/ queima)                |                          |
|               |                                 | Constroeste                               | Onda Verde          | 8603/2012               | 01/01/2013                    | 7,2                  | Registrado                               |                          |
|               |                                 | ESTRE Piratininga                         | Piratininga         | 8213/2012               | 01/01/2014                    | 6,0                  | Registrado                               |                          |
|               |                                 | Guatapará                                 | Guatapará           | 6553/2012               | 18/07/2012                    | 5,5                  | Registrado                               |                          |
|               |                                 | Proactiva: CGA Iperó                      | Iperó               | 8751/2012               | 01/09/2013                    | 8,5                  | Registrado                               |                          |
|               |                                 | TECIPAR- Engenharia e Meio Ambiente Ltda. | Santana de Parnaíba | 7799/2012               | 01/01/2009                    | 6,5                  | Registrado                               |                          |
|               |                                 | CGR Catanduva                             | Catanduva           | 385/2012                | 01/01/2013                    | 4,5                  | Registro em Validação                    |                          |
|               |                                 | Corpus/Araúna                             | Indaiatuba          | 287/2010                | 01/05/2010                    | Inexistente          | Registro em Validação                    |                          |
|               |                                 | <b>Total do Estado de São Paulo</b>       | <b>12 Projetos</b>  |                         |                               |                      | <b>110,6</b>                             |                          |
|               | <b>Total</b>                    | <b>Total da Região Sudeste</b>            | <b>20 Projetos</b>  |                         |                               |                      | <b>206,2</b>                             |                          |
|               | Nordeste                        | BA  | Feira de Santana    | Feira de Santana        | 1626/2008                     | 12/07/2008           | -  | Registrado               |
|               |                                 | PE  | CTR Candeias        | Jaboatão dos Guararapes | 3958/2011                     | 29/09/2011           | 8,5                                      | CER (2011 a 2014/queima) |
|               |                                 | MA  | Rosário             | Rosário                 | 8242/2013                     | 01/01/2004           | 5,7                                      | Registrado               |
| RN            |                                 | Natal                                     | Ceara- Mirim        | 7637/2012               | 01/12/2012                    | 4,2                  | Registrado                               |                          |
| AL            |                                 | CTR Maceió                                | Maceió              | 409/2012                | 01/07/2013                    | 10,5                 | Registro em Validação                    |                          |
| PE            |                                 | CTR/PE LCarbon                            | Igarassu            | Sem registro            | 01/09/2012                    | 11,2                 | Registro em Validação                    |                          |
| PI            |                                 | CTR Teresina                              | Teresina            | 412/2012                | 01/01/2014                    | 4,5                  | Registro em Validação                    |                          |
| SE            |                                 | ESTRE Aracajú                             | Rosário do Catete   | 410/2012                | 01/01/2014                    | 4,5                  | Registro em Validação                    |                          |
| <b>TOT AL</b> | <b>Total da Região Nordeste</b> | <b>8 projetos</b>                         |                     |                         |                               | <b>49,1</b>          |  |                          |
| Sul           | SC                              | Canhanduba                                | Itajaí              | 9943/2014               | 01/07/2014                    | 1,1                  | Registrado                               |                          |
|               | PR                              | ESTRE Iguaçu                              | Fazenda Rio Grande  | 411/2012                | 01/07/2013                    | 10,5                 | Registro em Validação                    |                          |
|               | <b>Total</b>                    | <b>Total da Região Sul</b>                | <b>2 projetos</b>   |                         |                               |                      | <b>11,6</b>                              |                          |
| Norte         | AM                              | Manaus                                    | Manaus              | 4211/2011               | 08/07/2011                    | 19,2                 | 5CER (2011 a 2014/queima)                |                          |
|               |                                 | <b>Total Brasil</b>                       | <b>31 projetos</b>  |                         |                               |                      | <b>286,1</b>                             |                          |

Fonte: (NASCIMENTO et al., 2019).



## **3.2 USINA DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO**

O biogás pode ser definido, de forma simplificada, como uma das inúmeras formas de fixação da energia proveniente do Sol na forma química, disponível por intermédio de uma queima. É proveniente da degradação química de organismos mortos ou de excreções, por meio da ação de microrganismos decompositores anaeróbios, que agem como catalisadores das reações de formação do biogás (PIEROBON, 2007).

A composição típica do biogás é aproximadamente 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio. Porém, dependendo da eficiência do processo, induzida por fatores como carga orgânica, pressão e temperatura durante o processo de fermentação, o biogás pode conter entre 40% a 80% de metano (COELHO, et al, 2006).

### **3.2.1 Biogás de Aterro Sanitário**

A disposição de resíduos no aterro sanitário faz que ocorra a digestão anaeróbia, com uma grande diversidade de microrganismos que incluem bactérias hidrolíticas e fermentativas, acidogênicas, acetogênicas e arqueas metanogênicas, além de BRS e protozoários (CASTILHOS JR et al., 2003).

De acordo com Barros (2013), a produção de gases em um aterro sanitário passa por quatro fases. A fase aeróbica é a primeira fase, ocorre imediatamente após a disposição dos resíduos no solo; nesse processo, acontece a decomposição aeróbia com consumo de oxigênio dos resíduos, resultando na produção de dióxido de carbono, água e calor, sendo que essa fase pode durar de horas até semanas. Na fase seguinte, fase anaeróbia não metanogênica, a atividade anaeróbia é predominante, são formados compostos ácidos e gás hidrogênio e também há a produção de dióxido de carbono, sendo esse processo pode durar entre 1 a 6 meses. A terceira fase é a fase anaeróbia metanogênica instável, durante esse processo aumenta a concentração de  $\text{CH}_4$  com um valor final constante e há uma diminuição da produção de dióxido de carbono, devido a mudança da decomposição aeróbia para a decomposição anaeróbia, resultando em produção de água, calor e metano, podendo durar de 3 meses a 3 anos. Durante a quarta fase, anaeróbia metanogênica estável, a decomposição dos gases e as taxas de produção se mantêm estáveis, pode-se ocorrer algumas variações na produção do gás em decorrente de variações ambientais ou variações de longo prazo, como esgotamento de nutrientes e concentração de substâncias inibitórias, sendo que esse processo pode durar de 8 a 40 anos (BANCO MUNDIAL, 2004).

O Banco Mundial (2004) registra uma quinta fase, chamada de fase metanogênica decrescente, em que a produção de metano vai diminuindo, que pode durar até 40 anos, resultando em tempo total de geração de biogás de aproximadamente 80 anos.

A produção do metano em aterro sanitário está intimamente ligada com a composição dos resíduos, a presença de componentes orgânicos degradáveis, teor de umidade, a idade do resíduo, o pH e a temperatura (MACHADO et al., 2009).

Os principais estudos realizados pelo país sobre potencial de geração de energia elétrica nos aterros sanitários foram impulsionados pela criação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) registrando projetos que visam à reduzir os GEE (NASCIMENTO et al, 2019).

O Brasil é um dos países com maior experiência com projetos de transformação de biogás em energia (ABREU, 2009). São crescentes nos últimos anos, os números de projetos em funcionamento ou em implantação, incluindo projetos desenvolvidos sob o MDL.

### **3.2.2 Implantação de uma Usina**

De acordo com Santos (2015), existem alguns componentes básicos para a implementação de uma usina de aproveitamento energético em aterros sanitários, sendo estes; queimador, gasômetro, compressor, tubulação, drenos, unidade de tratamento e componente de conversão energética:

- Queimador: utilizado para a combustão dos gases excedentes que não forem aproveitados para geração de energia;
- Gasômetro: utilizado para o armazenamento, sendo necessário seu armazenamento para possíveis manutenções nos equipamentos de geração de energia e para regularização da vazão de gás, que permite a operação da usina com uma geração energética o mais constante possível;
- Compressor: utilizado para coleta do gás, para o caso de um sistema ativo de coleta, e para o bombeamento do gás pela tubulação correta;
- Tubulação: utilizada para a coleta e transporte do biogás do aterro sanitário a usina;
- Drenos: utilizados para realizar a coleta do gás, são geralmente dispostos a cada 50 metros de distância. O número de drenos pode ser calculado pela equação 1, onde  $A_A$  é a área do aterro e  $r$  é o raio de abrangência do dreno, normalmente igual a 25m.

$$N_D = \frac{A_A}{\pi r^2} \quad (1)$$

- Unidade de tratamento do biogás: utilizada para a remoção de impurezas como H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> e ampliação do teor de metano (CH<sub>4</sub>) do biogás, elevando seu poder calorífico e também diminuindo os riscos de problemas em equipamentos da usina.
- Componente para a conversão energética: utilizado para a combustão e geração de energia a partir do biogás. Segundo COELHO et al. (2006), existem diversas tecnologias para a conversão energética do biogás; porém, as mais comuns são os motores de combustão interna e as turbinas a gás.

### 3.2.3 Sistemas de coleta e tratamento do Biogás de Aterro

De acordo com a CETESB (2006), para o aproveitamento do biogás de aterro são necessários três processos básicos: sistemas de coleta de gás ou de queima alternativa de *flare*, sistema de tratamento de gás e um sistema de geração e recuperação energética.

