



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS ARAPIRACA
UNIDADE EDUCACIONAL PENEDO**

MARKUS ANTONIO DE OLIVEIRA PORANGABA

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS EM ATERRO
SANTÁRIO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NO MUNICÍPIO
DE MACEIÓ – AL.**

Penedo – AL
2021

MARKUS ANTONIO DE OLIVEIRA PORANGABA

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS EM ATERRO
SANITÁRIO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NO MUNICÍPIO
DE MACEIÓ – AL.**

Monografia apresentada no Curso de Especialização Lato Sensu em Gestão em Meio Ambiente da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Gestão em Meio Ambiente.

Orientação Prof. Dra. Tânia Maria Gomes Voronkoff Carnaúba.

Coorientação: Prof. Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto.

Penedo – AL
2021

Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Biblioteca Unidade Educacional Penedo – BPP
Bibliotecária Responsável: Eliúde Maria da Silva CRB – 4/1834

P832a Porangaba, Markus Antonio de Oliveira.
Aproveitamento energético de biogás em aterro sanitário como alternativa sustentável no município de Maceió – Al. / Markus Antonio de Oliveira Porangaba. – Penedo – AL, 2021.
64 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização Lato Sensu em Gestão em Meio Ambiente) Universidade Federal de Alagoas. Campus Arapiraca. Unidade Educacional de Penedo. Penedo, 2021.

Orientadora: Profª. Drª. Tânia Maria Gomes Voronkoff Carnaúba.
Co-Orientador: Prof. Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto.

Bibliografia: f. 60-64.

1. Biogás. 2. Desenvolvimento Sustentável. 3. Energias Renováveis. 4. Gestão de Resíduos Sólidos. I. Carnaúba, Tânia Maria Gomes Voronkoff. II. Tavares Neto, Júlio Inácio Holanda. III. Título.

CDU: 658:502/504

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARKUS ANTONIO DE OLIVEIRA PORANGABA

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NO MUNICÍPIO DE MACEIÓ – AL.

Monografia apresentada no Curso de Especialização Lato Sensu em Gestão em Meio Ambiente da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Gestão em Meio Ambiente.



Tânia Maria Gomes Voronkoff Carnaúba/UFAL

Prof (a) Dra. Tânia Maria Gomes Voronkoff Carnaúba
(Orientadora)

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto (Coorientador)



Prof(a). Dra. Amanda Santana Peiter



Prof(a). Dra. Cassia Roberta Pontes Ribeiro

Penedo - AL, 13 de março de 2021

Dedico este trabalho a Maria Graciene de Oliveira, minha mãe,
por não medir esforços a me proporcionar o melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades e aos meus pais, em especial a minha mãe Maria Graciene de Oliveira, por não medirem esforços para me proporcionar uma educação digna, maiores responsáveis por minhas realizações e pelo meu caráter. Ao meu irmão Marcondes de Oliveira Porangaba pelo convívio e afeto.

Agradeço aos meus familiares em especial meus Avós, e imensamente aos meus tios Claudionor de Oliveira e Quitéria Maria Amorim, pelo acolhimento, diálogo confiança e paciência na caminhada da vida. Agradeço a minha Orientadora Prof.^a Dra. Tânia Maria Gomes Voronkoff Carnaúba e a meu Coorientador Prof. Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto, pelo suporte técnico, pelas sugestões e críticas, do apoio indispensável para conclusão deste trabalho, pelos conhecimentos técnicos e pelo incentivo e motivação durante a realização do projeto.

Agradeço também ao corpo docente da Universidade Federal de Alagoas, pelas constantes trocas de ideias e aos técnicos administrativos, em especial a Prof.^a Dra. Amanda Santana Peiter, por todo o apoio e ensinamento no desenvolvimento do projeto. Às amigadas feitas durante o curso, Andreza, Fernando, Luana. Rafaela, em especial a Jaqueline, Taís e Vanessa por construir um caminho mais leve diante das imensas dificuldades encontradas durante essa trajetória. Agradeço imensamente a meus amigos, pelo companheirismo e paciência em especial a Allwert Leão, Carla Queiroz, Enéas Neto, Geraldo Vianna, João Vitor, kledson Laurentino, Lanay Barbosa, Marcela Samara, Natalia Angelita, Rebeca Lúcio, Ricardo Érique, Tamires Clemente, Thayana Sarmento, Victor Hugo e a tantos outros que estiveram ao meu lado durante esta caminhada.

À todas as esferas da Universidade Federal de Alagoas.

RESUMO

A consolidação das atividades humanas e o aumento populacional, concomitante ao poder aquisitivo destas, tem fomentado o aumento descontrolado da geração de resíduos sólidos e o consumo de energia oriunda de fontes não renováveis. Diante disso, a presente pesquisa, realizou um levantamento teórico do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos, sob o aproveitamento do biogás produzido em aterro sanitário municipal, como fonte renovável de energia limpa, bem como, contribuir para redução da emissão de gases poluentes. O estudo foi desenvolvido no aterro sanitário do município de Maceió, localizado no Estado de Alagoas, para o qual o método utilizado foi o software desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA), o Modelo LandGEM 3.02 - Landfill Air Emissions Model, um modelo teórico de estimativa como ferramenta de previsão do volume de metano a ser gerado e os dados das emissões para os principais gases gerados pela decomposição anaeróbia de resíduos sólidos urbanos entre os anos de 2010 e 2035. Constatou-se no aterro um volume de gases correspondente a 64,5 milhões m³ /ano e os principais componentes do biogás, entre eles o gás metano com 32 milhões m³ /ano, dióxido de carbono 32 milhões m³ /ano, compostos orgânicos não metânicos- NMOC com 257.300 m³ /ano. que a potência elétrica e a energia gerada é diretamente proporcional ao escoamento de biogás no aterro, com a máxima potência no ano de 2026 de 10,87 MW e a geração de energia elétrica de 208,77 MWh/dia ou 75156,31 MWh/ano. Contudo, considerando o potencial energético do metano para os próximos anos no período de 2021 a 2035, serão produzidos um volume de 39,2 milhões de m³, equivalente a 132,49 MW de potência acumulada disponível, suficiente para atender aproximadamente 250 mil residências. Logo, o aproveitamento do biogás mostrou-se como uma excelente alternativa para geração de eletricidade, cuja utilização minimiza os impactos ambientais, principalmente pela emissão de GEE minimizando os efeitos do aquecimento global.

Palavras-chave: Biogás; Desenvolvimento Sustentável; Energias Renováveis, Gestão de Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

The consolidation of human activities and the increase in population, together with their purchasing power, has fostered the uncontrolled increase in the generation of solid waste and the consumption of energy from non-renewable sources. In view of this, this research carried out a theoretical survey of the energy potential of urban solid waste, using biogas produced in a municipal sanitary landfill, as a renewable source of clean energy, as well as contributing to the reduction of pollutant gas emissions. The study was carried out at the landfill in the municipality of Maceió, located in the State of Alagoas, for which the method used was the software developed by the Environmental Protection Agency (EPA), the LandGEM Model 3.02 - Landfill Air Emissions Model, a theoretical model of estimation as a tool for forecasting the volume of methane to be generated and emissions data for the main gases generated by the anaerobic decomposition of solid urban waste between the years 2010 and 2035. A volume of gases corresponding to 64 was found in the landfill, 5 million m³ / year and the main components of biogas, including methane gas with 32 million m³ / year, carbon dioxide 32 million m³ / year, non-methane organic compounds - NMOC with 257,300 m³ / year. the energy generated is directly proportional to the flow of biogas in the landfill, with the maximum power in 2026 of 10.87 MW and the generation of electric energy of 208.77 MWh / day or 75156.31 MWh / year. However, considering the energy potential of methane for the coming years in the period from 2021 to 2035, a volume of 39.2 million m³ will be produced, equivalent to 132.49 MW of available accumulated power, sufficient to serve approximately 250 thousand homes. Therefore, the use of biogas proved to be an excellent alternative for electricity generation, the use of which minimizes environmental impacts, mainly due to the emission of GHGs, minimizing the effects of global warming.

Keywords: Biogas; Sustainable development; Renewable Energies, Solid Waste Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Coleta de RSU nas regiões do país	18
Figura 2 - Mapa de Localização das regiões para elaboração dos planos intermunicipais de gestão de resíduos no estado de Alagoas.....	25
Figura 3- Técnica de compostagem utilizada como adubo.	26
Figura 4 - Processo de reciclagem de materiais.	27
Figura 5 - Funcionamento de um Incinerador de RSU	28
Figura 6 - Lixão a céu aberto	28
Figura 7 - Aterro controlado.....	29
Figura 8 - Instalação com manta de impermeabilização	29
Figura 9 - Aterro sanitário Salvaterra	30
Figura 10 - Etapas de produção do biogás.....	33
Figura 11 - Mapa do município de Maceió.	43
Figura 12 - Central de Tratamento de Resíduos de Maceió.	44
Figura 13 - Método de confinamento em células em aterro sanitário	45
Figura 14 - Estação de Tratamento de Efluentes da CRT Maceió.	45
Figura 15 - Tela de inserção de dados do programa.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação para 1 litro de biogás com outras fontes de energia.	32
Tabela 2 - Projeção da População Residente dos Bairros da Cidade de Maceió 2017- 2020. .	41
Tabela 3 - Bairros por região no município de Maceió.....	42
Tabela 4 - Estimativa da geração de resíduos sólidos	49
Tabela 5 - Estimativa de composição geométrica dos resíduos sólidos de Maceió.	50
Tabela 6 - Índice de composição gravimétrica com base no nível de renda.	52
Tabela 7 - Estimativa de emissões de gases no aterro de Maceió de 2010-2035.....	53
Tabela 8 - Potência e energia disponível em função de metano na CTR-Maceió.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de RSU no Brasil.....	17
Gráfico 2 – Caracterização de resíduos sólidos de Maceió.	51
Gráfico 3 – Emissão de gases na Central de Tratamento de Resíduos - Maceió.	54
Gráfico 4 – Comportamento da curva de emissões em unidades e Megagrama/ano.	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos resíduos quanto a origem definida pela PNRS	19
Quadro 2 - Classificação do resíduo quanto a sua composição química.....	20
Quadro 3- Classificação dos resíduos conforme a norma ABNT NBR 10.004:2004	21
Quadro 4 - Condições de operação para formação do gás metano.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANVISA	Agência Nacional da Saúde
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
CRT	Central de Tratamento de Resíduos
EPA	Environmental Protection Agency
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIRSU	Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos
IGBE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	International Panel on Climate Change
LandGEM	Landfill Gas Emissions Model
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NMOC	Compostos Orgânicos Não Metânicos
PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SEDET	Secretaria de Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente
SEMARH	Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SEMEC	Secretaria Municipal de Economia
SEMELJ	Secretaria Municipal, Esporte e Lazer
USEPA	United States Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 OS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	16
2.1.1 Classificação de Resíduos Sólidos	18
2.1.2 Política Pública e Gestão de Resíduo	22
2.1.2.1 Gestão de Resíduos no Estado de Alagoas.....	24
2.1.3 Alternativas para disposição final dos resíduos sólidos	25
2.1.4 Subprodutos de um aterro sanitário.....	31
2.2 PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS	31
2.2.1 Definição.....	31
2.2.2 Formação e geração de biogás em aterro sanitário.....	33
2.2.3 Condições operacionais.....	35
2.2.4 Impactos do biogás ao meio ambiente	36
2.2.5 Protocolo de Quioto.....	36
2.2.6 Principais modelos empíricos para estimativa de biogás.....	37
3. METODOLOGIA.....	40
3.1 PERFIL DO MUNICÍPIO DE MACEIÓ.....	40
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITARIO DE MACEIÓ	44
3.3 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO POPULACIONAL DE MACEIÓ	49
4.2 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE BIOGÁS NO ATERRO	52

4.3 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA E ENERGIA TEÓRICA A SER APROVEITADA NO ATERRO SANITÁRIO	55
4.4 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE EMISSÕES EVITADAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA	57
4.5 FORMAS DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS	57
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Com a revolução tecnológica e o aumento da população no planeta, modificou-se o padrão de consumo na sociedade. Indivíduos estão consumindo cada vez mais produtos e serviços para atender suas necessidades e tem como efeito, a geração descontrolada de resíduos sólidos e a escassez de energia elétrica para suprir as demandas desse processo. A geração de resíduo sólido urbano (RSU) tem-se tornado uma problemática para os gestores de municípios, devido sua complexidade de coleta, tratamento e destinação final (LINO, 2014).

Além disso, essa busca por novos mecanismos que proporcionem conforto e autonomia tecnológica, tem resultado no aumento do consumo de combustíveis fósseis (MOURA et al., 2013). Necessidade indispensável pela redução do consumo destes combustíveis, seu esgotamento das reservas, seus impactos ambientais e por ser um fator limitante ao desenvolvimento econômico. Deste modo, a procura por novas fontes de energias renováveis, limpas, acessíveis e de baixo custo, tem se tornado atrativo para investimentos (NASCIMENTO, 2016).

Estes RSU são constituídos por matéria orgânica degradável e não degradável e matéria inorgânica (BIANEK et. Al, 2018). Ao longo de seu processo de decomposição da matéria orgânica degradável, produz o biogás, gás composto principalmente de metano e dióxido de carbono, que se não for tratada corretamente, libera gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Além de gerar um líquido poluente (chorume), que contamina o solo e os lençóis freáticos, atraindo insetos e animais, que são vetores de doenças (LINO, 2014).

No Brasil, são nos aterros sanitários a região pela qual é depositada uma grande quantidade de resíduos sólidos Urbanos (SANTOS, 2015). Assim, a gestão eficiente dos resíduos sólidos e o aproveitamento energético do biogás pode atuar como uma alternativa ambientalmente sustentável para a disposição final de gases residuais. Com isso, pesquisas e análises da geração de energia elétrica a partir do biogás tem proporcionado a redução de emissões dos gases do efeito estufa e a maximização do índice de conversão do metano, contribuindo significativamente no cálculo para emissão de crédito de carbono dentro da política de desenvolvimento limpo (ABREU et al, 2009).

A modelagem matemática proporciona quantificar o potencial de geração de biogás no aterro com base na massa de resíduos depositada. Além de estimar as emissões de GEE, essa importante ferramenta possibilita o dimensionamento de plantas e sistemas que capture o biogás gerado no aterro (MACHADO et al., 2009).

Em comparação com os métodos de campo, os modelos teóricos despertam vantagens significativas, como o baixo custo e resultados rapidamente observáveis (ABRELPE, 2013). Diante do panorama de tratamento de RSU, instabilidade operacional e custo de geração de energia elétrica que o Brasil enfrenta, além das dificuldades encontradas pelas administrações públicas em atender aos programas de diretrizes ambientais que fornecem os subsídios necessário para o processo de licenciamento ambiental, são a motivação principal deste projeto, assim como colaborar com alternativas para o cenário da matriz energética brasileira.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial energético do RSU, sob o aproveitamento do biogás no Aterro Sanitário de Maceió – AL, como fonte renovável de energia limpa, além de contemplar aspectos críticos, como preservação ambiental, saúde pública, inclusão social e geração de trabalho para reduzir a disposição inadequada dos RSU solidando o desenvolvimento sustentável.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Mensurar a geração de resíduos sólidos urbanos do município de Maceió;
- Estimar o potencial energético do biogás gerado do resíduo sólido depositado no aterro sanitário municipal;
- Quantificar as emissões evitadas de Gases de Efeito Estufa com a adoção de um sistema de captação do biogás gerado;
- Apontar os benefícios energéticos e ambientais proporcionados pela substituição de uma parcela do uso de combustíveis fósseis pelo biogás gerado);

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são resíduos inerente a qualquer atividade antrópica, que de modo geral estão inseridos no conceito “lixo”, amplamente utilizado pela população, que pela convivência no meio social, para designar algo que não tem “utilidade” (LIMA et al., 2012). Assim, para Braga (2002) o lixo é definido como todo resto oriundo da atividade humana, cujos geradores consideram como fútil e descartáveis, este que se apresentam sob forma sólido, semi-sólido ou semilíquido.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004:2004, define resíduos sólidos como:

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

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resíduo sólido é todo material, objeto, substância, ou bem descartado, resultante de atividades humanas e cuja destinação final se faz necessária, voluntariamente ou por obrigação. Já a lei 12.305/2010 – Art. 3º inciso XVI, define resíduos sólidos como:

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

Neste sentido, o manual de Gerenciamento de Resíduos realizado pela Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro - Firjan (2019), afirma que apesar do adjetivo “sólido” associado ao termo, o conceito de resíduo sólido abrange os seguintes estados da matéria:

- Sólido;
- Semissólido;
- Gases contidos em recipientes; e
- Líquidos que possuam características que tornem inviável o seu lançamento direto na

rede pública de esgotos ou em corpos d'água.

