

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS  
E SANEAMENTO



MAYCO SULLIVAN ARAUJO DE SANTANA

**Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos do  
Futuro Aterro Sanitário Sediado no Município de Arapiraca/AL.**

Maceió  
2016

MAYCO SULLIVAN ARAUJO DE SANTANA

**Mayco Sullivan Araujo de Santana**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador(a): Prof(a). Dr.(a) Karina  
Ribeiro Salomon

Maceió  
2016

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**

Bibliotecária Responsável: Janaina Xisto de Barros Lima

S231a

Santana, Mayco Sullivan Araujo de.

Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos do futuro aterro sanitário sediado no município de Arapiraca/AL. / Mayco Sullivan Araujo de Santana. – 2016.

95 f. : il.

Orientadora: Karina Ribeiro Salomon.

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.

Bibliografia: f. 82-88.

Anexo: f. 89-90.

Apêndice: f. 91-95.

1. Resíduos sólidos. 2. Efluentes domésticos - Potencial energético. 3. Biogás. 4. Sustentabilidade. I. Título.

CDU: 628.385

## Folha de aprovação

MAYCO SULLIVAN ARAUJO DE SANTANA

Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos do  
município de Arapiraca – AL.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.



Prof. Dr. Karina Ribeiro Salomon (Orientadora)

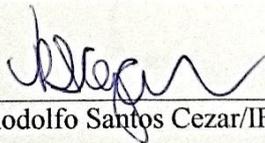


Prof. Dr. Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira (Coorientadora)

**Banca Examinadora:**



Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim/UFAL (Examinador 1)



Prof. Dr. Vicente Rodolfo Santos Cezar/UFAL (Examinador 2)

## RESUMO

A emissão incontrolada do biogás, gerado pelos resíduos sólidos, é um grave problema de poluição atmosférica, tanto em nível local quanto em nível global e, conseqüentemente, sua emissão deve ser minimizada. Uma forma de minimizar os impactos do biogás no meio ambiente é através do seu reaproveitamento para geração de energia elétrica. A presente pesquisa tem como proposta realizar um levantamento do potencial energético dos resíduos sólidos do futuro aterro da região do agreste alagoano que terá como sede a cidade de Arapiraca, a fim de avaliar a sua viabilidade econômica para geração de energia elétrica. Para o desenvolvimento do trabalho foram feitas, além de revisões a respeito do tema, visitas de campo para coleta de dados para caracterizar os resíduos sólidos urbanos do município sede e levantamento de dados gravimétricos das demais cidades constituintes do consórcio para disposição final dos resíduos no futuro aterro. No levantamento do potencial energético foi utilizado o programa LandGEM versão 3.02 e a partir dos dados encontrados foi feita uma análise econômica para o seu aproveitamento energético. A composição gravimétrica dos RSU do município sede do aterro apresentou a matéria orgânica com maior índice (48,5%), seguido de plástico flexível (15,4%) e resíduos sanitários (10,4%). Em menores quantidades estão a borracha (0,64%), madeira (0,60%) e couro com (0,27%). O futuro aterro apresenta um grande potencial energético chegando a 46.237,70 kW ao longo da vida útil do aterro, podendo chegar a 78.610,11kW quando considerado um prolongamento de 20 anos. Quanto a viabilidade, da utilização do biogás para gerar energia, teria investimento inicial de R\$ 19.732.965,00 e o tempo de retorno do investimento seria de 5 anos e VPL = R\$ 4.276.405,58 sem considerar o crédito de carbono e tempo de retorno de 4 anos e VPL = R\$ 6.835.326,15 se considerarmos o crédito de carbono, o que torna o projeto viável para as duas situações, sendo mais atrativa o investimento com comercialização do crédito de carbono. Cerca de 228.772 habitantes poderiam ser abastecidos com energia durante a vida útil do aterro sanitário e até 388.943 habitantes se considerado a geração de energia por mais 20 anos após o encerramento do aterro.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos. Aproveitamento energético. Biogás.

## ABSTRACT

The uncontrolled emission of biogas, generated by solid waste, is a serious problem in the atmospheric atmosphere, both locally and globally and, consequently, its emission should be minimized. One way to minimize the impacts of biogas is not the environment through its reuse to generate electricity. The present research has as a proposal to carry out a survey of the energy potential of the solid waste from the future landfill of the region of the Alagoan agreste that is based in a city of Arapiraca, in order to evaluate its economic viability for electricity generation. For the development of the work done, in addition to revisions regarding the theme, field visits for data collection to characterize municipal solid waste municipal data collection gravimetric of the other constituent cities of the consortium for the last of the waste in the future Landfill No survey Of the energy potential was used the program LandGEM version 3.02 and from the data found for an economic analysis for its energy use. (48.4%), followed by flexible plastic (15.4%) and sanitary waste (10.4%). The gravity of the MSW of the municipality is constituted by 48.6%. (0.64%), wood (0.60%) and leather with (0.27%). The future landfill has a great energy potential reaching 46,237.70 kW over the life of the landfill, reaching 78,610.11 kW when considered a 20 year extension. As for the viability of using biogas to generate energy, the initial investment of R \$ 19,732,965.00 and the time of return of the investment of 5 years and the NPV = R \$ 4,276,405.58 without considering the carbon credit Return time of 4 years and NPV = R \$ 6,835,326.15 if we consider the carbon credit, which makes the project feasible for two situations, being more attractive or investing with the commercialization of carbon credits. About 228,772 inhabitants were supplied with electricity during a life of the sanitary landfill and up to 388,943 inhabitants were built to generate energy for more than 20 years after the closure of the landfill.

**Keywords:** Solid Waste. Energy use. Biogas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Destinação Final dos Resíduos Sólidos no Estado de Alagoas (t/dia).....	20
Figura 2: Mapa das regiões administrativas de Maceió.Fonte: IBGE (2015). ....	33
Figura 3: Economia de Arapiraca. ....	34
Figura 4: Mapa dos municípios participantes do CONAGRESTE. ....	36
Figura 5: Estrutura utilizada para realização da pesquisa.....	39
Figura 6: Despejo dos resíduos para análise.....	40
Figura 7: Balde utilizado para pesagem dos resíduos.....	40
Figura 8: Balança usada na pesagem dos resíduos. ....	41
Figura 9: Rompimento dos sacos plásticos.Fonte: Do autor (2016).....	41
Figura 10: Rompimento dos sacos plásticos.Fonte: Do autor (2016).....	42
Figura 11: Quarteamento da amostra.Fonte: Do autor (2016).....	43
Figura 12: Separação de duas partes, vis-à-vis.....	43
Figura 13: Amostra final de 100kg. ....	44
Figura 14: Amostra final de 100kg.Fonte: Do autor (2016).....	45
Figura 15: Mini balança digital utilizada na pesagem. ....	46
Figura 16: Rompimento dos sacos. ....	47
Figura 17: Despejo dos resíduos para análise.....	47
Figura 18: Homogeneização da amostra. ....	47
Figura 19: Etapa de quarteamento. ....	47
Figura 20: Tela de inserção de dados do programa LandGEM. ....	50
Figura 21: Composição gravimétrica dos RSU do município de Arapiraca/AL.....	59
Figura 22: Comparação da composição gravimétrica média dos RSU de Arapiraca (2015) e do Brasil (2010). ....	60
Figura 23: Composição gravimétrica dos RSU das 5 regiões estudadas da cidade de Arapiraca. ....	62
Figura 24: Composição gravimétrica dos RSU de Arapiraca, agreste alagoano e Brasil. ....	65
Figura 25: Gráfico comparativo entre os métodos estudados e dados do censo. ....	67
Figura 26: Produção de gases no futuro aterro sanitário na cidade de Arapiraca. ....	73
Figura 27: Emissão de gás metano em m <sup>3</sup> /ano do futuro aterro na cidade de Arapiraca. ....	73
Figura 28: Potência gerada ao longo do tempo. ....	76
Figura 29: Energia disponível por ano. ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação das taxas de geração de resíduos sólidos e crescimento populacional. ....	17
Tabela 2: Situação da disposição final dos resíduos no Brasil. ....	18
Tabela 3: Geração de RSU no estado de Alagoas. ....	19
Tabela 4: Municípios membros da CONAGRESTE. ....	35
Tabela 5: Regiões selecionadas para a pesquisa. ....	37
Tabela 6: Povoado das zonas rurais de Arapiraca. ....	37
Tabela 7: Calendário de coleta dos dados. ....	38
Tabela 8: Lista dos componentes. ....	45
Tabela 9: Lista dos componentes. ....	52
Tabela 10: Dados da população total de todos os municípios da CONAGRESTE. ....	53
Tabela 11: Composição gravimétrica dos RSU de Arapiraca por região. ....	58
Tabela 12: Média geral da composição gravimétrica dos RSU da cidade de Arapiraca. ....	59
Tabela 13: Composição gravimétrica dos RSU das cidades do agreste alagoano. ....	64
Tabela 14: Média geral da composição gravimétrica dos RSU das cidades do agreste alagoano. ....	65
Tabela 15: Previsão da população a partir dos métodos estudados. ....	66
Tabela 16: Coeficiente de correlação de Pearson. ....	67
Tabela 17: Estimativa da população pelo método da curva logística. ....	68
Tabela 18: Estimativa da geração de RSU. ....	69
Tabela 19: Estimativa da geração de RSU. ....	72
Tabela 20: Potência e energia disponível em função de metano do futuro aterro na cidade de Arapiraca. ....	75
Tabela 21: Análise viabilidade econômica. ....	78
Tabela 22: Viabilidade econômica com crédito de carbono. ....	79
Tabela 23: População atendida por energia elétrica gerado pelos RSU do futuro aterro. ....	80

# SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	13
2.1	<b>Objetivo geral:</b> .....	13
2.2	<b>Objetivos específicos:</b> .....	13
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
3.1	<b>RESÍDUOS SÓLIDOS</b> .....	14
3.1.1	Classificação dos resíduos.....	14
3.1.2	Caracterização física dos resíduos sólidos.....	16
3.1.3	Geração de Resíduos Sólidos no Brasil.....	17
3.1.4	Destinação Final dos Resíduos Sólidos.....	17
3.1.5	Resíduos Sólidos em Alagoas.....	19
3.2	<b>ATERROS SANITÁRIOS</b> .....	20
3.2.1	Gestão nos Aterros Sanitários.....	20
3.2.2	Subprodutos de um aterro sanitário.....	21
3.3	<b>BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS</b> .....	22
3.3.1	Etapas da digestão anaeróbica.....	22
3.3.2	Impactos do biogás ao meio ambiente e a sociedade.....	24
3.3.3	Protocolo de Quioto.....	25
3.3.4	Tecnologia do Gás do Lixo (GDL).....	26
3.3.5	Formas de aproveitamento do biogás.....	27
3.4	<b>MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS</b> .....	27
3.4.1	Modelo Tchobanoglous, Thessen & Vigil.....	28
3.4.2	Método do Inventário das Emissões de Metano.....	28
3.4.3	Método de Decaimento de Primeira Ordem (FOD).....	29
3.4.5	Modelo Multi-fase.....	30
3.4.6	Modelo LandGEM.....	31
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	32
4.1	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	32
4.1.1	Arapiraca.....	32
4.1.2	Caracterização do futuro aterro sanitário.....	34
4.2	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE ARAPIRACA</b> .....	36
4.2.1	Bairros selecionados para estudo.....	36
4.2.2	Período das coletas.....	38
4.2.3	Composição Gravimétrica.....	39
4.3	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO DAS DEMAIS CIDADES INTEGRANTES DA CONAGRESTE.</b> .....	48
4.4	<b>ESTUDO DA POTENCIALIDADE ENERGÉTICA</b> .....	48
4.4.1	Cálculo dos parâmetros k e L <sub>0</sub> .....	50
4.5	<b>ESTIMATIVA DA POPULAÇÃO</b> .....	52
4.5.1	Método Aritmético.....	53
4.5.2	Método Geométrico.....	53

4.5.3	Método da Curva Logística.....	54
4.5.4	Estimativa da geração de RSU.....	54
4.6	<b>CÁLCULO DA POTÊNCIA E ENERGIA DISPONÍVEIS.....</b>	<b>55</b>
4.7	<b>ANÁLISE ECONÔMICA .....</b>	<b>56</b>
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>58</b>
5.1	<b>Caracterização dos resíduos sólidos urbanos do município de Arapiraca</b>	<b>58</b>
5.2	<b>Análise e comparação da composição gravimétrica das regiões estudada</b>	<b>61</b>
5.3	<b>Composição gravimétrica das cidades integrantes da CONAGRESTE... </b>	<b>63</b>
5.4	<b>Estimativa da população .....</b>	<b>66</b>
5.5	<b>Cálculo da geração de resíduos sólidos urbanos .....</b>	<b>68</b>
5.6	<b>Estimativa do potencial de geração de metano .....</b>	<b>69</b>
5.6.1	Cálculo do carbono orgânico degradável (COD).....	69
5.6.2	Cálculo do potencial de geração de metano (L <sub>0</sub> ).....	70
5.6.3	Cálculo da emissão de metano.....	71
5.7	<b>Cálculo da potência e energia disponíveis .....</b>	<b>74</b>
5.8	<b>Análise econômica .....</b>	<b>77</b>
6	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>84</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>89</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população brasileira acarreta em maiores concentrações de resíduos sólidos e estes estão causando uma crescente degradação na vida e no meio ambiente. Fica cada vez mais evidente a necessidade de se reduzir os possíveis efeitos negativos da geração dos resíduos, tendo em vista que com a degradação da matéria orgânica, que corresponde a aproximadamente 50% de sua composição, são gerados os lixiviados e gases de efeito estufa, os quais tem efeito nocivo na qualidade ambiental e social.

O biogás é gerado pela decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos e devido a sua composição, principalmente gás metano e dióxido de carbono, é um dos responsáveis por problemas ambientais, como por exemplo, o aquecimento global. O gás metano é um dos mais importantes gases de efeito estufa – GEE, pois seu potencial de aquecimento global é 20 vezes maior que o dióxido de carbono (KUMAR et al, 2004; PNUD, 2010),

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos e a geração de energia através do biogás em aterros sanitários são soluções ambientalmente sustentáveis gerando energia elétrica renovável e limpa. Além disso, o estudo da geração de energia elétrica a partir do biogás permite a redução de fugas dos gases do efeito estufa e a maximização do índice de conversão do metano, contabilizado no cálculo para emissão de crédito de carbono dentro do mecanismo de desenvolvimento limpo (ABREU et al, 2009).

A situação pessimista que o país enfrenta no setor energético, faz com que medidas alternativas sejam propostas. Uma delas é gerar energia elétrica a partir dos resíduos sólidos urbanos, o que, além de contribuir como alternativa para o cenário energético brasileiro, também contribui para solucionar problema com a disposição inadequada dos RSU favorecendo o desenvolvimento sustentável.

Segundo Campaniet al, (2009) alternativas energéticas por meio de fontes renováveis de energia tem sido objeto de estudo com intuito de diminuir da sociedade a dependência de combustíveis fósseis, além de encontrar soluções ambientalmente sustentáveis para colaborar com a matriz energética dos países e reduzir os impactos globais pela queima do mesmo. A produção de energia a partir de fontes renováveis é um dos principais problemas para prosseguir no futuro próximo para reduzir danos e esgotamento de recursos ambientais e para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (DESIDERI, 2003).

Tendo em vista todos esses aspectos, faz-se necessário o desenvolvimento da presente pesquisa, tendo como proposta a realização de um levantamento do potencial energético dos resíduos sólidos do futuro aterro do agreste alagoano que será sediado no município de Arapiraca-AL, para posterior aproveitamento energético, minimização dos impactos ambientais e desenvolvimento sustentável da região.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral:**

O objetivo geral desta pesquisa é realizar um levantamento do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos que irão compor o aterro sanitário sediado na cidade de Arapiraca – AL.

### **2.2 Objetivos específicos:**

- Realizar a caracterização dos resíduos sólidos do município de Arapiraca;
- Analisar os dados gravimétricos médios das cidades que compõem o Consórcio do Agreste para destinação de resíduos no aterro sediado em Arapiraca;
- Identificar o potencial de geração de Biogás e energia elétrica do futuro aterro sediado em Arapiraca;
- Avaliar a viabilidade econômica da geração de energia dos resíduos que irão compor o aterro.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS**

Segundo a lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010) que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, denominam-se resíduos sólidos todos os materiais, substância, objeto ou bem descartado que são resultantes de atividades humanas, 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 cujo lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água sejam inviáveis, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

##### **3.1.1 Classificação dos resíduos**

A classificação dos resíduos sólidos é importante para que futuras decisões possam ser desenvolvidas e executadas.

São várias as maneiras de se classificar os resíduos sólidos. As mais comuns são quanto aos ricos potenciais de contaminação do meio ambiente e quanto à natureza ou origem (Monteiro et al. 2001).

Quanto aos riscos potenciais de contaminação a NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos em:

- a) Resíduos classe I – Perigosos: são aqueles que apresentam inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, ou seja, são aqueles que apresentam risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices ou riscos ao meio-ambiente, quando gerenciados de forma inadequada;
- b) Resíduos classe II – Não perigosos: esses resíduos subdividem-se em resíduos classe II A – Não inertes e resíduos classe II B – Inertes;
  - b1) Resíduos classe II A – Não inertes: são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Esses resíduos podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
  - b2) 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.

Quanto à origem ou natureza a PNRS (BRASIL, 2010) classifica os resíduos sólidos em:

- a) Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) Resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;

Segundo D’ALMEIDA & VILHENA (2000) os resíduos sólidos também podem ser classificados em putrescíveis, recicláveis e combustíveis, somando as porcentagens individuais dos vários componentes.

### 3.1.2 Caracterização física dos resíduos sólidos

Para que seja realizado um gerenciamento dos resíduos de maneira mais adequada a cada situação de um local ou região, visando a diminuição de seu impacto no meio ambiente, é importante realizar uma avaliação quali-quantitativa dos resíduos sólidos.

As características do lixo podem variar em função de alguns fatores como sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos, e sua análise pode ser realizada segundo suas características físicas, químicas e biológicas (Monteiro et al. 2001).

Dentre as características físicas, químicas e biológicas o mais importante é o conhecimento das características físicas do resíduo, pois sem o seu conhecimento é praticamente impossível se efetuar a gestão adequada dos serviços de limpeza urbana e a implantação da coleta diferenciada (Gonçalves, 2007).

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica fisicamente os resíduos sólidos em:

- Geração per capita;
- Composição gravimétrica;
- Peso específico aparente;
- Teor de umidade;
- Compressibilidade

A geração per capita relaciona a quantidade de resíduos urbanos gerada diariamente por habitante.

A composição gravimétrica traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de lixo analisada. Alguns componentes analisados são: papel/papelão; plásticos; vidros; metais; matéria orgânica e outros.

Peso específico aparente é o peso do lixo solto em função do volume ocupado sem qualquer compactação.

O teor de umidade representa a quantidade de água presente no lixo.

A compressibilidade é o grau de compactação ou a redução do volume que uma massa de lixo pode sofrer quando compactada.

### 3.1.3 Geração de Resíduos Sólidos no Brasil

A geração dos Resíduos Sólidos no mundo vem crescendo aceleradamente, levando a índices de geração maiores que o índice de crescimento populacional. No Brasil, a geração de resíduos aumentou cerca de 4,1% em 2013 com relação ao ano anterior, enquanto que a população cresceu 3,7% no mesmo período, como pode ser visto na Tabela 1, apresentada a seguir.

Tabela 1: Comparação das taxas de geração de resíduos sólidos e crescimento populacional.

<b>Regiões</b>	<b>2012</b>		<b>2013</b>	
	<i>RSU Gerado (t/dia)/ Índice (kg/hab/dia)</i>	<i>População Total (hab.)</i>	<i>RSU Gerado (t/dia)</i>	<i>Índice (kg/hab./dia)</i>
<i>Norte</i>	13.754/ 0,841	17.013.559	15.169	0,892
<i>Nordeste</i>	51.689/ 0,959	55.794.707	53.465	0,958
<i>Centro – Oeste</i>	16.055/ 1,113	14.993.191	16.636	1,110
<i>Sudeste</i>	98.215/ 1,204	84.465.570	102.088	1,209
<i>Sul</i>	21.345/ 0,770	28.795.762	21.922	0,761
<b>Brasil</b>	<b>201.058/ 1,037</b>	<b>201.062.789</b>	<b>209.280</b>	<b>1,041</b>

Fonte: Adaptado ABRELPE (2014).

Como pode-se observar pela tabela 01 a região brasileira mais populosa é a Sudeste com mais de 84 milhões de habitantes e isso reflete na quantidade de resíduos sólidos gerados, onde concentra 48,8% do total de RSU gerados do Brasil. A região Nordeste apresenta o segundo maior índice de geração de RSU com cerca de 25,5% do total gerado no país. As regiões Sul, Centro – Oeste e Norte aparecem com 10,5%, 7,9% e 7,3% cada uma.

Em média cada habitante do Brasil gera 1,041 quilos de resíduos sólidos por dia, sendo a região Sudeste a região onde a geração per capita é maior, e a região Sul apresenta a menor geração percapita.