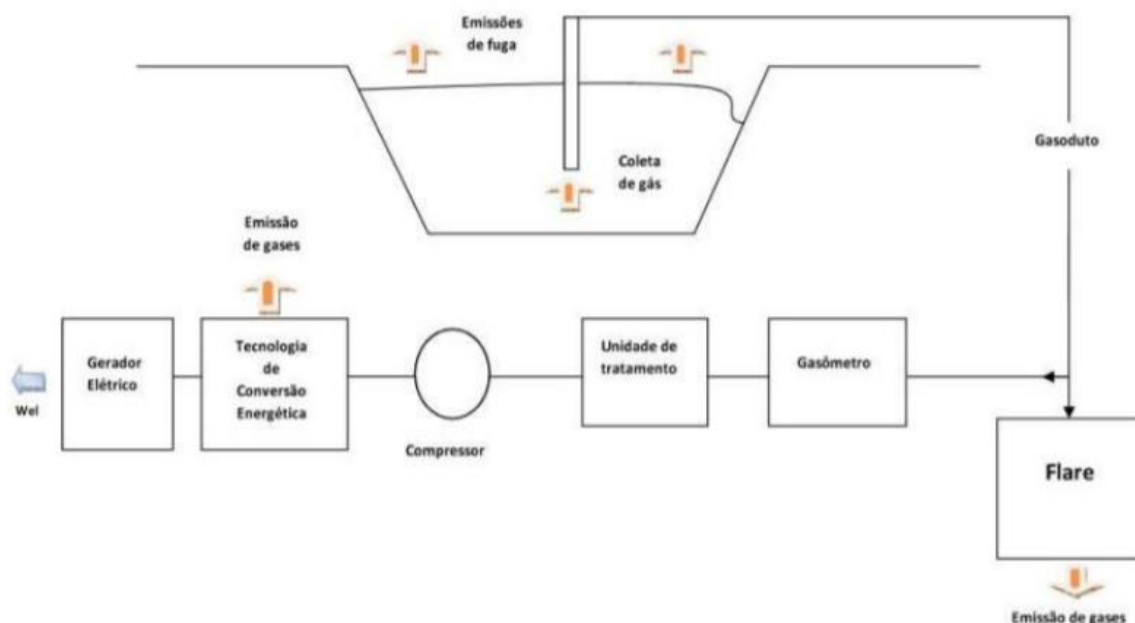
Um sistema padrão de coleta possui poços de coleta, tubos condutores, um sistema de tratamento e um compressor. O sistema de coleta do biogás é constituído por drenos horizontais e verticais, sopradores, filtros para remoção de material particulado e tanques separadores de condensado (MONTAGNA, 2016). A coleta do gás se dá por meio do sistema de coleta, que é conectada a uma tubulação lateral que transporta o gás até um coletor principal (CETESB, 2006).

O sistema de tratamento de condensado é uma parte importante de todo sistema, o gás produzido, normalmente entre 40°C e 50° C no ponto de saída dos drenos (MONTAGNA,2016), percorre os tubos e se resfria formando um condensado. Esse condensado deverá posteriormente ser removido para que não haja o bloqueio do sistema de coleta e assim, interrupção do processo de geração de energia (CETESB, 2006). Para esse processo de remoção, encaminha-se o gás a um tanque separador de líquidos denominado desumidificador, que têm a finalidade de separar eventuais gotículas de líquidos contidos no biogás (REZENDE, 2016). Essa fase líquida deverá ser drenada por gravidade para um tanque de coleta de condensado e depois ser bombeado para o sistema de coleta de chorume para ser tratado (BORGES, 2008).

O compressor é necessário para sucção do gás dos poços de coleta, e também pode ser indispensável para comprimir o gás antes de entrar no sistema de recuperação energética (CETESB, 2006).

O biogás produzido necessita de um tratamento para sua utilização. Durante a sua extração ele passa por um filtro, para que haja a remoção de material particulado que esteja no meio do gás (ALMEIDA, 2016). Após ser coletado e antes do uso no processo de conversão de energia, o gás deverá ser tratado para remover algum particulado, impurezas e algum condensado não coletado. Para esse processo utiliza-se uma sequência de filtros para a remoção de impurezas que podem danificar os componentes do motor ou turbina, e reduzir a eficiência do sistema (CETESB, 2006). O biogás, já isento de partículas sólidas e de gotículas líquidas, passa então pelo soprador e é encaminhado para a queima controlada no *flare* e/ou para outros sistemas de aproveitamento energético. A vazão de biogás é controlada por uma válvula borboleta e indiretamente por um inversor de frequência acoplado ao motor do soprador, o qual é acionado por um transmissor de pressão, instalado na linha de sucção. O soprador tem a finalidade de succionar o biogás do interior do aterro (DOS SANTOS, 2011; VICENTE, 2011; MARTINS, 2012).

O sistema de geração ou recuperação energética faz-se necessário para a conversão energética do biogás em alguma forma útil de energia, como eletricidade, vapor ou combustível (CETESB, 2006). Os resíduos que sobram da queima do biogás, são uma substância com aspecto de lodo que contem água, sais minerais e microrganismos, que pode ser utilizada como fertilizantes (ALMEIDA, 2016). A Figura 10 apresenta uma representação esquemática de uma usina de aproveitamento energético de energia elétrica de aterro sanitário.



**Figura 10:** Esquema de usina de aproveitamento energético de energia elétrica de aterro sanitário.

**Fonte:** (Santos et al., 2015).

De acordo com a CETESB (2006), além dos componentes citados, também podem ser acrescentados dois outros componentes de suma importância. O gasômetro é utilizado para armazenar diferentes volumes de combustível, sendo que esse armazenamento se faz necessário para realizar manutenções nos equipamentos de geração de energia. E o queimador, que permite a queima controlada de biogás não aproveitado na geração de energia elétrica.

### 3.2.4 Conversão energética do Biogás de Aterro.

O biogás é uma mistura gasosa e abundante em metano, sendo esse componente predominante no gás natural combustível (CENBIO, 2001). O potencial energético do biogás varia conforme a quantidade de metano em sua composição, quanto mais metano mais rico é o biogás. O volume está diretamente relacionado com sua origem: em aterros sanitários, a proporção de metano é, em média, de 50% e quando é gerado em reatores anaeróbios de efluentes, a concentração média é mais elevada, atingindo 65% (CENBIO, 2001).

O processo que transforma um tipo de energia em outro é definida como conversão energética. Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. Para a sua conversão, a energia química contida em suas moléculas é transformada em energia térmica, que pode ser convertida em energia mecânica pelo processo de combustão controlada (relação

da mistura entre ar e combustível). Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica (COSTA, 2006). Apesar de existirem diversas tecnologias para a conversão energética do biogás, as mais comuns são: motores de combustão interna (MCI) e turbina a gás (COELHO et al., 2006). A Tabela 6 apresenta as vantagens e desvantagens na utilização das principais tecnologias de conversão energética.

**Tabela 6 – Vantagens e Desvantagens na utilização das principais tecnologias de conversão energética.**

| <b>Tecnologia</b>         | <b>Vantagens</b>   | <b>Desvantagens</b>   |
|---------------------------|--|---|
| Motor a combustão Interna | Baixo custo de manutenção;<br>Pequeno tamanho de instalação;<br>Rápida Instalação;<br>Modularidade do sistema;<br>Diversidade de fornecedores de equipamentos. | Limitação de potência   |
| Turbina a Gás             | Eficiência em carga total e parcial;<br>Sem formação de condensados;<br>Maior confiabilidade mecânica;<br>Combustão mais completa.                             | Investimento inicial elevado;<br>Maior sensibilidade a partículas e impurezas |

**Fonte:** (MMA, 2005).

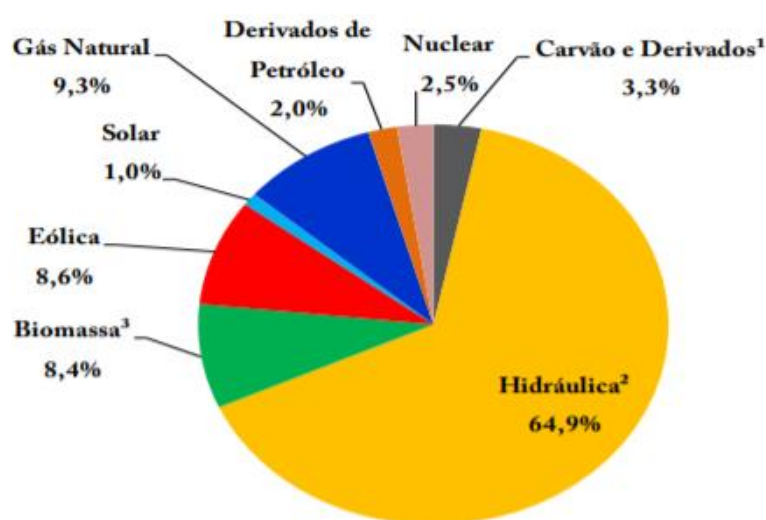
As turbinas a gás são divididas por faixa de potência de até 100kW (microturbina) a poucas centenas de kW e até quase 300 MW (turbinas de médio e grande porte). Elas funcionam sob alta pressão injetando ar comprimido em uma câmara de combustão provendo o sistema do oxigênio necessário para a queima. O gás resultante pressiona um compressor e um gerador. Sua eficiência está relacionada a quanto maior a temperatura e pressão de entrada e menor for a temperatura de exaustão, maior será a eficiência (SANTOS, 2009).

Os MCI podem funcionar por meio dos Ciclos Diesel ou Otto e geram energia elétrica pela conexão de um gerador ao motor (SANTOS, 2009). Basicamente, o que difere o motor Ciclo Diesel e Ciclo Otto é a forma como ocorre a combustão. No Ciclo Diesel, a combustão ocorre pela compressão do combustível na câmara de combustão, enquanto no ciclo Otto, a combustão ocorre pela explosão do combustível por meio de uma faísca na câmara de combustão (COSTA, 2006).

### 3.2.5 Demanda

No Brasil, ainda tem-se um número reduzido de aterros sanitários utilizados para recuperação do biogás, um dos fatores que contribuem para que essa fonte de energia não seja tão explorada é devido a matriz energética estar fundamentada na energia hídrica e não há tantos incentivos para novas formas de geração de energia elétrica quanto para essa forma de geração (ARCADIS, 2010), embora entre os anos de 2010 e 2019 tenha havido uma redução de 1,34% na produção de energia de fonte hidráulica, conforme o BEN (2020).