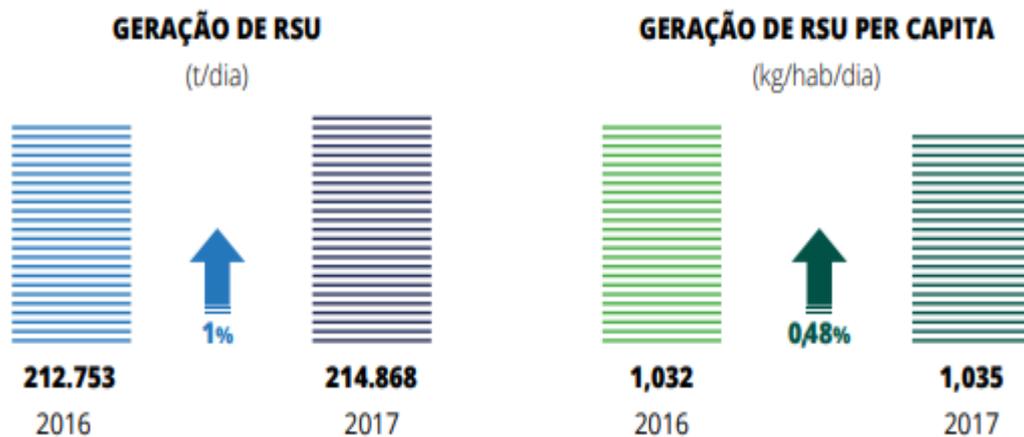
A PNRS desfez o termo “lixo” das tratativas oficiais sobre o tema, uma vez que, todo resíduo sólido tem valor. Logo é considerado rejeito, todo material que não apresente qualquer possibilidade de tratamento ou recuperação de valor agregado (FIRJAN, 2019).

A Lei 12.305/2010 – Art. 3º inciso XV, define rejeitos como:

Resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2017), último levantamento realizado pela instituição, a população brasileira apresentou um crescimento de 0,75% entre 2016 e 2017, enquanto a geração per capita de RSU apresentou aumento significativo de 0,48%. Como apresentado na Gráfico 1, a geração total de resíduos aumentou 1% no mesmo período, atingindo um total de 214.868 toneladas diárias de RSU em todo o território brasileiro.

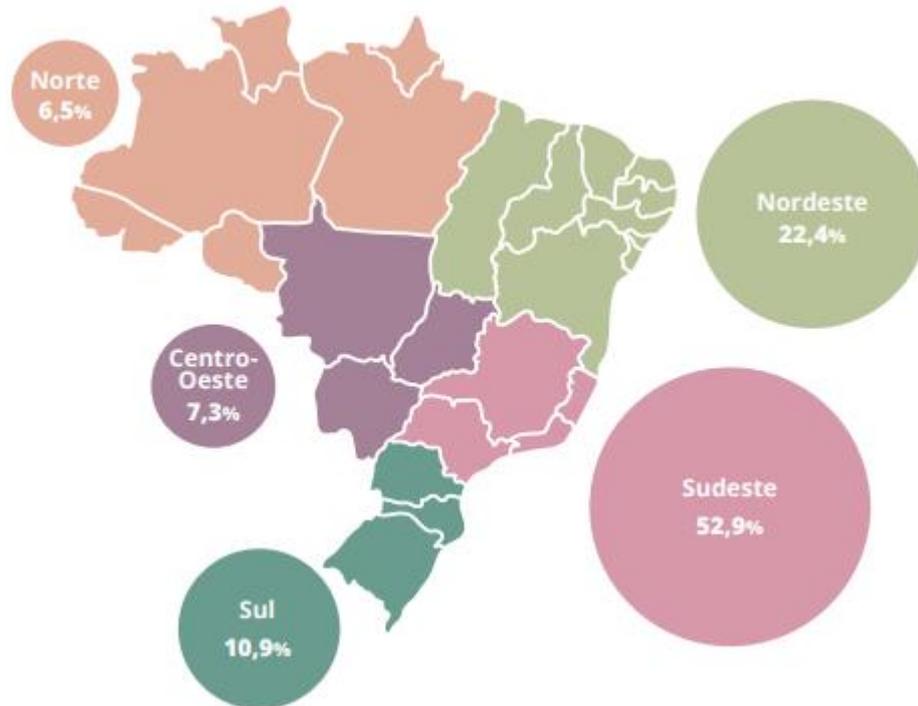
Gráfico 1: Geração de RSU no Brasil.



Fonte: Abrelpe, 2017.

Em todas as regiões do Brasil a quantidade de RSU coletados em 2017 apresentou um aumento em comparação ao ano anterior, e obteve um alcance de coleta um pouco acima de 90%.

Figura 1: Coleta de RSU nas regiões do país



Fonte: Abrelpe, 2017.

No Brasil, grande parcela dos resíduos sólidos é descartado sem nenhum tratamento. Vale ressaltar que, uma parte da população brasileira não tem as condições mínima de saneamento básico, assim, é comum despejos clandestinos na maioria dos municípios. Isso tem causado diversos impactos ambientais locais, expondo a saúde e qualidade de vida das pessoas, uma vez que, disposição adequada de RSU emite gases de efeito estufa (ICLEI, 2009, p. 7).

2.1.1 Classificação de Resíduos Sólidos

Um grande desafio para a sociedade e a administração pública dá-se à gestão dos resíduos sólidos. Com a intensificação das atividades humanas nos últimos tempos tem dificultado o manejo e disposição correta destes (COELHO et al., 2011). Assim, a disposição final do lixo urbano é um dos grandes e mais perigosos problemas ambientais enfrentados pelos centros urbanos em todo o planeta e com o aumento do consumismo tende a agravar-se com o alto índice de bens descartáveis, que passam cada vez mais a ganhar espaço na composição do lixo gerado pela sociedade (ENSINAS, 2003, p.1).

De acordo com a PNRS, os resíduos são classificados quanto à origem, a composição

química e à periculosidade. Além disso, os RSU apresentam agentes biológicos patogênicos ou resíduos químicos que podem alcançar o homem direta ou indiretamente, afetando-lhe a saúde. (SILVA, 2009). O Quadro 1 apresenta a classificação dos resíduos quanto a sua origem dos a, conforme PNRS define.

Quadro 1: Classificação dos resíduos quanto a origem definida pela PNRS.

Tipo	Descrição
Domiciliar	Restos de alimentos, embalagens em geral, jornais, pilhas, papel higiênico, lâmpadas etc.
Comercial	Encontrado em lojas, bares, escritórios, supermercados etc. Variando conforme o tipo de função realizada pelo estabelecimento. Lojas geralmente produzem mais embalagens; restaurantes geram mais restos de alimentos, mas, de modo geral, todos produzem resíduos de higiene, tais como papel-toalha e papel higiênico
Público	Resultante da poda de árvores, da limpeza de ruas, praias, córregos e galerias, e de feiras livres.
Oriundo de serviços de saúde e hospitais	Gerado em hospitais, farmácias, clínicas veterinárias, laboratórios etc. Contém ou pode conter agentes patogênicos (p. ex., agulhas, gases, luvas descartáveis, órgãos e vísceras, filmes de raios-x)
Portos, aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários	Composto basicamente por materiais de higiene pessoal e restos de alimento. Apresenta sérios riscos de transmissão de doenças oriundas de outras cidades, estados e países.
Industrial	Esses resíduos são bastante variados de acordo com o tipo de atividade da indústria (p. ex., cinza, lodo, plásticos, papéis, madeira, produtos químicos, tóxicos ou não, borrachas etc.).
Agrícola	Inclui embalagens de fertilizantes e defensivos agrícolas, rações, restos de colheita etc.
Entulho	Resíduos da construção civil compostos por materiais de demolições, restos de obras etc.

Fonte: Adaptado Menezes (2014).

Vale destacar que, de acordo com a classificação da PNRS para resíduos industriais, é tratado todo gerenciamento de resíduos industriais, materiais gerados de seu processo industrial e em suas instalações e que não sejam os seus subprodutos ou produtos finais.

Segundo Menezes (2014), os resíduos sólidos podem ser diferenciados quanto a sua

composição química como orgânicos e inorgânicos. No Quadro 2 é definido a classificação dos resíduos sólidos quanto a sua composição química.

Quadro 2: Classificação do resíduo quanto a sua composição química.

Orgânico	Inorgânico	
Composto por elementos biodegradáveis (que podem ser atacados por microrganismos decompositores). Ex.: restos de comida, sobras de madeira etc. Inclui também o papel, que é fabricado a partir de fibra vegetal mas, na maioria das vezes, é tratado separadamente para facilitar o processo de reciclagem.	Plástico	Predominantemente produzido a partir do petróleo.
	Metal	Produzido a partir da extração de minérios.
	Vidro	Produzido a partir de areia e sílica
	Borracha	Produzida a partir do látex vegetal e do petróleo.
	Outros	Incluem resíduos compostos por mais de um tipo de material, como embalagens do tipo longa-vida, compostas de papel, metal e plástico; embalagens laminadas compostas de plástico e metal.

Fonte: Adaptado Menezes (2014).

Segundo a norma ABNT NBR 10.004:2004, referência para Resíduos sólidos e sua Classificação, destaca quanto à sua periculosidade, estes que podem proporcionar riscos potenciais à saúde pública e ao meio ambiente, diferenciando os resíduos perigosos dos não perigosos, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3: Classificação dos resíduos conforme a norma ABNT NBR 10.004:2004.

Resíduos Classe I – Perigosos		Resíduos Classe II – Não Perigosos	
		II A – Não Inertes	II B – Inertes
Definição	São 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.	São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos; ou de resíduos classe II B – Inertes.	São aqueles resíduos que quando submetidos a um contato dinâmico ou estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.
Exemplos	Óleo lubrificante usado ou contaminado; óleo de corte e usinagem usado; equipamentos descartados contaminados com óleo; lodos de galvanoplastia; lodos gerados no tratamento de efluentes líquidos e pintura industrial; efluentes líquidos ou resíduos originados do processo de preservação da madeira; baterias à base de chumbo; e lâmpadas fluorescentes.	O lixo comum gerado em qualquer unidade industrial, proveniente de restaurantes, escritórios etc., é normalmente classificado como Classe II A – Não Inerte.	Para determinar com precisão o enquadramento nesta categoria, o resíduo não deve constar nos anexos da NBR 10.004, não pode estar contaminado com nenhuma substância dos Anexos C, D ou E da norma e ser testado de acordo com todos os métodos analíticos indicados.

Fonte: Adaptado FIRJAN, 2019.

Neste sentido, a norma ABNT aponta em sua classificação de resíduos como perigosos, conforme sua fonte de geração ou a sua composição, baseada em análises físico-químicas caracterizadas em laboratórios. Assim, serão definidas as etapas de coleta, armazenagem, transporte, manipulação, tratamento e destinação final, de acordo com cada tipo de resíduo gerado (FIRJAN, 2019).

São considerados resíduos de serviços de saúde (RSS) aqueles provenientes de:

- Qualquer unidade que execute atividades de natureza médico-assistencial humana ou animal, como os ambulatórios, incluindo medicamentos e imunoterápicos vencidos ou deteriorados;
- Centros de pesquisa, desenvolvimento ou experimentação na área de farmacologia e saúde, que podem fazer parte de um complexo industrial;
 - Necrotérios, funerárias e serviços de medicina legal;
 - Barreiras sanitárias.

Deste modo, segundo os conceitos gerais da literatura de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, é de responsabilidade do Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos - GIRSU

ações gerenciadoras que relacione todas às etapas, desde geração, acondicionamento, coleta e transporte, reaproveitamento, tratamento até sua destinação final dos resíduos sólidos, como tratados a seguir:

- Geração de Resíduos – esforço em conscientizar a sociedade a mudar hábitos de consumo, de forma a promover a não geração de resíduos, incentivando o consumo de produtos mais apropriados ambientalmente, assim como, a introduzir a segregação dos resíduos com base em suas características, visando não misturar resíduos que contamine materiais reaproveitáveis, proporcionando assim, uma maior eficiência nas demais etapas do processo.

- Acondicionamento de Resíduos – que sugere organizar os resíduos de acordo com suas características, contribuindo a identificação e manuseio ideal durante as etapas posteriores.

- Coleta e Transporte – que conduz as operações de remoção e transferência dos resíduos para os locais de armazenamento, processamento ou destinação final. Podendo ainda efetuar-se de forma seletiva e pela coleta de resíduos misturados.

- Reaproveitamento e tratamento – esta etapa agrega valor em resíduos que podem ser reaproveitados para outras finalidades, reduzindo impactos ambientais com ações corretivas. São formas reaproveitamento ou tratamento dos resíduos, a reciclagem, reutilização, recuperação ou compostagem.

- Destinação final – que direciona, após as possibilidades anteriormente caracterizadas, os resíduos não utilizados para espaços que acomodem à sua deposição final, geralmente aterros sanitários, com todo o preparo e medidas cabíveis de segurança, e devidamente apropriados para a captação dos efluentes líquidos e gasosos emitidos por estes.

De tal forma, problemas de saúde pública e ambientais são oriundos da não realização do tratamento adequado do lixo gerado, bem como doenças ocasionadas por animais, insetos transmissores contaminados, ou ainda o ar ou a água poluída, contaminados com substâncias tóxicas, podem multiplicar o risco quando o lixo é depositado a céu aberto em lixões. Além disso, problemas respiratórios, intestinais e outros provocados por locais poluídos ou através do contato com animais contaminados podem ser fatais.

2.1.2 Política Pública e Gestão de Resíduo

A Constituição Federal de 1988, em seu artigo 225, afirma que todos tem direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, assim como atribui o dever ao poder público a todos de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. O mesmo artigo, em seu parágrafo 3º, afirma que “as condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os

infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados” (FIRJAN, 2019).

Logo, de acordo com a Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/98), gestão ineficiente de resíduos poderá proporcionar sanções administrativas, civis e penais, bem como multas e/ou restrições de direitos ou da liberdade. Neste contexto, serão reparados os responsáveis, independentemente de culpa ou dolo, danos causados ao meio ambiente, como a poluição de corpos hídricos ou contaminação do solo.

Desta forma, segundo a ANVISA (2006), na década de 70, o Governo Federal, publicou uma Portaria Minter no 53, de 01/03/1979, por meio do Ministério do Interior, que orienta o controle de resíduos sólidos no país, de natureza industrial, domiciliares, de serviço de saúde e demais resíduos gerados pela sociedade.

Dentre os vários programas nacionais e legislações ambientais existentes que beneficie a política de resíduos sólidos, destacam-se aquelas que dispõem sobre: a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei no 6.938 de 31/08/1981), a Política Nacional de Saúde (Lei Orgânica da Saúde no 3.080 de 19/09/90), a Política Nacional de Educação Ambiental (Lei no 9.795 de 27/04/1994), a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei no 9.433 de 08/01/1997), a Lei de Crimes Ambientais (Lei no 9.605 de 12/02/1998), o Estatuto das Cidades (Lei no 10.257 de 10/07/2001); a Política Nacional de Saneamento Básico (Projeto de Lei no 5.296/05) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (projeto de lei) (ANVISA, 2006).

Um marco legal para a gestão de resíduos sólidos no Brasil foi a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404/2010, esta que considera como geradores de resíduos sólidos as pessoas físicas ou jurídicas, abrigadas no poder público ou privado, que produz resíduos sólidos por meio de suas atividades e consumo (FIRJAN, 2019).

Deste modo, a criação da PNRS trouxe uma política inovadora quanto a responsabilidade compartilhada dos estágios de vida dos produtos entre todas as partes de interesse, como poder público, o meio privado e o cidadão. Assim, realizar um trabalho de tratamento prévio dos resíduos sólidos, com a finalidade de reduzir o máximo possível o volume e, depois, recuperar e aproveitar todo seu potencial energético, dispondo apenas os rejeitos para a destinação final no aterro sanitário. Além disso, PNRS analisou conceitos modernos de metodologias de logística reversa para o setor industrial, e mais adiante estabeleceu metas para a extinção dos lixões e para a elaboração de planos de gestão dos resíduos, em todos os níveis da administração pública (FIRJAN, 2019).