### 3.1.4 Destinação Final dos Resíduos Sólidos

Com o aumento populacional, da geração de resíduos e o crescimento das cidades, o grande desafio da limpeza urbana não está apenas na remoção dos resíduos dos logradouros e edificações, mas, principalmente, em dar um destino final ambientalmente adequado aos materiais coletados.

A geração de resíduos está diretamente ligada aos hábitos de consumo e padrão de vida da população e sua destinação reflete a qualidade de vida da população (PECORA et al., 2009).

Neste contexto, a disposição final do lixo urbano é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos em todo o mundo e tende a agravar-se com o aumento do consumo de bens descartáveis, que passam cada vez mais a compor os grandes volumes de lixo gerados pela população (PECORA et al., 2009).

Um dos grandes vilões da destinação final dos resíduos são os Lixões, uma forma inadequada de disposição final, que se caracteriza pela simples descarga do lixo sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Logo, desde o início da vigência da Lei 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010), os lixões estão “desaparecendo” e dando lugar aos Aterros Controlados, normalmente um Lixão remediado a fim de minimizar os impactos ambientais, utiliza critérios de Engenharia, cobrindo os resíduos com uma camada de material inerte no final de cada jornada de trabalho, mas não dispõe de impermeabilização de base comprometendo as águas subterrâneas e não possui sistema de tratamento de chorume nem de dispersão de gases.

No entanto, a forma ambientalmente adequada de se descartar os resíduos sólidos é em Aterro Sanitário, que dispõe de critérios de engenharia e normas operacionais, é a forma de confinamento segura em termos de controle da poluição ambiental e proteção à saúde pública, possui sistema de impermeabilização de base, tratamento de chorume e disposição de gases (MONTEIRO, 2001).

A Tabela 02, a seguir, apresenta em porcentagem, os dados das três últimas Pesquisas Nacionais de Saneamento Básico, realizada pelo IBGE em 1989, 2000 e 2008.

**Tabela 2: Situação da disposição final dos resíduos no Brasil.**

<i>Ano</i>	<i>Destino final dos resíduos sólidos, por unidades de destino dos resíduos (%)</i>		
	<i>Vazadouro a céu aberto</i>	<i>Aterro controlado</i>	<i>Aterro sanitário</i>
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Fonte: Adaptado IBGE (2010).

Pode ser observado na tabela 02 que mais de 50% dos municípios brasileiros destinam os resíduos ao céu aberto, 22,5% para aterro controlado e 27,7% destina para

aterro sanitário. O índice de destinação final para aterro controlado vem crescendo e depois da criação da Política Nacional dos RSU esse percentual de aterro sanitário tende a crescer, uma vez que as cidades brasileiras agora devem possuir um aterro sanitário para destinação dos resíduos.

### 3.1.5 Resíduos Sólidos em Alagoas

De acordo com dados da ABRELPE (2014) o estado de Alagoas gerou 2.807 toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos no ano de 2012 e no ano de 2013 foi gerado 3.024 toneladas por dia, apresentando um crescimento de 7,7% de 2012 para 2013. Já o crescimento populacional foi de 4.27%. A geração média per capita de RSU, para o ano de 2013, foi de 0,91. A Tabela 03 fornece os dados da geração e coleta de resíduos sólidos no estado de Alagoas.

**Tabela 3: Geração de RSU no estado de Alagoas.**

<i>População Total</i>		<i>RSU Gerado (t/dia)</i>	
<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>
<i>3.165.472</i>	<i>3.300.935</i>	<i>2.807</i>	<i>3.024</i>

FONTE: ABRELPE, 2014.

A destinação final dos resíduos sólidos em alagoas ainda é, em sua maior parte, para lixões e aterros controlados que, do ponto de vista ambiental, pouco se diferenciam dos próprios lixões, pois não possuem o conjunto de sistemas necessários para a proteção do meio ambiente e da saúde pública (ABRELPE, 2014). A Figura 1 mostra o percentual da destinação dos resíduos sólidos, em toneladas por dia, dos anos de 2012 e 2013.

Figura 1: Destinação Final dos Resíduos Sólidos no Estado de Alagoas (t/dia)



FONTES: ABRELPE, 2014.

## 3.2 ATERROS SANITÁRIOS

Tecnicamente é a forma mais indicada para a disposição final dos Resíduos Sólidos. É um método para disposição final dos resíduos sólidos urbanos sobre terreno natural, através do seu confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo, segundo critérios de engenharia e normas específicas, de modo a evitar impactos ao meio ambiente, Saúde e Segurança Pública (MONTEIRO et al, 2001).

Nesta forma de contenção “os resíduos são compactados e cobertos diariamente, há sistemas de tratamento de chorume, drenagem das águas superficiais e coleta e queima do biogás” (LANDIM e AZEVEDO, 2008, p. 105).

### 3.2.1 Gestão nos Aterros Sanitários

Os aterros sanitários é a forma de contenção de resíduos ambientalmente adequada que obedece à critérios de engenharia e segue a riscas normas técnicas. E esses critérios são para evitar os danos ao meio ambiente e à vida. Dentre eles os principais são: impermeabilização do solo; drenagem do chorume; e, sistema de captação dos gases.

No entanto, para que os impactos ocasionados pela degradação da matéria orgânica, nos aterros sanitários, sejam evitados, é necessário não apenas a adoção desses

critérios de normatização e engenharia, mas sim um conjunto de ações (ICLEI, 2009, p. 08).

O esforço do poder público local é fundamental e é preciso uma ação concentrada entre os diferentes níveis de governo e demais atores sociais para garantir um resultado consistente, que inclua mudança de comportamento (ICLEI, 2009, p. 08).

Ou seja, é importante que essa forma de contenção final dos resíduos sólidos seja gerida de forma eficiente.

A gerência dos gases liberados pelo processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica nos aterros é uma atividade que contribui muito para a preservação ambiental, “no âmbito da administração municipal, instrumentos de gestão podem se tornar aliados poderosos para reduzir as emissões desses gases” (ICLEI, 2009, p. 08).

Um resultado satisfatório numa gestão eficiente nos aterros sanitários, dentre outras, prevê a captação e reutilização dos gases gerados, gases estes que contribuem para o efeito estufa.

### **3.2.2 Subprodutos de um aterro sanitário**

O processo de decomposição dos resíduos orgânicos gera subprodutos que prejudicam o meio ambiente de forma irreversível em curto prazo.

A decomposição da matéria orgânica ocorre por dois processos, o primeiro processo é de decomposição aeróbia e ocorre normalmente no período de deposição do resíduo. Após este período, a redução do O<sub>2</sub> presente nos resíduos dá origem ao processo de decomposição anaeróbia (BORBA, 2006, p. 08).

Nos aterros sanitários a forma de decomposição predominante é a anaeróbia, devido à cobertura com material inerte no final de cada dia de trabalho. Essa degradação gera subprodutos, o mais conhecido destes é o chorume, um líquido preto altamente poluidor, viscoso e com cheiro característico. Logo, o produto final da degradação anaeróbia, e subproduto de uma das alternativas de tratamento de Resíduos Sólidos, o Aterro Sanitário, é a emissão de gases, “os principais constituintes desses gases são o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o gás metano (CH<sub>4</sub>), sendo este último passível de coleta e utilização para a geração de energia, o chamado Biogás” (LANDIM e AZEVEDO, 2008, p. 63).

Um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado como um reator biológico onde as principais entradas são os resíduos e a água e as principais saídas são os gases e o chorume (BORBA, 2006, p. 08).

A geração do biogás se torna ainda pior que a geração do chorume, pelo fato de não ser visível. A emissão descontrolada do Biogás ameaça o ambiente local, pois causa danos à vegetação, gera odores desagradáveis e oferece riscos de explosão (ENSIMAS, 2003). No entanto o biogás também é considerado um problema global, pois é constituído por gases de efeito estufa.

### **3.3 BIOGAS DE ATERROS SANITÁRIOS**

O biogás é uma mistura gasosa obtida a partir da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, onde o metano e o dióxido de carbono encontram-se em maiores quantidades (SALOMON e LORA, 2005; ZANETTE, 2009)

Pequenas quantidades de ácido sulfídrico e amônia também são encontrados no biogás, assim como traços de hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono, carboidratos saturados ou halogenados e oxigênio estão ocasionalmente presentes no biogás (PARK e SHIN, 2001; BORBA 2006; ZANETTE, 2009).

A decomposição da matéria orgânica ocorre pela ação conjunta de grupos diferentes de microrganismos (fungos, bactérias e arqueas). E logo que acontece a disposição dos RSU, os microrganismos aeróbios estão presentes onde existe fonte de oxigênio para suas atividades metabólicas. E após um determinado tempo há a proliferação de organismos anaeróbios, que degradam a matéria orgânica sem a presença de oxigênio (MELO, 2003)

A digestão anaeróbica, conforme afirma CASSINI (2003, p. 15), é um processo de estabilização biológica complexa no qual um consórcio de microrganismos, na ausência de oxigênio molecular, promove a transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples como metano e gás carbônico.

#### **3.3.1 Etapas da digestão anaeróbica**

Neste item é apresentada uma breve descrição das etapas envolvidas na digestão anaeróbica.

O processo de digestão anaeróbia pode ser dividido em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHERNICHARO, 1997; SPERLING, 1996).

- Hidrólise

Nessa primeira etapa as ligações moleculares complexas como carboidratos, proteínas, gordura, são quebradas e dão origem à materiais mais simples como aminoácidos, ácidos glaxos, açúcares.

- Acidogênese

As substâncias resultantes da hidrólise são transformadas por bactérias fermentativas em compostos mais simples, os quais são excretados. São produzidos ácido propanoico, ácido butanoico, ácido láctico, álcoois, gás carbônico.

- Acetogênese

Na acetogênese ocorre a conversão dos produtos gerados na acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção de metano, isto é, acetato, dióxido de carbono e hidrogênio. Dependendo do estado de oxidação do material orgânico que sofrerá digestão, a formação de ácido acético pode ser acompanhada pelo surgimento de dióxido de carbono ou hidrogênio, sendo que o dióxido de carbono também é gerado na etapa de metanogênese (DEZOTTI, 2008).

Os lixiviados produzidos nessa fase apresentam grande quantidade de matéria orgânica. Têm, portanto, alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), valor usado para indicar a concentração de matéria orgânica em um dado volume líquido (SPERLING, 1996).

- Metanogênese

A metanogênese é a etapa terminal do processo de digestão anaeróbia. Nessa fase ocorre a produção biológica do metano, realizada por um grupo de Archae anaeróbias estritas, denominadas metanogênicas (MADIGAN, 2010).

As arqueas metanogênicas consomem os ácidos orgânicos simples. Esses microrganismos, segundo CASSINI (2003), “valendo-se da grande disponibilidade de substrato acidificado para seu metabolismo, produzem grandes quantidades de metano

que, por ser pouco solúvel, perde-se facilmente para a fase gasosa, sendo então queimado ou, preferivelmente, tratado e/ou aproveitado na geração de energia”.

O primeiro caminho dessa etapa é o processo oxidativo da metanogênese hidrogenotrófica, no qual o dióxido de carbono atua como acceptor de elétrons, sendo reduzido a metano (eq. 3.1). E o segundo é a da metanogênese acetoclástica, em que o carbono orgânico, na forma de acetato (ácido acético) é convertido a metano (eq. 3.2) (SPERLING, 1996).



### 3.3.2 Impactos do biogás ao meio ambiente e a sociedade

Os impactos são causados através dos subprodutos da degradação do lixo orgânico.

“A biodegradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos é caracterizada por uma sucessão de processos complexos através dos quais microrganismos (em especial bactérias), transformam a matéria orgânica em compostos minerais e gasosos. A natureza desses microrganismos e características das diferentes reações químicas e seus produtos permitem distinguir várias etapas nesta degradação. A composição do biogás produzido vai também evoluindo ao longo dos processos, destacando-se o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub>, que, representam em conjunto mais de 95% do seu volume (RUSSO, 2005, p. 43).”

Esses gases constituem os chamados GEE – Gases de Efeito Estufa, que “são capazes de reter o calor do sol [...]. O efeito estufa é um fenômeno que ocorre de forma natural na atmosfera. Os GEE são essenciais, portanto, para manter a temperatura necessária para a existência de vida no planeta” (SILVA; CAMPOS, 2008, p. 88).

Contudo, as atividades humanas vêm elevando a quantidade desses gases na atmosfera, prejudicando a vida no planeta. A geração demasiada de resíduos sólidos com a geração de gases durante seu processo de degradação é um agravo para essa questão. Os gases que mais contribuem para o efeito estufa, em ordem de importância, são: dióxido de carbono, CFC, metano, vapor de água, ozônio e óxido nitroso. Com isso

podemos observar que durante a biodegradação da matéria orgânica são gerados dois dos gases mais contribuintes para o efeito estufa (SILVA;CAMPOS, 2008).

Além dos efeitos negativos à atmosfera, os gases provenientes de aterros também atingem diretamente a população. O biogás causa grande potencial irritante, afetando os olhos e o nariz. A exposição direta e severa a esses gases pode causar coma imediato, convulsão e até a morte. A exposição menos intensa causa tontura, fadiga, náuseas, tosse, diarreia, irritação na pele, dor no nariz e no peito, gastrite, dor de cabeça e danos neurológicos (FRARE; GIMENES;PEREIRA, 2009).

Devido a essa série de agressões, ao meio ambiente e a sociedade, existem padrões que visam coibir a emissão desses gases diretamente na atmosfera, dentre eles destaca-se o Protocolo de Quioto.

### **3.3.3 Protocolo de Quioto**

O Protocolo contém o comprometimento dos países industrializados e dos países cujas economias estão em transição, com metas de redução de emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa). A lógica do Protocolo de Quioto é limitar permanentemente as emissões GEE das organizações e as obrigam a elaborar soluções que sejam conciliadas com o desenvolvimento econômico com a preservação dos recursos (ANDRADE; COSTA, 2008; RIBEIRO et al., 2008).

O MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, estabelecido pelo protocolo de Quioto é o Mercado de Carbono, onde os países, que conseguem reduzir suas emissões, vendem seus créditos de carbono. No caso do Brasil, e nos demais países em desenvolvimento, não há necessidade de reduzir as emissões, por enquanto; então, todo o carbono que deixa de ser emitido, ou que é recuperado da atmosfera, gera créditos de carbono e pode ser comercializado com empresas de países que necessitam reduzir as emissões (RIBEIRO et al., 2008)

Então, os gases naturalmente produzidos nos aterros, podem ser utilizados na geração de energia, e adicionalmente, negociados através do Protocolo de Quioto. Assim, aterros sanitários que tratem seus gases pela queima (transformação do metano em dióxido de carbono) ou pelo aproveitamento da energia poderão ser remunerados financeiramente por isto (DIAS, 2009).

### 3.3.4 Tecnologia do Gás do Lixo (GDL)

O gás do lixo é composto por uma mistura de 50% de CH<sub>4</sub>, 45 % de CO<sub>2</sub> e 5% de H<sub>2</sub>S e outros gases, que apresenta um potencial de aproveitamento energético (TOLMASQUIN, 2003; OLIVEIRA, 2004).

Os principais componentes estão descritos a seguir;

- Tubos de coleta

A coleta de gás normalmente começa após ser fechada uma porção do aterro. Existem duas configurações de sistemas de coleta: poços verticais e trincheiras horizontais. As trincheiras podem ser apropriadas para aterros sanitários profundos e podem ser usadas em áreas de aterro ativo. Independente do sistema de coleta usado, cada uma das pontas é conectada a uma tubulação lateral, que transporta o gás para um coletor principal. Preferencialmente, o sistema de coleta deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás, quando necessário (OLIVEIRA, 2004)

Esse sistema, entretanto, tem por característica as dificuldades com o controle da quantidade e da qualidade do gás e com o procedimento de identificação de vazamentos, uma vez que todos os tubos estão ligados a um grande sistema. A opção mais segura e econômica seria ter um tubo para cada poço ligado a uma bomba e uma casa de regulagem (LADIN;AZEVEDO, 2006).

- Compressor

Um compressor é necessário para puxar o gás dos poços de coleta, e pode ser necessário para comprimir o gás antes deste entrar no sistema de recuperação energética. O tamanho, tipo e número de compressores necessários, dependerão da taxa, do fluxo de gás e do nível desejado de compressão que é determinado pelo equipamento de conversão energética (OLIVEIRA, 2004).

- Flare

Flare é um dispositivo simples para ignição e queima do GDL. É considerado um componente de cada opção de recuperação de energia, pois este pode ser necessário durante as etapas de início e manutenção do sistema (OLIVEIRA, 2004). Ainda segundo Oliveira (2004) os projetos de flare incluem flares abertos (ou vela) e

enclausurados. Estes são mais caros, mas podem ser preferíveis (ou requeridos) porque proporcionam testes de concentração e podem obter eficiências de combustão ligeiramente altas. Além disto, flares enclausurados podem reduzir os incômodos de ruído e iluminação.

### **3.3.5 Formas de aproveitamento do biogás**

Existem três situações possíveis para o aproveitamento do biogás: o primeiro caso consiste na queima direta (aquecedores, esquentadores, fogões e caldeiras) e o segundo caso é referente a conversão do gás em eletricidade. Isto significa que o biogás permite a produção de energia elétrica e energia térmica (MARTINS, 2014).

- Energia elétrica

O aproveitamento do biogás na geração de energia elétrica é feito a partir da sua utilização como combustível em motores de combustão interna e em turbinas a gás (MARTINS, 2014).

Os motores de combustão interna geralmente apresentam uma maior eficiência de conversão do que as turbinas a gás. Entretanto, quando utilizadas em sistemas de cogeração (calor e eletricidade) as turbinas a gás podem apresentar um aumento na sua eficiência pela disponibilização do vapor resultante do processo de geração.

- Energia térmica

A utilização do biogás para a geração de energia térmica é feita através da queima do biogás em caldeiras para a geração de calor, promovendo o aquecimento da água e produzindo vapor, podendo ser utilizado em processos industriais ou gerando energia elétrica através do acionamento de turbinas a vapor acopladas a um gerador (NECKER, 2013 *apud* MARTINS, 2014).

## **3.4 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS**

Segundo Fernandes (2009), existem numerosos modelos disponíveis para estimar a produção de biogás e todos podem ser usados para desenvolver uma curva de geração que prediz a geração de gás por algum tempo.

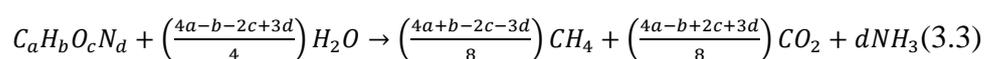
Para a determinação adequada do potencial de geração de gases de um aterro de resíduos sólidos existem formulações teóricas e experimentais, sendo as formulações

teóricas utilizadas para descrever a produtividade do biogás em função do tempo (SOUZA et al, 2012)

A produção de gás total e a taxa em que os gases são gerados podem sofrer algumas poucas variações dependendo do modelo adotado, no entanto os resíduos passíveis de decomposição é o parâmetro de entrada mais importante e comum a todos os modelos (FERNANDES, 2009).

### 3.4.1 Modelo Tchobanoglous, Thessen & Vigil

Segundo Fernandes (2009) este modelo foi desenvolvido para determinar o volume de gás a partir dos componentes lentamente e rapidamente biodegradáveis do resíduo e da constituição química de cada um de seus elementos em ambientes anaeróbios. O volume de gás estimado supõe a conversão completa dos resíduos orgânicos biodegradáveis em CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, conforme a Equação 3.3 a seguir.



Ainda segundo Fernandes (2009, p.20),

Os índices “a”, “b”, “c” e “d” são estimados pela constituição típica de diversos componentes do resíduo doméstico. Em geral os materiais orgânicos presentes nos resíduos são divididos em duas classificações: materiais que se decompõem rapidamente (duração de três meses a cinco anos) e materiais que se decompõem lentamente (até 50 anos ou mais).

### 3.4.2 Método do Inventário das Emissões de Metano

O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (1996) apresenta uma metodologia de fácil aplicação para estimar o gás metano a partir de resíduos sólidos para países ou regiões específicas.

Este método estima a quantidade de carbono orgânico degradável presente no resíduo, calculando assim a quantidade de metano que é determinado considerando diferentes categorias de resíduos sólidos e são necessários dados estatísticos da população e da composição gravimétricas dos RSU (MENDES; SOBRINHO, 2008). Este método se utiliza da equação 3.4.

$$Q = (RSU_t - RSU_f L_0 - R) (1 - OX) \quad (3.4)$$

$Q$ : quantidade de metano emitido (Gg de  $CH_4$ /ano);  
 $RSU_t$ : total de resíduos sólidos urbanos gerados (Gg/ano);  
 $RSU_f$ : fração de resíduos sólidos urbanos que é depositada em locais adequados de disposição final (%);  
 $L_0$ : potencial de geração de metano do resíduo (Gg de  $CH_4$ / Gg de RSU);  
 $R$ : Metano recuperado (Gg de  $CH_4$ /ano);  
 $OX$ : fator de oxidação (adimensional).