De acordo com o BEN (2020), a oferta de energia elétrica é caracterizada principalmente por fonte hidráulica, que responde a 64,9% da oferta interna de energia elétrica, enquanto que as fontes renováveis caracterizam 82,9% de toda oferta interna, como ilustra a Figura 11.



**Figura 11:** Fontes Renováveis da Matriz Elétrica Brasileira.

**Fonte:** (BEN, 2020).

De acordo com o PNE 2050, é esperado, até o ano de 2050, uma matriz elétrica sem emissões de GEE, ou seja, uma matriz elétrica 100% renovável, sendo obtida através do impedimento da expansão de UTEs a combustíveis fósseis, e permitindo a expansão de qualquer tecnologia de geração que não produza emissões (MME, 2020). O aproveitamento energético de RSU em função das externalidades positivas oriundas dessa fonte de geração foi indicado a partir de política energética uma entrada de entre os anos de 2020 a 2050 de 20 a 40 MW/ano de plantas termelétricas a partir de RSU (MME,2020).

### 3.2.6 Mercado

No Brasil, a principal forma de contratação de energia elétrica, acontece por meio de leilões. Sendo assim, as concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica garantem o atendimento ao Ambiente de Contratação Regulada (CCEE, 2018). Os leilões são realizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), por delegação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que é a autarquia vinculada ao MME responsável por regular e fiscalizar a geração, distribuição, transmissão e comercialização de energia (CCEE, 2018). Os leilões de energia e a execução do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), um dos maiores programas de incentivo à energia renovável executado no país, são uma das maiores ações desenvolvidas pelo MME para incentivar a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis (ALMEIDA, 2016).

A micro e mini geração distribuída consiste na produção de energia elétrica que vem de pequenas fontes de geração de energia, com base em fontes renováveis como energia solar, energia hidráulica, energia eólica, biomassa ou cogeração qualificada conectada à rede de distribuição (ANEEL, 2014). Dessa forma, a geração distribuída permite a construção de pequenas fontes de geração de energia elétrica próximas ao consumidor, reduzindo custos na geração e transmissão de eletricidade, pois a energia é gerada próximo ao local de consumo (MATHIAS et al, 2015).

A ANEEL, por meio da Resolução Normativa nº482/2012, foi responsável por uma nova classe de consumidores/geradores conhecidos como a micro e mini geração distribuída (GD) (BRASIL, 2012). A Resolução Normativa 687/2015 (ANEEL, 2012) trouxe algumas mudanças ao que foi estabelecido na resolução normativa 482/2012. De acordo com as novas regras, a microgeração distribuída define-se como uma central geradora de energia elétrica que apresenta potência instalada menor ou igual a 75 kW. É considerada minigeração distribuída, uma central geradora com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3MW, para fontes híbridas, ou menor ou igual a 5MW, para cogeração qualificada para as demais fontes de energia elétrica conectadas a rede de distribuição (ANEEL, 2015).

A resolução normativa 786/2017 (ANEEL, 2017) trouxe também algumas alterações na Resolução normativa 482/2012, pois a potência instalada de fontes renováveis considerada para minigeração distribuída deve ser superior a 75kW e menor ou igual a 5MW para todas as fontes. Uma outra alteração significativa feita pela supracitada resolução é que ficaram impedidos como



microgeração ou minigeração distribuída, as centrais geradoras que já tenham sido objeto de registro, concessão, permissão ou autorização, ou tenham entrado em operação comercial ou tenham tido sua energia elétrica contabilizada no âmbito da CCEE (ANEEL, 2017).

Em fevereiro de 2018, foi publicada pelo MME a Portaria MME nº 65/2018, em que foram estabelecidos os novos valores anuais de referência específicos (VRES), para os sistemas de geração distribuída. No âmbito da Lei 10.848/2004, conforme Portaria 65/2018, biomassa e biogás passaram a ter os seguintes valores anuais de referência específicos: biomassa residual, R\$ 349,00/MWh; biogás, R\$ 390,00/MWh; e biomassa dedicada, R\$ 537,00/ MWh (PPGEU, 2020).

### **3.2.7 Regulamentação**

Para a geração de energia elétrica gerada a partir do biogás de RSU, existe um mercado onde operam diversos agentes sob influência de regulação específica - ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e ANP (Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustível).

Apesar dos agentes regulatórios, ainda há aspectos que podem causar grandes conflitos, como por exemplo, a Resolução ANP nº 8/2015, que trata da especificação do biometano, proíbe a utilização comercial do produto originado de resíduos sólidos urbanos ou do esgotamento sanitário e permite o uso apenas de resíduos orgânicos de atividades da agroindústria. Desse modo, limitando o comércio do produto e causando um problema regulatório entre Estado e União, visto que existem legislações anteriores, como a Lei nº 6.361/2012, que permite o uso do biometano compatível com Gás Natural Renovável (GNR) no estado do Rio de Janeiro. A ANP esclarece que as limitações acontecem pois o gás natural proveniente de aterros sanitários e tratamento de esgotos podem conter compostos voláteis (siloxanos), que são contaminantes e podem afetar negativamente alguns do biogases, porém, essa restrição não impede seu uso de forma experimental (ANP, 2013).

### **3.2.8 Vantagens e Desvantagens da energia oriunda do Biogás de Aterro**

De acordo com Kalyani et al (2004), comparando diversos tipos de técnicas para o aproveitamento energético de RSU, foram apresentadas vantagens e desvantagens na utilização do biogás de aterro sanitário. Como vantagem, apresenta menor custo de implantação quando

comparado a outras tecnologias; o gás produzido pode ser utilizado na geração de energia ou uso térmico; não necessita de mão de obra especializada; os recursos naturais são reciclados ao retornar ao solo. E como desvantagens, pode ocorrer a contaminação do solo e da água pelo chorume; entre 30% a 40% do gás gerado é utilizado; para instalação é necessária uma grande área de terra; apresenta custos com transporte; custos significativos para o pré-tratamento do gás e do chorume e apresenta riscos de explosões.

## 4. Metodologia

A metodologia adotada para esse trabalho se divide de acordo com as seguintes etapas:

- Levantamento, por meio do SNIS, das informações relativas ao saneamento básico no município de Extrema – MG;
- Cálculo da projeção populacional e da geração de resíduos;
- Cálculo do potencial energético do biogás de aterro sanitário para os biodigestores;
- Análise da viabilidade econômica dos empreendimentos de geração de energia de RSU para o aproveitamento do biogás produzido em aterro.

### 4.1 Levantamento das informações relativas ao saneamento básico no município de Extrema- MG.

Extrema é um município do sudeste do Brasil, pertencente ao estado de Minas Gerais, localizado na região sul do estado. Sua população é estimada em 36.951 pessoas e área total de 244,575 km<sup>2</sup>. A cidade de Extrema possui coleta seletiva em todo território desde 2001, é o sexto município a implantar um aterro sanitário em no estado de Minas Gerais e o primeiro entre cidades com até 50 mil habitantes (EXTREMA, 2021).

Os dados da população e da geração de resíduos da cidade foram utilizados para estimar a vazão de biogás e o potencial energético do aterro e, posteriormente, o cálculo da viabilidade econômica do uso energético deste gás.

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

### 4.2 Projeção Populacional

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

Esta etapa iniciou-se com o levantamento dos dados censitários, referente a população de Extrema, conforme informações publicadas pelo IBGE. De posse desses dados, elaborou-se uma tabela para estimar o crescimento populacional com base em dados históricos dos censos demográficos do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE), para um período de 20 anos (2020 a 2040) através do modelo de taxa decrescente de crescimento, descrita pela Equação 1, cujas incógnitas são estimadas pelas Equações 2 e 3 (BARROS, 2013).

$$P(t) = P_0 + (P_s - P_0)[1 - e^{-k_d(t-t_0)}] \quad (1)$$

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

$$k_d = \frac{-\ln \cdot \ln \left[ \frac{(P_s - P_2)}{(P_s - P_0)} \right]}{t_2 - t_0} \quad (3)$$

Onde:

$P_t$  = população estimada no ano t (hab);

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

$P_s$  = população de saturação (hab);

$k_d$  = coeficiente.

Vale ressaltar que o ano de 2020 foi considerado o ano de abertura do aterro, 2021 o começo da deposição dos resíduos e geração de biogás e 2040, o ano de encerramento do aterro.

A geração de resíduos sólidos foi calculada a partir dos dados da geração per capita disponibilizados pelo SNIS (2020). A quantidade de resíduos gerados em cada cidade foi calculada multiplicando a geração per capita pela população de cada ano.

A projeção per capita para os anos posteriores a 2020 foi assumindo uma taxa de crescimento anual de 0,5%, conforme sugerido por Pin et al (2018). Baseado nesses dados pode-se calcular a geração total de resíduos (em toneladas por ano) do município ao longo do período de projeção. Posteriormente, foi possível calcular a quantidade de resíduos para o aterro sanitário. Os dados obtidos foram utilizados para estimar o potencial energético do aterro sanitário e do biodigestor.

Para fins de comparação, foi também calculada a projeção populacional com base no modelo apresentado por Sha'ato et al (2007). Através desse método fez-se uma estimativa do crescimento da população por um período de 20 anos (SILVA et al., 2017; BARROS, 2012), contados a partir do ano de 2020. Também foram utilizados os dados do IBGE, considerando os estudos do Censo demográfico de 1991, 2000 e 2010. Para este cálculo a metodologia utilizada é apresentada na equação 4.

$$P_n = P_0(1 + r)^n \quad (4)$$

Onde:

$P_n$  = é a população calculada no período de projeção;

$P_0$  = é a população inicial;

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

n= período de projeção dado em anos.

### 4.3 Geração de Resíduos

Os dados de resíduos sólidos gerados anualmente na cidade, obtidos do SNIS (2021) referente ao ano de 2017, foram de 0,91 kg/hab.dia. Para projetar a geração de resíduos, utilizou-se a taxa de crescimento anual proposto por Barros (2012) de 0,1 % em relação ao ano anterior.