Desta forma, em conformidade a Viabilizar a Universalização da Destinação Adequada de Resíduos Sólidos no Brasil, estudos de estimativa de custo, desenvolvidas como previsto na PNRS, indica investimentos em infraestrutura de aproximadamente R\$ 11,6 bilhões até 2031 e de cerca de R\$ 15 bilhões por ano para operação plena dos sistemas a serem implementados. Segundo a FIRJAN (2019), o estudo levou em consideração quatro das seis metas propostas para RSU da minuta do Planares:

- eliminação de lixões;
- redução dos resíduos secos dispostos em aterros sanitários;
- redução de resíduos úmidos dispostos em aterros; e
- recuperação de gases de aterros sanitários.

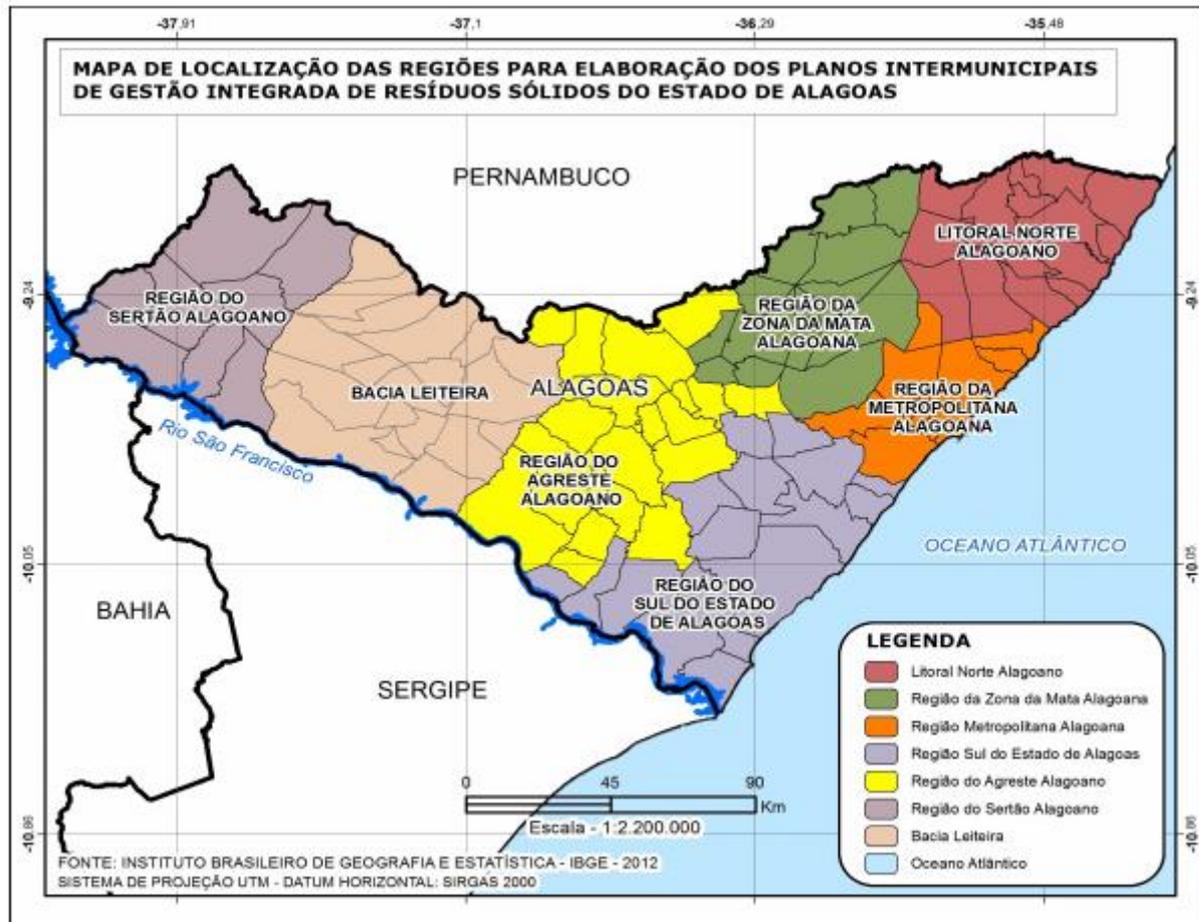
Além disso, a proposta discute outras alternativas para tratamento do RSU, com metodologias de compostagem, reciclagem, recuperação energética por meio de tratamento térmico e de captação do gás do aterro. Assim, considerando investimentos de aproximadamente R\$ 1,17 bilhão em usinas de incineração.

2.1.2.1 Gestão de Resíduos no Estado de Alagoas

No Estado de Alagoas foi decretada a Lei Estadual nº 7749 de 13/10/2015 que estabelece a Política Estadual de Resíduos Sólidos e Inclusão Produtiva, a qual aborda orientações gerais, princípios, objetivos e instrumentos, bem como as diretrizes de gestão integrada e ao gerenciamento dos resíduos, em concórdia com políticas estaduais, meio ambiente, recursos hídricos, saneamento básico e de promoção da inclusão social. Sancionada em outubro de 2015, esta lei foi publicada na fase de finalização do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS), o qual foi desenvolvido no período 2014/2015 (SEMARH, 2015).

De acordo com a Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMARH (2015) , a política de planejamento para gestão de resíduos sólidos em Alagoas desenvolveu-se com a elaboração do Plano Regionalização de Gestão de resíduos sólidos do estado de Alagoas, visando o arranjo entre os 102 municípios alagoanos, de forma a desenvolver e implementar as práticas de gerenciamento integrado e compartilhamento dos serviços públicos de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, garantindo um modelo de gestão facilitada ao que rege a posição de sistemas de tratamento de resíduos sólidos, redução do custo no gerenciamento de resíduos e diminuição dos passivos ambientais. A Figura 2 apresenta os resultados da definição das sete regiões no estado de planejamento de resíduos sólidos de acordo com o estudo proposto.

Figura 2: Mapa de Localização das regiões para elaboração dos planos intermunicipais de gestão de resíduos no estado de Alagoas.



Fonte: SEMARH, 2015.

O PERS orienta práticas para gestão de resíduos sólidos no estado de Alagoas, considerando as diferentes diretrizes estabelecidas pela PNRS, com prazo de vigência de 20 anos e revisada a cada 4 anos, considerando o alcance da gestão sustentável dos resíduos. Baseada na mobilização e participação de todos os municípios alagoanos, por meio de atores sociais, obrigatoriamente incluindo os catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis, atores econômicos, instâncias sociais e afins, de modo a integrar a gestão dos resíduos em um padrão de prestação de serviços mais homogêneo em todo o estado (SEMARH, 2015).

2.1.3 Alternativas para disposição final dos resíduos sólidos

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2019), o Brasil gerou 79 milhões de toneladas de resíduos em 2018, resultando em aproximadamente 1% em relação ao ano de 2017. Desse total, 92% (72,7 milhões) foi coletado, em comparação a 2017 houve uma alta de 1,66% em comparação a

2017, outros 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração, um resultado negativo frente as ações de gestão de resíduos, porém houve um aumento no ritmo de coleta em relação a alta de geração de resíduos.

Diante disso, há diversos destinos para disposição final dos resíduos no Brasil, entre os sistemas de tratamento de RSU estão a compostagem; reciclagem; incineração; lixão; aterro controlado e aterro sanitário.

- **Compostagem** - Caracterizado por se tratar de um processo biológico de decomposição da matéria orgânica, sobretudo, constituída de restos de origem animal ou vegetal. A decomposição resulta em um composto orgânico, muito utilizado como fertilizante natural no solo sem ocasionar riscos ao meio ambiente. Uma prática bastante comum meio rural e principalmente na agricultura familiar (AMBSC, 2008). A Figura 3 mostra resíduos sólidos tratados sob o método de compostagem, um material estável, rico em substâncias húmicas e nutrientes minerais formando assim um solo húmífero.

Figura 3: Técnica de compostagem utilizada como adubo.



Fonte: AMBSC, 2008.

- **Reciclagem** - Constitui uma prática de reaproveitamento e/ou reintrodução dos resíduos no processo produtivo. Esse método cada vez mais ganha força no sistema de produção, principalmente pela economia de insumos, como energia e matéria-prima virgem (AMBSC, 2008). Assim, a reciclagem, de materiais permite serem utilizados como matéria-prima na manufatura de novos produtos. Logo, a principal finalidade desta prática é a reintegração dos resíduos sólidos no ciclo de produção e consumo, baseado no princípio dos 3 R's: Reduzir,

Reutilizar, Reciclar (AMBSC, 2008). A Figura 4 apresenta o processo de reciclagem efetuada de forma manual por catadores de recicláveis.

Figura 4: Processo de reciclagem de materiais.

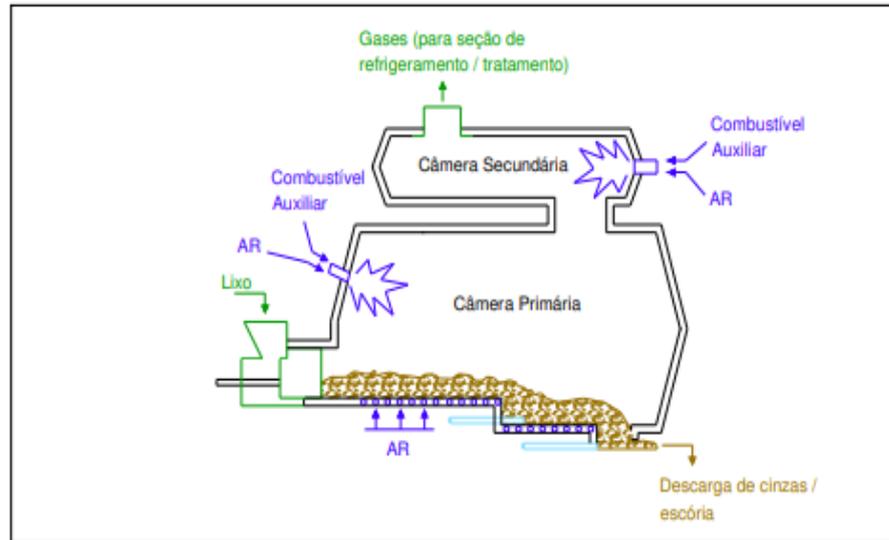


Fonte: AMBSC, 2008.

• **Incineração** - É o método composto por máquinas e equipamentos, a fim de reduzir o volume e peso dos resíduos por meio da combustão controlada. É um modelo comumente empregado em resíduos hospitalares e indústrias no Brasil (AMBSC, 2008). Além disso, por questões ambientais, uma vez que processo de incineração do lixo emite uma quantidade considerável de carbono, é muito aplicada uma moderna técnica, também chamada de plasma térmico. Nessa técnica o calor produzido pela queima não gerará fumaça, usam-se tochas de plasma ultra quente que transformam o lixo num gás que impulsiona as turbinas geradoras de eletricidade.

De forma geral, a tecnologia de Incineração empregada no mundo vai além dos mecanismos de aproveitamento da energia térmica, incorporam o desenvolvimento de sistemas de tratamento e depuração de gases, capazes de controlar, significativamente, a emissão de poluentes atmosféricos, e satisfazer, em geral, aos padrões ambientais de emissão vigentes (MACHADO, 2015). A Figura 5, mostra um esquema representativo de uma câmara de combustão, máquina utilizada no processo de incineração de resíduos. Observa-se, o lixo entra na primeira câmara onde é injetado ar e, caso seja necessário, um combustível auxiliar. Assim, os gases sobem para a segunda câmara onde mais ar é injetado. Após este processo, os gases seguem para o sistema de tratamento e assim as cinzas que ficam depositados na primeira câmara e são retirados e direcionados para o aterro.

Figura 5: Funcionamento de um incinerador de RSU.



Fonte: : CETSB, 1997.

• **Lixão** - Caracterizado pelo descarte simples sobre o solo sem quaisquer medidas de prevenção a saúde pública e ambiental. Ainda de acordo com Bidone (2001) é a área em que se descarta de forma inadequada, ocasionando sérios problemas como escoamento de líquidos que podem contaminar as águas superficiais e os lençóis freáticos; podendo ainda, proporcionar a liberação de gases de efeito estufa, como por exemplo o gás metano, dióxido de carbono e entre outros. A Figura 6 apresenta um lixão.

Figura 6: Lixão a céu aberto



Fonte: Goes, 2016.

• **Aterro controlado** - Tratamento de disposição de resíduos sólidos no solo, geralmente em antigos Lixões, sob cuidados de integridade a saúde e segurança pública, minimizando os impactos ambientais. A Figura 7 apresenta um aterro controlado, com área de disposição de resíduos minimizada.

Figura 7: Aterro controlado.



Fonte: Goes, 2016.

Similar ao aterro sanitário, o aterro controlado, produz, em geral, poluição localizada, a extensão da área de disposição é minimizada, porém, não dispõe de impermeabilização de base, este que protege de subprodutos deste tipo de aterro, que se espelhe e comprometa a qualidade das águas subterrâneas, nem sistemas de tratamento de chorume ou de dispersão dos gases gerados. Figura 8 mostra a instalação com manta de impermeabilização, uma das principais diferenças do aterro sanitário.

Figura 8: Instalação com manta de impermeabilização.



Fonte: Faria, 2010.

• **Aterro sanitário** - É a técnica utilizada para a disposição de resíduos sólidos no solo, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite o confinamento adequado e seguro a proteção à saúde pública e ambiental. É constituído por camadas cobertas com material inerte no solo, seguindo os critérios de normas operacionais específicas (D' ALMEIDA & VILHENA, 2000). A Figura 9 apresenta um aterro sanitário, local destinado à decomposição final de resíduos sólidos gerados pela atividade humana.

Figura 9: Aterro sanitário Salvaterra.



Fonte: Faria, 2010.

Para realização do projeto de aterro sanitário, é necessário realizar estudos prévios de cunho geológico e topográfico para determinação da área a ser destinada para que não comprometa o meio ambiente. Deste modo, na etapa de construção é realizado, inicialmente, a impermeabilização do solo através de combinação de argila e lona plástica de impermeabilização (PEAD), visando evitar infiltração de substâncias líquidas no solo, estes que são drenados por tubulações e escoados para um tanque de tratamento. Além disso, são colocados tubos ao redor de todo aterro, com a finalidade de desviar e escoar o excesso de águas de chuva do aterro (AMBIENTEBRASIL, 2008).

De acordo com a Norma Técnica NBR 8419 (ABNT, 1984), para a construção de um aterro sanitário não deve ser construído em áreas sujeitas à inundação, obtendo uma camada de espessura mínima de 1,5 m de solo insaturado entre a superfície inferior do aterro e o mais alto nível do lençol freático, bem como o solo deve ser de baixa permeabilidade (argiloso), sendo realizadas as aferições durante a época de maior precipitação pluviométrica da região. O aterro deve ser instalado a uma distância mínima de 200 metros de qualquer curso d'água. Assim

como deve possuir arborização ao seu redor para evitar erosões, espalhamento da poeira e retenção dos odores (AMBIENTE BRASIL, 2008).

Segundo D' Almeida e Vilhena (2000) na fase de operação, é implantado uma impermeabilização do local, minimizando os riscos de poluição, e controlando a proveniência dos resíduos. Com isso, biogás gerado é extraído e as águas lixiviantes são tratadas. Visando o controle dos resíduos no aterro, são pesados em balança e em seguida depositados em células que uma vez preenchidas são devidamente isoladas, seladas e tapadas, bem como os gases liberados durante a decomposição são captados e tratados de acordo com cada projeto, uma parcela destes são queimados com sistema de purificação de ar ou ainda utilizados como fonte de energia (AMBIENTE BRASIL, 2008).

2.1.4 Subprodutos de um aterro sanitário

A decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários gera subprodutos que prejudicam o meio ambiente de forma irreversível em curto, médio e longo prazo. Este tratamento pela ação de diferentes tipos de microrganismos, dá-se por dois processos, a decomposição aeróbia e anaeróbia. A decomposição aeróbia ocorre normalmente no período de deposição do resíduo. Após este período, surge a decomposição anaeróbica com a redução e ausência do oxigênio (O₂) presente nos resíduos dá (BORBA, 2006, p. 08).