O valor de  $L_0$  pode ser calculado pela equação pela equação 3.5:

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (3.5)$$

$L_0$ : potencial de geração de metano do lixo (Gg de  $CH_4$ /Gg de RSU);  
 $FCM$ : fator de correção de metano (%);  
 $COD$ : carbono orgânico degradável (Gg de C/Gg de RSU);  
 $COD_f$ : fração de COD dissociada (%);  
 $F$ : fração em volume de metano (%);  
 $\frac{16}{12}$ : fator de conversão de carbono em metano (Gg de  $CH_4$ /Gg de C)

### 3.4.3 Método de Decaimento de Primeira Ordem (FOD)

Segundo IPCC (1996) apud Martins (2014), este método considera que o gás metano pode ser emitido ao longo de vários anos. A equação 3.6 é utilizada para estimar a geração de metano.

$$Q = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (3.6)$$

$Q$ : geração de metano no ano ( $m^3$ /ano);  
 $L_0$ : potencial de geração de metano do resíduo ( $m^3$ /t de resíduo);  
 $R$ : média anual de deposição de resíduo durante a vida útil do aterro (t/ano);  
 $k$ : taxa de geração de metano (1/ano);  
 $c$ : tempo desde o fechamento do aterro (ano);  
 $t$ : tempo desde a abertura do aterro (ano).

### 3.4.4 Modelo de Primeira Ordem

Neste método a formação de biogás a partir de uma certa quantidade de resíduos há um decaimento exponencialmente ao longo do tempo (SCHARFF e JACOBS, 2006). O modelo pode ser descrito matematicamente pela equação 3.7.

$$\alpha_t = \zeta \cdot 1,87 \cdot A \cdot C_0 k_1 e^{-k_1 t} \quad (3.7)$$

Onde,

$\alpha_t$  – produção de gás em um dado tempo ( $\text{m}^3\text{GDL} \cdot \text{ano}^{-1}$ );

$\zeta$  – fator de dissimilação 0,58;

1,87 – fator de conversão ( $\text{m}^3\text{GDL} \cdot \text{kgC}^{-1}_{\text{degradação}}$ )

A – quantidade de resíduo no local (Mg)

$C_0$  – quantidade de carbono orgânico no resíduo ( $\text{kgC} \cdot \text{Mg resíduo}^{-1}$ )

$k_1$  – taxa de degradação constante  $0,094 \text{ (ano}^{-1}\text{)}$

t – tempo aterrado desde o depósito (ano)

### 3.4.5 Modelo Multi-fase

Segundo Scharff e Jacobs (2006), diferentes tipos de resíduos contêm diferentes frações de matéria orgânica que degradam a taxas diferentes. A vantagem de um modelo de múltiplas fases é que a composição típica de resíduos pode ser tomada em conta. Neste modelo oito categorias de resíduos e três frações são distinguidas. Para cada fração de produção de biogás é calculada separadamente. O modelo de múltiplas fases é um modelo de primeira ordem e pode ser descrito matematicamente pela equação 3.8.

$$\alpha_t = \zeta \sum_{i=1}^3 c A \cdot C_{0,i} k_{1,i} e^{-k_{1,i} t} \quad (3.8)$$

Onde:

$\alpha_t$  – produção de gás em um dado tempo ( $\text{m}^3\text{GDL} \cdot \text{ano}^{-1}$ )

$\zeta$  – fator de dissimilação

i – fração de resíduos com taxa de degradação  $k_{1,i}$  [ $\text{kgi} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{resíduo}}$ ]

c – fator de conversão ( $\text{m}^3\text{GDL} \cdot \text{kgMO}^{-1}_{\text{degradação}}$ )

A – quantidade de resíduo no local (Mg)

$C_0$  – quantidade de material orgânico no resíduo ( $\text{kgMO} \cdot \text{Mg resíduo}^{-1}$ )

$k_{1,i}$  – taxa de degradação constante da fração ( $\text{ano}^{-1}$ )

t – tempo aterrado desde o depósito (ano)

### **3.4.6 Modelo LandGEM**

O LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) é um programa desenvolvido pelo Control Technology Center da EPA (Environmental Protection Agency) (EPA, 2005).

O programa é uma ferramenta que pode ser usada para estimar taxas de geração de biogás, metano, dióxido de carbono, compostos orgânicos não metânicos e os poluentes atmosféricos individuais de aterros de resíduos sólidos (FIGUEIREDO, 2012).

Este modelo é descrito com maiores detalhes na metodologia deste trabalho.

## **4 METODOLOGIA**

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado uma revisão na literatura que envolveu a área de saneamento ambiental, com tópicos referentes aos resíduos sólidos e geração de biogás a partir da decomposição dos resíduos no aterro sanitário.

Foram feitas várias visitas de campo na área de instalação do “aterro controlado” de Arapiraca para análise da composição gravimétrica dos resíduos do município além de visitas a instituições como a Secretaria de Meio Ambiente de Arapiraca para coleta de informações quanto a gestão dos resíduos sólidos do município. Visitas à Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas também foram realizadas para coleta de dados sobre a composição gravimétrica dos resíduos das cidades do agreste alagoano.

Esta pesquisa realizou ainda uma estimativa geração de biogás e da viabilidade econômica do seu reaproveitamento para geração de energia elétrica dos resíduos do futuro Aterro que será implantado na cidade de Arapiraca e que irá atender, também, mais 19 municípios do agreste de Alagoas, sendo denominado como Consorcio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste Alagoano– CONAGRESTE.

### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

#### **4.1.1 Arapiraca**

Arapiraca é o mais importante município do interior do estado de Alagoas. Possui aproximadamente 345,655 km<sup>2</sup> de área e população de aproximadamente 214006 habitantes, sendo 181481 habitantes a população da área urbana (84,8%) e 32525 habitantes a população da área rural (15,2%) (IBGE, 2010). A Figura 2 mostra o mapa da cidade de Arapiraca.

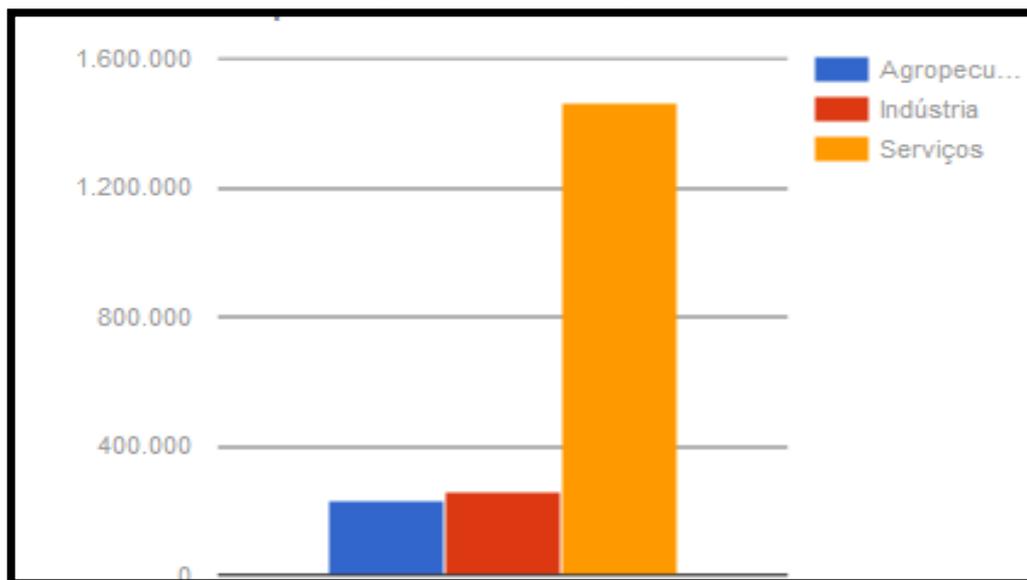
Figura 2: Mapa das regiões administrativas de Maceió.



Fonte: IBGE (2015).

Desde a década de 80 a cidade de Arapiraca vem apresentando um crescimento econômico com seu comércio e serviços, se destacando como um importante centro comercial na região do agreste localizando-se no centro geográfico do estado. A área de influência direta do município atinge uma população de aproximadamente meio milhão de habitantes (ARAPIRACA, 2015). A economia da cidade também tem base na agricultura, tendo como principais culturas o fumo, a mandioca, o abacaxi, o feijão, o milho e as hortaliças. A Figura 3 a seguir mostra que Arapiraca tem sua maior fonte da economia vindo do setor de serviço (1.465.193,00 R\$), seguido pela indústria (261.788,00 R\$) e agropecuária (231.893,00).

Figura 3: Economia de Arapiraca.



Fonte: IBGE (2015).

Segundo dados do IBGE (2010), Arapiraca apresentou no ano de 2006 a terceira maior evolução de PIB, ao todo mais de 40 municípios, ou seja, cerca de 1 milhão de pessoas, se abastecem do comércio do município.

Sua localização geográfica privilegiada interliga as demais regiões geoeconômicas do Estado e caracteriza-se como polo de abastecimento agropecuário, comercial, industrial e de serviços. Arapiraca atende às necessidades regionais, minimiza as distâncias entre os centros de abastecimento e potencializa o desenvolvimento da região (ARAPIRACA, 2015)

Segundo dados do município de 2009, Arapiraca gera aproximadamente 245 toneladas de resíduos por dia. A disposição final dos RSU da cidade é para um aterro controlado.

#### 4.1.2 Caracterização do futuro aterro sanitário

O aterro sanitário de Arapiraca será construído através de um consórcio que vai abranger a Região Metropolitana do Agreste Alagoano. O Consórcio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste Alagoano (CONAGRESTE) vai atender 20 municípios, tendo Arapiraca como sede.

Os municípios do agreste alagoano que serão atendidos pelo consorcio e suas respectivas populações, segundo dados do censo do IBGE de 2010, podem ser vistos na Tabela 04 a seguir.

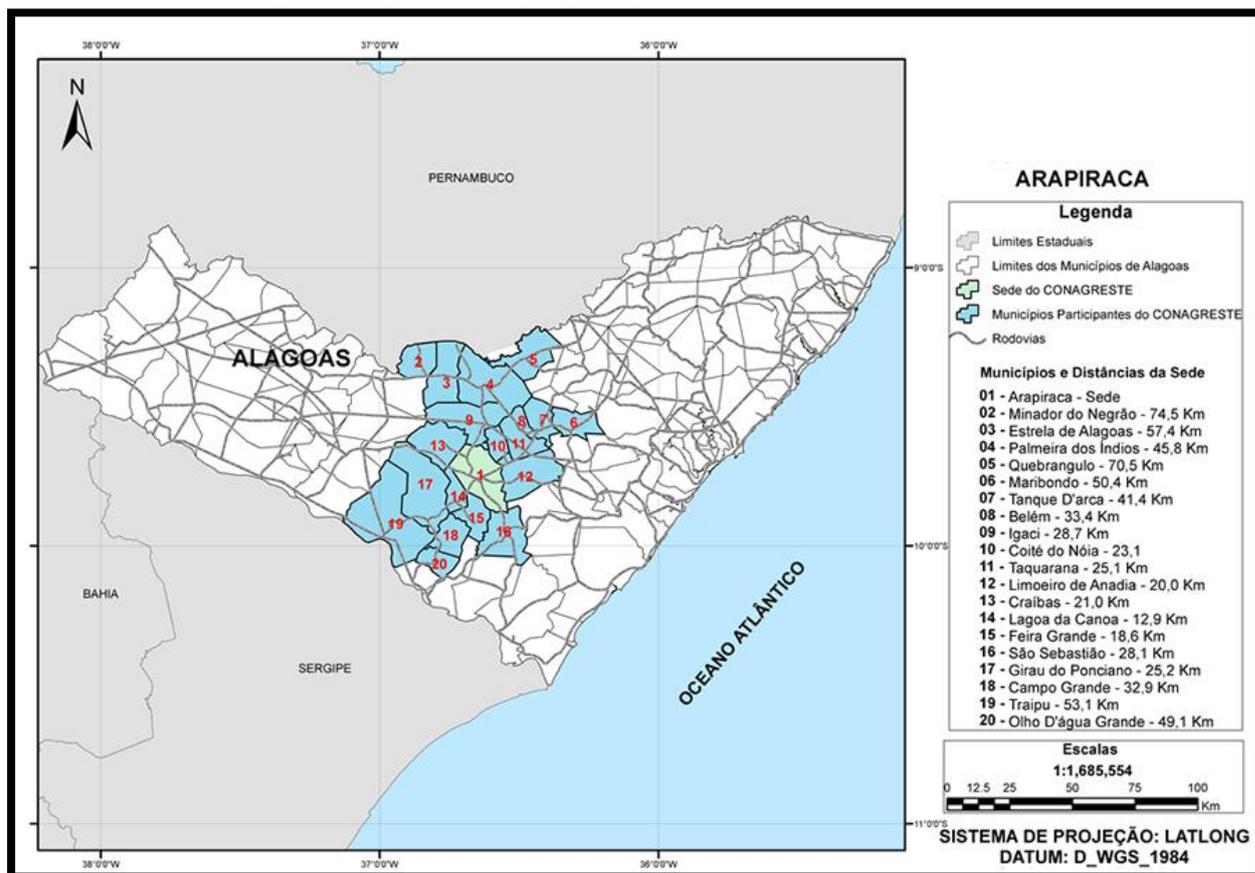
**Tabela 4: Municípios membros da CONAGRESTE.**

	<i>CIDADE</i>	<i>HABITANTES</i>
1	<b>Arapiraca</b>	<b>214.006</b>
2	<b>Minador do Negrão</b>	<b>5.275</b>
3	<b>Estrela de Alagoas</b>	<b>17.251</b>
4	<b>Palmeira dos Índios</b>	<b>70.368</b>
5	<b>Quebrangulo</b>	<b>11.480</b>
6	<b>Maribondo</b>	<b>13.619</b>
7	<b>Tanque D'arca</b>	<b>6.122</b>
8	<b>Belém</b>	<b>4.551</b>
9	<b>Igaci</b>	<b>25.188</b>
10	<b>Coité do Nóia</b>	<b>10.926</b>
11	<b>Taquarana</b>	<b>19.020</b>
12	<b>Limoeiro de Anadia</b>	<b>26.992</b>
13	<b>Craíbas</b>	<b>22.641</b>
14	<b>Lagoa da Canoa</b>	<b>18.250</b>
15	<b>Feira Grande</b>	<b>21.321</b>
16	<b>São Sebastião</b>	<b>32.010</b>
17	<b>Girau do Ponciano</b>	<b>36.600</b>
18	<b>Campo Grande</b>	<b>9.032</b>
19	<b>Traipu</b>	<b>25.702</b>
20	<b>Olho D'agua Grande</b>	<b>4.957</b>
	<b>Média</b>	<b>29.766</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>595.311</b>

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do IBGE, 2010.

A Figura 4 mostra o mapa dos municípios participantes do Consorcio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste Alagoano com destaque para Arapiraca que é a cidade sede.

Figura 4: Mapa dos municípios participantes do CONAGRESTE.



Fonte: CONAGRESTE, 2015.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE ARAPIRACA

### 4.2.1 Bairros selecionados para estudo

Esta etapa da pesquisa consistiu em selecionar um conjunto de bairros, do município de Arapiraca, que pudessem fornecer uma amostra representativa dos resíduos sólidos gerados no município. Os critérios adotados nesta seleção levaram em conta o número de habitantes do bairro, roteiro de coleta dos caminhões, tipo de atividade desenvolvida e a logística de poder selecionar bairros individuais. No anexo A pode ser visto o cronograma de coleta dos resíduos no município de Arapiraca.

As regiões selecionadas são apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5: Regiões selecionadas para a pesquisa.**

<i>Bairro</i>	<i>Tipo de resíduo predominante</i>	<i>Turno da coleta</i>	<i>População</i>	<i>% Geral</i>
<i>Alto do Cruzeiro</i>	Residencial	Noturno	6102	2,9%
<i>Brasília</i>	Residencial	Diurno	14737	6,9%
<i>Centro</i>	Residencial - Comercial	Noturno	4459	2,1%
<i>Primavera</i>	Residencial	Diurno	11940	5,2%
<i>Zona Rural</i>	Residencial - Agrossilvopastoril	Diurno	32527	15,2%
<b>TOTAL</b>			<b>69765</b>	<b>32,5%</b>

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do IBGE (2010).

A zona rural foi dividida em 3 setores de acordo com a sua programação de coleta. Na Tabela 6 estão indicados os povoados e sítios que compõem as respectivas zonas rurais.

**Tabela 6: Povoado das zonas rurais de Arapiraca.**

<i>Zona Rural</i>	<i>Povoados</i>
<i>Zona Rural 1</i>	Mangabeira, Massaranduba, Sítio Bom Nome, Vila São José, Poção, Poço da Pedra, Vila Aparecida, Genipapo, Baixa do Capim, Santa Rosa, Carrasco, Sítio Xexeu, Fazenda Velha, Lagoa d' Água, Oitizeiro, Ufal.
<i>Zona Rural 2</i>	Bananeira, Laranjal, Bausamo, Sítio Piauí, Baixa da Hora, Jacaranda, Sítio Martins, Pau Darco, Ingazeira, Conjunto Bem Viver.
<i>Zona Rural 3</i>	Breu, Canãa, Capim, Pau Ferro, Vila Fernandes, Mundo Novo, Fazenda Velha, Vila São Francisco, Vila São Vicente.

Fonte: Elaboração própria a partir do cronograma de coletas do município de Arapiraca.

Os bairros Alto do Cruzeiro, Brasília e Primavera são os mais populosos de Arapiraca e por isso possuem caminhão específico para cada um. O bairro Centro foi selecionado pelo fato do município ter uma economia voltada para o comércio. Já a Zona Rural foi analisada devido ao fato do município possuir mais de 15% da sua

população residindo em sítios e povoados, além de Arapiraca também possuir sua economia voltada para o setor agropecuário.

Como foi visto na Tabela 06, a composição gravimétrica foi realizada para um total de aproximadamente 70 mil habitantes, o que corresponde a mais de 32% da população de Arapiraca, sendo assim uma amostra representativa.

#### 4.2.2 Período das coletas

As coletas foram realizadas no período de maio a dezembro de 2015, totalizando 8 meses de dados. O período de coleta permitiu avaliar as variações sazonais uma vez que amostras foram coletadas nas estações chuvosa e seca do ano.

Os bairros Alto do Cruzeiro, Brasília e Primavera possuem coleta nos dias pares da semana, ou seja, segunda, quarta e sexta-feira. No centro da cidade, a coleta é realizada todos os dias, então, por uma questão logística, foram escolhidos dias pares para as coletas. Cada dia par é feito a coleta de uma zona rural distinta. De acordo com a programação de coleta da cidade, às segundas-feiras é coletado a Zona Rural 1, nas quartas-feiras é coletado a Zona Rural 3 e nas sextas-feiras é feito a coleta da Zona Rural 2. Na Tabela 7 está indicado o calendário de obtenção de amostras para a pesquisa, totalizando 40 amostras.

**Tabela 7: Calendário de coleta dos dados.**

<b>Bairros</b>	<b>Mai dia 22</b>	<b>Jun dia 15</b>	<b>Jul dia 22</b>	<b>Ago dia 28</b>	<b>Set dia 21</b>	<b>Out dia 21</b>	<b>Nov dia 13</b>	<b>Dez dia 07</b>
<b>Alto do Cruzeiro</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Brasília</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Centro</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Primavera</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Zona Rural 1</b>	--	X	--	--	X	--	--	X
<b>Zona Rural 2</b>	X	--	--	X	--	--	X	--
<b>Zona Rural 3</b>	--	--	X	--	--	X	--	--

Fonte: Elaboração própria.

(X) – Amostras obtidas.

(--) – Amostras não obtidas.

### 4.2.3 Composição Gravimétrica

Para a obtenção da composição gravimétrica dos resíduos, inicialmente foi montada uma estrutura com uma tenda para auxiliar o desenvolvimento da análise com uma base forrada por uma lona para que as amostras não sofressem interferências externas, Figura 5.

Figura 5: Estrutura utilizada para realização da pesquisa.



Fonte: Do autor (2016).

O ensaio da composição gravimétrica inicia com despejo de uma amostra representativa do caminhão compactador em um local no terreno do aterro, cerca de 1 a 2 toneladas de resíduos de cada bairro (Figura 6).

**Figura 6: Despejo dos resíduos para análise**



Fonte: Do autor (2016).

Em seguida eram pesados 400 kg de resíduos e despejados sobre a lona. Para a pesagem da amostra era utilizado um balde de capacidade 100 L e uma balança digital com capacidade de até 200 quilos, Figuras 7 e 8.

**Figura 7: Balde utilizado para pesagem dos resíduos.**



Fonte: Do autor (2016).

**Figura 8: Balança usada na pesagem dos resíduos.**



Fonte: Do autor (2016).

Após a pesagem, a amostra era colocada em uma lona onde se realizava o rompimento dos sacos plásticos, Figura 9.

**Figura 9: Rompimento dos sacos plásticos.**



Fonte: Do autor (2016).

