



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA DA BIOMASSA



MARIANA BEZERRA GAYOSO MENDES

BENEFÍCIOS DA IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR NA CENTRAL DE  
TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACEIÓ-AL

RIO LARGO - AL

2023

MARIANA BEZERRA GAYOSO MENDES

**BENEFÍCIOS DA IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR NA CENTRAL DE  
TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACEIÓ-AL**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Energia da Biomassa da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia da Biomassa.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Andréa de Vasconcelos Freitas Pinto

Coorientador: Prof. Dr. Elton Lima Santos

RIO LARGO – AL

2023

**Catálogo na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias**  
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

M538b Mendes, Mariana Bezerra Gayoso.

Benefícios da Implantação de um biodigestor na central de tratamento de resíduos de Maceió-AL. / Mariana Bezerra Gayoso Mendes. – 2023.

58f.: il.

Orientadora: Andréa de Vasconcelos Freitas Pinto.

Coorientador: Elton Lima Santos

Dissertação (Mestrado Profissional em energia da Biomassa) – Programa de Pós - Graduação em energia da Biomassa, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2023.

Inclui bibliografia

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Biogás. 3. Danos ao meio ambiente.  
I. Título.

CDU: 662.99

## Folha de aprovação

**MARIANA BEZERRA GAYOSO MENDES**

### **BENEFÍCIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR NA CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACEIÓ-AL**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Energia da Biomassa da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 31 de março de 2023.

**Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ANDREA DE VASCONCELOS FREITAS PINTO  
Data: 04/04/2023 20:20:33-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

**Prof.ª Dr.ª Andréa de Vasconcelos Freitas Pinto**  
Presidente

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ELTON LIMA SANTOS  
Data: 04/04/2023 19:57:29-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

**Prof. Dr. Elton Lima Santos**  
Membro Interno

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARIA JOSÉ DE HOLANDA LEITE  
Data: 04/04/2023 20:58:20-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

**Prof.ª Dr.ª Maria José de Holanda Leite**  
Membro Externo

Dedico

A minha mãe, Maria José Bezerra  
(*in memoriam*) que me mostrou a  
importância de tratar todos os seres  
como iguais, a ter compaixão para  
com os mesmos e ajudar a manter  
vivos e saudáveis todos os reinos da  
natureza.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora, Andréa de Vasconcelos, por me incentivar, apoiar, corrigir, ter paciência e compreensão durante toda essa jornada.

A meu pai, João Carlos Gayoso Mendes (*in memoriam*), que com sua força e lucidez foi um exemplo, incentivando-me a ir atrás dos meus objetivos, sempre com muito amor e paciência.

A Marília Chamusca que com seu amor e companheirismo sempre me apoiou em todas as minhas escolhas e me deu forças para passar pelas adversidades que a vida me impõe.

A Heverton Walmar que me mostrou, através de seu exemplo, o poder de transformação que o esforço e dedicação podem fazer em nossas vidas.

A Rosa Tenório, ex-secretária municipal de Desenvolvimento Territorial e do Meio Ambiente, a qual articulou o meu acesso ao aterro sanitário de Maceió, colocando-me em contato a diretora da Sudes.

A Liz Araújo, ex-diretora de Serviços Especiais e Planejamento da Sudes, pois respondeu o questionário, forneceu dados e relatórios os quais ajudaram bastante no desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários da CTR – MA (Central de Tratamento de Resíduos de Maceió) por terem-me recebido muito bem durante as visitas realizadas no local. E a Laura Nunes, assistente técnica do aterro sanitário, por ter-me fornecido dados importantes.

À todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização nesse projeto, meu muito OBRIGADA!