Dessa forma foi possível calcular a geração de resíduos anualmente na cidade, em seguida fez-se o somatório da geração de resíduos sólidos mais a geração de lodo de esgoto.

### 4.4 Estimativa do Biogás a ser produzido

Para determinar a produção de biogás em aterros sanitários e quantificar a energia gerada através do metano gerado, existem diversos modelos. O modelo de geração de biogás de aterro sanitário baseado em equações de decaimento de primeira ordem são os mais utilizados (SANTOS, 2015). O modelo desenvolvido pela agência americana de proteção ambiental (USEPA, 2005), utilizada no software LandGEM®, equação 5, e pela Agência Intergovernamental de Painel sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006), equação 6 para os cálculos de emissões de gases provenientes de aterros sanitários e aplicada pela Companhia de Tecnologia Ambiental, CETESB (2005).

De acordo com Silva (2012), os resultados obtidos podem ser utilizados para avaliar o potencial de emissões de GEE, bem como a viabilidade de projetos de aproveitamento energético do biogás. Neste estágio, a geração de metano proveniente de RSU depositado em aterros foi estimada por meio da equação 6, utilizada na rotina de SILVA et al (2019).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \left[ \frac{Mi}{10} \right] e^{-kt_{ij}} \quad (5)$$

$$\sum Q_x = k \cdot L_0 \cdot \sum (R_x \cdot e^{-k(x-T)}) \quad (6)$$

Onde:

$k$  = taxa de decaimento (ano<sup>-1</sup>);

$L_0$  = Potencial de geração de metano (m<sup>3</sup>/t);

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

$Q_x$  = Fluxo de biogás no ano  $x$  gerado pelos resíduos depositados no ano inicial  $t$  (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano);

$Q_{CH_4}$  = vazão anual de metano;

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

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

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

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

Os valores de  $k$  e  $L_0$ , foram obtidos com base nos dados de World Bank (2004), conforme as Tabelas 7 e 8 a serem apresentadas a seguir. Onde para  $k$  foi considerado o valor de 0,05 ano<sup>-1</sup> e  $L_0$ , o valor de 225 m<sup>3</sup>/t. Posteriormente, foi possível calcular a potência disponível na unidade.

**Tabela 7 – Valores sugeridos de  $k$  conforme as precipitações anuais correspondente ao local.**

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

Fonte: (World Bank,2004).

**Tabela 8 – Valores sugeridos de  $L_0$  por conteúdo de resíduos orgânicos.**

| Categoria de RSU                 | Valores Mínimo de $L_0$ | Valor máximo de $L_0$ |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Resíduo Relativamente Inerte     | 5                       | 25                    |
| Resíduo Moderadamente degradável | 140                     | 200                   |
| Resíduo altamente degradável     | 225                     | 300                   |

Fonte: (World Bank,2004).

### 3.4.1 Biodigestor

O cálculo da estimativa do biogás produzido pelo digestor anaeróbico foi baseado em Santos et al (2018). A quantidade de resíduo orgânico gerado foi estimada pela equação 7. Em relação a quantidade de biogás produzido e coletado no biodigestor, este foi calculado de acordo com as equações 8 e 9, conforme apresentado por Santos (2019).

$$R_0 = R \cdot F_0 \quad (7)$$

$$Q_{BG} = R_0 \cdot I_{BG} \quad (8)$$

$$Q_{COL} = Q_{BG} \cdot E_{col} \quad (9)$$

Onde:

$R_0$  = quantidade de resíduos orgânicos gerados (t/ano);

$R$  = resíduos gerados (t/ano);

$F_0$  = porcentagem da fração de resíduos orgânicos;

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

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

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

$E_{COL}$  = eficiência de coleta (%);

Como dados de entrada, a porcentagem da fração de resíduos orgânicos foi considerada como sendo de 45,43% (EXTREMA, 2015). O parâmetro  $I_{BG}$  adotado foi de  $150 m^3/t$  de biogás, conforme Henríquez (2016), e considerando um conteúdo de metano de 65%, conforme Santos (2019). O  $E_{COL}$  foi considerado como sendo de 90% (adaptado de Fulhaber et al 2012).

## 4.5 Estimativa do Aproveitamento Energético

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

De posse destes dados, torna-se possível determinar a potência disponível em cada unidade. Estes fatores são utilizados para determinar a potência disponível, obtida por meio da

equação 10 (Barros, 2012), e a energia a ser gerada, através do motor Ciclo Otto de acordo com a equação 11 (Santos, Barros, Tiago Filho, 2018), e modelado no Scilab® por Silva et al. (2019)

$$P = Q_{CH_4} \cdot E \cdot E_C \cdot Q_{C_{CH_4}} \cdot \left( \frac{1}{365.24.3600} \cdot \frac{1}{100} \right) \quad (10)$$

$$En = P \cdot f_c \cdot 8760 \quad (11)$$

Onde:

P= Potência disponível por ano (kW);

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

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

$E_C$ = Eficiência de coleta de biogás (%);

E= Eficiência da tecnologia de conversão (%);

$1/365.24.3600$ = número de segundos em 1 ano (s. ano<sup>-1</sup>);

$1/1000$  = para transformação da unidade de J.s<sup>-1</sup> para kW;

$f_c$  = fator de capacidade;

8760= número de horas por ano;

En= Energia disponível anualmente (kWh/ano).

Considerando a opção de aterro sanitário, para a aplicação da equação 8 foram considerados os seguintes parâmetros para o aproveitamento energético do biogás: poder calorífico do metano no valor de  $35,5 \cdot 10^6$  ( $J/m^3CH_4$ ) (PIÑAS et al, 2016), considerando um conteúdo de metano de 55% conforme a média encontrada em estudos (MELLO, 2016) E HENRÍQUEZ, 2016), motor Ciclo Otto de combustão interna com eficiência considerada de 33% (PECORA, 2006; BOVE; LUNGHI, 2006) e a eficiência de coleta de biogás de 55,5%, considerando a média encontrada em estudos (SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013; WATERMOLEN, 2012). O fator de capacidade foi considerado de 80% (SANTOS, BARROS, TIAGO FILHO, 2018).

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



Para a análise energética, um importante parâmetro a ser analisado é a potência ótima de atuação, que é definida como a potência em que se gera a maior produção de energia. Conforme Santos et al (2018), esta potência é obtida por meio da variação entre a menor e maior potência gerada anualmente por cada aterro sanitário, obtendo assim a potência que gera a maior produção possível de energia.

## 4.6 Análise da Viabilidade Econômica

É necessário fazer uma análise de todos os custos envolvidos no empreendimento como o investimento inicial, os custos anuais relativos a operação e manutenção, além dos benefícios obtidos por meio da venda da energia excedente. Esta análise é de extrema importância para a tomada de decisão e verificação da viabilidade econômica do empreendimento proposto.

Por meio das etapas anteriores e dos dados obtidos, é possível utilizar a rotina de SILVA et al (2019) para efetuar os cálculos financeiros relativos a ambas tecnologias de gerenciamento e aproveitamento energético de RSU. Para a análise econômica foram consideradas os parâmetros valor presente líquido (VPL) e o custo nivelado de energia (LCOE, em inglês) de acordo com BRANKER et al (2011). Para o cálculo do VPL, o empreendimento se mostra viável economicamente ao apresentar VPL positivo pelo menos durante o período de análise, que no presente estudo foi considerado 20 anos, conforme a equação 12.

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{(E_n \cdot T) - C_{o\&m}}{(1+i)^n} - I \quad (12)$$

Sendo:

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

m = vida útil do projeto (anos);

T = tarifa de venda de energia em USD/MWh;

i = taxa de juros adotada como sendo de 10% a. a.;

CO&M = custos de operação e manutenção; considerado como 5% em relação ao investimento inicial;

I = Investimento inicial; n = ano de análise.

Foi considerada a venda do biogás durante 20 anos do projeto. Na rotina elaborada por SILVA et al (2019), o cálculo LCOE relaciona a energia gerada pelo empreendimento e os custos envolvidos, ao longo do período de vida útil do projeto, representa o custo mínimo da receita a ser obtido por kWh para cobrir as despesas referentes aos custos de

operação e manutenção, os investimentos, jutos e a remuneração dos investidores (KABAYASHI,2014). A análise do LCOE é encontrada pela equação 13.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^m \frac{C_n}{(1+i)^n}}{\sum_{t=1}^m \frac{E_n}{(1+i)^n}} \quad (13)$$

Onde:

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

$E_n$  = energia produzida anualmente;

$i$  = taxa de juros;

$m$  = vida útil do projeto (anos);

$n$  = ano de análise.