Feito o rompimento dos sacos era realizada a homogeneização manual da amostra com auxílio de pá e enxada, Figura 10.

**Figura 10: Rompimento dos sacos plásticos.**



**Fonte: Do autor (2016).**

Com a amostra homogeneizada era realizado o quarteamento, em que a amostra é separada em 4 partes iguais, Figura 11. Em seguida eram desprezadas duas das quatro partes, vis-à-vis, sobrando duas porções de 100 quilos cada, totalizando 200 quilos, Figura 12.

**Figura 11: Quarteamento da amostra.**



Fonte: Do autor (2016).

**Figura 12: Separação de duas partes, vis-à-vis.**



Fonte: Do autor (2016).

Depois, as duas partes de 100 kg eram misturadas novamente de forma manual e realizado um segundo quarteamento. As amostras eram divididas em quatro partes de aproximadamente 50 kg cada e duas partes, vis-à-vis, eram desprezadas. No fim

restavam duas porções de aproximadamente 50 kg totalizando aproximadamente uma amostra representativa do caminhão compactador de 100 kg, Figura 13.

**Figura 13: Amostra final de 100kg.**



Fonte: Do autor (2016).

De posse da amostra representativa, tinha início a etapa de separação dos principais componentes que constituíam a amostra, ao todo 12 componentes. Essa separação era realizada manualmente, Figura 14.

Figura 14: Amostra final de 100kg.



Fonte: Do autor (2016).

A lista dos componentes está indicada na Tabela 08. Estes itens foram selecionados por ser os que mais estão presentes na composição dos RSU de uma região e são os que mais são encontrados na literatura de triagem de resíduos por alguns autores como por exemplo CUNHA (2005), JUCÁ (2002b), TAVARES (2008).

Tabela 8: Lista dos componentes.

<i>ORDEM</i>	<i>COMPONENTE</i>	<i>ORDEM</i>	<i>COMPONENTE</i>
<i>1</i>	Plástico flexível	<i>7</i>	Madeira
<i>2</i>	Plástico rígido	<i>8</i>	Metais
<i>3</i>	Papel/Papelão	<i>9</i>	Vidros
<i>4</i>	Trapos	<i>10</i>	Matéria orgânica
<i>5</i>	Couros	<i>11</i>	Resíduos Sanitários
<i>6</i>	Borrachas	<i>12</i>	Terras e similares

Fonte: O autor (2016).

Após a separação dos elementos era realizada a pesagem dos componentes com o auxílio de uma mini balança digital de alta precisão com capacidade máxima de 50 kg, Figura 15.

Figura 15: Mini balança digital utilizada na pesagem.



Fonte: O autor (2016).

O percentual de cada componente na amostra foi calculado por meio da Equação 4.1.

$$CG(\%) = \frac{P_c}{P_t} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde,

CG: composição gravimétrica (%)

P<sub>c</sub>: Peso de cada componente

P<sub>t</sub>: Peso total do resíduo.

No Apendice A é possível verificar um modelo da planilha utilizado para anotação dos dados no campo.

As Figuras 16 a 19 mostram a pesquisa sendo realizada no turno noturno para os bairros Centro e Alto do Cruzeiro.

**Figura 17: Despejo dos resíduos para análise.**



Fonte: O autor (2016).

**Figura 16: Rompimento dos sacos.**



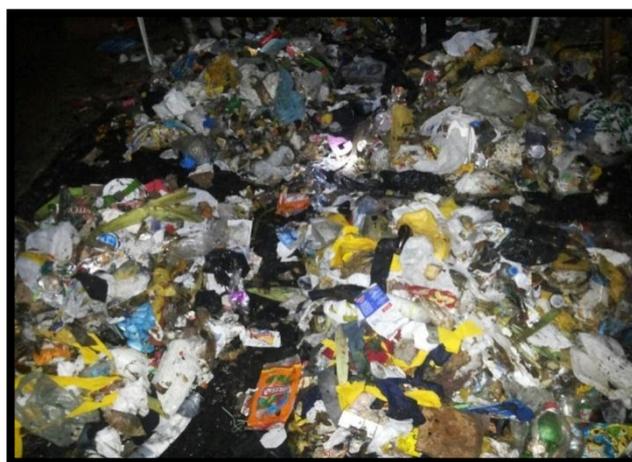
Fonte: O autor (2016).

**Figura 18: Homogeneização da amostra.**



Fonte: O autor (2016).

**Figura 19: Etapa de quarteamento.**



Fonte: O autor (2016).

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO DAS DEMAIS CIDADES INTEGRANTES DA CONAGRESTE.

Através da composição gravimétrica dos resíduos sólidos, de Arapiraca e das outras cidades que fazem parte do Consórcio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste, foi possível analisar a potencialidade energética através do programa LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) – versão 3.02.

Os dados da gravimetria das cidades de Minador do Negrão, Estrela de Alagoas, Palmeira dos Índios, Quebrangulo, Maribondo, Tanque D'arca, Belém, Igaci, Coité do Nóia, Taquarana, Limoeiro de Anadia, Craíbas, Lagoa da Canoa, Feira Grande, São Sebastião, Girau do Ponciano, Campo Grande, Traipu e Olho D'agua Grande foram obtidos através de coleta de dados na Secretaria Estadual de Recursos Hídricos de Alagoas – SEMARH (2016).

### 4.4 ESTUDO DA POTENCIALIDADE ENERGÉTICA

Para a estimativa anual do gás metano, do dióxido de carbono e do biogás, como também de outros gases (butano, monóxido de carbono, entre outros), a ser produzido no aterro da cidade de Arapiraca foi utilizado o programa LandGEM (Landfill Gas Emissions Model)– versão 3.02.

O LandGEM é um programa desenvolvido pelo *Control Technology Center* da EPA (*Environmental Protection Agency*) (EPA, 2005).

O programa parte de uma equação de primeira ordem para fazer as estimativas das emissões dos gases para o ano desejado.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (4.2)$$

Onde:

$Q_{CH_4}$ : 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 ( $ano^{-1}$ )

$L_0$ : 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 (tempo, com precisão de decimais, por exemplo, 3,2 anos)

Os parâmetros  $L_0$  e  $K$  são os mais importantes, pois refletem variações de acordo com o local, clima e tipo de resíduos. O fator  $K$  varia de 0,003 a 0,21 ( $ano^{-1}$ ). Nas condições brasileiras 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  $m^3/t$  (FIGUEIREDO, 2012).

Segundo Gonçalves (2007), esse modelo pode ser utilizado tanto para dados específicos do local quanto com dados padrões para se estimar as emissões dos gases em aterros. O programa possui dois conjuntos de parâmetros para o cálculo da geração de metano em aterros:

a) AP42 (*Compilation of Air Pollutant Emission Factors*) – utiliza os parâmetros de  $L_0 = 100 m^3/t$  de resíduos e  $k = 0,02 ano^{-1}$  para regiões áridas com precipitação menor que 635 mm/ano ou  $k=0,04 ano^{-1}$  para regiões áridas com precipitação maior que 635 mm/ano.

b) CAA (*Clean Air Act*) – utiliza os parâmetros de  $L_0 = 170 m^3/t$  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.

A Figura 20 mostra a tela de inserção de dados do programa, que tem uma interface com a Microsoft Excel.

Figura20: Tela de inserção de dados do programa LandGEM.

**1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS**

Landfill Open Year:

Landfill Closure Year:

Have Model Calculate Closure Year? Yes  No

Waste Design Capacity:  megagrams

Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections

Restore Default Model Parameters

**4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES**

Input Units:  Mg/year

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (Mg/year)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		

**2: DETERMINE MODEL PARAMETERS**

Methane Generation Rate, k (per year):

Potential Methane Generation Capacity, L<sub>0</sub> (m<sup>3</sup>):

CAA Conventional:  - 170

NMOC Concentration (ppmv as Hexane):

CAA:  - 4.000

Methane Content (% by volume):

CAA:  - 50% by volume

**3: SELECT GASES/POLLUTANTS**

Gas / Pollutant #1:  Default pollutant parameters are currently being used by model.

Total landfill gas

Gas / Pollutant #2:

Methane

Gas / Pollutant #3:

Carbon dioxide

Gas / Pollutant #4:

NMOC

Edit Existing or Add New Pollutant Parameters

Restore Default Pollutant Parameters

Description/Comments:

Fonte: Programa LandGEM desenvolvido pela EPA (2005).

#### 4.4.1 Cálculo dos parâmetros k e L<sub>0</sub>

A taxa de geração de metano (k) e o potencial de geração de metano (L<sub>0</sub>) são parâmetros de grande importância na estimativa de gás metano, pois refletem a realidade de geração no aterro ao longo dos anos.

Como não há dados específicos do local, foi necessário adotar valor de k e estimar o valor de L<sub>0</sub> de acordo com a área estudada.

Estudos realizados pelo CEPEA (2004) *apud* Gonçalves (2007) o valor da taxa de geração de metano (k) é adaptado de acordo com a região, índice pluviométrico e

clima. Sugere-se para a região Sul,  $k = 0,08 \text{ ano}^{-1}$ ; para Sudeste,  $k = 0,09 \text{ ano}^{-1}$ ; para Norte e Nordeste,  $k = 0,1$ .

Segundo IPCC (2006), uma maneira de se calcular o potencial de geração de metano ( $L_0$ ), utilizada na presente pesquisa, é através da Equação 4.3.

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (4.3)$$

Onde:

$L_0$  : potencial de geração de metano do lixo (Gg de  $CH_4$ /Gg de RSU);

$FCM$ : fator de correção de metano (%);

$COD$ : carbono orgânico degradável (Gg de C/Gg de RSU);

$COD_f$ : fração de COD dissociada (%);

$F$ : fração em volume de metano (%);

$\frac{16}{12}$ : fator de conversão de carbono em metano (Gg de  $CH_4$ /Gg de C).

$FCM = 1$

$COD_f = 0,5$

$F = 0,5$

Segundo IPCC (2006), o valor do fator de correção de metano ( $FCM$ ) para disposição de resíduos sólidos de forma adequada e bem gerenciada, que é a proposta do futuro aterro de Arapiraca, é igual a 1.

O valor padrão, recomendado pelo IPCC (2006), para a fração de carbono orgânico degradável dissociada  $COD_f$  é 0,5.

O valor da fração em volume de metano ( $F$ ) foi considerado igual a 0,5, uma vez que, segundo IPCC (2006), o biogás gerado em um aterro sanitário pelos resíduos sólidos possui um percentual de 50% de metano.

O carbono orgânico degradável ( $COD$ ) é o carbono orgânico dos resíduos que é acessível à decomposição bioquímica. O  $COD$  é estimado com base na composição dos resíduos e pode ser calculado a partir de uma média ponderada do teor de carbono de vários componentes degradáveis (tipos de resíduos / materiais) do fluxo de resíduos (IPCC, 2006).

Para o cálculo do  $COD$  foi utilizada a Equação 4.4

$$COD = \sum(COD_i \times W_i) \quad (4.4)$$

$COD$ : Fração de carbono orgânico degradável no lixo

$COD_i$ : Fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo  $i$

$W_i$ : Fração do tipo de resíduo  $i$  por categoria do resíduo

O valor do  $COD_i$  depende da composição do material que será depositado no aterro e pode ser visto na Tabela 09.

Tabela 9: Lista dos componentes.

<i>Componente</i>	<i>COD (% em massa)</i>
<i>A) Papel/Papelão</i>	40
<i>B) Resíduos de parques e jardins</i>	17
<i>C) Restos de alimento</i>	15
<i>D) Têxteis</i>	40
<i>E) Madeira</i>	30

Fonte: Adaptado de IPCC (2006).

A fração do tipo de resíduo ( $W_i$ ) depende dos resultados da análise da composição gravimétrica do resíduo.

Para estimar a geração de biogás no futuro aterro sanitário de Arapiraca, foi necessário estimar a quantidade de resíduos sólidos urbanos que serão gerados ao longo dos 20 anos de vida útil do aterro, em função do crescimento populacional e da geração per capita de RSU.

#### 4.5 ESTIMATIVA DA POPULAÇÃO

Para a estimativa do crescimento populacional de Arapiraca e das demais cidades que fazem parte da CONAGRESTE foram utilizados dados de Censo Demográfico de 1991, 2000 e 2010 do IBGE. A Tabela 10 mostra o crescimento populacional das 20 cidades que estão incluídas no consorcio do aterro do agreste alagoano.

Tabela 10: Dados da população total de todos os municípios da CONAGRESTE.

<b>Ano</b>	<b>População dos Municípios</b>
<b>1991</b>	507527
<b>2000</b>	552877
<b>2010</b>	595311

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do IBGE (2015).

A previsão da população futura foi calculada a partir de dados censitários (IBGE 2015), utilizando-se os seguintes métodos matemáticos: Aritmético, Geométrico e da Curva Logística. Para verificar qual o método que apresentou o melhor ajuste, foi calculado o coeficiente de correlação (R) com o auxílio da ferramenta Excel versão 2016. A seguir, serão escritos os referidos métodos matemáticos.

#### 4.5.1 Método Aritmético

Esse método pressupõe uma taxa de crescimento constante para os anos que se seguem, a partir de dados conhecidos, por exemplo, a população do último censo (TSUTIYA, 2006).

Sendo  $K_a$  uma constante e considerando  $P_1$  a população do penúltimo censo (ano  $t_1$ ),  $P_2$  a população do último censo (ano  $t_2$ ),  $t$  o ano para o qual se está projetando e  $P$  a população no ano  $t$ , chega-se à expressão geral do Método Aritmético:

$$P = P_2 + k_a(t - t_2) \quad (4.5)$$

Em que a constante  $K_a$  é encontrada pela Equação 4.6.

$$k_a = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad (4.6)$$

#### 4.5.2 Método Geométrico

Este método considera para iguais períodos de tempo, a mesma porcentagem de aumento da população (TSUTIYA, 2006).

A expressão geral do método para estimar a população para o ano  $t$  é dada pela Equação 4.7.

$$P = P_2 e^{k_g(t-t_2)} \quad (4.7)$$

As variáveis são as mesmas já definidas anteriormente, exceto  $k_g$ , que representa a taxa de crescimento geométrico e pode ser encontrada pela Equação 4.8.

$$k_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{t_2 - t_1} \quad (4.8)$$

### 4.5.3 Método da Curva Logística

Admite-se para este método que o crescimento da população obedece a uma relação matemática do tipo curva logística, em que a população cresce assintoticamente em função do tempo para um valor limite de saturação ( $K$ ) (TSUTIYA, 2006). A estimativa populacional é dada pela Equação 4.9.

$$P = \frac{K}{1 + e^{a-bT}} \quad (4.9)$$

O parâmetro  $a$  é um valor tal que, para  $T = a/b$ , há uma inflexão na curva; o parâmetro  $b$  é a razão de crescimento da população e  $T$  representa o intervalo de tempo entre o ano da projeção e  $t_0$ . Os parâmetros da equação da curva logística são definidos pelas expressões que se seguem Equações 4.10 a 4.12:

$$K = \frac{2P_0P_1P_2 - (P_1)^2(P_0 + P_2)}{P_0P_2 - (P_1)^2} \quad (4.10)$$

$$b = -\frac{1}{0,4343d} \log \frac{P_0(K - P_1)}{P_1(K - P_0)} \quad (4.11)$$

$$a = \frac{1}{0,4343} \log \frac{K - P_0}{P_0} \quad (4.12)$$

### 4.5.4 Estimativa da geração de RSU

Para estimar a quantidade de resíduos sólidos que irá para o futuro aterro sanitário, foi utilizada a Equação 4.13 e considerada uma vida útil de 20 anos.

$$P_d = \frac{pop \cdot g \cdot R}{1000} \quad (4.13)$$

$P_d$ : produção diária média de resíduos (kg/dia)  
 $P_{op}$ : população no determinado ano considerado  
 $g$ : geração per capita de resíduo do município (kg/hab.dia)  
 $R$ : percentual de resíduos aterrados (%).

Para a geração per capita de resíduos dos municípios foi adotado um valor de 0,8 kg/hab.dia. Admitiu-se que o percentual de resíduos aterrados será de 100%.

#### 4.6 CÁLCULO DA POTÊNCIA E ENERGIA DISPONÍVEIS

A determinação da potência disponível pode ser feita por meio da Equação 4.14 (PECORA, 2009).

$$P_x = \frac{Q_x \cdot P_{C_{metano}} \cdot \eta}{31536000} \quad (4.14)$$

$P_x$ : potência disponível a cada ano (kW)  
 $Q_x$ : vazão de metano a cada ano ( $m^3CH_4$ /ano)  
 $P_{C_{matano}}$ : poder calorífico de metano =  $35,53 \cdot 10^6$  J/ $m^3CH_4$   
 $\eta$ : eficiência do motor  
31536000: segundos em um ano

Segundo Martins (2014), a conversão do biogás em energia elétrica é feita a partir do uso de um motor de combustão interna acoplado a um gerador e possui uma eficiência que varia de 20 a 50%. Portanto, foi adotado o valor de 30% para a eficiência do projeto.

Para o cálculo da energia disponível utilizou-se a Equação 4.15.

$$E = P \cdot R_{end} \cdot T \quad (4.15)$$

$E$ : energia disponível (MWh/dia);  
 $P$ : potência disponível (MW);  
 $R_{end}$ : rendimento do motor operando a plena carga = 80% (adotado) = 0,80;  
Tempo de Operação do motor: 24 (h/dia).

## 4.7 ANÁLISE ECONÔMICA

Para verificar a viabilidade econômica dos resíduos para geração de energia utilizou-se o método do Valor Presente Líquido (VPL). Este método é o mais recomendado por especialistas em finanças para decisão de investimento (DA FONSECA, 2010).

O VPL consiste no valor presente dos fluxos de caixa futuros reduzido do valor presente do custo do investimento, considera o valor temporal do dinheiro, ou seja, um recurso hoje vale mais do que amanhã, porque pode ser investido e render juros; não é influenciado por decisões menos qualificadas como preferência do gestor, métodos de contabilização, rentabilidade da atividade atual (DA FONSECA, 2010).

O VPL pode ser calculado através da Equação 4.16.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} - I \quad (4.16)$$

*R*: fluxo de caixa no t-ésimo período;

*I*: investimento inicial;

*i*: taxa mínima de atratividade (adotado 10% ao ano);

*n*: período de investimento.

A taxa mínima de atratividade (TMA), ou taxa interna de retorno, é uma taxa de juros, que ao se fazer um investimento o investidor espera um retorno pelo menos igual a essa taxa (PEREIRA; COSTA e COSTA, 2012). A TMA é única para cada investidor e não existe fórmula matemática para calculá-la, pode ser considerada pessoal e intransferível, uma vez que varia de investimento para investimento e de pessoa para pessoa.

Com o resultado do VPL tem-se as seguintes situações:

VPL > 0: O projeto é viável;

VPL < 0: O projeto é inviável;

VPL = 0: O projeto é indiferente.

Foi utilizada uma avaliação econômica para duas situações, uma sem crédito de carbono e a outra com o cálculo do crédito de carbono. Segundo Martins (2013), o crédito de carbono é uma medida que permite às indústrias e os países diminuírem os seus índices de emissão de gases do efeito estufa através de um sistema de compensação. Às empresas e os países que conseguem reduzir as suas emissões é dado créditos, podendo estes ser vendidos nos mercados financeiros.

Para calcular os créditos de carbono são utilizados os seguintes dados (PECORA, 2006):

- Energia gerada (MWh/ano);
- Fator de intensidade de carbono - 0,5 tCO<sub>2</sub>eq/MWh;
- Valor de Certificado de Emissões Evitadas (CEE) - EUR 6,21/tCO<sub>2</sub> ;

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização dos resíduos sólidos urbanos do município de Arapiraca

Foram selecionados no estudo 5 regiões, sendo 4 bairros e a região de zona rural do município, esta última dividida em 3 setores: zona rural 1, 2 e 3. Os dados da composição gravimétrica de cada região estudada podem ser vistos na Tabela 11.

Tabela 11: Composição gravimétrica dos RSU de Arapiraca por região.

<b>COMPONENTES</b>	<b>MÉDIAS POR REGIÃO (%)</b>				
	<b>Alto do Cruzeiro</b>	<b>Brasília</b>	<b>Centro</b>	<b>Primavera</b>	<b>Zona Rural</b>
<b>Plástico Rígido</b>	6,33	5,24	10,38	5,36	4,22
<b>Plástico Flexível</b>	18,28	15,75	15,83	17,15	13,59
<b>Papel/Papelão</b>	10,17	9,26	19,82	7,28	5,85
<b>Trapos</b>	1,75	2,32	1,18	1,97	3,10
<b>Couros</b>	0,28	0,33	0,44	0,07	0,26
<b>Borracha</b>	0,43	0,38	0,18	0,37	1,05
<b>Madeira</b>	0,14	0,30	0,34	0,25	1,06
<b>Metais</b>	2,38	1,60	2,33	1,13	1,25
<b>Vidro</b>	2,56	2,64	1,15	1,77	1,34
<b>Matéria Orgânica</b>	45,86	51,29	39,71	52,51	50,05
<b>Resíduos Sanitários</b>	10,21	7,76	7,49	9,64	12,54
<b>Terra e Similares</b>	1,61	3,13	1,15	2,50	5,69
<b>TOTAL</b>	100	100	100	100	100

Fonte: Elaboração própria (2016)

Na Tabela 01(Apêndice B) é possível ver a composição gravimétrica média mensal dos resíduos sólidos urbanos de cada região em análise, levantada ao longo de 8 meses de estudo.