A decomposição anaeróbia é dominante nos aterros sanitários devido à cobertura com material inerte no final de cada dia de deposição dos resíduos. Neste processo é produzido chorume, subproduto mais conhecido deste tipo de processo. Caracterizado por uma substância líquida preta altamente poluidor, viscoso e com odor forte. Assim, outro subproduto resultante ao final desta degradação anaeróbia, é a emissão de gases de efeito estufa, altamente poluentes. Estes gases são constituídos de gás metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), nitrogênio (N₂), entre outros. Sendo o gás metano, também chamado de Biogás de grande potencial energético (LANDIM e AZEVEDO, 2008, p. 63).

2.2 PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

2.2.1 Definição

De acordo com a literatura de Oliver et al., (2008), biogás é um gás combustível renovável com a queima de forma limpa, utilizado como fonte de energia alternativa. A tabela 1 apresenta relação de 1m³ de biogás frente a outras fontes de energia, ressaltando seu poder calorífico varia de 5000 a 7000 Kcal/m³.

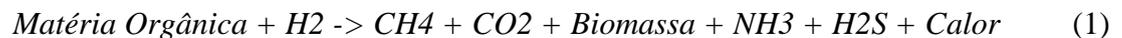
Tabela 1: Relação para 1 litro de biogás com outras fontes de energia

0,61 litros gasolina	0,45 litros de gás de cozinha
0,58 litros de querosene	1,5 quilos de lenha
0,55 litros óleo diesel	0,79 litros de álcool

Fonte: Oliver et al., 2008.

Para Salomon, Lora, (2005) e Zanette (2009), o biogás é uma mistura gasosa resultante da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, em que o gás metano e o dióxido de carbono encontram-se em maiores proporções. Entretanto, há também quantidades de ácido sulfídrico, amônia, traços de hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono, carboidratos saturados ou halogenados e oxigênio presentes no biogás (PARK e SHIN, 2001; BORBA 2006; ZANETTE, 2009).

De acordo com Araújo (2017), o biogás é resultante da fermentação anaeróbica, ocorrendo a degradação e estabilização da matéria orgânica, e assim formando o metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e substância líquida, rica em minerais que pode ser utilizado como biofertilizante. De forma geral, Kelleher et al. (2002) representa na equação 1 a digestão anaeróbia, sob ação de microorganismos que atuam de forma simbiótica.



A atividade de degradação da matéria orgânica ocorre sob ação conjunta de fungos, bactérias e arqueas (SANTANA, 2016). Esse processo biológico ocorre em diferentes fases, pelas bactérias hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos. Nesta cadeia de microorganismos, as bactérias acidogênicas e as arqueas metanogênicas caracterizam-se principalmente em relação a sua forma nutricional, a fisiologia, o pH, o crescimento e a sensibilidade quanto a variações de temperatura.

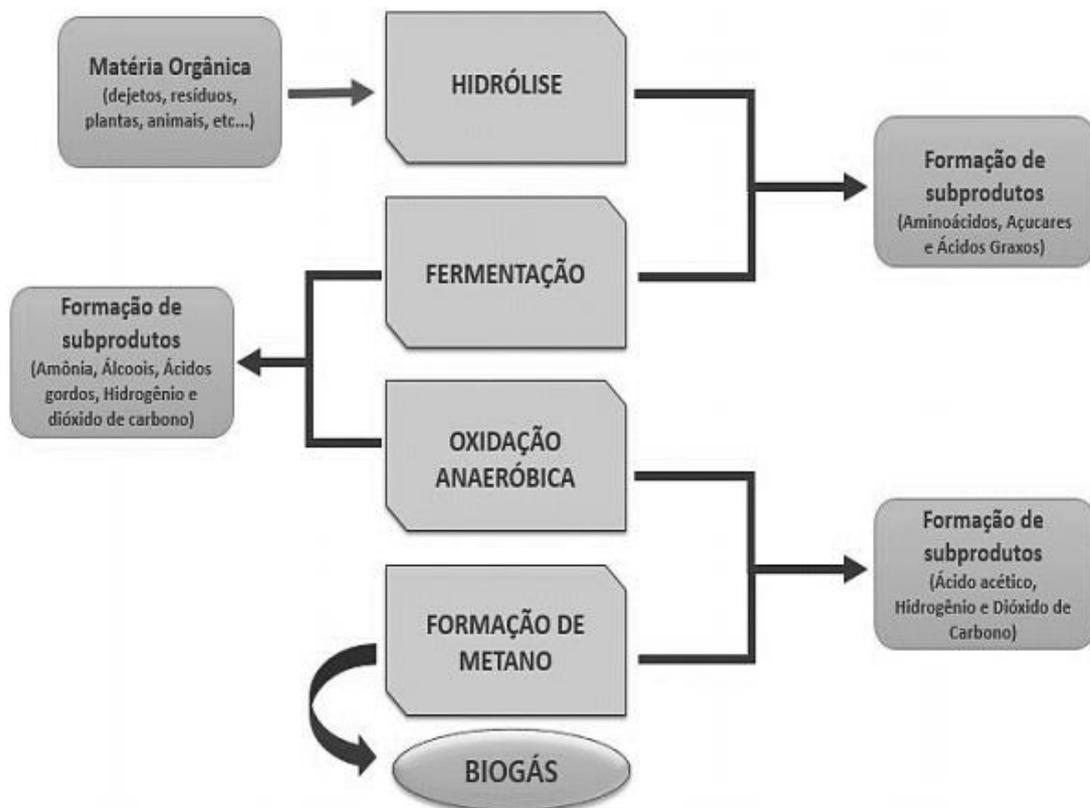
Assim que ocorre a deposição dos resíduos sólidos no aterro sanitário os microrganismos aeróbios começam a realizar suas atividades metabólicas, uma vez que, existe fonte de oxigênio molecular. Em seguida, após um determinado tempo organismos anaeróbios começam a proliferação, pois haverá ausência de oxigênio, promovendo a transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples (MELO, 2003).

2.2.2 Formação e geração de biogás em aterro sanitário

A produção do metano ocorre de forma independente em ambientes com ausência de ar, em que a matéria orgânica/biomassa é composta por carboidratos, lipídeos, proteínas entre outros nutrientes, decompondo-se e formando metano e impurezas. Assim, gerando uma proporção de biogás de CH₄:CO₂: 71%: 29%, em que parte do dióxido de carbono formado se liga à amônia e o enxofre fica como resíduo (ARAÚJO, 2017).

De acordo com Deublein e Steinhäuser (2008), a nível bacteriano, o biogás resultante do processo anaeróbico pelas quatro fases, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Em que possuem uma relação de sinergia muito íntima em suas reações químicas nas fases 1-2 e 3-4, estágios em que os níveis de degradação devem ter a mesma extensão. A Figura 10 descreve as reações bioquímicas na geração do biogás.

Figura 10: Etapas de produção do biogás



Fonte: Araújo, 2017.

- **Hidrólise** - Esse processo é importante a produção de biogás, uma vez que quebra dos polímeros maiores, iniciando o processo de degradação. Caracterizando a primeira etapa da biodigestão, as ligações moleculares fortemente complexas como carboidratos, proteínas,

gordura, são quebradas por enzimas e dão origem à materiais mais simples como aminoácidos, ácidos graxos, açúcares, como mostrado na equação 2.

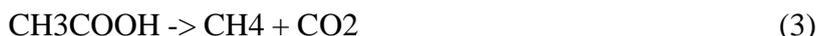


- **Acidogênese** – A matéria resultante do processo da hidrólise é transformada por bactérias fermentativas (acidogênicas) em compostos mais simples, ácido propanoico, ácido butanoico, ácido láctico, álcoois, gás carbônico, os quais são excretados. Variando sua formação de acordo com a quantidade de hidrogênio dissolvido na reação. Assim, quanto maior a concentração de hidrogênio, menor é o pH da reação, afetando a eficiência da acidogênese, o que resulta no acúmulo de ácidos orgânicos.

- **Acetogênese** – Nesta etapa ocorre a conversão das substâncias resultantes das bactérias acidogênese em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio, compostos que formam os substratos para a produção de metano. Logo, ao depender das condições de oxidação da matéria orgânica, haverá formação de ácido acético acompanhada pelo surgimento de dióxido de carbono ou hidrogênio (DEZOTTI, 2008). Essa é uma das fases mais delicadas do processo, por razões de quantidade de hidrogênio formada e capacidade de degradação desta substância pelas Arqueas responsáveis pela metanogênese. Além disso, haverá uma alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pois é gerado uma grande quantidade da matéria orgânica lixiviado (SANTANA, 2016).

- **Metanogênese** – Esta é a etapa final do processo de digestão anaeróbia, em que o ácido acético, o hidrogênio e dióxido de carbono é transformado em metano e gás carbônico, realizada por um conjunto de Archae anaeróbias estritas, denominadas metanogênicas (MADIGAN, 2010). Estas bactérias possuem características particulares que as permitem viver em ambientes complexos, em que são ausentes ou contém em baixas concentrações, seus aceptores de elétrons de oxigênio (O₂) e Nitrato (NO₃⁻). A metanogênese, no geral, pode ser considerada como uma respiração anaeróbia em que o gás carbônico ou o grupo metil de compostos C-1, ou carbono do grupo metil do acetato é o aceptor de elétrons (ARAÚJO, 2017).

De acordo com Araújo (2017), os microorganismos Archeas são divididas em dois grupos importantes em função de suas características fisiológica, são eles: metanogênicos hidrogenotróficos (utilizam o hidrogênio e dióxido de carbono) e os metanogênicos acetoclásticos (utilizam o ácido acético e metanol para a geração de metano e gás carbônico). A seguir é apresentado reações 3 e 4 representam a reação de cada um dos tipos das Arqueas metanogênese.



2.2.3 Condições operacionais

De forma geral, a eficiência microbiota na formação do biogás depende de alguns parâmetros, estes, que influenciara no processo bioquímico realizado por milhares de bactérias, por fatores que estão relacionados com o meio ideal para sua atuação, considerando o tipo de substrato, as características do ambiente e as condições de operação, como mostrado no quadro 4.

Quadro 4: Condições de operação para formação do gás metano.

Concentração de nutrientes	Carbono, nitrogênio, potássio, fósforo e enxofre, alguns micronutrientes minerais, vitaminas e aminoácidos são necessários para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, sendo assim, o conhecimento da composição química e o tipo de biomassa utilizada são importantes (FILHO, 1981).
pH: acidez ou alcalinidade	Nas fases da hidrólise e da acidogênese, o pH ideal fica em torno de 5,2 à 6,3. Já na acetogênese e metanogênese o pH ideal fica entre 6,5 à 8. Abaixo do pH crítico pode haver precipitação dos íons metálicos, bem como inibição da ação bacteriana. Acima do pH crítico, a partir do qual a concentração de íons carbonato disponíveis é elevada, os metais pesados passam a ser precipitados na forma de carbonatos, e neste caso é acentuada a influência do pH (ARAUJO, 2017).
Temperatura	A porcentagem de metano na constituição do biogás é maior quando o processo de fermentação ocorre em temperaturas mais elevadas, o que garante um maior poder calorífico à mistura. As arqueas metanogênicas as mesofílicas, que atuam em temperaturas situadas na faixa de 20 a 40°C, e as, que atuam na faixa de 50 a 60°C. O processo de digestão e gaseificação é altamente acelerado à temperaturas entre 35 e 37°C. Para temperaturas inferiores a 35°C o processo de digestão é menor e, para temperaturas inferiores a 15°C, a produção é muito reduzida (BARRERA, 2003).
Tempo de detenção hidráulica	Para o substrato composto de resíduos de matéria orgânica o tempo de detenção situa na faixa de 20 a 30 dias, sendo que com 30 dias a carga orgânica já sofreu grande redução e devido a isso, a produção de biogás já atingiu seu máximo e a partir desse ponto passa a decair (BEUX, 2005).

Fonte: Adaptado Araújo, 2017.

2.2.4 Impactos do biogás ao meio ambiente

Os impactos são causados através dos subprodutos da degradação da matéria orgânica presente no aterro sanitário. Assim, Efeito Estufa, de acordo com Silva e Campos (2008, p. 88), é um fenômeno que ocorre de forma natural na atmosfera, essenciais para manter a temperatura necessária para a existência de vida no planeta, uma vez que os GEE são capazes de reter o calor do sol.

Entretanto, as ações antrópicas tem aumentado exponencialmente a quantidade desses gases na atmosfera. Logo, a geração descontrolada de resíduos sólidos com a geração de gases proporcionada por sua degradação tem se tornado um agravante frente a essas questões. Dessa forma, dióxido de carbono, CFC, metano, vapor de água, ozônio e óxido nitroso, são os gases que mais contribuem para o efeito estufa. (SILVA e CAMPOS, 2008).

2.2.5 Protocolo de Quioto

De maneira geral, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), praticada durante a Conferência Rio-92, foi um grande marco para toda a sociedade, com a finalidade de alcançar a estabilização das concentrações de Gases de Efeito Estufa - GEEs na atmosfera em nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático que representa um aumento significativo da temperatura média da superfície terrestre de 1° a 3,5° Celsius e aumento do nível médio do mar de 15 a 90 cm, previstos até 2100, aumento ocasionado principalmente pelas atividades antrópicas (BRASIL. SENADO FEDERAL, 2004, p. 12).

Assim, assinado em dezembro de 1997, Protocolo de Quioto estabelece metas de redução de emissão de gases de efeito estufa e mecanismos adicionais de implementação para que estas metas sejam atingidas. As metas de redução são diferentes para os países participantes,¹ em consonância com o “princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas” (BRASIL. SENADO FEDERAL, 2004, p. 12). Além disso, as obrigam a elaborar estratégias solucionadoras que sejam conciliadas com o desenvolvimento econômico com a preservação dos recursos (ANDRADE; COSTA, 2008; RIBEIRO et al., 2008).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é um dos mecanismos propostos que permite a participação de países em desenvolvimento em cooperação com países desenvolvidos, que tem a finalidade de redução das emissões de GEEs ou no aumento da remoção de CO₂, por intermédio de investimentos em tecnologias mais eficientes, utilização de fontes de energias renováveis, racionalização do uso da energia, florestamento e reflorestamento, Mercado de

Carbono, onde os países, que conseguem reduzir suas emissões, vendem seus créditos de carbono (RIBEIRO et al., 2008).

No Brasil, e nos países em desenvolvimento, não há necessidade de reduzir as emissões, assim, todo o carbono poupado a atmosfera, ou até mesmo recuperado da atmosfera, gera créditos de carbono e pode ser comercializado com empresas oriundas de países que estejam no acordo e necessitam reduzir as emissões (RIBEIRO et al., 2008) Deste modo, os gases produzidos nos aterros, além de poder ser utilizados na geração de energia, podem ser negociados através do Protocolo de Quioto. Com isso, aterros sanitários que queimam seus gases, convertendo metano em dióxido de carbono ou potencializam seu poder energético, poderão ser remunerados financeiramente (DIAS, 2009).

2.2.6 Principais modelos empíricos para estimativa de biogás

Diversas ferramentas empíricas estão disponíveis sob modelos matemáticos para gerar dados que na prática dificilmente seriam possíveis obter, estes que proporcionarão a avaliação do potencial de geração de biogás em um aterro sanitário, por exemplo. E assim, serem utilizados em projetos que visem a gestão do biogás. (BANCO MUNDIAL, 2004).

Deste modo, os resultados da estimativa da produção total de gás podem variar conforme o modelo utilizado, devido suas características de parâmetros, como condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e entre outros. Assim, o modelo adotado influenciará diretamente na geração de gás no aterro, principalmente quando houver informações inconsistentes do local. Alguns critérios são fundamentais para o cálculo da geração do metano, como a população local, que determinará a quantidade de lixo produzida por habitante, além do tempo de vida do aterro, sendo esses apenas alguns dos fatores relevantes no cálculo (SILVA, 2012).

Neste sentido, para a consolidação dos dados estimados e modelo adequado, faz-se necessário considerar algumas variáveis, como por exemplo a disponibilidade de dados. Os modelos mais utilizados no mercado são o modelo do Banco Mundial, que foi o primeiro a ser criado, o LANDGEM e o modelo do IPCC.

• **Método de Inventário do IPCC (International Panel on Climate Change)** - Exibida em 1996 pelo Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC), o Método de Inventário determina a estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável presente em resíduos sólidos, assim, calculando a quantidade de metano gerada em determinados resíduos depositados, estes que deverão obedecer as categorias de resíduos sólidos da região

(CETESB/SMA, 2003).