A taxa que o investidor obtém a cada ano sobre os capitais investidos no projeto, enquanto o investimento inicial é recuperado gradativamente, é conhecida como TIR, e é utilizada para determinar a taxa de rentabilidade mínima que torna um projeto viável, sendo normalmente utilizada conjuntamente com o VPL. De acordo com MENDES (2017), a TIR é a taxa de atualização do projeto que dá o VPL nulo.

$$TIR \Rightarrow VPL = 0 \quad (14)$$

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{(E_n \cdot T) - C_{o\&m}}{(1+i)^n} - I \quad (15)$$

Se  $TIR > i$ , o projeto é viável;

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

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

A taxa de juros adotada foi de 10% a.a., para o aproveitamento energético em ambas as tecnologias (PEREIRA et al, 2018), os custos relativos a operação e manutenção foram considerados de 5% em relação ao investimento inicial (LOPES, 2017) e a vida útil do projeto

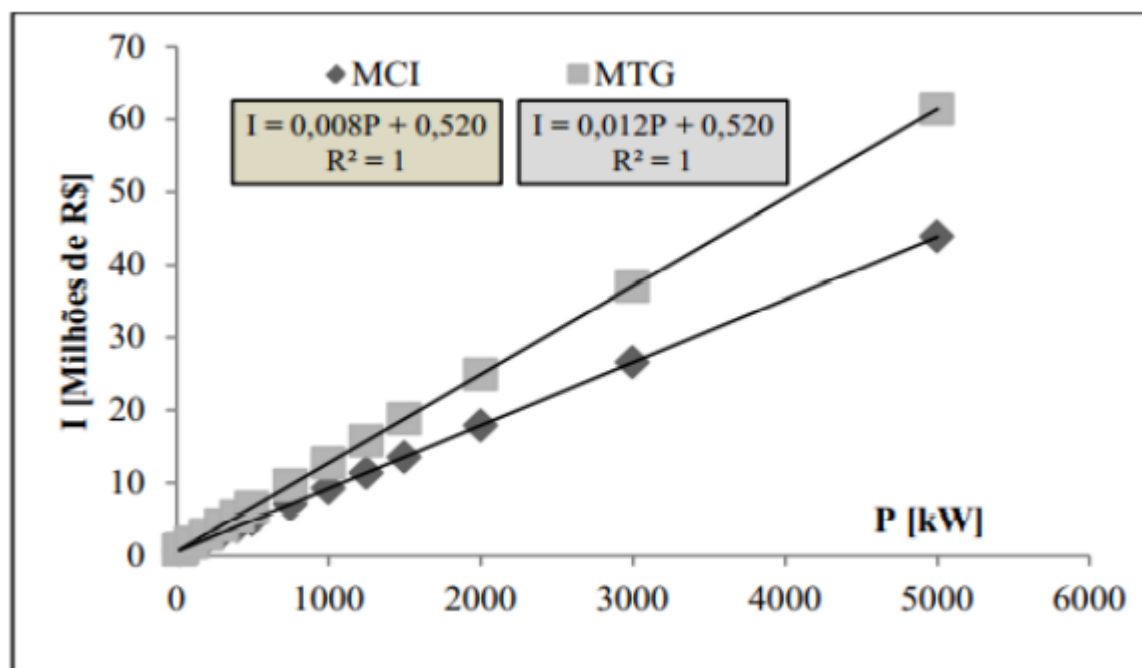
de 20 anos. Foi considerado o comércio de energia através da geração distribuída adotada de 561 R\$/MWh, valor referente a portaria nº 65/2018 para a energia oriunda de RSU na geração distribuída (EPE, 2019a). Para os empreendimentos, o preço de venda foi considerado de 311 R\$/MWh, valor obtido conforme leilão de Geração de Energia A-4/2019, nº 3 de 2019 (EPE, 2019b). A taxa de conversão de R\$ 5,2920 para USD (cotação do dia 21/01/2021; INVESTING, 2021). No cálculo da viabilidade econômica, para se obter o investimento inicial, foram considerados nos cálculos os equipamentos necessários para a captação e uso do biogás. O investimento inicial foi calculado conforme estudos desenvolvidos por SANTOS *et al* (2015) que estabelece uma relação entre a potência e o investimento, Figura 12, de uma usina utilizando motores de combustão interna (MCI) e o custo dos seguintes componentes: queimador, gasômetro, compressor, gasoduto, drenos, tubulação de coleta e o tratamento, conforme equação 16.

$$I = 0,008.P + 0,520 \quad (16)$$

Sendo:

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

P= potência ótima (kW).



**Figura 12:** Relação entre investimento e Potência.

**Fonte:** Santos et al (2015).

Para o uso do biodigestor anaeróbio, há também a presença de segregador, triturador, utilizados na etapa de pré-tratamento dos resíduos e o próprio biodigestor, além dos componentes básicos presentes no aterro. Os equipamentos considerados estão apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Equipamentos Considerados na Captação do Biogás.**

| <b>Equipamento</b>      | <b>Custos</b>               | <b>Unidades</b> | <b>Função</b>                  | <b>Fonte</b>     |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------|
| Segregador <sup>a</sup> | 67.103                      | USD/t           | Separação dos resíduos         | Luz et al (2015) |
| Triturador <sup>b</sup> | 146.09                      | USD/unidade     | Trituração da matéria orgânica | Alibaba (2017)   |
| Biodigestor             | 20% do investimento inicial | USD/unidade     | Para a digestão anaeróbia      | PROBIOGÁS(2015)  |

<sup>a</sup> Consiste na triagem. Este é o estágio mais importante do processo, pois é onde os materiais recicláveis são removidos, em especial os metais, pois podem danificar o equipamento nas etapas seguintes (Luz et al., 2015).

<sup>b</sup> Para um triturador com uma taxa de vazão em t/h de resíduo orgânico adequado para o digestor em estudo.

**Fonte:** Santos et al (2019).

## **4.7 Aplicação dos dados no algoritmo no Scilab®**

A metodologia previamente apresentada foi utilizada para o desenvolvimento do algoritmo no *software* Scilab® por Silva *et al* (2019), com o objetivo de gerar informações sobre o potencial energético do empreendimento estudado.

### **4.7.1 Sobre o Scilab®**

O Scilab® é um software livre e de código aberto para a computação numérica que fornece um ambiente de computação para aplicações científicas e de engenharia, sendo disponível gratuitamente (SCILAB, 2020). Sua versão mais atual é 6.0.2. É um software com centenas de funções matemáticas, avançada linguagem de programação, e interface com avançadas estruturas de dados e funções gráficas 2D e 3D.

O Scilab® permite que o usuário insira dados de entrada referentes a análise do estudo apresentado. Para esse trabalho, alguns dados foram inseridos através do uso de uma planilha do software Excel®. Nessa planilha, havia dados de entrada das populações dos Censos Demográficos referentes aos anos de 1990, 2000 e 2010, como também a produção de resíduos referente a cidade. Outra maneira de entrada de dados foi através da introdução de valores que são solicitados no início da utilização do programa; sendo solicitado ao usuário os valores referentes aos parâmetros solicitados.

O algoritmo utilizado no presente trabalho foi preparado por SILVA *et al* (2019) no software Scilab® e foi aplicado para o estudo do aterro estudado. Diversos autores têm utilizado esse software para análises energéticas, podendo citar trabalhos como MENSAH (2018), SANTOS (2018) e COSTA (2018).

#### 4.7.2 Dados de Entrada

As equações utilizadas na rotina baseiam-se nas equações de 1 a 15. Os dados de entrada utilizados para gerar a solução do algoritmo no Scilab® estão apresentadas na Tabela 10.

**Tabela 10 – Dados de entrada para solução do algoritmo no Scilab®.**

| Parâmetro  | Valor   |
|--|---|
| População referente ao ano 2000                      | Censo demográfico 2000 (IBGE,2010)                        |
| População referente ao ano 2010                      | Censo demográfico 2000 (IBGE,2010)                        |
| Crescimento anual de geração de resíduos (%)         | 0,5% como em Pin et al, (2018)                            |
| Constante de decaimento (t/ano)                      | 0,05 (WORLD BANK,2004)                                    |
| Potencial de geração de biogás (m <sup>3</sup> /ton) | 225 (WORLD BANK,2004)                                     |
| Ano atual  | 2020  |
| Porcentagem da fração de resíduos orgânicos (%)      | 45,43% (EXTREMA,2015)                                     |
| Valor do Dólar (USD)                                 | USD 5,2920 (cotação do dia 21/01/2021; INVESTING(2021))   |
| Preço de venda da energia (R\$/MWh)-GD               | 561 R\$/MWh (EPE,2019b)                                   |
| Preço de venda da energia (R\$/MWh)- Leilão          | 311,00 R\$/MWh (ANEEL,2021)                               |
| Custo de operação e manutenção (%)                   | 5% do valor de investimento inicial conforme Lopes (2017) |

|                   |                                       |
|-------------------|---------------------------------------|
| Taxa de Juros (%) | 5% ano (Pereira; Santos; Santos 2018) |
|-------------------|---------------------------------------|

**Fonte:** Próprio Autor

## 5. Resultados e Discussões

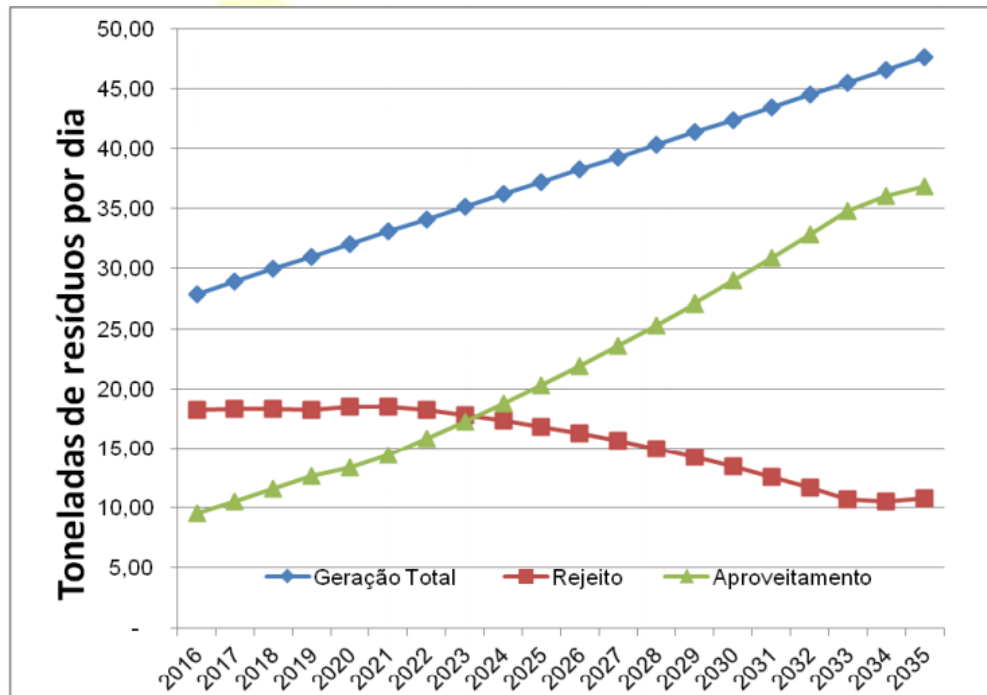
### 5.1 Aterro de Extrema

A cidade de Extrema conta com aterro sanitário próprio, onde foi prevista a continuidade da sua operação até o ano de 2020. Para subsidiar o presente aterro, foram consideradas alternativas de implantação de um novo aterro para o ano de 2021 (EXTREMA, 2015).