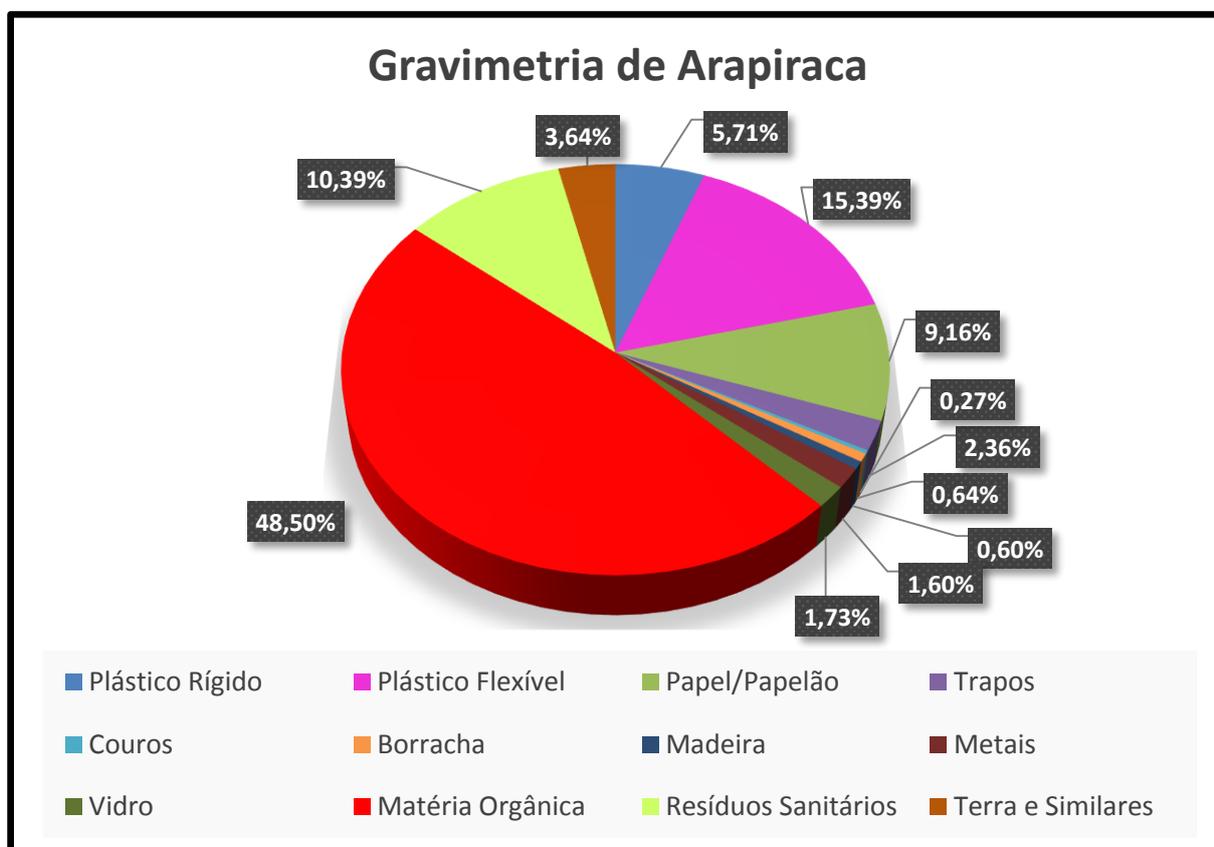
A Tabela 12 e a Figura 21 apresentam a média geral da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do município de Arapiraca.

Tabela 12: Média geral da composição gravimétrica dos RSU da cidade de Arapiraca.

<b>COMPONENTES</b>	<b>MÉDIA DE ARAPIRACA (%)</b>
<i>Plástico Rígido</i>	5,71
<i>Plástico Flexível</i>	15,39
<i>Papel/Papelão</i>	9,16
<i>Trapos</i>	2,36
<i>Couros</i>	0,27
<i>Borracha</i>	0,64
<i>Madeira</i>	0,60
<i>Metais</i>	1,60
<i>Vidro</i>	1,73
<i>Matéria Orgânica</i>	48,50
<i>Resíduos Sanitários</i>	10,39
<i>Terra e Similares</i>	3,64
<b>TOTAL</b>	100

Fonte: Elaboração própria (2016)

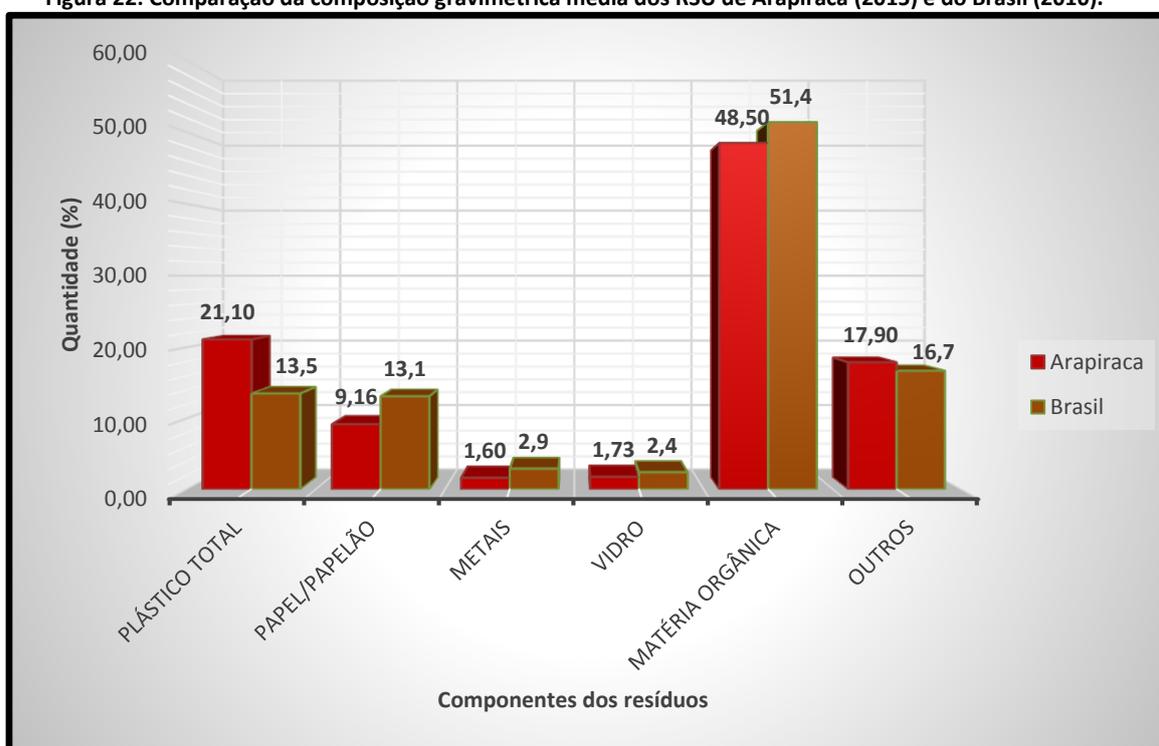
Figura 21: Composição gravimétrica dos RSU do município de Arapiraca/AL.



Fonte: Elaboração própria (2016).

Como pode ser observado na figura 21, o maior percentual, aproximadamente 49% dos resíduos sólidos de Arapiraca, é de matéria orgânica, seguido de plástico flexível (15,4%) e resíduos sanitários (10,4%). Os componentes em menores quantidades são o couro com 0,27%; madeira com 0,60% e borracha com 0,64%. A Figura 22 apresenta uma comparação da composição gravimétrica média da cidade de Arapiraca e do Brasil. Os dados da composição média do Brasil foram adaptados do Ministério de Meio Ambiente (2012) que apresentou dados da gravimetria do Brasil no ano de 2010.

Figura 22: Comparação da composição gravimétrica média dos RSU de Arapiraca (2015) e do Brasil (2010).



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do autor e do Ministério do Meio Ambiente (2012).

É possível observar na figura 22 que a matéria orgânica (MO) da cidade de Arapiraca está muito próxima da média nacional, ficando apenas 2,9% abaixo. O índice de matéria orgânica deve-se a restos de alimentos, galhos e folhagens em geral e à produção e ao comércio de produtos orgânicos como frutas, verduras, legumes, cana-de-açúcar, casca de cocos, dentre outros.

No entanto comparando com países desenvolvidos o índice de matéria orgânica é bastante alto. Segundo Hoornweg (2012), a fração de matéria orgânica em cidades de países desenvolvidos, como Estados Unidos, é no entorno de 28% e dentre muitos fatores o poder econômico é preponderante, pois, quanto menor a economia de uma

região maior é a fração de matéria orgânica. Uma explicação para o alto índice de MO na cidade de Arapiraca seria o baixo poder aquisitivo da população que, segundo dados do Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2013), possui uma renda per capita de R\$ 423,28, 26,65% da população é pobre e 11,15% é extremamente pobre. A renda do município está abaixo da renda per capita de Alagoas, que segundo IBGE (2010) é de R\$ 604,00 e bem menor quando comparada em nível nacional, em que a renda média do brasileiro é de R\$ 1.052,00. Outra explicação pode ser que a cidade tenha alguma deficiência do setor de produção de alimentos que, segundo Tavares (2008), tem como consequência altos índices de desperdício.

O percentual médio de metais e vidros é menor em comparação à média nacional, isso pode ser explicado também por questões econômicas, já que muitas pessoas coletam latas e garrafas de vidro para sua sobrevivência, chegando assim poucas quantidades desse material no aterro controlado da cidade. A maior parte dos vidros coletados na pesquisa era de garrafas quebradas.

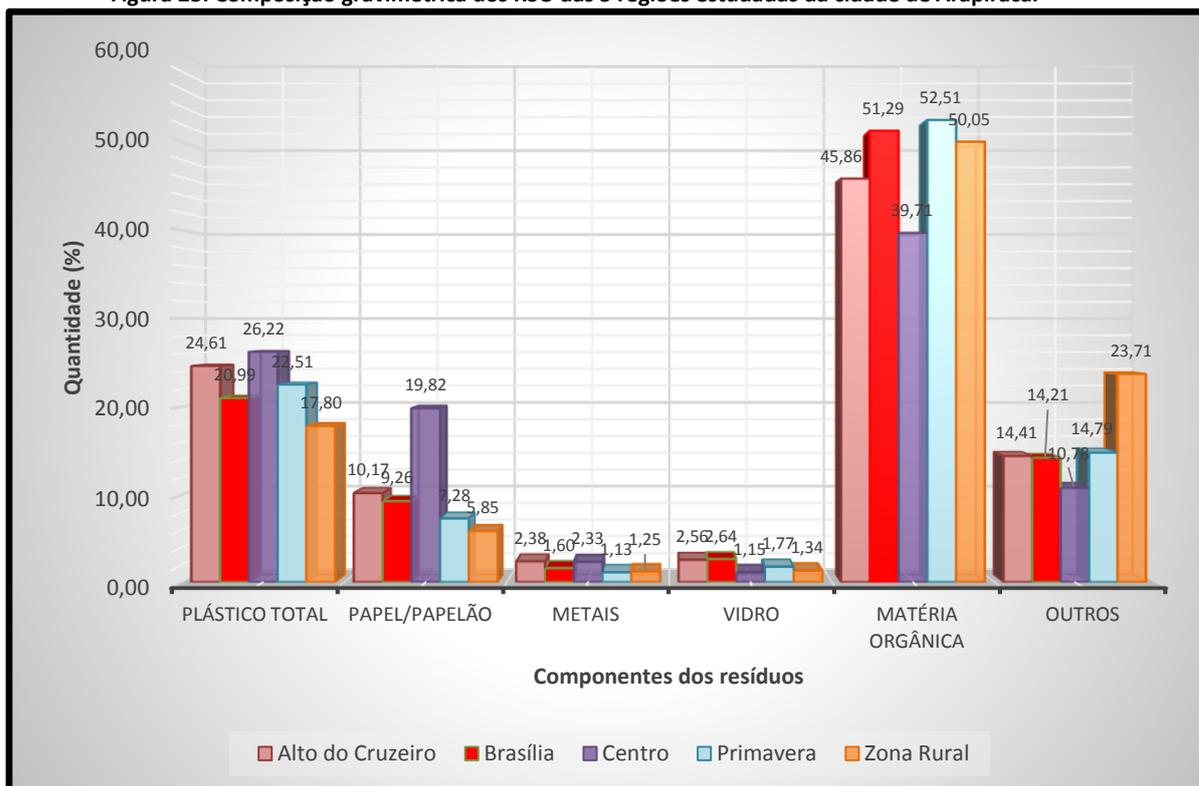
A quantidade de plásticos gerais ficou com índice bem elevado quando comparado com a média nacional. Esta elevada percentagem se deve, principalmente, a quantidades de sacolas utilizadas em compras de supermercados pela população e sua utilização em acondicionamento de resíduos sólidos.

O índice de papel/papelão é cerca de 4% menor que a média nacional, isso pode ser devido à substituição do papel por sacolas plásticas, e até mesmo devido a existência de muitas pessoas que coletam esse material para vender em cooperativas e empresas de reciclagens como meio de sobrevivência.

## **5.2 Análise e comparação da composição gravimétrica das regiões estudada**

A composição gravimétrica de alguns componentes dos resíduos das 5 regiões estudadas, para fornecer uma amostra representativa da cidade de Arapiraca, pode ser vista na Figura 23.

Figura 23: Composição gravimétrica dos RSU das 5 regiões estudadas da cidade de Arapiraca.



Fonte: Do autor.

Analisando a figura 23, pode-se verificar que a região que apresenta maior percentual de matéria orgânica é o bairro Primavera, região do município que apresenta uma população com baixo poder aquisitivo. Levando em consideração a lógica, a tendência era que a região da Zona Rural de Arapiraca apresentasse um maior índice de matéria orgânica em relação às outras regiões, por ser um local onde a população possui menos condições econômicas que as outras regiões, além de ter uma economia voltada para a agricultura e pecuária com menor consumo de produtos industrializados. No entanto, a Zona Rural apresentou apenas o terceiro maior índice de matéria orgânica, isso pode ser explicado pelo fato da população utilizar os componentes orgânicos como alimento para animais e adubo para as plantações. A região do Centro apresentou um menor índice de matéria orgânica, isso se deve ao fato de ser um local voltado para atividades de comércio e isso fica comprovado pelos elevados índices de embalagens como plástico total e papel/papelão.

O bairro do Alto do Cruzeiro apresentou o segundo maior índice de papel/papelão e plástico, isso provavelmente pela concentração de supermercados, escolas e faculdade na região. A Zona Rural apresentou o menor percentual de papel/papelão e plástico, isso pode ser explicado pelo fato dessa população apresentar

um poder aquisitivo menor que outras regiões da cidade o que faz com que sejam consumidos, por exemplo, menos produtos industrializados e apresenta, também, poucas escolas e mercadinhos. O bairro primavera apresenta a segunda menor quantidade de papel/papelão, possivelmente, por ser um local com uma população de baixo poder econômico e áreas com baixa economia que produzem poucos materiais recicláveis.

Quanto à presença de metais, o bairro Primavera e a Zona Rural apresentaram um menor percentual. É possível explicar pela economia das regiões, a Zona Rural pelo fato da população utilizar poucos produtos industrializados e o bairro Primavera pode ser pela presença de catadores que recolhem este tipo de material para reciclagem. Os bairros do Centro e Alto do Cruzeiro apresentaram maior percentual nesta categoria por possuir atividades de comércio com presença de supermercados e lanchonetes.

O índice de vidro foi menor no Centro e na Zona Rural. No bairro do Centro, por ser uma região de comércio e serviços, a tendência era que apresentasse um índice mais elevado, no entanto, talvez, catadores estejam coletando este componente antes da sua destinação final no aterro.

### **5.3 Composição gravimétrica das cidades integrantes da CONAGRESTE**

Como já mencionado anteriormente, a CONAGRESTE é um consórcio de 20 cidades da região do agreste alagoano para utilização de um aterro sanitário. A cidade sede do aterro é Arapiraca, que foi a cidade que teve sua composição gravimétrica realizada nesta pesquisa. As outras 19 cidades, que irão dispor seus resíduos no futuro aterro, teve sua composição gravimétrica realizada pela Secretaria Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Alagoas (SEMARH/AL) em parceria com a empresa FLORAM do estado da Bahia.

A pesquisa da SEMARH para a região do agreste foi feita nos meses de setembro, outubro e novembro do ano de 2015 e em cada uma das cidades foi realizada apenas uma coleta para determinação dos componentes dos resíduos.

Os dados da composição dos resíduos sólidos das cidades do agreste que irão depositar seus resíduos no futuro aterro de Arapiraca, podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13: Composição gravimétrica dos RSU das cidades do agreste alagoano.

<b>CIDADE</b>	<b>Componentes dos Resíduos (%)</b>					
	<b>Matéria Orgânica</b>	<b>Papel/Papelão</b>	<b>Metais</b>	<b>Plástico Total</b>	<b>Vidro</b>	<b>Outros</b>
<i>Arapiraca</i>	48,50	9,16	1,60	21,10	1,73	17,90
<i>Minador do Negrão</i>	60,51	14,37	0,76	14,37	0,15	9,83
<i>Estrela de Alagoas</i>	65,25	8,96	0,63	13,84	3,93	7,39
<i>Palmeira dos Índios</i>	65,15	5,70	0,65	16,29	0,00	12,21
<i>Quebrangulo</i>	48,78	3,25	0,81	10,57	1,63	34,96
<i>Maribondo</i>	78,03	0,75	0,90	11,96	0,60	7,77
<i>Tanque D'arca</i>	64,39	2,99	1,00	14,25	1,28	16,10
<i>Belém</i>	67,98	5,27	0,41	17,05	0,41	8,88
<i>Igaci</i>	30,57	15,65	0,55	20,81	3,68	28,73
<i>Coité do Nóia</i>	59,47	8,93	0,24	16,41	0,00	14,96
<i>Taquarana</i>	72,59	7,81	0,43	9,94	2,13	7,10
<i>Limoeiro de Anadia</i>	77,05	1,64	0,33	11,48	0,49	9,02
<i>Craíbas</i>	54,41	3,68	0,74	18,38	1,47	21,32
<i>Lagoa da Canoa</i>	81,79	0,84	0,51	9,27	0,84	6,75
<i>Feira Grande</i>	83,83	2,51	0,12	6,83	0,24	6,47
<i>São Sebastião</i>	70,73	7,93	0,68	13,54	0,00	7,11
<i>Girau do Ponciano</i>	61,49	2,70	0,68	10,81	2,70	21,62
<i>Campo Grande</i>	62,05	10,10	0,14	8,66	0,29	4,33
<i>Traipu</i>	67,19	1,56	0,63	17,97	0,78	11,88
<i>Olho D'agua Grande</i>	61,43	7,14	0,71	17,14	1,43	12,14

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do autor e da SEMARH (2016).

A Tabela 14 apresenta a média geral dos componentes dos RSU das cidades do agreste alagoano que irão dispor seus resíduos no futuro aterro.

Tabela 14: Média geral da composição gravimétrica dos RSU das cidades do agreste alagoano.