*“Sua tarefa é descobrir o seu  
trabalho e, então, com todo  
coração, dedicar-se a ele.”*

*Buda.*

## RESUMO

As atividades humanas, o crescimento da população e seu poder aquisitivo, tem causado aumento descontrolado da geração de resíduos sólidos urbanos e o consumo de energia oriunda de fontes não renováveis. A redução do consumo de eletricidade proveniente do sistema de abastecimento, em especial o Brasil em que predomina de hidrelétricas, tende a reduzir a necessidade de construção de imensos reservatórios, os quais causam impactos em todo o ecossistema aquático, além de alagar grandes áreas, destruir matas ciliares e deslocar populações. A melhor gestão dos resíduos sólidos urbanos evita que estes tenham destinação inadequada causando danos ao meio ambiente, como: a contaminação do solo e corpos hídricos; a liberação de metano para a atmosfera; insalubridade de áreas próximas onde estão armazenados; atração de vetores e doenças associadas. Diante disso, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica, econômica e os benefícios ambientais da implantação de um sistema de aproveitamento energético do biogás gerado na Central de Tratamento de Resíduos de Maceió (CTR/MA), a partir da utilização dos resíduos Classe IIA recebidos diariamente e aqueles armazenados no local. Para este propósito, foram aplicados questionários, obtidos relatórios e realizadas visitas à CTR/MA. Para estimar a produção de biogás e energia elétrica, adotou-se o modelo empregado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) e para o fator de conversão de biogás em eletricidade utilizou o apresentado pela Fundação Ecológica Nacional (FEN). Estima-se que cerca de 82% dos resíduos que são aterrados nas valas da CTR/MA podem ser aproveitados no processo de biodigestão, aumentando o tempo de vida útil do aterro e reduzindo o custo com a destinação nesses resíduos. O aterro sanitário de Maceió apresentou capacidade de produzir 80.330,8425 m<sup>3</sup> de metano por mês que convertido em energia elétrica resulta em 67.477,91 kwh/mês. Ao todo, o município poderá reduzir seus gastos anuais em R\$ 30.847.301,16, sendo R\$ 607.301,16 através da conversão do biogás gerado em energia elétrica e R\$ 30.240.000,00 deixando de armazenar os resíduos Classe IIA nas valas e os destinando para uma Usina de Tratamento Mecânico Biológico.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos urbanos; biogás; danos ao meio ambiente; geração de eletricidade.

## ABSTRACT

Human activities, population growth and purchasing power have caused an increased uncontrolled generation of urban solid waste and the consumption of energy from non-renewable sources. The reduction in electricity consumption from the supply system, which in Brazil originates predominantly from hydroelectric plants, tends to reduce the need to build huge reservoirs, which impacts the entire aquatic ecosystem, in addition to flooding large areas, destroying riparian forests and displacing populations. Better management of urban solid waste prevents it from being improperly disposed, causing environmental damage, such as; the contamination of soil and bodies of water; the release of methane into the atmosphere; creating unhealthy areas close to where they are stored; attracting plagues and associated diseases. Therefore, this work should aim to evaluate the technical and economic viability, also the environmental benefits of implementing a system for the energetic use of biogas generated at CTR/MA (Waste Treatment Center of Maceió), based on the use of waste Class IIA received daily and those already stored on site. Using the model by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) and the biogas conversion factor into electricity, presented by FEN (National Ecological Foundation) for this purpose, questionnaires were applied, reports were obtained and visits were made to CTR/MA, seeking to estimate the biogas and electricity production. It is estimated that around 82% of the waste currently landfilled in the CTR/MA ditches can be used in the biodigestion process, increasing the useful life of the landfill and reducing the cost of disposing of this waste. The landfill in Maceió has showned the capacity to produce 80,330.8425 m<sup>3</sup> of methane per month, which was convert into electricity, resulting in 67,477.91 kwh per month. In all, the municipality will be able to reduce its annual expenses by R\$ 30,847,301.16, of which R\$ 607,301.16 through the conversion of biogas into electricity and R\$ 30,240,000.00 by not storing Class IIA waste in the ditches and sending them to a Biological Mechanical Treatment Plant.