Quanto a quantidade de resíduos sólidos a serem encaminhados ao aterro sanitário, ao longo do período de implantação, dependerão das condições de atendimento às metas de aproveitamento dos resíduos sólidos secos para reciclagem e dos resíduos úmidos para compostagem, de forma que se possa verificar a existência de três cenários (EXTREMA, 2015).

- Cenário crítico: Condição em que as metas de aproveitamento dos resíduos secos recicláveis e úmidos não é atendida, ou seja, todos os resíduos urbanos coletados serão dispostos em aterros sanitários;
- Cenário Intermediário: Condição em que as metas de aproveitamento dos resíduos sólidos secos são parcialmente atendidas, ou seja, serão dispostos em aterro sanitário a parcela orgânica e os rejeitos dos resíduos coletados;
- Cenário Ideal: Condição em que as metas de aproveitamento dos resíduos sólidos secos e úmidos orgânicos são plenamente atendidas. Nesta condição, somente rejeitos são encaminhados ao aterro sanitário.

A Figura 13 apresenta o balanço entre produção e o aproveitamento dos resíduos, considerando a soma do aproveitamento dos resíduos sólidos recicláveis (t/dia) mais o aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos (t/dia) (EXTREMA, 2015).



**Figura 13:** Balanço entre produção e aproveitamento dos resíduos.

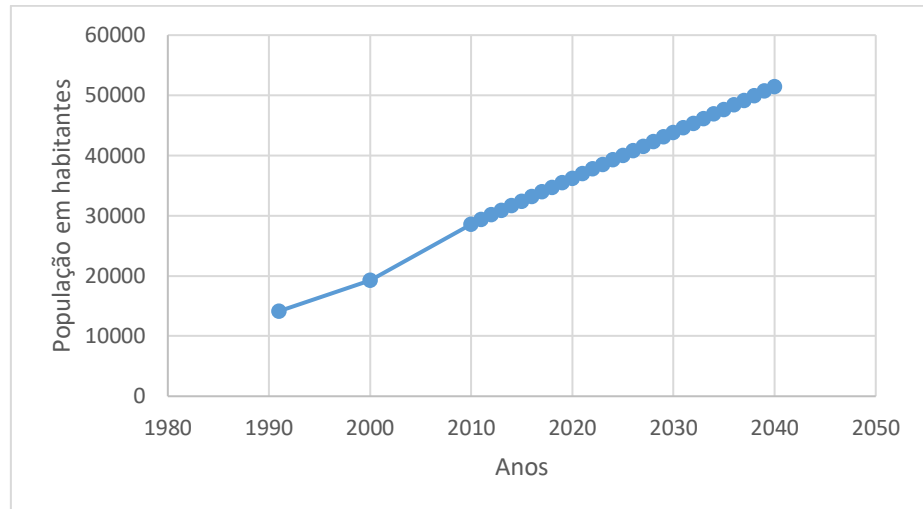
Fonte: EXTREMA (2015).

O cálculo de demanda de capacidade operacional do aterro sanitário é válido para qualquer que seja a definição do município, em relação à destinação final de seus resíduos sólidos.

## 5.2 Projeção Populacional

Utilizando a equação 1, 2 e 3 com o auxílio de uma ferramenta denominada *Solver*® e com os dados do IBGE foi possível efetuar os cálculos para a projeção populacional. O gráfico que mostra a tendência populacional aritmética da cidade de Extrema é apresentado na figura 14.

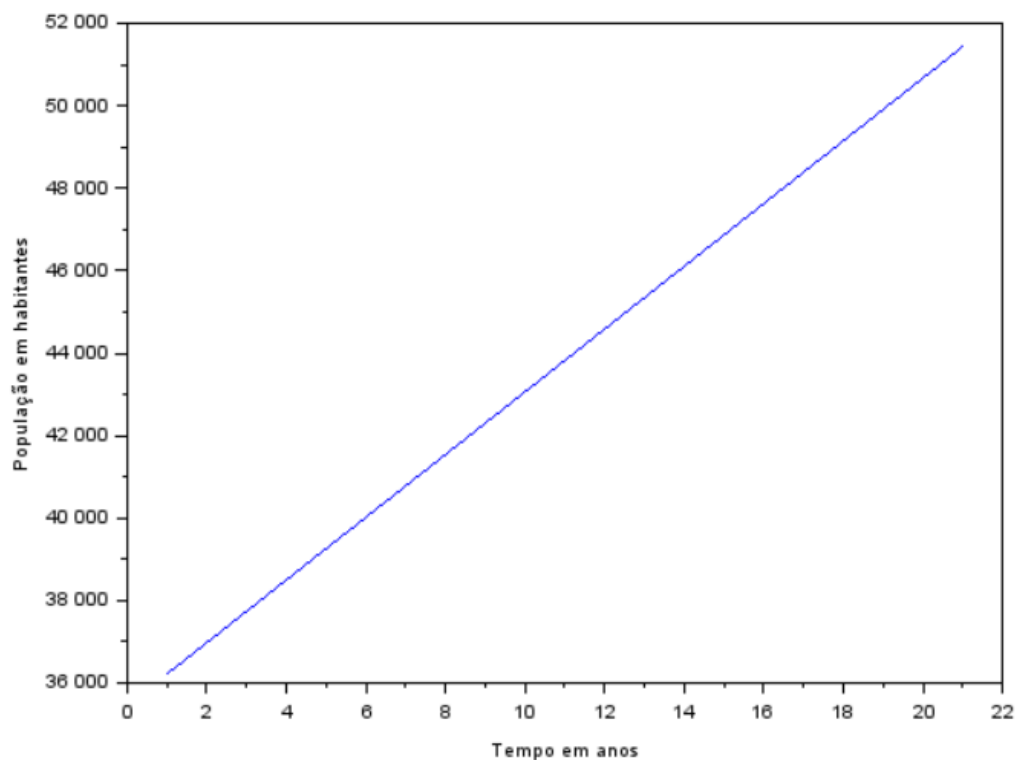




**Figura 14:** Projeção Populacional Aritmética.

**Fonte:** Autor.

Para o segundo método foi utilizado a equação 4 e os dados históricos do IBGE, calculou-se a projeção populacional para a cidade de Extrema através da rotina de Silva et al (2019), o método de projeção populacional escolhido foi o Linear, a figura 15 apresenta o gráfico resultante da projeção populacional para o segundo método de análise.



**Figura 15:** Projeção Populacional Linear.

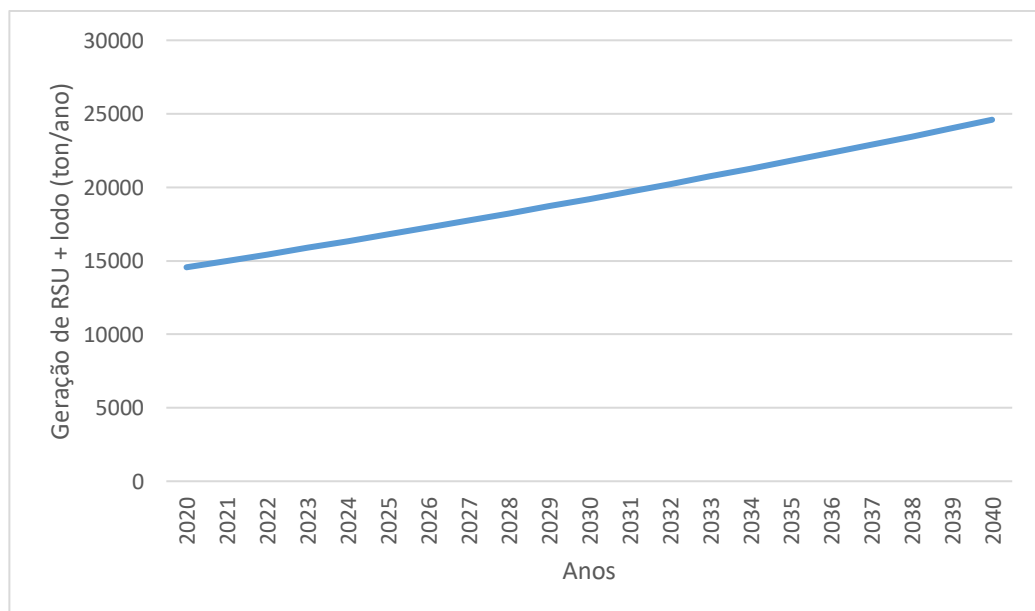
**Fonte:** Autor.

O gráfico da Figura 15, apresenta o ano 0 como o ano inicial do aterro, no caso o ano de 2020 e o ano 20 como o ano final do aterro, no caso o ano de 2040.

O resultado para as duas projeções para os dois métodos se mostrou equivalente. Para o ano de 2020 as duas projeções apresentaram um valor de aproximadamente 36.211 habitantes, de acordo com o CENSO de 2020 para cidade de Extrema o valor de 36.951 habitantes (IBGE, 2020).

### 5.3 Estimativa de Produção de Resíduos Sólidos e Lodo de Esgoto

Os dados dos Resíduos Sólidos obtido do SNIS (2021) possibilitaram estimar a geração de resíduos sólidos e a geração de lodo de esgoto considerando um aumento de 1% ao ano, Figura 16.