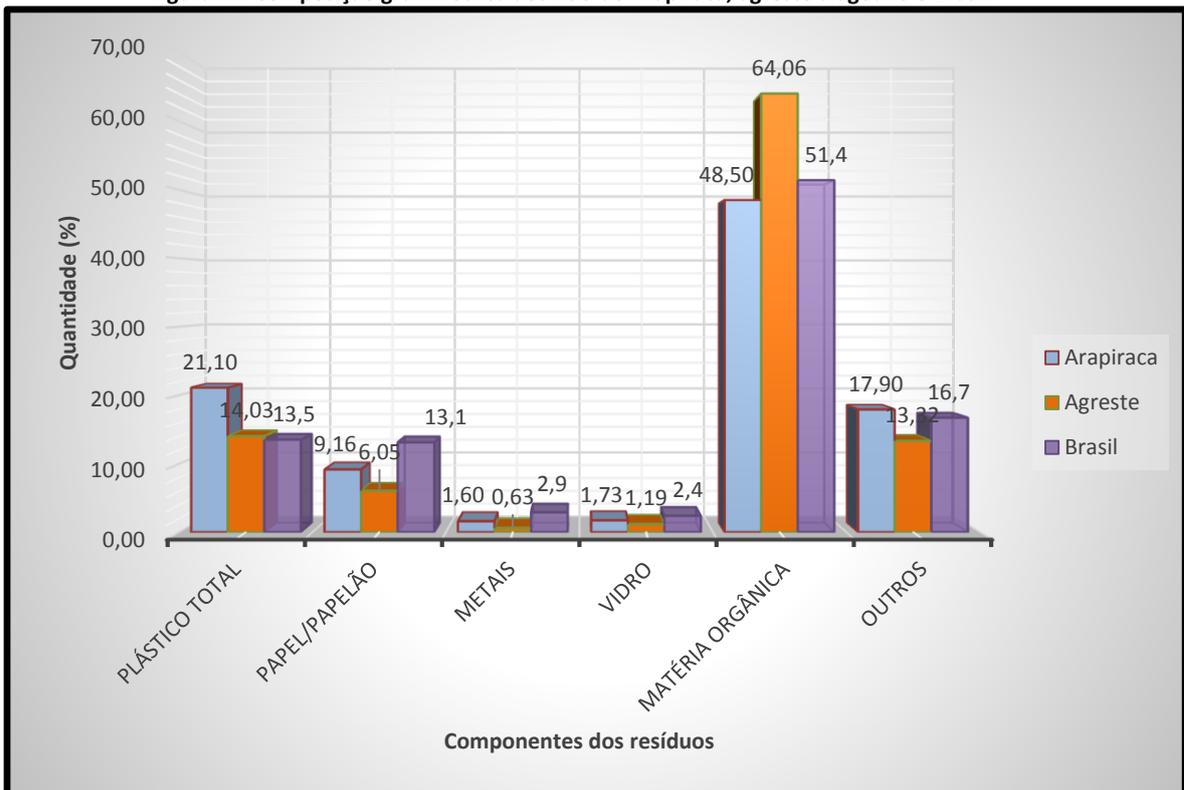
<b>COMPONENTES</b>	<b>MÉDIA DO AGRESTE</b>
<i>Plástico Total</i>	14,03
<i>Papel/Papelão</i>	6,05
<i>Metais</i>	0,63
<i>Vidro</i>	1,19
<i>Matéria Orgânica</i>	64,06
<i>Outros</i>	13,32

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do autor e da SEMARH (2016).

Conforme dados da pesquisa de campo, a matéria orgânica apresenta maior percentual com 64,06%, o que pode ser considerado um valor elevado, seguido por plástico. Os índices de metais e vidro apresentaram o menor valor.

A Figura 24 apresenta uma comparação da composição gravimétrica média do agreste alagoano com a cidade de Arapiraca e do Brasil.

Figura 24: Composição gravimétrica dos RSU de Arapiraca, agreste alagoano e Brasil.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do autor e do Ministério do Meio Ambiente(2012).

Como pode ser visto na figura 24 a matéria orgânica da região do agreste alagoano possui um índice bastante elevado (64,06%) em comparação com a média do Brasil (51,4%) e da cidade de Arapiraca (48,50%). Isto se deve, principalmente, por ser uma localidade onde a população possui um baixo poder aquisitivo. Muitas das cidades

do Agreste possuem economia voltada para agricultura, e muitos habitantes ainda residem em zona rural.

Os percentuais de vidro, metais e papel/papelão apresentaram os menores índices quando comparados às médias de Arapiraca e do Brasil. Estes componentes também são indicadores da economia de uma localidade. Quanto menor o poder econômico da população menor é o percentual de materiais recicláveis inertes. Em regiões com uma economia subdesenvolvida há menos consumo de produtos industrializados, e muitos habitantes vivem da coleta desses materiais para reciclagem, como meio de sobrevivência.

#### 5.4 Estimativa da população

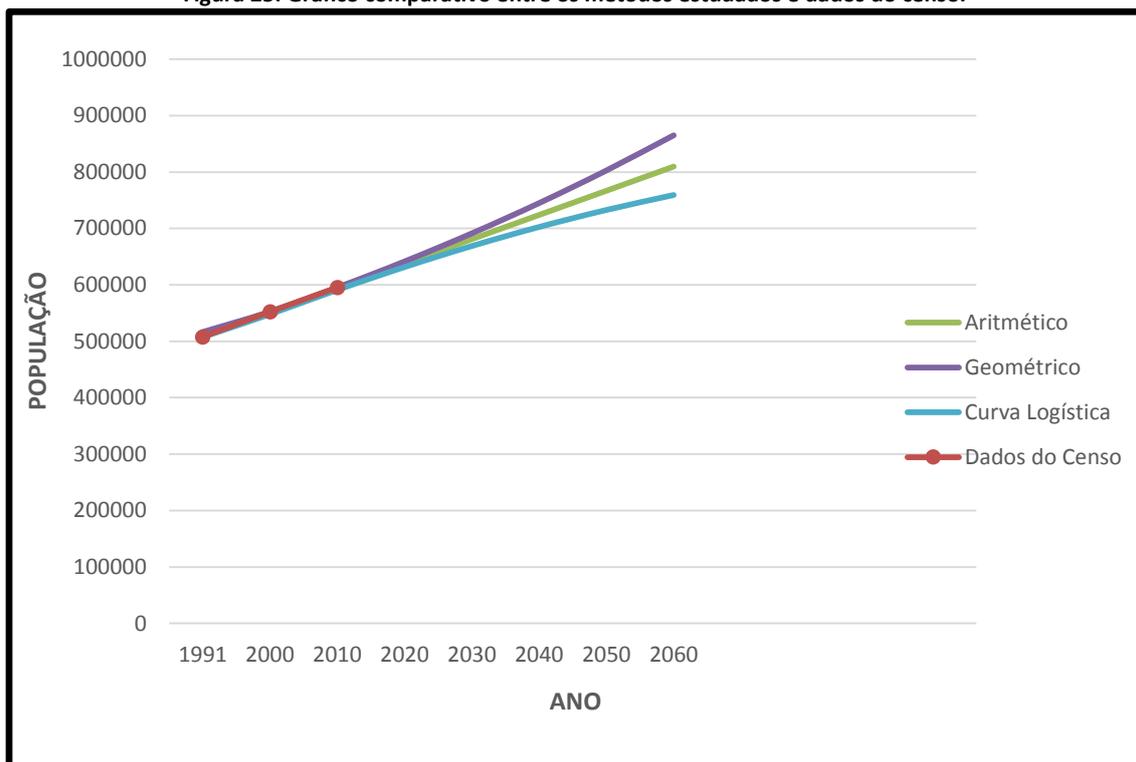
Para o cálculo da população de projeto foram utilizados dados dos censos de 1991, 2000 e 2010, como visto na Tabela 10 do item 4.5. A partir da Tabela foi estimada a população utilizando método aritmético, geométrico e da curva logística. A partir dos dados obtidos foi elaborado um gráfico comparativo entre os três métodos e calculado o coeficiente de correlação de Pearson para avaliar qual apresenta melhor ajuste. Na Tabela 15 estão indicadas as previsões de população dos municípios do CONAGRESTE, e para os anos de 1991, 2000 e 2010, uma comparação com os dados censitários do IBGE. A Figura 25 ilustra a comparação entre os três métodos estudados.

**Tabela 15: Previsão da população a partir dos métodos estudados.**

<i>Ano</i>	<i>População Censo</i>	<i>Método Aritmético</i>	<i>Método Geométrico</i>	<i>Método Curva Logística</i>
1991	507527	513831	516479	507527
2000	552427	552427	552427	548015
2010	595311	595311	595311	591135
2020	--	638195	641524	631601
2030	--	681079	691324	668885
2040	--	723963	744991	702660
2050	--	766847	802823	732788
2060	--	809731	865145	759298

Fonte: O autor (2016).

Figura 25: Gráfico comparativo entre os métodos estudados e dados do censo.



Fonte: O autor (2016).

Conforme indicado na Tabela 16, o coeficiente de correlação de Pearson que mais se aproxima de 1 foi obtido a partir do método de previsão populacional da Curva Logística, e, portanto, este será o método adotado para o cálculo da população de projeto

Tabela 16: Coeficiente de correlação de Pearson.

<b>Método</b>	<b>Coeficiente de correlação</b>
<b>Aritmético</b>	0,9990
<b>Geométrico</b>	0,9980
<b>Logística</b>	0,9995

Fonte: O autor (2016).

A Tabela 17 apresenta a estimativa populacional através deste método. Como o aterro ainda está em fase de início de construção foi adotado que ele irá funcionar a partir de 2017 com vida útil de 20 anos.

**Tabela 17: Estimativa da população pelo método da curva logística.**

<i>Ano</i>	<i>População</i>	<i>Ano</i>	<i>População</i>
<b>2017</b>	619775	<b>2028</b>	661701
<b>2018</b>	623748	<b>2029</b>	665311
<b>2019</b>	627690	<b>2030</b>	668885
<b>2020</b>	631601	<b>2031</b>	672424
<b>2021</b>	635480	<b>2032</b>	675928
<b>2022</b>	639326	<b>2033</b>	679396
<b>2023</b>	643139	<b>2034</b>	682828
<b>2024</b>	646919	<b>2035</b>	686224
<b>2025</b>	650666	<b>2036</b>	689584
<b>2026</b>	654379	<b>2037</b>	692907
<b>2027</b>	658057	-	-

Fonte: O autor (2016).

A Tabela 02 do Apêndice C apresenta os resultados obtidos com a projeção da população através dos métodos aritmético, geométrico e curva logística do período de 2017 a 2037.

## **5.5 Cálculo da geração de resíduos sólidos urbanos**

O cálculo da quantidade de RSU que serão destinados ao futuro aterro da cidade de Arapiraca foi realizado a partir da população para cada ano de vida útil do aterro sanitário e da geração per capita de RSU.

Segundo dados da ABRELPE (2014) a geração média per capita de RSU do estado de Alagoas, para o ano de 2013, foi de 0,91 kg/hab.dia. Portanto, para efeito de cálculo, foi considerado que a geração per capita média de RSU das cidades que irão dispor os resíduos no aterro sanitário é igual a 0,8 kg/hab.dia. Na Tabela 18 podem ser vistos os resultados obtidos.

**Tabela 18: Estimativa da geração de RSU.**

<i>Ano</i>	<i>População</i>	<i>Geração Per Capita (kg/hab.dia)</i>	<i>RSU (t/ano)</i>
2017	619775	0,80	180974,31
2018	623748	0,80	182134,50
2019	627690	0,80	183285,60
2020	631601	0,80	184427,48
2021	635480	0,80	185560,03
2022	639326	0,80	186683,11
2023	643139	0,80	187796,61
2024	646919	0,80	188900,43
2025	650666	0,80	189994,45
2026	654379	0,80	191078,57
2027	658057	0,80	192152,72
2028	661701	0,80	193216,79
2029	665311	0,80	194270,72
2030	668885	0,80	195314,42
2031	672424	0,80	196347,82
2032	675928	0,80	197370,87
2033	679396	0,80	198383,50
2034	682828	0,80	199385,66
2035	686224	0,80	200377,31
2036	689584	0,80	201358,40
2037	692907	0,80	202328,90

Fonte: O autor (2016).

## 5.6 Estimativa do potencial de geração de metano

### 5.6.1 Cálculo do carbono orgânico degradável (COD)

Através da Equação 4.4, do item 4.4.1, pode-se obter a Equação 5.1 a seguir.

$$COD = (0,4xA) + (0,17xB) + (0,15xC) + (0,4xD) + (0,3xE) \quad (5.1)$$

A: Papel/Papelão (%)

B: Parques e jardins (%)

C: Restos de alimento (%)

D: Têxteis (%)

E: Madeira (%)

Os valores referentes aos resíduos de parques e jardins não foram considerados, pelo fato dos mesmos não serem depositados nos mesmos locais que os resíduos sólidos domésticos, havendo deposição diferenciada.

Com exceção de Arapiraca, não foram levantados dados sobre os resíduos de madeiras e têxteis. Por essa razão para estes índices vão ser considerados, para efeito de cálculo, os percentuais da cidade de Arapiraca, ou seja, 0,6% de madeira e 2,36% de têxteis. Portanto, a partir da tabela 09 tem-se os seguintes dados de entrada:

$$A = 0,0605$$

$$B = 0$$

$$C = 0,6406$$

$$D = 0,0236$$

$$E = 0,0060$$

Portanto,

$$COD = (0,4 \times 0,0605) + (0,17 \times 0) + (0,15 \times 0,6406) + (0,4 \times 0,0236) + (0,3 \times 0,006)$$

$$COD = 0,1315 \text{ Gg de C/Gg de RSU}$$

### 5.6.2 Cálculo do potencial de geração de metano ( $L_0$ )

Pela equação 4.3 e sendo o  $COD = 0,1315$  (Gg de C/Gg de RSU) eos dados descritos na metodologia  $FCM = 1$ ,  $COD_f = 0,5$ ,  $F = 0,5$ , tem-se que o potencial de geração de metano do lixo é:

$$L_0 = 1 \times 0,1315 \times 0,5 \times 0,5 \times \frac{16}{12}$$
$$L_0 = 0,0438 \text{ Gg de CH}_4/\text{Gg de RSU.}$$

Considerando a densidade do  $\text{CH}_4$ (0°C e 1,013 bar) como 0,0007168 t/m<sup>3</sup> (DE ABREU, 2008). Tem-se:

$$L_0 = 61,105 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tonelada de resíduo}$$

### 5.6.3 Cálculo da emissão de metano

Para o cálculo da quantidade de metano gerado, através do programa LandGEM, pelos resíduos sólidos que serão dispostos no futuro aterro da cidade de Arapiraca, foram considerados que o ano de abertura do aterro é 2017 e 20 anos de vida útil, portanto encerramento do aterro no ano de 2037. Foi considerado, ainda que: a taxa de geração de metano ( $k$ ) é igual a 0,1 para região nordeste, como visto no item 4.4.1; o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) é 61,105 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/tonelada de resíduo, item 5.5.2; no biogás gerado 50% correspondem ao metano; a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados ao longo dos anos em Mg; e considerado que a concentração dos compostos orgânicos não-metano (NMOC) é de 4,000 ppmv (partes por milhão de volume).

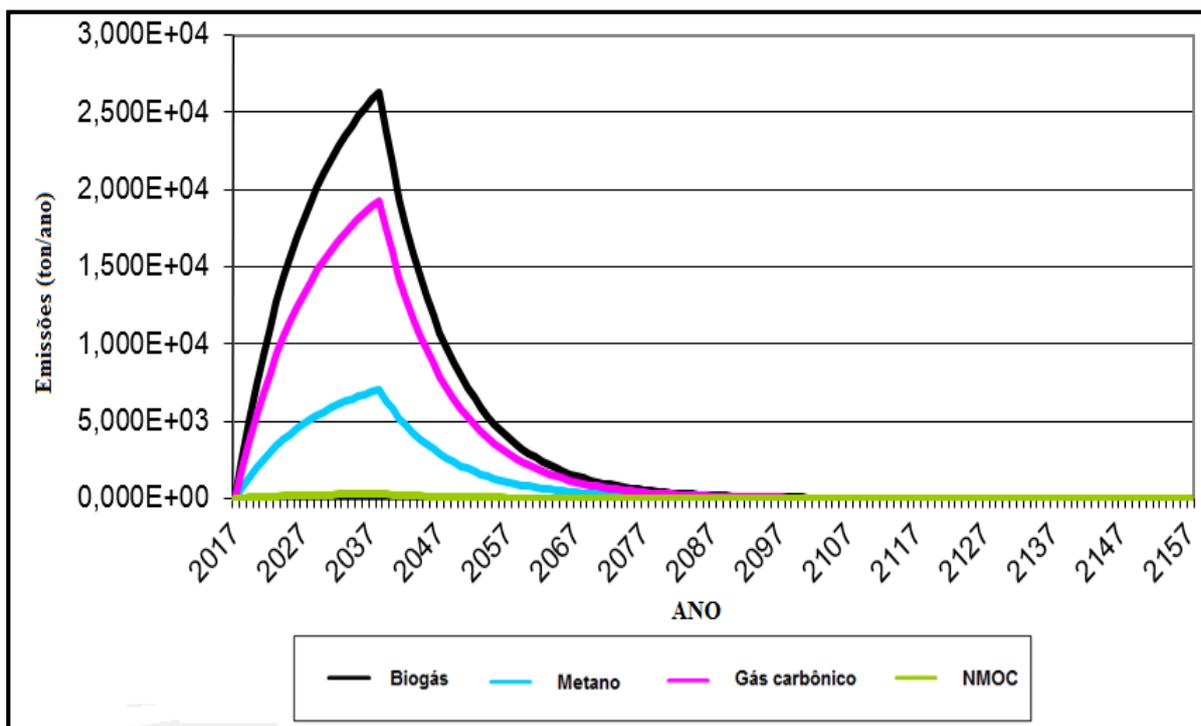
Os resultados da estimativa da geração de metano obtidos a partir do LandGEM podem ser vistos na Tabela 19. O programa também gera os resultados da emissão dos gases produzidos no aterro, em toneladas por ano, em forma de gráfico e da emissão de metano em m<sup>3</sup>/ano, que está apresentado nas Figuras 26 e 27.

Tabela 19: Estimativa da geração de RSU.

<i>ANO</i>	<i>m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano</i>	<i>m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/hora</i>
2017	0	0
2018	1057619,76	120,73
2019	2021373,89	230,75
2020	2900141,75	331,07
2021	3701956,97	422,60
2022	4434088,05	506,17
2023	5103110,96	582,55
2024	5714975,25	652,39
2025	6275063,71	716,33
2026	6788246,20	774,91
2027	7258928,56	828,64
2028	7691096,93	877,98
2029	8088357,50	923,33
2030	8453972,93	965,07
2031	8790894,87	1003,53
2032	9101793,68	1039,02
2033	9389085,28	1071,81
2034	9654955,32	1102,16
2035	9901381,14	1130,29
2036	10130151,67	1156,41
2037	10342885,33	1180,69
<b>2038</b>	<b>10541046,34</b>	<b>1203,32</b>
2039	9537933,15	1088,81
2040	8630278,81	985,19
2041	7808999,19	891,44
2042	7065874,67	806,61
2043	6393467,79	729,85
2044	5785048,89	660,39
2045	5234528,70	597,55
2046	4736397,43	540,68
2047	4285669,62	489,23
2048	3877834,24	442,68
2049	3508809,52	400,55
2050	3174902,15	362,43
2051	2872770,26	327,94
2052	2599390,02	296,73
2053	2352025,36	268,50
2054	2128200,55	242,95
2055	1925675,49	219,83
2056	1742423,24	198,91
2057	1576609,75	179,98
2058	1426575,49	162,85
2059	1290818,88	147,35

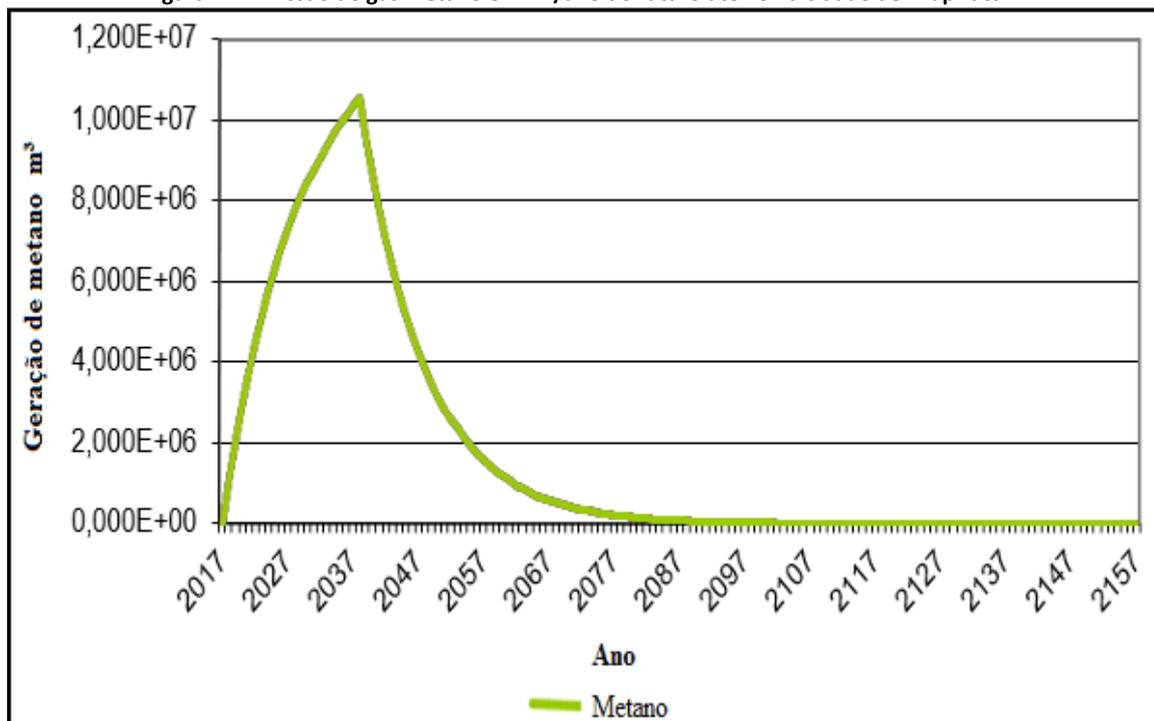
Fonte: O autor (2016).