Nesta metodologia é necessário a inserção de dados estatísticos da população e à quantidade de resíduos sólidos gerados da região. Em caso de ausência de dados específicos, recomenda-se o uso dos dados padronizados fornecidos pelo IPCC. A seguir é apresentado a equação do potencial de metano gerado em aterros pelo método de inventário do IPCC:

$$Q_{CH_4} = \frac{pop_{urb} \cdot TaxaRSD \cdot RSDf \cdot L_o}{pCH_4} \quad (5)$$

Q_{CH_4} = metano gerado (m^3CH_4/ano);

pop_{urb} = População urbana (habitantes);

$TaxaRSD$ = Taxa de geração de resíduos sólidos domiciliares/ habitantes ano (RSD/hab.ano);

$RSDf$ = Fração de resíduos sólidos domésticos que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos (%).

L_o = Potencial de geração de metano do lixo (kg de CH_4 /kg de RSD);

pCH_4 = Massa específica do metano (kg/m^3).

• **Modelo LandGEM** - A United States Environmental Protection Agency - USEPA apresenta um método para calcular os gases emitidos pela degradação de Resíduos Sólidos em aterros com disposição sem controle, esta, apresentada a equação cinética de primeira ordem (1) com a qual podem ser calculadas as emissões de metano. Esta metodologia foi publicada pela USEPA (“Emission factor documentation for AP-42 section 2.4. Municipal Solid Waste Landfills (BORBA, 2006, p. 19).

Deste modo, o LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) é um software desenvolvido pelo Control Technology Center da EPA (Environmental Protection Agency). Essa ferramenta permite estimar taxas de geração de biogás, metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), compostos orgânicos não metânicos e os poluentes atmosféricos individuais de aterros de resíduos sólidos (FIGUEIREDO, 2012).

Assim, para a projeção da quantidade de resíduos sólidos urbanos, levará em consideração o crescimento populacional com base em dados históricos dos censos e contagem populacional, do IGBE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, aspecto fundamental nas análises de produção de biogás no aterro sanitário e das simulações de geração de GEE.

O modelo matemático que rege a configuração do software estima a produção de gases a partir da Equação 6 (USEPA, 2005; ABRELPE, 2013).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_o \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

(6)

Q_{CH_4} = produção anual de metano para determinado ano (m^3/t);

$I = 1$ - acréscimo por ano;

n = ano do cálculo (ano inicial de abertura do aterro)

$j = 0,1$ - acréscimo por ano; k = taxa de geração de metano (ano^{-1});

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

L_o = potencial de geração de metano (m^3/Mg);

M_i = massa de resíduos recebidos no ano em cada seção (Mg);

t_{ij} = ano, em cada seção, de recebimento da massa de resíduos;

• **Método Banco Mundial** - O modelo do Banco Mundial constitui um modelo de primeira ordem, cuja base dá-se a uma fração constante de material biodegradável no aterro por tempo decorrido. Método comumente aplicado e aceito nas Américas do Sul e do Norte, definida pela equação 3 (SILVA, 2012):

$$Q_{CH_4} = kL_o M_i e^{-kt}$$

(7)

Q_{CH_4} = produção anual de metano para determinado ano (m^3/ano);

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

L_o = potencial de geração de metano (m^3/Mg);

M_i = massa de resíduos recebidos no ano em cada seção (tonelada/ano);

t = Anos após o fechamento do aterro;

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho consistiu em 4 etapas, a primeira baseada principalmente no aprofundamento de conceitos através de uma revisão na literatura acerca do saneamento ambiental, resíduos sólidos e principalmente a formação de biogás a partir da degradação microbiana dos resíduos no aterro sanitário.

A segunda etapa envolveu a coleta de dados quanto a gestão dos resíduos sólidos do município de Maceió, em que foram realizados diversos contatos com colaboradores de instituições, como a Secretaria de Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente - SEDET (órgão que tem como competência definir políticas públicas de desenvolvimento territorial do município de Maceió com promoção a ações de saneamento básico, esgoto sanitário, drenagem pluvial, limpeza urbana e preservação do meio ambiente), Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas - SEMARH (órgão da administração direta do Governo do Estado de Alagoas, que tem a competência de implantar e coordenar as políticas de Meio Ambiente e de Recursos Hídricos do Estado) a V2 Ambiental (operadora da Central de Tratamento de Resíduos – CRT) e a Estre Ambiental (Empresa gestora dos resíduos sólidos).

Entretanto, a terceira etapa da pesquisa compreendeu realizar uma estimativa baseada em uma metodologia teórica de geração de biogás oriundo da Central de Tratamento de Resíduos que atende todo o município de Maceió. Neste presente trabalho optou-se por utilizar o software LandGem® para estimativa da produção de gás.

Assim, a quarta etapa consistiu em discutir os resultados do programa, a potência de energia disponível a cada ano e por fim análises de sensibilidade quanto as possibilidades de utilização do biogás e a minimização de impactos ao meio ambiente com a emissão de seus GEE.

3.1 PERFIL DO MUNICÍPIO DE MACEIÓ

De acordo com o IBGE, a população da capital alagoana teve um total de 932.748 mil habitantes, inserida numa área de 503,072 km², que representa a densidade demográfica de 1.854,10 hab/km². Neste sentido, o Tribunal de Justiça do Estado de Alagoas estimou no ano de 2020 uma população de aproximadamente 1.061,330 habitantes, com densidade demográfica correspondente 2.109,7 hab/km², um aumento de 13,8% da população no município de Maceió nos últimos 10 anos. A Tabela 2 apresenta esse crescimento populacional em cada bairro da capital.

Tabela 2: Projeção da População Residente dos Bairros da Cidade de Maceió 2017-2020

MUNICÍPIO	PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO 2017-2020			
	2017	2018	2019	2020
MACEIÓ	1.042.829	1.049.061	1.055.401	1.061.330
Antares	23.637	24.002	24.372	24.719
Barro Duro	17.544	17.719	17.897	18.064
Bebedouro	9.762	9.743	9.723	9.705
Benedito Bentes	104.419	105.339	106.274	107.149
Bom Parto	12.266	12.234	12.201	12.170
Canaã	5.705	5.744	5.783	5.819
Centro	2.083	2.042	2.000	1.961
Chã da Jaqueira	16.434	16.423	16.413	16.403
Chã de Bebedouro	9.788	9.745	9.702	9.662
Cidade Universitária	87.007	87.883	88.774	89.608
Clima Bom	62.524	62.893	63.270	63.622
Cruz das Almas	13.704	13.816	13.930	14.037
Farol	16.466	16.444	16.421	16.400
Feitosa	34.355	34.581	34.811	35.026
Fernão Velho	5.831	5.835	5.840	5.844
Garça Torta	1.429	1.417	1.405	1.394
Grua de Lourdes	14.767	14.794	14.822	14.848
Guaxuma	2.690	2.702	2.714	2.725
Ipioca	8.908	8.983	9.059	9.130
Jacarecica	6.269	6.299	6.329	6.357
Jacintinho	93.549	93.945	94.348	94.725
Jaraguá	2.393	2.347	2.300	2.256
Jardim Petrópolis	5.984	6.035	6.086	6.135
Jatiúca	41.493	41.688	41.887	42.072
Levada	11.126	11.139	11.153	11.166
Mangabeiras	4.340	4.350	4.359	4.369
Mutange	2.716	2.721	2.726	2.731
Ouro Preto	7.976	8.075	8.175	8.269
Pajuçara	4.102	4.124	4.147	4.168
Pescaria	3.327	3.358	3.389	3.418
Petrópolis	30.097	30.459	30.826	31.170
Pinheiro	18.571	18.543	18.515	18.489
Pitanguinha	4.575	4.563	4.550	4.539
Poço	21.248	21.274	21.301	21.327
Ponta da Terra	7.811	7.778	7.744	7.712
Ponta Grossa	19.856	19.746	19.635	19.531
Ponta Verde	30.930	31.298	31.672	32.021

MUNICÍPIO	PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO 2017-2020			
	2017	2018	2019	2020
Pontal da Barra	2.597	2.604	2.611	2.617
Prado	17.631	17.624	17.617	17.609
Riacho Doce	7.086	7.191	7.298	7.398
Rio Novo	8.582	8.654	8.727	8.795
Santa Amélia	12.608	12.718	12.831	12.935
Santa Lúcia	31.920	32.250	32.586	32.900
Santo Amaro	1.993	1.996	2.000	2.004
Santos Dumont	25.894	26.199	26.509	26.800
São Jorge	11.803	11.992	12.184	12.364
Serraria	27.956	28.254	28.556	28.839

Fonte: TJAL/APMP/D.ETJ, 2020.

Maceió está dividida em 50 bairros, como apresentada na Tabela 3, que por sua vez compõem a malha de 8 regiões de controle administrativo da gestão municipal, conforme produzida com base nas informações do PDR Municipal (2009).

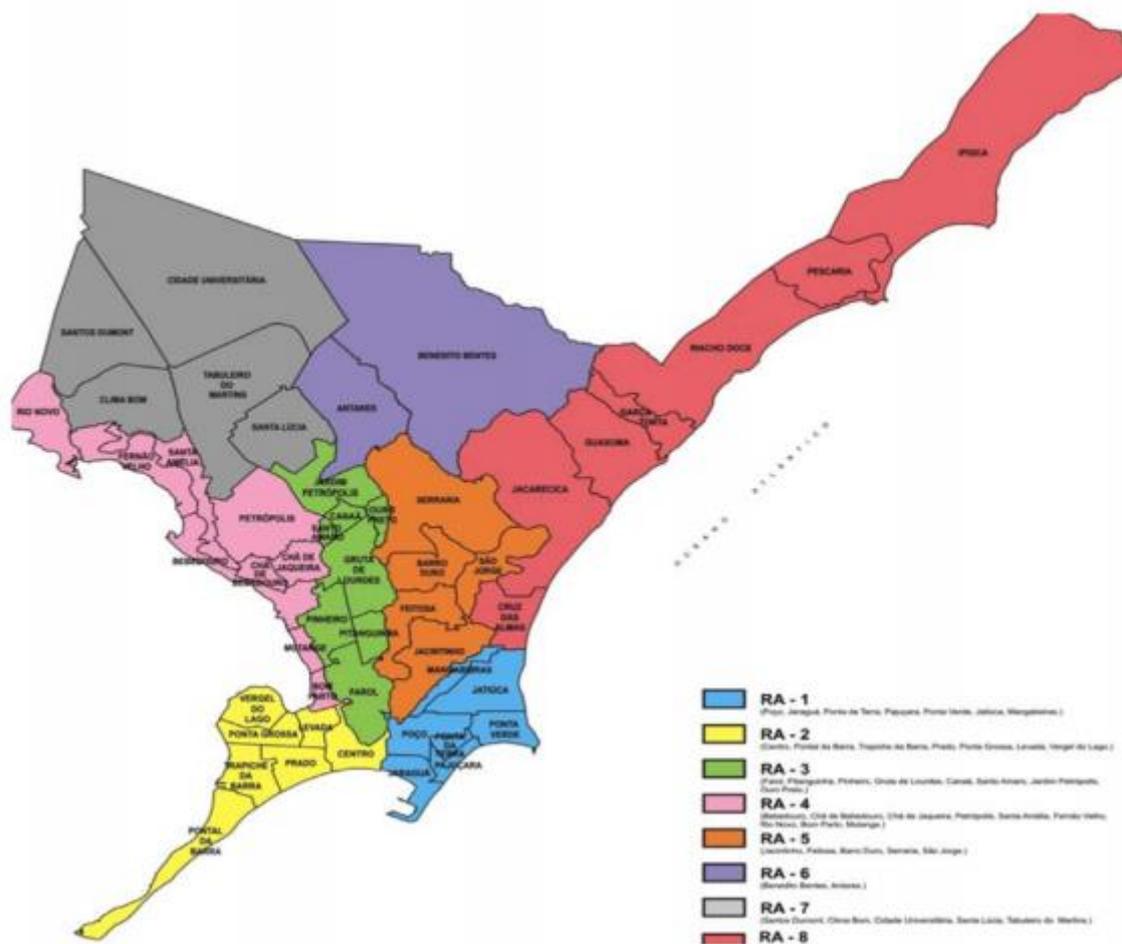
Tabela 3: Bairros por região no município de Maceió.

RA 1	RA 2	RA 3	RA 4	RA 5	RA 6	RA 7	RA 8
Poço	Centro	Farol	Bom Parto	Jacintinho	Benedito Bentes	Santos Dumont	Cruz das Almas
Jaraguá	Pontal da Barra	Pitanguinha	Mutange	Barro Duro	Antares	Cidade Universitária	Jacareica
Ponta da Terra	Trapiche da Barra	Pinheiro	Bebedouro	Serraria		Santa Lúcia	Guaxuma
Pajuçara	Prado	Grita de Lourdes	Chã de Bebedouro	São Jorge		Tabuleiro dos Martins	Garça Torta
Ponta Verde	Levada	Canaã	Petrópolis	Feitosa		Clima Bom	Riacho Doce
Jatiúca	Vergel do Lago	Santo Amaro	Chã da Jaqueira				Pescaria
Mangabeiras	Ponta Grossa	Jardim Petrópolis	Santa Amélia				Ipioca
		Ouro Preto	Fernão Velho				
			Rio Novo				

Fonte: PNAS, 2017.

Na Figura 11 é apresentado o mapa do município de Maceió com as divisões de suas regiões administrativas, como parâmetro para planejamento de suas políticas públicas e avaliação de impacto das políticas municipais de gestão, organização e prestação de serviços, entre eles educação e saúde.

Figura 11: Mapa do município de Maceió.



Fonte: PNAS, 2017.

Na economia o município é rico em sal-gema, contendo um polo cloroquímico, que abriga a maior empresa instalada no estado, a Braskem, e tem um setor industrial diversificado (indústrias químicas, açucareiras e de álcool, de cimento e alimentícias), além de sua atividade agrícola e pecuária e extração de gás natural e petróleo, informa a Secretaria Municipal de Economia – SEMEC da capital.

De acordo com o IBGE, Maceió obteve em 2018 um PIB – Produto Interno Bruto per capita R\$ 22,4 bilhões, obtendo uma forte participação na economia do estado, destacando-se no comércio e nas atividades industriais, notadamente nos setores químico, alimentício, metalúrgico e de plásticos.

Segundo a Secretaria Municipal, Esporte e Lazer - SEMELJ, Maceió possui um grande potencial e um papel importante no turismo do estado, atraindo diversos turistas com suas belezas naturais e grande diversidade cultural. Além de oferecer várias opções de lazer e espaços modernos para negócios.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITARIO DE MACEIÓ

Estabelecida pela Lei nº 12.305/2010, regulamentada pelo Decreto nº 7.404/2010, com a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), foi desativado o Vazadouro Cruz das Almas, e instalado a Central de Tratamento de Resíduos – CTR MA, localizado em Guaxuma, distrito do bairro Benedito Bentes, município de Maceió. Com as coordenadas geográficas: Latitude: -9.561214° ($09^{\circ}33'40.37''S$) e Longitude: -35.697483° ($35^{\circ}41'50.94''W$). Suas atividades deram início no dia 30 de abril de 2010 com concessão de 20 anos, ocupando uma área de 140 hectares, o equivalente a 130 campos de futebol, como mostrado de na Figura 12.

Figura 12: Central de Tratamento de Resíduos de Maceió.