**Figura 16:** Geração anual de RSU+ lodo (t/ano).

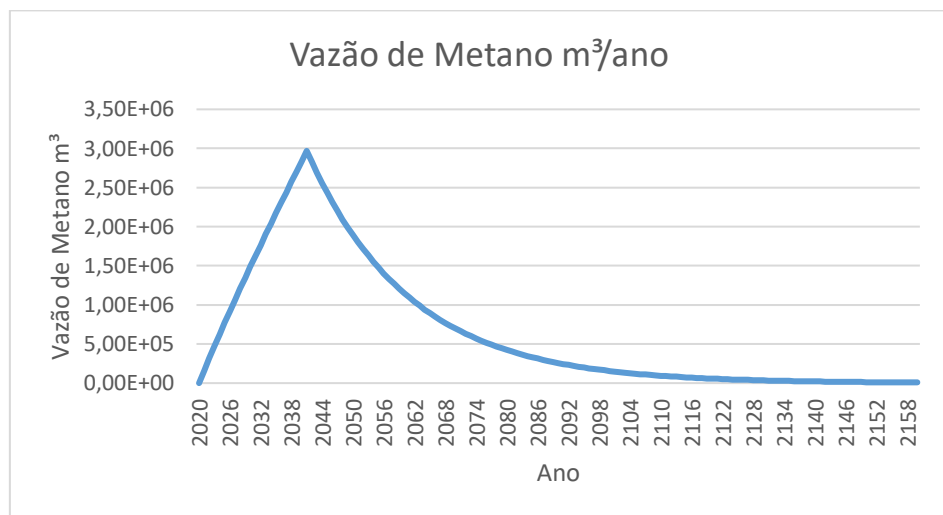
**Fonte:** Autor.

A previsão de geração de resíduos apresenta a mesma tendência identificada na projeção populacional. Inicia-se com uma geração de 14.558 toneladas no ano de 2020, para o ano de 2030, uma geração de 19.203 toneladas e para o ano de 2040, uma geração de 24.594 toneladas.

## 5.4 Estimativa do Biogás a ser produzida e do potencial energético

### 5.4.1 Aterro Sanitário

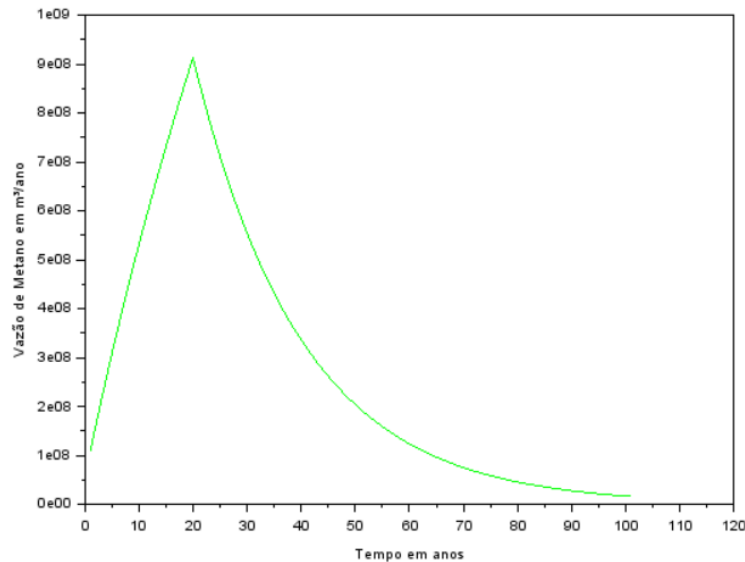
Para a estimativa de metano a ser gerado é necessário levar em conta a quantidade anual de resíduos gerados. Com posse destes dados, para o cálculo da produção de metano a ser gerado pelo aterro, utilizou-se a equação 5, no programa LandGEM®. A Figura 17 apresenta os resultados para a produção estimada de metano a ser gerada no aterro da cidade de Extrema, no entanto esse modelo estende-se para aproximadamente 120 anos após o aterro ser fechado, para que se possa analisar o que acontece com a quantidade de metano gerado.



**Figura 17:** Vazão de Metano m³/ano LandGEM®.

**Fonte:** Autor

Também através da equação 2, porém utilizando o método de SILVA et al (2019), foram utilizados os dados de geração de resíduos sólidos junto com os parâmetros considerados e, com isso, estimou-se a geração de metano produzida pela digestão anaeróbica da fração orgânica dos RSU, figura 18.



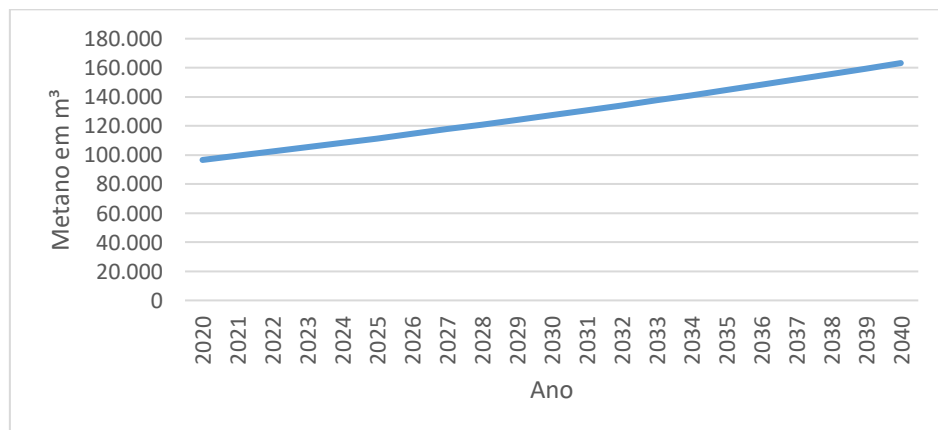
**Figura 18:** Vazão de Metano m<sup>3</sup>/ano método Silva et al (2019).

**Fonte:** Autor

Considerando os dados obtidos através do programa LandGEM, os resultados mostram que o aterro pode alcançar  $2,97.10^6$  m<sup>3</sup> de metano passível de ser coletado no ano final de estudo. Através do método de SILVA et al (2019), a projeção de vazão metano mostrou que o aterro pode alcançar o valor de  $9,129.10^8$  m<sup>3</sup> de metano para o ano final de estudo, sendo para ambos os valores de maior geração.

#### 5.4.2 Biodigestor

Através dos dados de massa de resíduos sólidos orgânicos, de geração de resíduos sólidos urbanos e dos dados da geração de lodo, por meio da equação 9 foi possível calcular a geração de metano no biodigestor para utilização no aterro de Extrema, Figura 19.



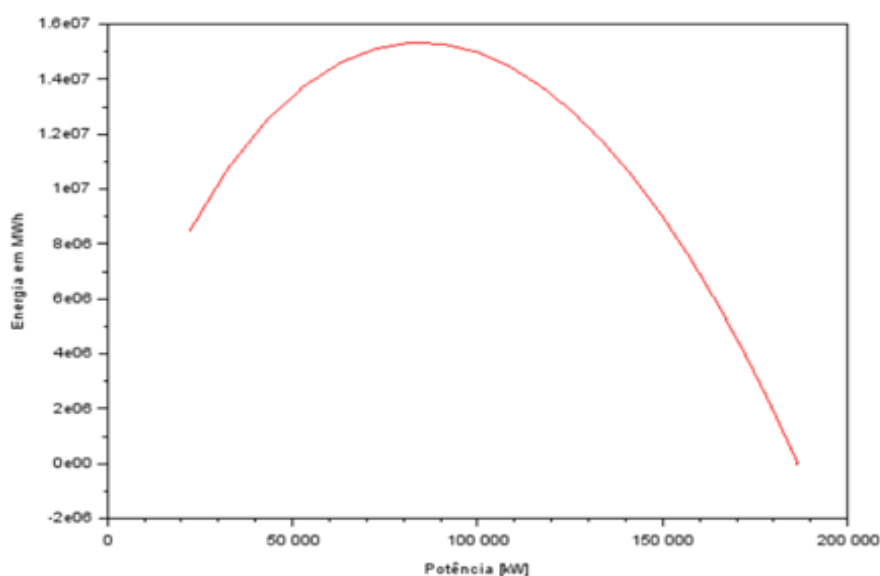
**Figura 19:** Geração de Metano no Biodigestor pelo programa LandGEM.

**Fonte:** Autor

Mediante a utilização do programa LandGEM foi gerado o gráfico da figura 19, onde se observa que a maior produção de metano pelo biodigestor acontece também no ano final de estudo, isso se dá, pois, geração de resíduos sólidos orgânicos é linear, dentro dos anos do consórcio, sendo que o ano de 2040 apresenta a maior geração de resíduos sólidos orgânicos.

## 5.5 Estimativa do potencial energético

A partir da equação 10, calculou-se a energia elétrica através da potência gerada pelo método de Silva et al (2019). Para avaliar a energia elétrica produzida é muito importante levar em consideração a quantidade de resíduos gerada pela população, quanto maior é a geração de resíduos maior é a energia obtida. A figura 20 apresenta a gráfico de energia.



**Figura 20:** Máxima de Energia método Silva et al (2019).

**Fonte:** Autor

Na figura 20, constata-se que a máxima energia não é gerada pela potência máxima, mas sim por uma potência ótima, de forma a maximizar a energia gerada, nesse caso a potência ótima foi de 81.788,264 kW.

## 5.6 Análise da Viabilidade Econômica

Com os resultados obtidos em relação a potência a ser gerada pelo empreendimento, foi possível determinar o VPL e LCOE. O investimento inicial do projeto foi obtido por meio da soma dos componentes necessários para a instalação e funcionamento da usina durante os anos de operação. Para a venda de energia foram escolhidos dois cenários, o primeiro, o preço

estabelecido pelo último leilão e o segundo, o preço da venda na geração distribuída. Ambos foram calculados pelo método de Silva et al (2019) e também pelo software LandGEM.

Para o primeiro cenário o empreendimento não se mostrou economicamente viável, ou seja, apresentou VPL negativo. A Tabela 11 apresenta os valores obtidos.