Figura 26: Produção de gases no futuro aterro sanitário na cidade de Arapiraca.



Fonte: Adaptado do programa LandGEM versão 3.02

Figura 27: Emissão de gás metano em m³/ano do futuro aterro na cidade de Arapiraca.



Fonte: Adaptado do programa LandGEM versão 3.02.

Analisando a tabela 19 e as figuras 26 e 27 observa-se que a geração máxima de metano ocorre no ano de 2038, um ano após o encerramento da vida útil do aterro, com

total de 10.541.046,34 m<sup>3</sup>. A curva nos gráficos tem um comportamento crescente durante o período que o futuro aterro vai receber resíduos e a partir do encerramento do aterro a curva é regida pela constante de decaimento (k), referente à degradação da matéria orgânica ao longo do tempo.

Este modelo é fiel ao comportamento dos aterros, pois considera que a geração de metano cresce com o tempo de maturação e à medida que há acúmulo de resíduos sólidos soma-se um novo potencial de geração de biogás e também estima a geração de metano nos anos posteriores ao fechamento do aterro.

### **5.7 Cálculo da potência e energia disponíveis**

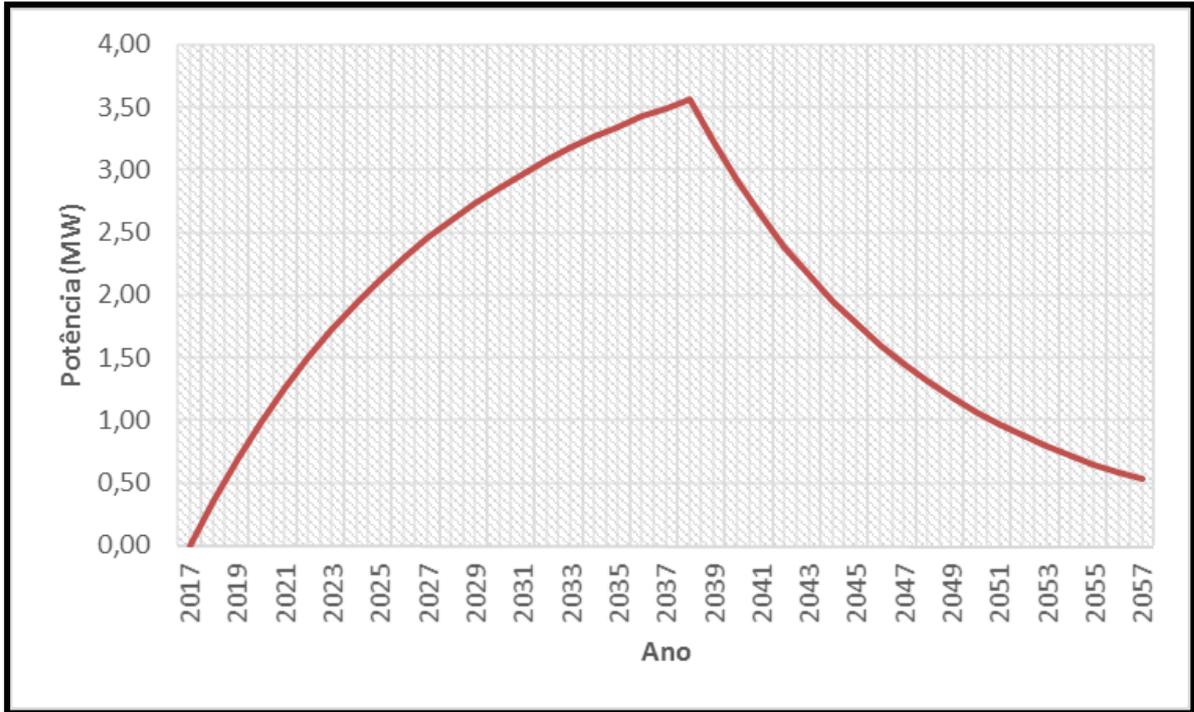
Em função da estimativa de geração de metano, ao longo dos anos, foi realizado o cálculo da potência (MW) e da geração de energia elétrica (MWh/dia e MWh/mês) disponível no futuro aterro sanitário, conforme a Tabela 20, Figuras 28 e 29.

**Tabela 20: Potência e energia disponível em função de metano do futuro aterro na cidade de Arapiraca.**

<i>Ano</i>	<i>m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> /ano</i>	<i>Potência disponível (MW)</i>	<i>Energia disponível (MWh/mês)</i>	<i>Energia disponível (MWh/ano)</i>
2017	0,00	0,00	0,00	0,00
2018	1.057.619,76	0,36	205,90	2470,83
2019	2.021.373,89	0,68	393,53	4722,37
2020	2.900.141,75	0,98	564,61	6775,37
2021	3.701.956,97	1,25	720,72	8648,58
2022	4.434.088,05	1,50	863,25	10359,00
2023	5.103.110,96	1,72	993,50	11921,99
2024	5.714.975,25	1,93	1112,62	13351,43
2025	6.275.063,71	2,12	1221,66	14659,92
2026	6.788.246,20	2,29	1321,57	15858,83
2027	7.258.928,56	2,45	1413,20	16958,45
2028	7.691.096,93	2,60	1497,34	17968,09
2029	8.088.357,50	2,73	1574,68	18896,18
2030	8.453.972,93	2,86	1645,86	19750,33
2031	8.790.894,87	2,97	1711,45	20537,46
2032	9.101.793,68	3,08	1771,98	21263,78
2033	9.389.085,28	3,17	1827,91	21934,96
2034	9.654.955,32	3,26	1879,67	22556,09
2035	9.901.381,14	3,35	1927,65	23131,80
2036	10.130.151,67	3,42	1972,19	23666,25
2037	10.342.885,33	3,50	2013,60	24163,25
2038	10.541.046,34	3,56	2052,18	24626,19
2039	9.537.933,15	3,22	1856,89	22282,70
2040	8.630.278,81	2,92	1680,19	20162,22
2041	7.808.999,19	2,64	1520,29	18243,53
2042	7.065.874,67	2,39	1375,62	16507,43
2043	6.393.467,79	2,16	1244,71	14936,54
2044	5.785.048,89	1,96	1126,26	13515,14
2045	5.234.528,70	1,77	1019,08	12229,01
2046	4.736.397,43	1,60	922,11	11065,26
2047	4.285.669,62	1,45	834,36	10012,26
2048	3.877.834,24	1,31	754,96	9059,47
2049	3.508.809,52	1,19	683,11	8197,35
2050	3.174.902,15	1,07	618,11	7417,27
2051	2.872.770,26	0,97	559,29	6711,42
2052	2.599.390,02	0,88	506,06	6072,74
2053	2.352.025,36	0,79	457,90	5494,85
2054	2.128.200,55	0,72	414,33	4971,94
2055	1.925.675,49	0,65	374,90	4498,80
2056	1.742.423,24	0,59	339,22	4070,68
2057	1.576.609,75	0,53	306,94	3683,31

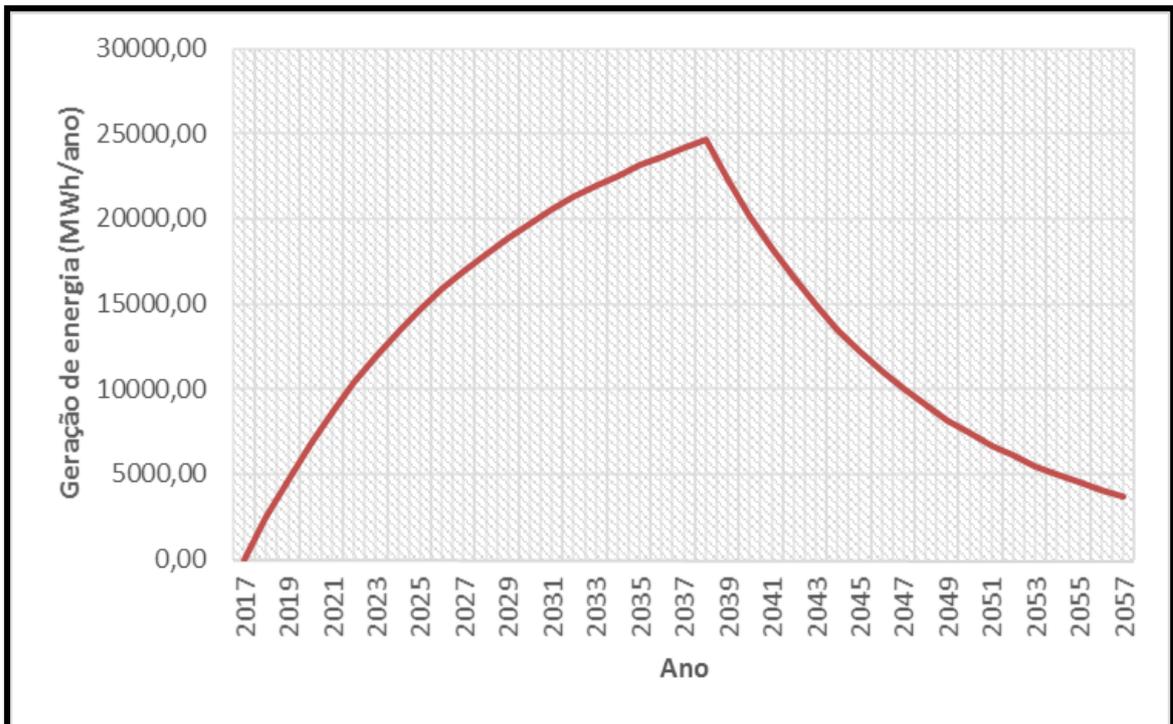
Fonte: O autor (2016).

Figura 28: Potência gerada ao longo do tempo.



Fonte: O autor (2016).

Figura 29: Energia disponível por ano.



Fonte: O autor (2016).

Observa-se que a potência elétrica e a energia gerada são diretamente proporcionais à vazão de biogás no aterro e decaem a partir do momento em que o aterro é encerrado, regido pela constante de decaimento (k), referente a degradação da matéria orgânica no tempo.

A potência máxima (3,56 MW ou 3.562,82 kW) e a geração máxima de energia (24.626,19 MWh ou 24.626.195 kWh) ocorre no ano de 2038, um ano após o encerramento do aterro. Mesmo após a vida útil do aterro sanitário ainda há a geração de metano devido à matéria orgânica presente nos resíduos sólidos e, conseqüentemente, há a geração de energia elétrica, podendo ainda ser aproveitada. No período em estudo, 2017 a 2057, a geração de energia elétrica total foi de 543.353,10 MWh ou 543.353.100,00 kWh.

## **5.8 Análise econômica**

Como a potência máxima será de 3.562,82 kW, no ano de 2038, será proposto 14 unidades de geração de energia elétrica de 250 kW, que produzirão energia através da combustão do biogás.

Segundo Tolmasquim (2003) apud Gonçalves (2008), o custo para implantação de cada unidade é de 1000,00 US\$/kW. Para o cálculo dos custos foi considerado, segundo Banco Central do Brasil (2016), 1 US\$ = 4,0855 R\$.

Foram considerados 15% do valor do conjunto de motores para os custos de instalação, operação e manutenção, para os sistemas de conexão elétrica foi admitido como sendo 20% do conjunto e 15% para os custos com engenharia e outros. A receita foi considerada como a quantidade de energia produzida por ano, e a tarifa média de venda de energia elétrica do estado de Alagoas, segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (2014), é de 193,92 R\$/MWh. A taxa de juros foi de 10% considerado que o motor irá operar 8760 horas por ano. Foi considerado que as unidades de geração de energia elétrica serão instaladas no primeiro ano de operação do aterro, 2017, e funcionarão a partir do segundo ano de funcionamento do aterro, 2018. Para estimativa da receita foi admitido o período de 20 anos de vida útil do aterro acrescido de mais 20 anos após o encerramento, uma vez que mesmo após a vida útil o aterro ainda gera potência e energia.

A Tabela 21 apresenta a estimativa de custo do investimento inicial e o valor de VPL, TIR e Tempo de Retorno.

**Tabela 21: Análise viabilidade econômica.**

<b>Dados do Gerais</b>		
Potência elétrica	3562,82	kW
Capacidade do motor	250,00	kW
Número de motores	14	
Preço específico tecnologia geração	1000,00	US\$/kW
Taxa de cambio	4,0855	R\$/US\$
Preço do motor	250000,00	US\$
Preço do Conjunto	3500000,00	US\$
Preço do Conjunto	14299250,00	R\$
Custo Operação e Manutenção do motor	2144887,50	R\$
Sistema de interconexão elétrica	2859850,00	R\$
Custo inst.&eng.& outros	428977,50	R\$
Eficiência elétrica	0,30	
Vida útil	18	Anos
Taxa de juros	10%	
Horas de operação por ano	8760	h/ano
Custo total investimento	19732965,00	R\$
Tarifa média de vendade energia elétrica	193,92	R\$/MWh
Receita anual	6052301,997	R\$/ano
Tempo de retorno	5,07	Anos
Valor presente líquido	4276405,58	R\$
Taxa interna de retorno	14,84%	

Ano	Fluxo de caixa	VPL
0	-19732965	
1	3907414,497	-R\$ 14.709.790,91
2	3907414,497	-R\$ 11.774.092,57
3	3907414,497	-R\$ 9.105.275,89
4	3907414,497	-R\$ 6.679.078,91
5	3907414,497	-R\$ 4.473.445,29
6	3907414,497	-R\$ 2.468.323,82
7	3907414,497	-R\$ 645.486,12
8	3907414,497	R\$ 1.011.639,06
9	3907414,497	R\$ 2.518.116,50
10	3907414,497	R\$ 3.887.641,44

Fonte: O autor (2016).

Como observado, o valor do investimento inicial, para implantação das unidades geradoras de energia elétrica é alto, R\$ 19.732.965,00. O investimento tem retorno positivo a partir do 5º ano de funcionamento do aterro sanitário. O valor do VPL calculado, a uma taxa de 10% aa, foi VPL = R\$ 4.276.405,58o que torna o investimento no projeto viável, pois VPL é maior que zero.

Uma forma de melhorar a projeção econômica do projeto seria através da contabilização do crédito de carbono, pois ele geraria um aumento na receita anual. A Tabela 22 apresenta a viabilidade econômica com o acréscimo do crédito de carbono.

**Tabela 22: Viabilidade econômica com crédito de carbono.**

<b>Investimento (R\$)</b>	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TR (anos)</b>
19.732.965,00	6.835.326,15	4

Com o crédito de carbono a projeção econômica torna-se mais atrativa para o financiamento, pois apresenta um valor presente líquido maior do que o primeiro cenário , sem credito de carbono, e quanto maior o VPL mais viável é o projeto. Outro ponto observado é que o tempo de retorno do investimento diminui para 4 anos.

Segundo dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2013), cada habitante da região nordeste consome em média 1397 kWh/ano de energia elétrica. Com base neste dado foi estimada a quantidade de habitantes que poderiam ser atendidos por energia elétrica proveniente do metano gerado a partir dos resíduos sólidos do aterro sanitário. A Tabela 22 apresenta com detalhes a quantidade de habitantes que seriam abastecidos em cada ano, considerando a vida útil e um prolongamento de mais 20 anos.

**Tabela 23: População atendida por energia elétrica gerado pelos RSU do futuro aterro.**

<i>Ano</i>	<i>Potência disponível (kW)</i>	<i>Energia disponível (kWh/ano)</i>	<i>População atendida</i>
2017	0,00	0,00	0
2018	357,47	2470831,57	1769
2019	683,21	4722372,44	3380
2020	980,23	6775366,77	4850
2021	1251,24	8648582,87	6191
2022	1498,70	10359001,53	7415
2023	1724,82	11921985,68	8534
2024	1931,63	13351434,78	9557
2025	2120,94	14659924,19	10494
2026	2294,39	15858830,97	11352
2027	2453,48	16958448,11	12139
2028	2599,55	17968088,14	12862
2029	2733,82	18896175,91	13526
2030	2857,40	19750333,70	14138
2031	2971,28	20537457,20	14701
2032	3076,36	21263784,94	15221
2033	3173,46	21934961,10	15701
2034	3263,32	22556091,79	16146
2035	3346,61	23131796,50	16558
2036	3423,94	23666254,61	16941
2037	3495,84	24163247,07	17297
2038	3562,82	24626194,62	17628
2039	3223,77	22282702,35	15950
2040	2916,99	20162222,87	14433
2041	2639,40	18243533,68	13059
2042	2388,23	16507431,91	11816
2043	2160,96	14936542,07	10692
2044	1955,32	13515142,16	9674
2045	1769,24	12229006,34	8754
2046	1600,88	11065262,52	7921
2047	1448,53	10012263,57	7167
2048	1310,69	9059470,71	6485
2049	1185,96	8197348,09	5868
2050	1073,10	7417267,28	5309
2051	970,98	6711420,97	4804
2052	878,58	6072744,83	4347
2053	794,97	5494846,75	3933
2054	719,32	4971942,94	3559
2055	650,87	4498800,02	3220
2056	588,93	4070682,59	2914
2057	532,89	3683305,93	2637

Fonte: Do autor (2016).

Pode-se observar que durante o primeiro ano de utilização do metano, para gerar energia, cerca de 1769 pessoas já poderiam ser atendidas, chegando ao pico no ano de 2038 onde aproximadamente 18 mil habitantes seriam abastecidas com energia elétrica, o que mostra que muitos bairros da cidade de Arapiraca, ou até mesmo algumas pequenas cidades do Agreste Alagoano poderiam ser abastecidas com energia elétrica proveniente do metano do futuro aterro sanitário. Durante a vida útil do aterro sanitário 228.772 habitantes seriam abastecidos pela energia gerada pelos RSU e, considerando o prolongamento de mais 20 anos, após o encerramento do aterro, 388.943 habitantes seriam abastecidos pela energia gerada.

## 6 CONCLUSÃO

Tendo em vista que o presente trabalho teve como princípio avaliar o potencial energético e respectiva viabilidade econômica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados na região Agreste de Alagoas, e com os dados obtidos a partir da composição gravimétrica dos RSU da área de estudo, pode-se concluir a região do Agreste Alagoano possui um grande potencial de geração de metano, chegando a gerar cerca de 232.577.964,9 milhões de m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> durante 40 anos de aproveitamento, 20 anos de vida útil do aterro com mais 20 anos após o seu encerramento.

Sabe-se que o planeta vem enfrentando graves problemas, desde a escassez de água, até o aumento populacional, aumento da geração de resíduos sólidos e aquecimento global. Com isso há a necessidade de implantação de programas de gestão focando o desenvolvimento sustentável. Para que a região do Agreste de Alagoas se desenvolva em compatibilidade com o meio ambiente, a sociedade e a economia são essenciais o gerenciamento adequado de seus resíduos, bem como a valorização de fontes alternativas de energia elétrica, tendo em vista que a matriz energética do país ainda é a água. Sendo assim, o aproveitamento do biogás convertendo-o em eletricidade minimiza os impactos ambientais causados à qualidade do ar da região e à camada de ozônio, minimizando os efeitos do aquecimento global.

Com as análises realizadas constatou-se que com a utilização do metano na geração de energia elétrica se mostrou bastante promissora, visto que o potencial energético dos RSU da região chegou a aproximadamente 46.237,70kW ao longo da vida útil do aterro, podendo chegar a 78.610,11kW quando considerado um prolongamento de 20 anos.

Quanto a caracterização os resultados gravimétricos mostraram que por questões culturais e econômicas o aterro sanitário sediado em Arapiraca receberá uma quantidade relativamente grande de matéria orgânica, comparada com a média brasileira. Este fator pode se dar devido ao poder aquisitivo da sociedade envolvida no estudo, tendo em vista que a região Agreste se caracteriza pelo baixo poder aquisitivo da população e, de acordo com a literatura, quanto mais desfavorecida economicamente for uma determinada sociedade, a porcentagem de material orgânico aumenta e a de materiais recicláveis diminui. Fato que foi confirmado nos dados de caracterização dos RSU da região de estudo.

Faz parte deste estudo a proposta de instalação de unidades de geração de energia elétrica no aterro sanitário, para atender as necessidades energéticas do local, e caso haja excedentes dessa energia, esta poderá ser vendida para a concessionária local.

Na análise dos custos e da receita considerou-se que toda a energia seria vendida para uma concessionária. A partir dessas análises foi possível concluir que a implantação das unidades de geração de energia elétrica, no aterro sanitário sediado em Arapiraca, é viável, pois apresentou VPL positivo e com 5 anos se tem o retorno do capital investido nesta tecnologia, se considerado sem o crédito de carbono e 4 anos de tempo de retorno se considerado a comercialização do crédito de carbono.

Com as análises realizadas acerca do tema estudado e dos resultados obtidos, conclui-se que a geração de energia elétrica no aterro sanitário do Agreste Alagoano, através do biogás, uma fonte renovável e limpa, pode torná-lo auto-sustentável, considerando o aproveitamento da energia gerada através da parcela orgânica dos resíduos sólidos gerados na região para suprir as necessidades energéticas do referido aterro sanitário; além de gerar receita para a região, no caso de venda do excedente de energia; e minimização dos impactos ambientais e sociais que a emissão descontrolada dos gases gerados na decomposição da matéria orgânica pode causar.

## REFERENCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013**. Ed. Especial de 10 anos. 2014.

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 Congreso Ibero americano de Ingeniería Mecânica (CIBIM), 2009.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro: BNDS, 2004.

ARAPIRACA (AL). **Prefeitura. 2014**. Disponível em:  
<<http://www.arapiraca.al.gov.br>>. Acesso em: 23 de dezembro de 2015.

BCB – **Banco Central do Brasil**. Disponível em:<[www.bcb.gov.br](http://www.bcb.gov.br)>. Acessado em: 20 de janeiro de 2016.

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

BRASIL, Atlas. **Atlas do desenvolvimento humano no Brasil 2013**. Acesso em: Janeiro de 2016.

BRASIL. Congresso Nacional – **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos)**. Brasília, DF. 2010. Disponível em:  
<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)> Acesso em: 01/03/2015.

CAMPANI, D. B.; DE CASTRO RAMOS, G. G.; MARTINS, C. G.; & ZANINI, D. **Desenvolvimento de indicadores sócio-ambientais para o programa de coleta seletiva do município de São Leopoldo.** Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, v. 2, p. 1-8, 2009.

CASSINI, S. T. VOZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do Biogás.** Rio de Janeiro: ABES/Rima, 2003.

CONAGRESTE – **Consortio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste Alagoano.** Disponível em: <<http://www.conagreste.al.gov.br>>. Acessado em: 23 de dezembro de 2015.

CUNHA, M. A. C. **Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos de Maceió Visando à Implantação de Coleta Seletiva.** Trabalho de conclusão de curso. Graduação em Biologia. Universidade Federal de Alagoas. 2005.

DA FONSECA, Y. D. **Técnicas de avaliação de investimentos: uma breve revisão da literatura.** 2010.

DE ABREU, F. C.; PECORA, V.; VELÁZQUEZ, S.; & TEIXEIRA, S. **Biogás de aterro para geração de eletricidade e iluminação.** 2008.

DESIDERI, U.; DI MARIA, F.; LEONARDI, D.; & PROIETTI, S. **Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study.** Energy conversion and Management, v. 44, n. 12, p. 1969-1981, 2003.

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.

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

ENSIMAS, A. V. **Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas – SP.** UNICAMP: São Paulo, 2003.

EPA -U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2005). *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*. Disponível em:<http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#software>.

FERNANDES, J. G. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental**. Escola de engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, UFGM, Belo Horizonte, 2009.

FIGUEIREDO, J. C. **Estimativa de Produção de Biogás e Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos em Minas Gerais**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, UFGM. Belo Horizonte, 2012.

FRARE, L. M; GIMENES, M. L; PEREIRA, N. C. **Processo para Remoção de Ácido Sulfídrico de Biogás**. EngSanitAmbient. Vol. 14 Nº 2. abr/jun. 2009, 167-172.

GONÇALVES, A. T. T. **Potencialidade energética dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais do município de Itajubá – MG**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, 2007.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. **What a waste: a global review of solid waste management**. 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio do Janeiro, 2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). **Censo 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acessado em 23 de dezembro de 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015). **Pesquisa de Informações Básicas Municipais**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acessado em: 23 de dezembro de 2015.

ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual do Aproveitamento do Biogás: Volume um, Aterros Sanitários**. Secretariado para a América Latina e Caribe, Escritório de Projetos no Brasil: São Paulo, 2009.

IPCC, Inter governmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 5: Waste. Capítulo 3: Solid Waste Disposal.

Disponível em:

[http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5\\_Volume5/V5\\_3\\_Ch3\\_SWDS.pdf](http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf).

Acessado em 02 de janeiro de 2016.

JUCÁ, J. F. T. (2002b). **Relatório Final: Diagnóstico de resíduos sólidos do estado de Alagoas**. PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO / MMA.

KUMAR, S.; GAIKWAD, S. A.; SHEKDAR, A. V.; KSHIRSAGAR, P. S. **Estimation method for national methane emission from solid waste landfills**. Atmospheric Environment, v. 38, n. 21, p. 3481-3487, 2004.

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.

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

MARTINS, K. A. **Potencial Energético e Avaliação Econômica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município De Maceió – Al**. Trabalho de conclusão de curso. Centro de Tecnologia – CTEC; Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Maceió, 2014.

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

MENDES, L. G. G.; SOBRINHO, P. M. **Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário**. Revista Biociências, v. 13, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**.  
BRASILIA, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – **Anuário Estatística de Energia Elétrica 2013**. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/>>. Acessado em: 30 de janeiro de 2016.

MONTEIRO, J. H. P.; & ZVEIBIL, V. Z. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

OLIVEIRA, L. B. **Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil**. Tese doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

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

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

PEREIRA, A. S.; COSTA, L. G.; COSTA, L. R. **Análise de Investimentos**. Curitiba: IESDE, 2012.

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

Resíduos Sólidos Alagoas. Disponível em: <http://www.residuossolidos.al.gov.br>.  
Acessado em 23 de dezembro de 2015.

- 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.
- RUSSO, M. A.T. **Avaliação dos Processos de Transformação de Resíduos Sólidos Urbanos em Aterros Sanitários**. Universidade do Minho: Portugal, 2005.
- 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.
- SCHARFF, H.; JACOBS, J. **Applying guidance for methane emission estimation for landfills**. Waste Management, v. 26, n. 4, p. 417-429, 2006.
- SEMARH –SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE ALAGOAS. **Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Agreste: Produto3 – Etapa 2.1- Relatório do diagnóstico da gestão intermunicipal de resíduos sólidos**. Relatório Técnico. Maceió, 2016.
- 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 Nº 1. jan/mar. 2008, 88-96.
- SOUZA, R. M.; VALDÉS, J. S. C. **Análise do Potencial Energético do Biogás Proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO para Geração de Energia Elétrica**. Revista AJES. v. 6, 2012.
- TAVARES, J. C. L.. **Caracterização dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Maceió-al**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas, UFAL. Maceió, 2008.
- TOLMASQUIM, M. T.. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, Cinergia, 2003.

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de Água.** Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

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

## **ANEXO A – Programação de coleta diurna.**

COMPACTADOR 180

**P – SETOR - 02 SENADOR ARMON DE MELO, PLANALTO, CONJ. CASA FORTE.**

**I – SETOR – 01 PARTE ELDORADO, BAIXA GRANDE, JARDIN ESPERANÇA.**

COMPACTADOR 183

**P – SETOR- 04 BRASILIA.**

**I – SETOR- 03 SENADOR NILO COELHO, CAVACO, PARTE DO ELDORADO.**

COMPACTADOR 919

**P – SETOR – 06 CANAFISTOLA, CONJUNTO FREI DAMIÃO, JARDIN TROPICAL.**

**I – SETOR – 05 BAIXÃO, ZÉLIA BARBOSA ROCHA, CONJ. CIDADE DE DEUS E CONJ. E PORTO SEGURO.**

COMPACTADOR 191

**P – SETOR – 08 BOA VISTA, CONJUNTO ADALBERTO ROCHA, CONJUNTO RECANTO BOA VISTA, NOVA ESPERANÇA**

**I – SETOR – 07 MANUEL TELES, CACIMBAS I E II**

COMPACTADOR 186

**P – SETOR – 10 PRIMAVERA.**

**I – SETOR – 09 CONJ. ARUEIRA, CONJ.NOSSA SENHORA DA APARECIDA, BOM SUCESSO, CONJUNTO MASSARANDUBA, CONJUNTO CEREJEIRA, CONJUNTO COLIBRI, CONJ. VALENTIN.**

COMPACTADOR 923

**P – SETOR – 12 – PRIMAVERA II, SÃO LUIZ II, JOÃO PAULO II, GUARIBAS, VERDES CAMPO.**

**I – SETOR – 11 RIO DOS BICHOS, BOM JARDIN, BARRO VERMELHO, CANGADÚ, PÉ LEVE VELHO, FLEXEIRAS, SÍTIO NOVO, TERRA FRIA, FURNAS, ALAZÃO, BATINGA, SÍTIO TAQUARA, POÇO SANTANA.**

COMPACTADOR 921

## **SEGUNDA E QUÍNTA**

**P e I – SETOR – 14** MANGABEIRA, NASSARANDUBA, SÍTIO BOM NOME, VILA SÃO JOSÉ, POÇÃO, POÇO DA PEDRA, VILA APARECIDA, GENIPAPO, BAIXA DO CAPIM, SANTA ROSA, CARRASCO, SÍTIO XEXEU, FAZENDA VELHA, LAGOA D AGUA, OITIZEIRO, UFAL.

## **TERÇA E SEXTA**

**I e P – SETOR – 13** BANANEIRA, LARANJAL, BAUSAMO, SÍTIO PIAUI, BAIXA DA HORA, JACARANDA, SÍTIO MARTINS, PAU DARCO, INGAZEIRA, CONJ. BEM VIVER.

## **QUARTA E SÁBADO**

**P e I – SETOR 15** BREU, CANÃA, CAPIM, PAU FERRO, VILA FERNANDES, MUNDO NOVO, FAZENDA VELHA, VILA SÃO FRANCISCO, VILA SÃO VICENTE.

## **PROGRAMAÇÃO DE COLETA NOTURNA.**

COMPACTADOR 180

DIARIO/ SETOR NOTURNO - O CENTRO.

COMPACTADOR 188

**P – SETOR NOTURNO – 16**-SANTA ESMERALDA, NOVO HORIZONTE.

**I – SETOR NOTURNO – 17** SÃO LUIZ I E OURO PRETO.

COMPACTADOR 183

**P – SETOR NOTURNO – 18** CAETETUS, JARDIN MÁRIA E SANTA EDWIRGES.

**I – SETOR NOTURNO – 19** BRASILIANA, CAPIATÃ E SENADOR TEOTONIO VILELA.

COMPACTADOR 186

**P - SETOR NOTURNO – 20** ALTO DO CRUZEIRO.

**I – SETOR NOTURNO – 21** PADRE ANTONIO DE LIMA, OLHO DAGUA CAZUZINHOS, CONJ. BRISA LAGO.

**APÊNDICE A – Planilha utilizada na anotação dos dados em campo.**

<b>BAIRRO:</b> <b>COMPACTADOR:</b> <b>DIA:</b> <b>HORÁRIO CHEGADA DO COMPACTADOR:</b> <b>HORÁRIO DE INICIO DA CARACTERIZAÇÃO:</b> <b>HORÁRIO DE ENCERRAMENTO DA CARACTERIZAÇÃO:</b>		
<b>COMPONENTES DOS RSU</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Peso (Kg)</b>	<b>%</b>
Plástico Rígido		
Plástico Flexível		
Papel/Papelão		
Trapos		
Couros		
Borracha		
Madeira		
Metais		
Vidro		
Matéria Orgânica		
Resíduos Sanitários		
Terra e Similares		
<b>TOTAL</b>		

**APÊNDICE B - Composição gravimétrica mensal das regiões analisadas.**

<b>BRASÍLIA</b>									
<b>Componentes</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGOS</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>	<b>MÉDIA (%)</b>
<i>Plástico Rígido</i>	4,74	3,61	4,60	4,49	6,48	3,62	6,82	7,59	<b>5,24</b>
<i>Plástico Flexível</i>	13,95	18,37	16,31	16,74	15,36	15,89	12,06	17,30	<b>15,75</b>
<i>Papel</i>	9,82	9,04	9,33	9,85	8,89	8,12	8,82	10,23	<b>9,26</b>
<i>Trapos</i>	1,33	3,41	4,49	3,03	2,45	1,20	1,73	0,90	<b>2,32</b>
<i>Couros</i>	0,14	1,34	0,18	0,45	0,00	0,56	0,00	0,00	<b>0,33</b>
<i>Borracha</i>	0,60	0,38	0,37	0,42	0,20	0,00	0,44	0,60	<b>0,38</b>
<i>Madeira</i>	0,18	0,05	0,47	0,27	0,70	0,33	0,38	0,00	<b>0,30</b>
<i>Metais</i>	1,17	1,89	0,92	1,42	1,90	1,63	1,60	2,30	<b>1,60</b>
<i>Vidro</i>	1,22	1,10	4,66	2,38	3,34	2,69	1,44	4,30	<b>2,64</b>
<i>Matéria Orgânica</i>	51,39	53,47	51,14	51,02	49,20	53,30	50,90	49,90	<b>51,29</b>
<i>Resíduos Sanitários</i>	9,39	6,50	7,31	8,10	5,98	9,10	9,58	6,10	<b>7,76</b>
<i>Terra e Similares</i>	6,07	0,85	0,22	1,83	5,50	3,56	6,22	0,78	<b>3,13</b>
<b>CENTRO</b>									
<b>Componentes</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGOS</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>	<b>MÉDIA (%)</b>
<i>Plástico Rígido</i>	11,44	10,69	12,52	9,52	11,87	9,29	7,19	10,56	<b>10,38</b>
<i>Plástico Flexível</i>	15,55	14,49	14,82	16,61	15,63	17,01	14,35	18,20	<b>15,83</b>
<i>Papel</i>	17,41	23,66	19,04	19,58	17,20	21,02	18,63	22,00	<b>19,82</b>
<i>Trapos</i>	1,45	2,21	0,77	0,34	0,96	1,21	0,94	1,56	<b>1,18</b>
<i>Couros</i>	1,92	0,00	0,82	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	<b>0,44</b>
<i>Borracha</i>	0,39	0,02	0,18	0,08	0,01	0,32	0,47	0,00	<b>0,18</b>
<i>Madeira</i>	0,16	0,13	0,08	0,00	0,00	0,02	1,99	0,36	<b>0,34</b>
<i>Metais</i>	1,36	0,87	1,68	2,11	1,65	3,25	4,58	3,12	<b>2,33</b>
<i>Vidro</i>	0,42	2,17	1,08	1,02	0,93	1,50	0,86	1,20	<b>1,15</b>
<i>Matéria Orgânica</i>	39,21	40,62	42,03	42,43	41,89	37,05	38,12	36,35	<b>39,71</b>
<i>Resíduos Sanitários</i>	9,35	5,14	6,26	8,10	8,89	7,35	9,38	5,44	<b>7,49</b>
<i>Terra e Similares</i>	1,36	0	0,73	0,21	0,97	1,23	3,50	1,21	<b>1,15</b>

**Tabela 01 – Composição gravimétrica mensal dos RSU das regiões analisadas na pesquisa.**

Continuação da tabela 01.

<b>ALTO DO CRUZEIRO</b>									
<b>Componentes</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGOS</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>	<b>MÉDIA (%)</b>
<i>Plástico Rígido</i>	6,39	6,40	5,38	6,23	8,39	7,85	4,80	5,23	<b>6,33</b>
<i>Plástico Flexível</i>	17,05	20,25	17,88	18,54	16,32	19,85	15,81	20,50	<b>18,28</b>
<i>Papel</i>	8,92	7,71	6,25	7,67	10,36	9,98	16,18	14,31	<b>10,17</b>
<i>Trapos</i>	2,07	3,39	1,15	1,80	2,65	1,35	0,91	0,66	<b>1,75</b>
<i>Couros</i>	0,24	0,89	0,41	0,38	0,00	0,21	0,00	0,12	<b>0,28</b>
<i>Borracha</i>	1,34	0,10	0,00	0,45	0,00	0,00	0,56	0,98	<b>0,43</b>
<i>Madeira</i>	0,00	0,22	0,10	0,08	0,00	0,30	0,40	0,00	<b>0,14</b>
<i>Metais</i>	1,89	2,40	2,95	2,48	1,36	4,51	2,12	1,32	<b>2,38</b>
<i>Vidro</i>	1,25	1,08	1,41	1,37	2,87	3,75	6,42	2,36	<b>2,56</b>
<i>Matéria Orgânica</i>	51,60	41,58	51,13	48,15	46,21	39,68	45,22	43,30	<b>45,86</b>
<i>Resíduos Sanitários</i>	7,29	14,79	11,80	11,35	10,98	9,86	6,57	9,01	<b>10,21</b>
<i>Terra e Similares</i>	1,95	1,19	1,53	1,48	0,86	2,66	1,01	2,21	<b>1,61</b>
<b>PRIMAVERA</b>									
<b>Componentes</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGOS</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>	<b>MÉDIA (%)</b>
<i>Plástico Rígido</i>	3,47	4,28	6,10	5,57	5,98	3,85	7,48	6,20	<b>5,36</b>
<i>Plástico Flexível</i>	12,11	17,87	15,30	18,15	17,10	18,13	18,99	19,50	<b>17,15</b>
<i>Papel</i>	7,24	9,44	6,18	8,10	7,70	8,90	4,81	5,90	<b>7,28</b>
<i>Trapos</i>	5,20	3,58	1,52	0,73	2,30	1,51	0,52	0,40	<b>1,97</b>
<i>Couros</i>	0,17	0,00	0,00	0,04	0,00	0,25	0,00	0,12	<b>0,07</b>
<i>Borracha</i>	0,31	0,15	0,09	0,91	0,00	0,63	0,85	0,00	<b>0,37</b>
<i>Madeira</i>	0,09	0,12	0,12	0,10	0,72	0,14	0,19	0,50	<b>0,25</b>
<i>Metais</i>	0,58	0,52	0,63	0,64	1,80	0,84	1,69	2,36	<b>1,13</b>
<i>Vidro</i>	2,15	1,16	1,57	1,60	2,03	0,90	2,02	2,75	<b>1,77</b>
<i>Matéria Orgânica</i>	58,71	52,54	56,07	52,64	51,37	49,80	50,82	48,12	<b>52,51</b>
<i>Resíduos Sanitários</i>	7,22	9,37	10,83	9,49	9,61	11,18	8,46	10,97	<b>9,64</b>
<i>Terra e Similares</i>	2,75	0,97	1,59	2,06	1,39	3,87	4,17	3,18	<b>2,50</b>

Tabela 01–Composição gravimétrica mensal dos RSU das regiões analisadas na pesquisa.

Continuação da tabela 01.

<b>Componentes</b>	<b>ZONA RURAL</b>								
	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGOS</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>	<b>MÉDIA (%)</b>
<i>Plástico Rígido</i>	2,99	4,41	3,85	3,32	3,97	5,12	4,42	5,36	<b>4,18</b>
<i>Plástico Flexível</i>	15,28	13,64	16,08	11,50	11,52	14,21	13,67	11,23	<b>13,39</b>
<i>Papel</i>	6,87	5,51	5,88	4,63	4,45	6,35	5,52	7,35	<b>5,82</b>
<i>Tapos</i>	3,85	5,45	1,14	3,98	4,95	1,75	2,99	2,32	<b>3,30</b>
<i>Couros</i>	0,19	0,12	0,11	0,67	0,00	0,21	0,58	0,32	<b>0,28</b>
<i>Borracha</i>	0,62	1,34	1,41	1,28	2,35	0,26	1,34	0,00	<b>1,07</b>
<i>Madeira</i>	0,10	0,90	0,71	1,42	2,21	1,45	0,90	0,78	<b>1,06</b>
<i>Metais</i>	1,12	0,72	0,71	1,58	1,45	1,25	0,89	2,58	<b>1,29</b>
<i>Vidro</i>	0,57	1,21	0,77	1,99	0,98	1,75	1,22	2,32	<b>1,35</b>
<i>Matéria Orgânica</i>	56,18	41,11	49,29	55,00	50,70	47,19	54,01	48,70	<b>50,27</b>
<i>Resíduos Sanitários</i>	7,34	15,62	14,35	9,42	13,21	13,89	10,61	14,35	<b>12,35</b>
<i>Terra e Similares</i>	4,89	9,97	5,69	5,21	4,21	6,57	3,87	4,69	<b>5,64</b>

Tabela 01 – Composição gravimétrica mensal dos RSU das regiões analisadas na pesquisa.

Fonte: Elaboração própria (2016).

## APÊNDICE C - Estimativa populacional pelos três métodos estudados.

Tabela 02 – Previsão da população das cidades da CONAGRESTE pelos métodos analisados.

<b>ANO</b>	<b>Método aritmético</b>	<b>Método geométrico</b>	<b>Método curva logística</b>
<b>2017</b>	625330	627296	619775
<b>2018</b>	629618	632003	623748
<b>2019</b>	633907	636746	627690
<b>2020</b>	638195	641524	631601
<b>2021</b>	642483	646338	635480
<b>2022</b>	646772	651188	639326
<b>2023</b>	651060	656075	643139
<b>2024</b>	655349	660999	646919
<b>2025</b>	659637	665959	650666
<b>2026</b>	663925	670956	654379
<b>2027</b>	668214	675991	658057
<b>2028</b>	672502	681064	661701
<b>2029</b>	676791	686175	665311
<b>2030</b>	681079	691324	668885
<b>2031</b>	685367	696512	672424
<b>2032</b>	689656	701739	675928
<b>2033</b>	693944	707005	679396
<b>2034</b>	698233	712311	682828
<b>2035</b>	702521	717656	686224
<b>2036</b>	706809	723042	689584
<b>2037</b>	711098	728468	692907

Fonte: Elaboração própria (2016).