**Keywords:** Urban solid waste; biogas; environmental damage; electricity generation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de projeto para conversão do biogás em energia elétrica.....	29
Figura 2 – Fluxograma típico de Usina de Tratamento Mecânico-Biológico de RSU.....	30
Figura 3 – Localização do Aterro Sanitário de Maceió-AL.....	32
Figura 4 - Localização geográfica das regiões administrativas de Maceió.....	34
Figura 5 – Chegada dos caminhões a CTR/MA.....	36
Figura 6 – Verificação do conteúdo do caminhão.....	36
Figura 7 – Balança instalada na entrada do aterro.....	37
Figura 8 – Caminhão sendo pesado.....	37
Figura 9 – Resíduos Classe II A sendo descarregados na vala.....	37
Figura 10 – Resíduos de Classe II A já armazenado na vala antes de serem compactação.....	37
Figura 11 – Resíduos de podas.....	38
Figura 12 – Trituração dos resíduos das podas das árvores.....	38
Figura 13 – Entulhos a serem reaproveitados.....	38
Figura 14 – Britador que separa os resíduos em granulometrias distintas.....	38
Figura 15 – <i>Flares</i> instalados nas valas do aterro sanitário de Maceió-AL.....	40
Figura 16 – <i>Flare</i> (queimador) utilizado na CTR/MA.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Impurezas e impactos do biogás.....	20
Tabela 2 – Concentração de metano no ponto de dreno de gás.....	41
Tabela 3 - Composição gravimétrica nas RAs de Maceió em junho, julho e agosto de 2017.....	42
Tabela 4 - Composição gravimétrica nas RAs de Maceió em novembro, dezembro de 2017 e janeiro 2018.....	43
Tabela 5 – Percentual de papel, papelão, trapos, madeira e matéria orgânica das RAs de Maceio.....	44
Tabela 6 – Estimativa dos custos ambientais associados à redução do consumo de insumos através da reciclagem.....	48

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

BTS - Baixo Teor de Sólidos

CH<sub>4</sub> – Metano

C/N – Relação Carbono Nitrogênio

CTR - Central de Tratamento de Resíduos

CTR/MA - Central de Tratamento de Resíduos de Maceió

CO<sub>2</sub> - Monóxido de carbono

FEN - Fundação Ecológica Nacional

Flares – Queimadores

PNRS –Política Nacional de Resíduos Sólidos

RAs - Regiões Administrativas Municipais

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RSD - Resíduos Sólidos Domiciliares

SUDES - Superintendência Municipal de Desenvolvimento Sustentável

ST – Sólidos Totais

SV - Sólidos Voláteis

SVB - Sólidos Voláteis Biodegradáveis

SVR - Sólidos voláteis refratários

TCO - Taxa de Carga Orgânica

TMB - Tratamento Mecânico Biológico

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Biomassa em Aterro Sanitário.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Benefícios Ambientais da Utilização do Biogás.....</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Manejo e tratamento dos resíduos sólidos em Maceió.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Digestão anaeróbica como opção de tratamento dos resíduos orgânicos.....</b>	<b>23</b>
<b>2.6</b>	<b>Descrição geral do processo de digestão anaeróbica.....</b>	<b>23</b>
<b>2.7</b>	<b>Fatores que influenciam a produção de biogás em aterro sanitário .....</b>	<b>24</b>
<b>2.8</b>	<b>Parâmetros ambientais e operacionais de controle da digestão anaeróbica.....</b>	<b>24</b>
2.8.1	Composição dos resíduos / Sólidos totais (ST) / sólidos voláteis (SV).....	24
2.8.2	Taxa de carga orgânica (TCO).....	25
2.8.3	pH.....	25
2.8.4	Temperatura.....	26
2.8.5	Nutrientes .....	26
2.8.6	Carbono Nitrogênio (C/N) .....	27
2.8.7	Tempo de retenção ou de detenção hidráulica (TDH).....	27
2.8.8	Mistura.....	27
<b>2.9</b>	<b>Tipos de sistemas de digestão anaeróbica.....</b>	<b>27</b>
<b>2.10</b>	<b>Formas de obtenção do biogás de aterro sanitário controlado.....</b>	<b>28</b>
2.10.1	Obtenção do biogás através de extração direta.....	28
2.10.2	Obtenção do biogás através de uma Usina de Tratamento Mecânico Biológico.....	29
<b>2.11</b>	<b>Vantagens e Desvantagens da Digestão Anaeróbica nos Aterros Sanitários.....</b>	<b>30</b>
<b>2.12</b>	<b>Utilização da Digestão Anaeróbica do Brasil e no Mundo.....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Coleta e análise dos dados .....</b>	<b>33</b>