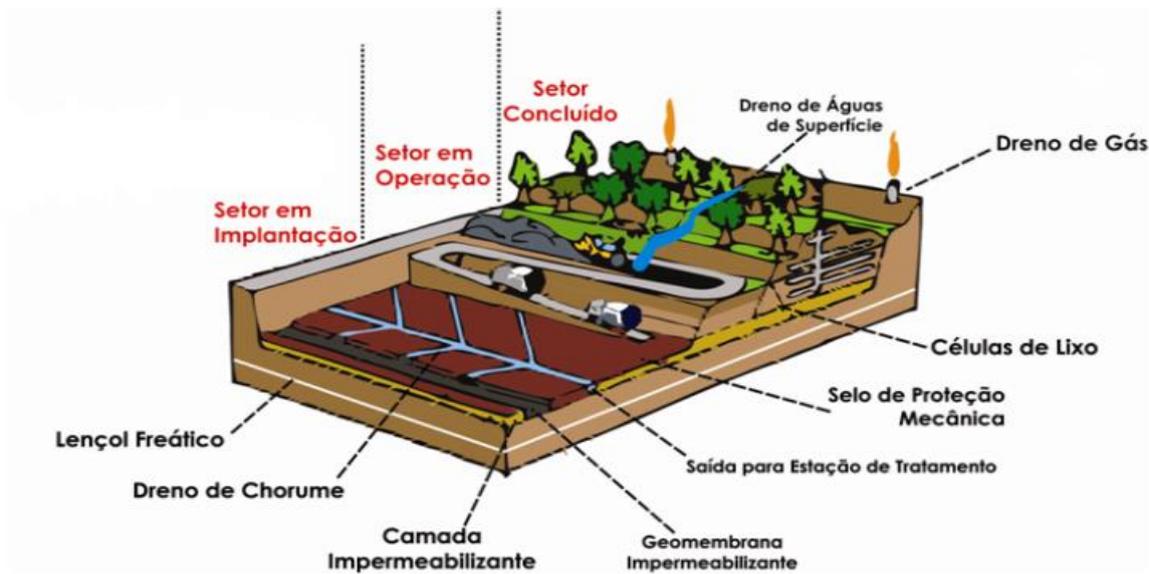


Fonte: PMGIRS/Maceió, 2017

O aterro sanitario de Maceió é administrado pela empresa V2 Ambiental SPE S/A do Grupo Estre, empresa especializada no tratamento e disposição de resíduos que atua como o operador da planta de biogás, assim definida uma nova alternativa de destinação final para s resíduos de Maceió, esta ambientalmente adequada (PMGIRS/Maceió, 2017).

A CTR recebe resíduos sólidos (tipo Classe II-A inerte e Classe II-B não inerte), com confinamento realizado pelo método em células, como mostra a Figura 13, como se fossem buracos gigantes, que são cobertas com uma camada de argila, o projeto inicial conta com três células, prevendo a construção de cinco células para receber o lixo doméstico que recebe aproximadamente 57 mil toneladas de lixo por mês (G1 Alagoas, 2014).

Figura 13: Método de confinamento em células em aterro sanitário.



Fonte: Alagoas, 2021.

Os gases produzidos sob condições anaeróbicas são capturados e queimados em flare, contando também, com uma estação de tratamento de efluentes líquidos percolados (chorume), transportado para uma rede de esgoto, em que é tratado pela Companhia de Abastecimento de Alagoas- CASAL, e vira água de reuso como apresentado na Figura 14 (ESTRE, 2021).

Figura 14: Estação de Tratamento de Efluentes da CRT Maceió.



Fonte: G1 Alagoas, 2014.

Nas instalações, foi implantado no fundo a ao lado das células duas camadas de telas impermeáveis de forma a evitar infiltração de substâncias líquidas oriundas dos resíduos. Além

disso, o aterro contém uma área para compostagem, todo o material biológico de poda de árvores que é triturado e acomodado. Há também uma área que recebe todo o tipo de entulho proveniente da construção civil denominada Britador (G1 Alagoas, 2014).

3.3 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

A projeção dos cálculos teóricos de produção de biogás no aterro levou em consideração o ano de abertura da CTR 2010 e foram assumidos valores da vida útil do aterro sanitário de 15 anos e taxa de coleta dos resíduos sólidos urbanos de 100%, sabendo o tempo de sua concessão de 20 anos. Para isso coletou-se na base dados da Secretaria de Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente – SEDET, o crescimento populacional neste mesmo período, estes baseados em dados históricos do censo de 2010 do IGBE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Esses dados foram obtidos através do modelo geométrico, devido à tendência deste método em apresentar uma estabilização do crescimento da população.

Diante disso, coletou-se os dados do crescimento de geração de resíduos sólidos urbanos anual, utilizados nos cálculos de geração per capita de resíduos sólidos para o período supramencionado. De acordo com Lima (2004) existem diversos fatores que influenciam na origem e a formação dos resíduos sólidos no meio urbano, como quantidade de habitantes do local, legislação, condições climáticas, hábitos, variações da economia, poder aquisitivo, nível educacional, entre outros.

Além disso, para estimativa de geração de resíduos sólidos no município de Maceió foi considerado a composição gravimétrica de resíduos sólidos datada em 2007, sob os critérios de matéria orgânica (biodegradáveis), recicláveis e rejeitos (descartáveis). Este que baseou-se, em dados as especificações de volume dos resíduos sólidos gerados, visto que utilizou-se como densidade específica dos resíduos recicláveis o valor de 203 kg/m³ (SILVA e SANTOS, 2010) e para os resíduos sólidos urbanos considerou-se a densidade específica de 600 kg/m³ (MONTEIRO, 2006).

Contudo, a investigação na literatura foi uma das principais fontes para a obtenção dos dados de entrada para caso em estudo e a definição dos cálculos. Os números relacionados à geração de resíduos foram retirados do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do município de Maceió, disponível no site Secretaria de Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente.

O tratamento de dados foi realizado por meio de cálculos teóricos. Para este, foi utilizado o o programa LandGEM (Landfill Gas Emissions Model)– versão 3.02, com base no

modelo matemático apresentado na equação 6. O software tem uma interface com a Microsoft Excel, como mostrado na Figura 15, método empírico utilizado para estimativa anual do gás metano, do dióxido de carbono e do biogás, como também de outros gases no aterro sanitário.

Figura 15: Tela de inserção de dados do programa.

USER INPUTS Landfill Name or Identifier: Central de Tratamentos de Resíduos de Maceió (C)

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections

Landfill Open Year	2010	
Landfill Closure Year	2023	
Have Model Calculate Closure Year	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	
Waste Design Capacity		megagrams

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Restore Default Model Parameters

Methane Generation Rate, k ($year^{-1}$)	0.05
Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3)	CAA Conventional - 170
NMOC Concentration ($ppmv$ as hexane)	CAA - 4,000
Methane Content ($\%$ by volume)	CAA - 50% by volume

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Default pollutant parameters are currently being used by model.

Gas / Pollutant #1	Methane	<input type="button" value="Edit Existing or Add New Pollutant Parameters"/> <input type="button" value="Restore Default Pollutant Parameters"/>
Gas / Pollutant #2	Carbon dioxide	
Gas / Pollutant #3	NMOC	
Gas / Pollutant #4	Carbon monoxide	

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units: short tons/year

Year	Input Units (SHORT TONS/YEAR)	Calculated Rate (Mg/year)
2010		
2011		
2012		
2013		
2014		
2015		
2016		
2017		
2018		
2019		
2020		
2021		
2022		
2023		
2024		
2025		
2026		
2027		
2028		
2029		
2030		
2031		
2032		
2033		

Fonte: Próprio autor, 2021.

Diante disso, L_0 e K são os parâmetros os mais importantes, uma vez que refletem variações de acordo com a região de estudo, clima e tipo de resíduos. De acordo com Figueiredo (2012), o fator K varia de 0,003 a 0,21 (ano^{-1}). Nas condições do Brasil o fator K pode ser aplicado para variação de 0,05 até 0,15 e o fator L_0 no Brasil varia de 140 até 190 m^3/t .

CEPEA (2004) apud Gonçalves (2007), afirma que o valor da taxa de geração de metano (k) é de acordo com a região, índice pluviométrico e clima, sugerindo para região Sul, $k = 0,08$ ano^{-1} ; para Sudeste, $k = 0,09$ ano^{-1} ; para Norte e Nordeste, $k = 0,1$. Já o potencial de geração de metano (L_0) $L_0 = 170$ m^3/t de resíduos e $k=0,02$ ano^{-1} para regiões áridas, $k=0,05$ ano^{-1} para regiões com a precipitação maior que 635 mm/ano .

De acordo com a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – SEMARH, Maceió tem uma precipitação média 1726 mm/ano , logo é admitido para cálculo os parâmetros $k=0,05$ ano^{-1} e $L_0 = 170$ m^3/t convencional.

Entretanto, para a determinação da potência e energia, utilizaram-se as seguintes

equações:

$$P = \left(\frac{Q \cdot PCI \cdot \eta}{31536000} \right) \quad (6)$$

$$E = P \cdot \text{Rend} \cdot \text{Tempo de operação} \quad (7)$$

Onde:

P = Potência Disponível (MW);

Q = Geração Anual de Metano por ano calculado (m³ CH₄/ano);

PCI = Poder Calorífico Inferior do metano admitindo 35,52*10⁶ kcal/ m³ CH₄

η = Eficiência dos motores (em média, 0,30);

31536000 = Conversão segundos em um ano

E = energia disponível (MWh/dia);

Rend = Rendimento de motores operando a plena carga , adotado 80% (estimado em 0,80);

Tempo de operação = Tempo de operação dos motores : 24 (h/dia).

A conversão do biogás em energia elétrica é feita a partir do uso de um motor de combustão interna acoplado a um gerador, neste caso utilizado um motor do ciclo otto e possui uma eficiência que varia de 20 a 50% (MARTINS, 2014). Adotado assim, o valor de 30% para a eficiência na estimativa teórica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CRESCIMENTO POPULACIONAL E QUANTIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE MACEIÓ

A projeção populacional da capital foi obtido no estudo intitulado Prognóstico dos serviços de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos através do Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos do município de Maceió/AL, a qual utilizou-se o histórico da população baseado nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015) e está apresentado na tabela 4. O índice de geração per capita de resíduos foi calculado por meio da relação entre os resíduos gerados a cada ano e a população projetada para este ano, respectivamente.

Tabela 4: Estimativa da geração de resíduos sólidos.

Ano	Crescimento populacional	RSU (t/ano) (100%)	Geração <i>per capita</i> (kg/hab.dia)
2010	932.295	262.466	0,86
2011	949.700	299.315	0,86
2012	967.105	336.164	0,95
2013	984.830	373.266	1,04
2014	1.002.879	408.912	1,12
2015	1.021.259	270.647	0,88
2016	1.039.976	293.096	0,94
2017	1.059.035	374.951	0,97
2018	1.078.445	381.823	0,97
2019	1.098.209	388.821	0,97
2020	1.118.336	395.947	0,97
2021	1.138.832	403.203	0,97
2022	1.159.704	410.593	0,97
2023	1.180.958	418.118	0,97
2024	1.202.602	425.781	0,97
2025	1.224.642	433.585	0,97
2026	1.247.086	441.531	0,97
2027	1.269.942	449.623	0,97
2028	1.293.216	457.863	0,97
2029	1.316.917	466.254	0,97
2030	1.341.053	474.800	0,97
2031	1.365.630	483.501	0,97
2032	1.390.659	492.363	0,97
2033	1.416.145	501.386	0,97
2034	1.442.099	510.575	0,97
2035	1.468.529	519.933	0,97

Fonte: PMGIRS, 2017.

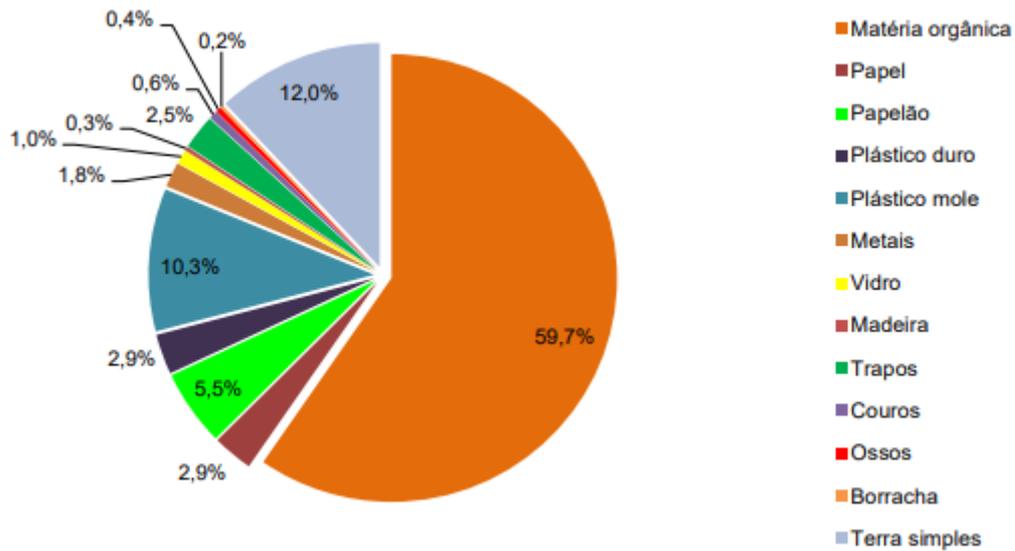
De acordo com o PMGIRS (2017), a partir do histórico populacional e do índice de geração de resíduos, foi adotado o modelo geométrico a fim de se prever o crescimento populacional da cidade e projetar a geração de resíduos nos próximos anos. Deste modo, coletou-se também os dados da composição gravimétrica dos resíduos sólidos com base na A caracterização dos resíduos sólidos domiciliares adotada por Tavares (2008), como apresentada na tabela 5.

Tabela 5: Estimativa de composição geométrica dos resíduos sólidos de Maceió.

Ano	Composição (t/ano)												
	Matéria orgânica 59,70% (t/ano)	Papel 2,90% (t/ano)	Papelão 5,50%(t/ano)	Plástico duro 2,90% (t/ano)	Plástico mole 10,30% (t/ano)	Metais 1,80% (t/ano)	Vidro 1,00% (t/ano)	Madeira 0,30% (t/ano)	Tapos 2,50% (t/ano)	Couros 0,60% (t/ano)	Ossos 0,40% (t/ano)	Borracha 0,20% (t/ano)	Terra simples 12,00% (t/ano)
1960													
2011													
2012													
2013	222.840	10.825	20.530	10.825	38.446	6.719	3.733	1.120	9.332	2.240	1.493	747	44.792
2014	244.120	11.858	22.490	11.858	42.118	7.360	4.089	1.227	10.223	2.453	1.636	818	49.069
2015	161.576	7.849	14.886	7.849	27.877	4.872	2.706	812	6.766	1.624	1.083	541	32.478
2016	174.978	8.500	16.120	8.500	30.189	5.276	2.931	879	7.327	1.759	1.172	586	35.172
2017	223.846	10.874	20.622	10.874	38.620	6.749	3.750	1.125	9.374	2.250	1.500	750	44.994
2018	227.949	11.073	21.000	11.073	39.328	6.873	3.818	1.145	9.546	2.291	1.527	764	45.819
2019	232.126	11.276	21.385	11.276	40.049	6.999	3.888	1.166	9.721	2.333	1.555	778	46.659
2020	236.380	11.482	21.777	11.482	40.783	7.127	3.959	1.188	9.899	2.376	1.584	792	47.514
2021	240.712	11.693	22.176	11.693	41.530	7.258	4.032	1.210	10.080	2.419	1.613	806	48.384
2022	245.124	11.907	22.583	11.907	42.291	7.391	4.106	1.232	10.265	2.464	1.642	821	49.271
2023	249.617	12.125	22.996	12.125	43.066	7.526	4.181	1.254	10.453	2.509	1.672	836	50.174
2024	254.191	12.348	23.418	12.348	43.855	7.664	4.258	1.277	10.645	2.555	1.703	852	51.094
2025	258.850	12.574	23.847	12.574	44.659	7.805	4.336	1.301	10.840	2.602	1.734	867	52.030
2026	263.594	12.804	24.284	12.804	45.478	7.948	4.415	1.325	11.038	2.649	1.766	883	52.984
2027	268.425	13.039	24.729	13.039	46.311	8.093	4.496	1.349	11.241	2.698	1.798	899	53.955
2028	273.344	13.278	25.182	13.278	47.160	8.242	4.579	1.374	11.447	2.747	1.831	916	54.944
2029	278.354	13.521	25.644	13.521	48.024	8.393	4.663	1.399	11.656	2.798	1.865	933	55.951
2030	283.455	13.769	26.114	13.769	48.904	8.546	4.748	1.424	11.870	2.849	1.899	950	56.976
2031	288.650	14.022	26.593	14.022	49.801	8.703	4.835	1.451	12.088	2.901	1.934	967	58.020
2032	293.941	14.279	27.080	14.279	50.713	8.863	4.924	1.477	12.309	2.954	1.969	985	59.084
2033	299.328	14.540	27.576	14.540	51.643	9.025	5.014	1.504	12.535	3.008	2.006	1.003	60.166
2034	304.813	14.807	28.082	14.807	52.589	9.190	5.106	1.532	12.764	3.063	2.042	1.021	61.269
2035	310.400	15.078	28.596	15.078	53.553	9.359	5.199	1.560	12.998	3.120	2.080	1.040	62.392

Fonte: PMGIRS, 2017.