**Tabela 11 – Resultado preço estabelecido último leilão.**

| <b>Valor de Tarifa</b> | <b>VPL</b>        | <b>LCOE</b> |
|------------------------|-------------------|-------------|
| R\$187,90 MWh          | R\$ -295700000.00 | R\$ 236,71  |

**Fonte:** Próprio Autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®.

Para o segundo cenário o empreendimento já se mostrou economicamente viável, ou seja, VPL apresentou positivo. A Tabela 12 apresenta os valores obtidos.

**Tabela 12– Resultado preço de venda na geração distribuída.**

| <b>Valor de Tarifa</b> | <b>VPL</b>       | <b>LCOE</b> |
|------------------------|------------------|-------------|
| R\$311,00 MWh          | R\$ 442000000.00 | R\$ 236,71  |

**Fonte:** Próprio Autor a partir dos dados obtidos pelo Scilab®.

A análise econômica se mostrou inviável para venda de energia em leilão, onde o valor do VPL se mostrou negativo para o aterro, indicando que o retorno do empreendimento será menor que o investimento inicial tornando o projeto impraticável. O LCOE indica qual tarifa de venda de energia e leva em consideração os custos esperados ao longo da vida da usina dividido pela potência produzida, para esse cenário o valor da LCOE foi de R\$ 236,71 para a produção de energia e o valor de venda no valor de R\$ 187,90, ou seja, um prejuízo de R\$ 48,81 por MWh.

Para o segundo cenário, com a venda de energia na geração distribuída, a análise econômica se mostrou extremamente viável, pois o valor do VPL se mostrou positivo para o empreendimento, tornando-o assim, um bom investimento. O valor do LCOE foi de R\$ 236,71 para a produção de energia e o valor de venda no valor de R\$ 311,00, ou seja, um lucro de R\$ 74,29 por MWh.

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por finalidade estudar o potencial de geração de energia elétrica do biogás da digestão anaeróbica da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos bem como a viabilidade econômica do aterro da cidade de Extrema MG, através de algoritmos desenvolvidos no Scilab e pelo software LANDGEM.

Através dos resultados obtidos pelo uso das duas ferramentas de análise, foi possível ter um melhor diagnóstico do empreendimento, além da observação gráfica dos resultados ser uma ótima ferramenta para visualização e entendimento do comportamento das curvas.

As projeções populacionais nos dois programas se mostraram semelhantes, o resultado das projeções para o ano de 2020 foi semelhante ao valor da projeção feita pelo IBGE para o mesmo ano, este com população estimada de 36.951 habitantes, para as projeções o valor de 36.212 habitantes para a projeção do *Microsoft Excel* e de aproximadamente 36.213 habitantes para a projeção do Scilab, ou seja, mostrando coesão dos dados.

As curvas de vazão de metano, potencial energético e energia elétrica revelaram que no fim do consórcio, onde há a maior quantidade de RSU depositada no aterro, há maior geração de biogás, resultando no aumento do potencial energético do aterro e em consequência a energia elétrica disponível pela queima do gás.

O empreendimento se mostrou economicamente viável tendo sua energia comercializada no mercado de geração distribuída, onde apresentou um VPL positivo. Diferentemente do valor de energia proveniente de biomassa comercializado no último leilão da ANEEL, que não foi suficiente para render lucro ao empreendimento, apresentando um valor de VPL negativo.

Servindo de base para outros estudos que incentivem a geração de biogás proveniente de aterro.

Em síntese, o empreendimento se destaca com uma saída ambientalmente correta para grandes problemas que os resíduos causam ao meio ambiente e saúde. Evidencia o potencial energético proveniente do biogás do aterro e sua viabilidade técnica que apresenta de potencializar a matriz energética brasileira, servindo de base para outros estudos que incentivem a geração de biogás proveniente de aterro.

## 7. REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos Sólidos**. 210 p. São Paulo, 2018/2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012. **Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 de abr. de 2012. Seção 1, p. 53, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução n.º 8, de 30 de janeiro de 2015. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 fev. 2015. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-np/2015/janeiro&item=ranp-8--2015>. Acesso em: 13 janeiro. 2021

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

ANNEE- AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9> Acesso em: Janeiro, 2021

ARCADIS TETRPLAN. Produto 6 – Resumo Executivo: **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 de Meio Ambiente (MMA), nov. 2010. 44 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação** - NBR 13.896. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 12p.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004:2004 Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 77 p, 2004.

BARROS, R. M. *et al.* **The electric energy potential of landfill biogas in Brazil.** Energy Policy. V. 65, p. 150-164, 2014.

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade.** Rio de Janeiro: Interciencia; Minas Gerais: Acta, 2013.

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

BORGES, Marisa Soares. **Tratamento de água e efluentes industriais.** 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.

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] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 03 de ago. 2010. Seção 1, p. 3, 2010.

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

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2001. Nota Técnica VII - **Geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos urbanos e rurais.** Disponível em <[www.cenbio.com.br](http://www.cenbio.com.br)>. Acesso em: 08 de junho. 2020.

CENBIO. Nota Técnica VII - **Geração de Energia a Partir do Biogás Gerado por Resíduos Urbanos e Rurais.** São Paulo, 2001.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Biogás - Pesquisas e Projetos no Brasil. 2006a. Disponível em: . Acesso em: 12 de agosto 2020

CHERNICARO, C.A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias –** Reatores Anaeróbios, Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2005.

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

CHONG, S.; CHONG, J. **Methane: a natural gas**. Microbiology Today, p. 124-127, 2008.

COELHO, Suani Teixeira, et al. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Proveniente do Tratamento de Esgoto**, Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia; Centro Nacional de Biomassa, 2006.

COPEL. **MANUAL PARA GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2015**. Disponível em < [https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual\\_gerenciamento\\_residuos\\_solidos/\\$FILE/Manual%20para%20Gerenciamento%20de%20Res%C3%ADduos%20v1.88.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual_gerenciamento_residuos_solidos/$FILE/Manual%20para%20Gerenciamento%20de%20Res%C3%ADduos%20v1.88.pdf)> Acesso: 05/06/2020.

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

DOS SANTOS, Guilherme Garcia Dias. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

ECOURBIS AMBIENTAL, 2019. Disponível em: <http://www.ecourbis.com.br/site/destinacao.aspx?content=aterro-sanitario>. Acesso em: 05 agosto 2020.

EPE -EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. 2019a. **EPE publica infográfico sobre o Valor Anual de Referência Específico – VREs**. Disponível em: Acesso em 02 de junho. 2020.

EXTREMA. Disponível em: <https://www.extrema.mg.gov.br/secretarias/secretaria-municipal-de-meio-ambiente/limpeza-publica/> Acesso em: 05 de janeiro de 2021.

GOLDEMBERG, J. **Biogás: Projetos e Pesquisas no Brasil**. CETESB / Secretaria do Meio Ambiente; Organização: Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer; Responsável Técnico: João Wagner Silva Alves; São Paulo, 2006, 184 p.

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

IBGE -INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas saneamento**. 2011. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=280933> Acesso em: 05/06/2020.

IPEA- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos, Relatórios de Pesquisa**. Brasília, 2012.  
IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico sobre catadores de resíduos sólidos**. (Relatório de Pesquisa). Brasília: Ipea, 2012.

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

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

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

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

LOUREIRO, S.m.; ROVERE, E.l.l.; MAHLER, C.f.. **Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil, in the state and city of Rio de Janeiro**. Waste Management, [s.l.], v. 33, n. 5, p.1302-1312, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.024>.

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

MARCHEZETTI, A.; KAVISKI, E.; BRAGA, M. **Aplicação do método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares.** Ambiente Construído, v. 11, n. 2, p. 173–187, 2011. . <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212011000200012>

MMA- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Acordo de Paris 2020.** Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 02 de junho. 2020.

MMA- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** 2018. Disponível em: . Acesso em: 05 de junho. 2020.

MMA- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Redução de Emissões na Disposição Final.** 2007. Disponível em: [https://www.mma.gov.br/estruturas/srhu\\_urbano/\\_publicacao/125\\_publicacao12032009023918.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_publicacao/125_publicacao12032009023918.pdf) . Acesso em: 05 de junho. 2020.

MONTEIRO, J. H. P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos.** Coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa *et al.* **Estado da Arte dos Aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil.** Engenharia Sanitária Ambiental V.24, p. 143-155,2019

NASCIMENTO, Victor Fernandez, Anahi Chimini Sobral, Pedro Ribeiro de Andrade *et al.* **Evolução e Desafios no gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.** Ambiente e Água- An Interdisciplinary Journal of Applied Science. INSS 1980-993X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1635>, 2015.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola.** Capítulo 9. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

PIRES, I. C. G.; FERRÃO, G. E. **Compostagem no Brasil sob a perspectiva da legislação ambiental.** REVISTA TRÓPICA: Ciências Agrárias e Biológicas p.01-18, v.09, n.01, 2017.

PNRS. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Lei Nº 12305 de 2 de agosto. 2010. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso: 04/06/2020.

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

REZENDE, Andrea das Graças Oliveira Brynner. **Avaliação do potencial energético e econômico do tratamento, destinação e reutilização de resíduos sólidos urbanos (RSU).** 1. ed. Rio de Janeiro: Conexão Ciência (Online), 2016.

SANTOS, Ivan Felipe Silva dos Santos; BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio, **Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators, Sustainable Cities and Society**, Vol. 41, 2018, p. 587-600, ISSN 2210-6707, 2015.

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

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

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

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

THEMELIS, N. J. e ULLOA, P. A. **Methane Generation in Landfills.** Renewable Energy, V. 32, p. 1243 – 1257, 2007

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

**UNFCCC – Convenção Quadro das Nações Unidas Sobre a Mudança do Clima, 2020.**  
Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>. Acesso em: Agosto, 2020.