Como pode ser observado na tabela 5, o maior percentual, aproximadamente 59,70% dos resíduos sólidos de Maceió é de matéria orgânica, seguido de terra simples (12%) e papelão (5,50%). Os componentes em menores quantidades são borrachas com 0,20%; madeira com 0,30% e ossos com 0,40%. Dessa forma, as porcentagens dos resíduos caracterizados demonstram importante artifício para os critérios de tratabilidade, considerando as categorias de classificação apresentadas por Tavares, Pinheiro e Callado (2007), como apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2: Caracterização de resíduos sólidos de Maceió.

Fonte: PMGIRS, 2017.

Desta forma, os dados sobre a composição gravimétrica de resíduos sólidos apresentada, datadas de 2007, demonstrada no gráfico 5, apresenta maior número de categorias caracterizadas e maior amplitude de amostragem. Assim, estimativa de geração de resíduos sólidos no município de Maceió mostram importantes aspectos quantitativos quanto aos critérios de tratabilidade, são eles: matéria orgânica (biodegradáveis), recicláveis e rejeitos (descartáveis). Considerando o alto potencial de matéria biodegradável na composição de resíduos de aproximadamente 61%, composto pelas categorias matéria orgânica (59,70), madeira (0,30%), couro (0,60%) e osso (0,40%). De forma geral, componentes essenciais para geração de metano.

O elevado índice de matéria orgânica deve-se principalmente a produção e comércio de produtos orgânicos, destacando-se restaurantes e a comercialização de frutos, legumes, verduras e afins em comércios e feiras livres, tratando também a produção de coco na região. Além disso, Maceió tem um comércio extenso na comercialização de peixes mariscos e moluscos, em especial ao sururu de capote, prato característico dos alagoanos. Entretanto, há uma forte participação de galhos e folhagens oriundos da limpeza urbana, manutenção da vegetação de ruas e praças, principalmente na orla lagunas da capital. A tabela 6 compara os índices da composição gravimétrica com a classe de renda.

Tabela 6: Índice de composição gravimétrica com base no nível de renda.

Nível de renda	Orgânico (%)	Papel (%)	Plástico (%)	Vidro (%)	Metal (%)	Outros (%)
Baixa renda	64	5	8	3	3	17
Média-baixa renda	59	9	12	3	2	15
Média-alta renda	54	14	11	5	3	13
Alta renda	28	31	11	7	6	17

Fonte: Bragagnolo, et al., 2020.

Contudo, o índice de matéria orgânica da capital (59,7%) apresentado pelo PMGIRS (2017), se comparado as faixas de classe econômica, como demonstrado na Tabela 6, Maceió encontra-se com um nível de renda baixo, fator este, correlacionado ao poder aquisitivo e desemprego, estando diretamente ligado ao baixo consumo de produtos industrializados, além da deficiente gestão de do setor alimentício, tendo o alto desperdício como resultante. O Brasil apresenta um índice de matéria orgânica de aproximadamente 60%, e neste sentido varias pesquisas mostraram que esse perfil é característico para países em desenvolvimento (TAVARES, 2008).

4.2 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE BIOGÁS NO ATERRO

De posse da estimativa de resíduos, possibilitou-se calcular a projeção do biogás por meio do software LandGem® (Equação 6), como mostra a Tabela 7. Os parâmetros de k e L_0 considerados foram respectivamente iguais a: 0,05 [ano⁻¹] e 170 [m³/ton], sabendo-se que a precipitação média de Maceió 1726 [mm/ano] (SEMARH,2021) e que os resíduos gerados na cidade têm um teor de matéria orgânica próximo a 61% (PMGIRS, 2017).

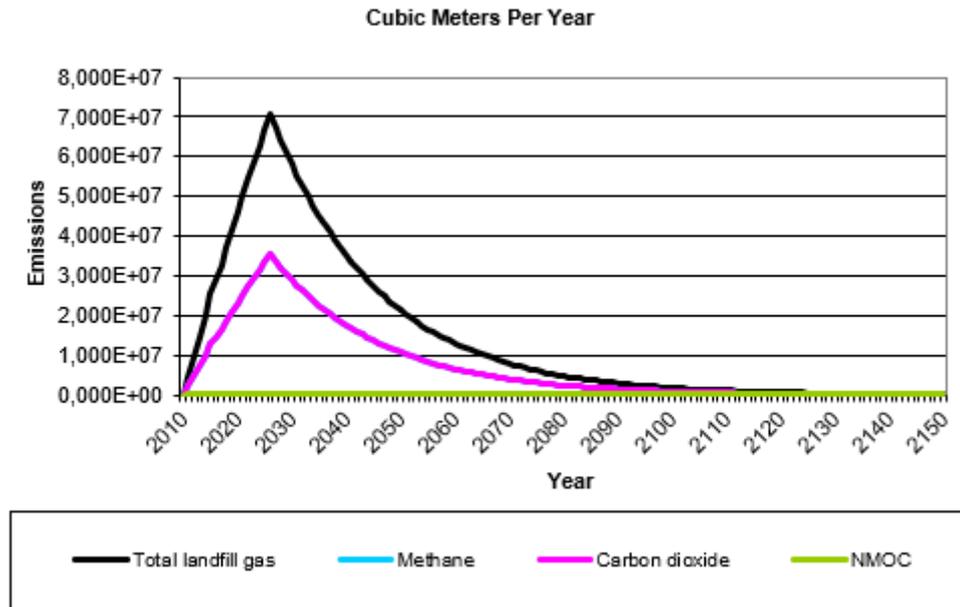
Tabela 7: Estimativa de emissões de gases no aterro de Maceió de 2010-2035.

Ano	RSU (t/ano)	Gás total (Biogás)		Metano		Dióxido de Carbono		NMOC	
		(m ³ /ano)	Mg/ano	(m ³ /ano)	Mg/ano	(m ³ /ano)	Mg/ano	(m ³ /ano)	Mg/ano
2010	262.466	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2011	299.315	3,97E+06	4,95E+04	1,98E+06	1,32E+03	1,98E+06	3,63E+03	1,59E+04	5,69E+01
2012	336.164	8,30E+06	1,04E+04	4,15E+06	2,77E+03	4,15E+06	7,59E+04	3,31E+04	1,19E+02
2013	373.266	1,30E+07	1,62E+04	6,49E+06	4,33E+03	6,49E+06	1,19E+04	5,19E+04	1,86E+02
2014	408.912	1,80E+07	2,25E+04	8,99E+06	6,00E+03	8,99E+06	1,65E+04	7,19E+04	2,58E+02
2015	270.647	2,33E+07	2,91E+04	1,16E+07	7,77E+03	1,16E+07	2,13E+04	9,31E+04	3,34E+02
2016	293.096	2,62E+07	3,28E+04	1,31E+07	8,75E+03	1,31E+07	2,40E+04	1,05E+04	3,76E+02
2017	374.951	2,94E+07	3,67E+04	1,47E+07	9,80E+03	1,47E+07	2,69E+04	1,18E+05	4,21E+02
2018	381.823	3,36E+07	4,20E+04	1,68E+07	1,12E+04	1,68E+07	3,08E+04	1,35E+05	4,82E+02
2019	388.821	3,78E+07	4,71E+04	1,89E+07	1,26E+04	1,89E+07	3,46E+04	1,51E+05	5,41E+02
2020	395.947	4,18E+07	5,22E+04	2,09E+07	1,39E+04	2,09E+07	3,82E+04	1,67E+05	5,99E+02
2021	403.203	4,57E+07	5,71E+04	2,29E+07	1,53E+04	2,29E+07	4,19E+04	1,83E+05	6,55E+02
2022	410.593	4,96E+07	6,19E+04	2,48E+07	1,65E+04	2,48E+07	4,54E+04	1,98E+05	7,11E+02
2023	418.118	5,34E+07	6,67E+04	2,67E+07	1,78E+04	2,67E+07	4,89E+04	2,14E+05	7,65E+02
2024	425.781	5,71E+07	7,13E+04	2,86E+07	1,91E+04	2,86E+07	5,23E+04	2,28E+05	8,19E+02
2025	433.585	6,075E+07	7,59E+04	3,04E+07	2,026E+04	3,04E+07	5,56E+04	2,43E+05	8,71E+02
2026		6,45E+07	8,03E+04	3,22E+07	2,15E+04	3,22E+07	5,89E+04	2,57E+05	9,22E+02
2027		6,12E+07	7,64E+04	3,06E+07	2,04E+04	3,06E+07	5,60E+04	2,45E+05	8,77E+02
2028		5,82E+07	7,27E+04	2,91E+07	1,94E+04	2,91E+07	5,33E+04	2,33E+05	8,35E+02
2029		5,54E+07	6,92E+04	2,77E+07	1,85E+04	2,769E+07	5,07E+04	2,22E+05	7,94E+02
2030		5,27E+07	6,58E+04	2,63E+07	1,76E+04	2,63E+07	4,82E+04	2,11E+05	7,55E+02
2031		5,01E+07	6,26E+04	2,51E+07	1,67E+00	2,51E+07	4,59E+04	2,00E+05	7,18E+02
2032		4,77E+07	5,95E+04	2,30E+07	1,59E+04	2,38E+07	4,36E+04	1,91E+05	6,83E+02
2033		4,53E+07	5,66E+04	2,27E+07	1,51E+04	2,27E+07	4,15E+04	1,81E+05	6,50E+02
2034		4,31E+07	5,39E+04	2,16E+07	1,44E+04	2,16E+07	3,95E+04	1,73E+05	6,18E+02
2035		4,10E+07	5,12E+04	2,05E+07	1,37E+04	2,05E+07	3,76E+04	1,64E+05	5,88E+02

Fonte: Próprio autor, 2021.

Deste modo, a Tabela 7 apresenta a estimativa de geração de biogás no aterro, com geração máxima dos gases ocorrendo no ano de 2026, um ano após o encerramento da vida útil do aterro, com volume de 64,5 milhões m³ /ano e os principais componentes do biogás, entre eles o gás metano com 32 milhões m³ /ano, dióxido de carbono 32 milhões m³ /ano, compostos orgânicos não metânicos- NMOC com 257.300 m³ /ano. O gráfico 3 apresenta o comportamento da curva da geração desses gases.

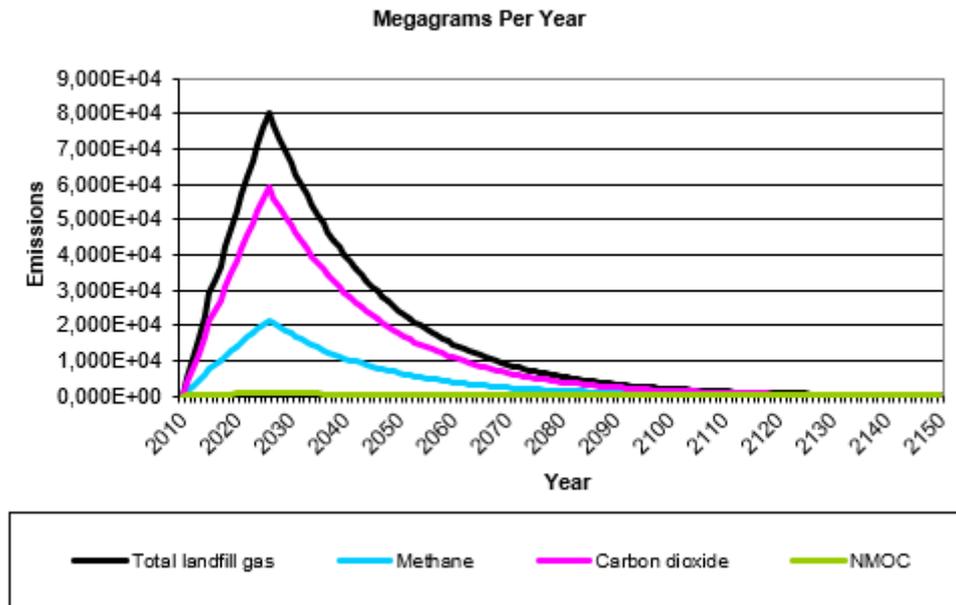
Gráfico 3: Emissão de gases na Central de Tratamento de Resíduos - Maceió.



Fonte: Próprio autor, 2021.

O Gráfico 3 mostra o comportamento do aumento das emissões geradas pelo aterro sanitário por meio da digestão anaeróbia, que alcançam seu valor máximo em 2026, bem com a similaridade quantitativa do volume de geração de dióxido de carbono e do gás metano, percebendo que o programa LandGEM considera que a geração de metano vai crescendo com o passar dos anos à medida que mais resíduos sólidos são depositados no aterro sanitário, até atingir um pico máximo de geração de metano próximo ao ano de encerramento do aterro e decair continuamente. O gráfico 4 mostra o comportamento da curva de emissões em Megagrama/ano (Mg/ ano).

Gráfico 4: Comportamento da curva de emissões em unidades e Megagrama/ano.



Fonte: Próprio autor, 2021.

No Gráfico 4, observa-se a máxima emissão de gases de 80.344 Mg/ano, atingindo 58.883 Mg/ano de dióxido de carbono, 21.461 Mg/ano de metano e compostos orgânicos não metânicos- NMOC com 922 Mg/ano, dos quais o metano é o que tem o poder calorífico necessário para a combustão e geração de energia.

4.3 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA E ENERGIA TEÓRICA A SER APROVEITADA NO ATERRO SANITÁRIO

De acordo com projeção de geração de metano ao longo dos anos, foi possível estimar a potência (MW), assim como, a geração de energia elétrica (MWh/dia, MWh/mês, MWh/ano), através da equação 6 e 7 respectivamente, disponível na CTR Maceió, considerando o período de 2010 a 2035, conforme é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Potência e energia disponível em função de metano na CTR-Maceió.

Ano	m ³ CH ₄ /ano)	Potência disponível (MW)	Energia disponível (MWh/dia)	Energia disponível (MWh/mês)	Energia disponível (MWh/ano)
2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2011	1983000,00	0,67	12,87	386,06	4632,72
2012	4148000,00	1,40	26,92	807,55	9690,64
2013	6486000,00	2,19	42,09	1262,73	15152,72
2014	8990000,00	3,04	58,34	1750,22	21002,61
2015	11640000,00	3,93	75,54	2266,13	27193,59
2016	13120000,00	4,43	85,14	2554,27	30651,20
2017	14690000,00	4,97	95,33	2859,92	34319,06
2018	16810000,00	5,68	109,09	3272,65	39271,84
2019	18880000,00	6,38	122,52	3675,65	44107,82
2020	20890000,00	7,06	135,57	4066,97	48803,62
2021	22870000,00	7,73	148,41	4452,44	53429,33
2022	24800000,00	8,38	160,94	4828,19	57938,24
2023	26690000,00	9,02	173,20	5196,14	62353,69
2024	28550000,00	9,65	185,28	5558,25	66699,06
2025	30370000,00	10,26	197,09	5912,58	70950,98
2026	32170000,00	10,87	208,77	6263,01	75156,17
2027	30600000,00	10,34	198,58	5957,36	71488,31
2028	29110000,00	9,84	188,91	5667,28	68007,34
2029	27690000,00	9,36	179,69	5390,83	64689,91
2030	26340000,00	8,90	170,93	5128,00	61536,01
2031	25050000,00	8,47	162,56	4876,86	58522,29
2032	23000000,00	7,77	149,26	4477,75	53733,04
2033	22670000,00	7,66	147,12	4413,51	52962,09
2034	21560000,00	7,29	139,91	4197,41	50368,89
2035	20510000,00	6,93	133,10	3992,99	47915,86

Fonte: Próprio autor, 2021.

Considerando que no ano de abertura no aterro (2010) não é possível ser utilizado para os devidos fins de estimativas teóricas de energia pela inconsistência e/ou pequena degradação da matéria orgânica e consecutiva geração de metano, observa-se que a potência elétrica e a energia gerada são diretamente proporcionais ao escoamento de biogás no aterro, com a máxima potência no ano de 2026 de 10,87 MW e a geração de energia elétrica de 208,77 MWh/dia ou 75156,31 MWh/ano ou seja energia que supriria aproximadamente 16 mil residências brasileiras (com consumo convencional). Além disso, considerando o potencial energético do metano de 2021 a 2035 com 39,2 milhões de m³, nestes 15 anos equivalente a 132 MW de potência acumulada disponível.

Desta forma, a energia acumulada no período da pesquisa , 2010 a 2035 total foi de 172,25 MW, mesmo após a vida útil do aterro sanitário à matéria orgânica presente nos resíduos sólidos continua se degradado e logo ainda há a geração de metano, conseqüentemente, há a geração de energia elétrica, podendo ainda ser aproveitada.

4.4 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE EMISSÕES EVITADAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Através do LandGEM possibilitou avaliar a geração de biogás e seus componentes, metano, gás carbônico e outros gases, obtendo-se um volume total de biogás acumulado, como apresentado na Tabela 7, entre os anos 2010 e 2035, de 960 milhões m³, metano acumulado de 510 milhões de m³, uma vez que o modelo prediz que o volume de gás carbônico se iguala ao de metano, e compostos orgânicos não metálicos- NMOC 3,99 milhões m³, caracterizando outros gases com um montante pouco significativo.

Desta forma, considerando que 100% (na prática considera aproximadamente 75%) do biogás produzido fosse captado, no total de 25 anos, período de estudo, 1,32 milhão de toneladas de biogás, em especial 1 milhão de toneladas de gás carbônico e 304 mil toneladas de metano, potentes Gases de Efeito Estufa seriam evitados no meio ambiente. O volume acumulado de dióxido de carbono gerado no aterro de Maceió neste período é equivalente a aproximadamente 95 mil automóveis fora de circulação. Assim, os aterros sanitários são a 3º maior fonte mundial de emissões de Gases do Efeitos Estufa, ações antrópicas que respondem aproximadamente 13% das causas de emissão destes gases (CETESB, 2008).

4.5 FORMAS DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

De modo geral, com as características obtidas através das estimativas apontadas, em especial do metano, a redução das emissões globais teria um efeito positivo rápido e significativo acerca do aquecimento da atmosfera, além de gerar valor comercial em importantes benefícios econômicos e energéticos.

De acordo com Martins (2014), existem diversas formas para o aproveitamento do biogás, a mais comum é para geração de energia elétrica, outra possibilidade consiste na queima direta (aquecedores, esquentadores, fogões e caldeiras) principalmente para pequenos produtores, em especial aos que utilizam biodigestores convencionais.

- Energia elétrica - utilização como energia química (combustível) em motores de combustão interna e em turbinas a gás. Além disso, podem permitir a utilização em sistemas de cogeração (calor e eletricidade).

- Energia térmica - utilizado para geração de calor em caldeira com sua queima, proporcionando o aquecimento da água e produzindo vapor, usual em processos industriais.

Entretanto, o biogás pode ser utilizado com o crédito de carbono, muito utilizado em países desenvolvidos, (devido ao acordo de Kyoto), sendo também um artifício considerável a possibilidade de investir na captação e geração de energia térmica ou elétrica, sob a projeção econômica, tornando-o mais atrativo para o financiamento. Assim, podendo reverter o cenário da matriz energética e o moldando o tratamento e cuidado com dos resíduos provenientes da Biomassa, para minimizar os impactos no meio ambiente, inserindo um novo sentido a política ambiental e de energia (SANTANA, 2016).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Percebe-se que com o crescimento da populacional, haverá aumento do consumo de água, alimentos, energia, e principalmente a geração de resíduos sólidos, uma problemática social e ambiental que assola a sociedade. Logo, surge a necessidade de políticas públicas mais efetivas acerca do desenvolvimento sustentável. Assim, para que Maceió se desenvolva em compatibilidade com o meio ambiente, a sociedade e a economia é fundamental estratégias de gerenciamento de resíduos, bem como a inserção de fontes renováveis para geração de energia elétrica. Contudo, o aproveitamento do biogás mostra-se como uma excelente alternativa para geração de eletricidade, cuja utilização minimiza os impactos ambientais, principalmente pela emissão de GEE minimizando os efeitos do aquecimento global.

De modo geral, percebe-se que a administração e manutenção da limpeza urbana no país tem um comportamento de desenvolvimento lento para a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, difundida em 2010, e para implementação dos novos conceitos acerca de estratégias de gerenciamento resíduos sólidos eficaz e sustentável, de forma a otimizar e aproveitar o potencial dos recursos existentes nos materiais descartados.

Em virtude dos aspectos mencionados, a pesquisa teve como princípio avaliar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados na Central de Tratamento de Resíduos de Maceió - Alagoas, e com os dados obtidos a partir da composição gravimétrica dos RSU do ambiente em estudo, o aterro possui um grande potencial de geração de metano, chegando a gerar cerca de 510 milhões de m³ de CH₄ no período de 25 anos de aproveitamento, sabendo que é gerado mais gases após o período estipulado no estudo.

Com as análises realizadas constatou-se que o ano de máxima geração de biogás foi 2026 com 64,5 milhões de m³, um ano após o fechamento do aterro e se convertido em energia

elétrica, corresponde a 75156,17. Além disso, considerando o potencial energético do metano para os próximos anos de 2021 a 2035, serão produzidos um volume de 39,2 milhões de m³, equivalente a 132,49 MW de potencia acumulada disponível, suficiente para atender aproximadamente 250 mil residências.

As principais limitações da pesquisa devem-se à atualização de dados concedidos pelas instituições, principalmente órgãos responsáveis pela gestão dos resíduos sólidos do município de Maceió, cuja obtenção é necessária para os cálculos teóricos. Além disso, o intuito de fortalecer a análise, os valores obtidos poderiam ser comparados aos dados reais do quantitativo de geração de resíduos anualmente.

Diante disso, como foi apontado na metodologia, existem limitações quanto a empregabilidade dos cálculos teóricos, por conta da ausência de dados disponíveis na literatura e pelas próprias instituições competentes, assim ocorrendo variações nos resultados por assumir premissas que divergem da prática.

Recomenda-se que para trabalhos futuros a realização experimental da composição gravimétrica dos resíduos sólidos e o quantitativo da geração dos resíduos do município, bem como uma análise dos custos de operação e implantação de sistema de captação, tratamento e conversão do biogás em energia elétrica, a fim de verificar a viabilidade de implantação de uma usina de biogás na Central de Tratamento Resíduos de Maceió.

REFERÊNCIAS

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

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Atlas brasileiro de emissões de gases de efeito estufa e potencial energético na destinação de resíduos sólidos. São Paulo, 2013. 171 p.

ABREU, F. V.; COSTA FILHO, M. A. F.; SOUZA, Mauro Carlos Lopes. Biogás de aterros sanitários para geração de energia renovável e limpa - um estudo de viabilidade técnica e econômica. In: IX Congresso Ibero americano de Engenharia Mecânica (CIBIM), 2009.

AMBIENTEBRASIL. Portal. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br>>. Acesso em 15 de Nov de 2020.

AMBSC. Ambiental Saneamento e Concessões. Disponível em: <<http://www.ambsc.com.br>>. Acesso em 15 de Dez de 2020.

ANDRADE, J. C. S; COSTA, P. Mudança Climática, Protocolo de Kyoto e Mercado de Créditos de Carbono: Desafios à Governança Ambiental Global. O&S. v.15 N° 45. Abril/Junho, 2008.

ARAÚJO, Ana Paula Caixeta. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Monografia do curso de Engenharia Química. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal De Uberlândia, UFU. 42 f. Uberlândia. 2017.

BANCO MUNDIAL. The World Bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean. Waterloo, 2004.

BRAGAGNOLO, Lucimara. FERRAZZO, Fernanda Machado. KORF, Eduardo Pavan. MOSSI,

BIANEK, J.; SCHIRMER, W. N.; CABRAL; A. R.; MAYER, C. L. D.; EURICH, P. H.; MARTINS, E. H.; Comparação entre metodologias USEPA e IPCC para estimativa teórica de produção de biogás em aterro municipal. Universidade Federal do Paraná. BIOFIX Scientific Journal v. 3 n. 1 p. 34-40, 2018.

BIDONE, F. Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais. Rio de Janeiro: RiMa, 2001.

BORBA, S. M. P. Análise de Modelos de Geração de Gases Em Aterros Sanitários: Estudo de casos. Rio de Janeiro: COPPE, 2006.

BRAGA, B. Introdução à Engenharia Ambiental. São Paulo: Prentice Hall, 2002. ABNT, 2004. Associação Brasileira De Normas Técnicas - ABNT. Classificação de resíduos sólidos. NBR 10.004.lei 12.305/2010 – Art. 3º inciso XVI.

Altemir José. Composição gravimétrica e estimativa de geração per capita municipal de resíduos sólidos urbanos destinados ao Aterro Sanitário de Palmeira das Missões, Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (2020): 7(16): 953-

970. ISSN 2359-1412.

BRASIL. Comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rbepop/v33n1/0102-3098-rbepop-33-01-0175pdf>>. Acesso em 20 de Jun 2020.

BRASIL. Senado Federal. Subsecretaria de Edições Técnicas. Protocolo de Quioto e legislação correlata. Brasília: Subsecretaria de Edições Técnicas do Senado Federal, 2004. v. 3 (Coleção Ambiental). 88 p.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em 10 de Fev de 2021.

CETSB - El.5011 ver. Fev/97 - "Sistema de incineração de resíduos de serviço de saúde - Procedimento".

D' ALMEIDA, M. O., & VILHENA, A. Manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT / CEMPRE, 2000.

DEUBLEINB, D., STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008 368p.

DIAS, V. C. F. Estudo das Emissões de Biogás nos Aterros Sanitários de Içara e Tijuquinhas. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2009.

DEZOTTI, M. Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos: Volume 5 da Série Escola Piloto de Engenharia Química. Editora E-papers, 2008.

ESTRE. Soluções para cidades. Disponível em: <<https://www.estre.com.br/solucoes-para-cidades/aterro-sanitario/>>. Acesso em 20 de Jan de 2021.

FARIA, Mário. Aterro Sanitário: Biogás produzido em aterros sanitários, aspectos ambientais e aproveitamento do potencial energético. Monografia do Curso de Especialização em Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. 108 f. São Paulo, 2010.

FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. Manual de gerenciamento de resíduos / Firjan. - Rio de Janeiro : [s.n], 2019. 35 p.

FIRMO, A. L. B. Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos. 2013. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

G1 Alagoas. Reportagem G1 Globo Disponível em: <<http://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2014/08/aterro-sanitario-de-maceio-funciona-ha-4-anos-mas-ainda-e-mal-utilizado.html#:~:text=Inaugurado%20em%202010%20no%20bairro,toneladas%20de%20lixo%20por%20m%C3%AAs>>. Acesso em: 21 Jan, 2021.

GOES, Dalvan. A contribuição do aterro sanitário na gestão de resíduos sólidos: Um breve estudo de caso no aterro de Paulo Afonso, BA. Revista Científica da FASETE 2016.1.

IBGE. Estudos e Pesquisas. Informação demográfica e socioeconômica. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/maceio/panorama>>. Acesso em: 21 Jan, 2021.

ICLEI, Manual para aproveitamento de biogás. São Paulo, 2009, 81 p.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T.F.; SUTTON, D.; LEAHY, M.J. Advances in poultry litter disposal technology – a review *Bioresource Technology*. v.83, p. 27-36, 2002.

LANDIM, A. L. P. F.; AZEVEDO, L. P. de. O Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários: Unindo o Útil ao Agradável. BNDES: Rio de Janeiro, 2008.

LIMA, L.M. Lixo: tratamento e biorremediação.3.ed. São Paulo: Hemus Editora, 2004.

LIMA, Mirian Luiza de; RODRIGUES, Edson Vander; COSTA, Wesley Satlher da, RIBEIRO, Josimar. Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Questão Socioambiental Municipal *Solid Waste: A Socio-Environmental Matter*. *BioEng, Tupã*, v.6 n.1, p. 08-17, Jan/Abr., 2012.

LINO, Fátima Aparecida de Moraes. Proposta de Aproveitamento do potencial energético do resíduo sólido e urbano e de esgoto doméstico com minimização dos impactos ambientais. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2014.

MADIGAN, M.; MARTINKO, J.; DUNLAP, P.; & CLARK, D. *Microbiologia de Brock*. 12ª Edição, Artmed, 2010.

MACHADO, Camila Frankenfeld. Incineração: Uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP. Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Ambiental, 97f, 2015.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; GOURC, J-P.; VILAR O. M.; NASCIMENTO, J. C. F. Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. *Waste Management*, v. 29, p. 153-161, 2009.

Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Aterros Sanitários: Conceitos Gerais. Disponível em: <http://www.mp.go.gov.br/portalweb/hp/9/docs/rsudoutrina_01.pdf>. Acesso em 10 deFev 2021.

MELO, M. C. de. Uma Análise de Recalques Associada aBiodegradação no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca. Recife: UFPE/ CTG, 2003.

MONTEIRO, E.D.V. Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 223- 230, 2006.

MOURA, L.F.; BARBOSA, P.T.; SILVA, F.F.M.; MACEDO, C.S. construção de biodigestor modelo indiano no instituto federal Campus-Apodi-RN. Anais... IX Congresso de Iniciação Científica do IFRN, on line, Campus Currais Novos, julho 4, 2013 – julho 6, 2013.

NASCIMENTO, D.P. et al. Estimativa de Geração de Biogás em Aterro Sanitário. In: FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 10., João Pessoa. Anais... João

Pessoa: FIRS, 2019.

NASCIMENTO, Kennedy Luiz Souza do. Potencial de geração de energia e viabilidade técnica e econômica da adoção de biodigestor no setor hospitalar. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Energia da Biomassa –Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo. 2016.

NASCIMENTO, D.P. et al. Estimativa de Geração de Biogás em Aterro Sanitário. In: FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 10., João Pessoa. Anais... João Pessoa: FIRS, 2019.

OLIVER, A. de P. M. et al. Manual de treinamento em biodigestão. Salvador: Winrock, 2008. 23 p.

PARK, J.W.; E SHIN, H.C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. *Atmospheric Environment*. v. 35 , p. 3445-3451, 2001.

PIMENTEL, C. H. L. A gestão dos resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa/PB - à luz das rotas tecnológicas. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife: UFPE, 2017.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLIVEIRA, M. A.; ROALCABA, O. D. C.; Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rbepop/v33n1/0102-3098-rbepop-33-01-0175pdf>>. Acesso 18 de jun 2020.

PMGIRS - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do município de Maceió/AL. Tomo II - Prognóstico dos serviços de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. Maceió – AL. 2017.

PNAS - POLÍTICA NACIONAL DE ASSISTÊNCIA SOCIAL de Maceió 2014-2017, aprovada pelo Conselho Nacional de Assistência Social. Resolução nº. 17, de 25 de Junho de 2014. Maceió. 2014.

RIBEIRO, M. S.; RESENDE, A. J.; DALMÁCIO, F. Z. Uma análise multidimensional dos projetos brasileiros de MDL–Mecanismos de Desenvolvimento Limpo. *Revista de Contabilidade da UFBA*, v. 2, n. 1, p. 14-29, 2008.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S.. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. *Biomassa & Energia*, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SANTANA, Mayco Sullivan Araujo. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos do futuro aterro sanitário sediado no município de Arapiraca/AL. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2016.

SANTOS, I. F. S. et al. Um estudo das relações de operação e potência instalada de uma usina termelétrica em aterros sanitários. *PCH Notícias & SHP News*, v. 62, p. 25-28, 2015b.

SEMEC. Secretaria Municipal de Economia. Disponível em: <<http://www.maceio.al.gov.br/semec/>>. Acesso em: 21 jan, 2021.

SEMARH. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www.semarh.al.gov.br/tempo-e-clima/analises-tecnicas/precipitacao-mensal>>. Acesso em: 21 jan, 2021.

SEMTUR. Secretaria Municipal, Esporte e Lazer. Disponível em: <<http://www.maceio.al.gov.br/semtur/>>. Acesso em: 21 Jan, 2021.

SILVA, M. C.; SANTOS, G. O. Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados. 2010.

Disponível:<<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/view/167/157>>. Acesso em 5 de dez de 2020.

SILVA, T. N.; CAMPOS, L. M. S. Avaliação da Produção e Qualidade do Gás de Aterro para Energia no Aterro Sanitário dos Bandeirantes – SP. Eng. sanit. ambient. Vol. 13 N° 1. jan/mar. 2008, 88-96.

SILVA, T. R. 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 em Ciências em Engenharia de Energia)- Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

TAVARES, Jimmy Carter Lima. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Maceió – AL. Dissertação (mestrado em Engenharia: Recursos Hídricos e Saneamento) Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. 116f. Maceió. 2008.

TJA/APMP/D.ETJ. Projeção da população residente nos municípios alagoanos e dos bairros de Maceió entre 2017 e 2020 e parâmetros necessários para a criação e elevação de Comarcas. Maceió, AL: Tribunal de Justiça de Alagoas, APMP, 2017.

ZANETTE, A. L.. Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.