3.2.1	Entrevistas e recebimento de relatórios.....	33
3.2.2	Caracterização dos resíduos recebidos na CTR/MA.....	33
3.2.3	Avaliação dos gases emitido pela CTR/MA.....	35
3.2.4	Visita a CTR/MA.....	36
3.2.5	Fórmulas para estimar a produção de biogás e energia elétrica.....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCURSÕES.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Composição gravimétrica dos resíduos da cidade de Maceió.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Estimativa do potencial de geração de metano .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>Estimativa da vazão de metano .....</b>	<b>44</b>
<b>4.4</b>	<b>Conversão do biogás em eletricidade.....</b>	<b>45</b>
<b>4.5</b>	<b>Viabilidade técnica.....</b>	<b>45</b>
<b>4.6</b>	<b>Viabilidade econômica.....</b>	<b>45</b>
<b>4.7</b>	<b>Benefícios ambientais.....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento dos resíduos sólidos urbanos, segue sendo um desafio para evitar impactos ambientais como, emissões de gases de efeito estufa, poluição de águas subterrâneas e superficiais. Em combinação com a coleta seletiva e a reciclagem, novas tecnologias, como: compostagem, digestão anaeróbia, pirólise e a gaseificação têm sido desenvolvidas para fazer frente as restrições ao aterramento de resíduos (FRIAS, 2016).

Nessa perspectiva, a digestão anaeróbia se mostra como uma alternativa promissora para o tratamento de resíduos orgânicos, haja vista que a fração orgânica corresponde a mais de 50% do total de resíduos residenciais gerados no Brasil (BRASIL, 2012). E tratamento destes é garantido pela Lei nº 12.305/10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, indicando o aterramento sanitário como o método de disposição final mais empregado, todavia, este não é economicamente viável, pois não traz nenhum benefício econômico e gera altos passivos ambientais.

A biodigestão consiste em um método de reciclagem de materiais orgânicos para a formação do biogás e biofertilizante. Estudos e projetos que se encontram em andamento em vários países do mundo, incluindo Brasil, confirmam que a digestão anaeróbica de resíduos sólidos urbanos, permite resolver simultaneamente os problemas de demanda energética, gestão de resíduos, emissões de gases de efeito de estufa, assim visa solucionar a contradição que prevalece entre o meio ambiente e desenvolvimento e, sobretudo, colabora para a coexistência necessária entre prosperidade econômica e meio ambiente saudável (RAJENDRAN et al., 2014).

O biogás é o principal produto da digestão anaeróbica, composto principalmente por metano e gás carbônico, com grande aplicabilidade para produção de eletricidade, calor e combustível veicular, além de ter como efluente o biofertilizante que pode ser usado para adubação do solo e desenvolvimento das plantas (VICTORINO, 2016).

No nordeste brasileiro, 35,6% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são destinados para aterros sanitários, 32,9% vão para aterros controlados e 31,5% para lixões. Em Alagoas foram geradas 1.092.810 toneladas de RSU no ano de 2019. (ABRELPE, 2020). Verificando-se a necessidade de melhorar a gestão desses resíduos no Estado e a indicação de alternativas tecnológicas adequadas à realidade local.

Em Maceió, há a predominância de matéria orgânica entre os resíduos sólidos coletados, correspondendo a 67% do total (SILVA, 2020). A cidade conta com um aterro sanitário - CTR (Central de Tratamento de Resíduos), no qual os gases gerados da decomposição dos resíduos aterrados são conduzidos por drenos verticais até a superfície e queimados nos *flares*, transformando assim, o gás metano em gás carbônico, com potencial causador de efeito estufa 21 vezes menor que o metano, o que reduz impacto ambiental, porém não elimina.

No Brasil, 61% dos RSU coletados são destinados para aterro, o equivalente a 46,4 milhões de toneladas (ABRELPE, 2022). Mas, existe apenas 422 plantas de geração de energia elétrica a partir do biogás (EPE, 2022). No que diz respeito, ao uso final da produção brasileira de biogás existente, 73% é destinada para a geração de eletricidade, 17% geração de calor e 10% sofrem processos regulatórios previstos na Agência Nacional de Gás Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP), para que possam se tornar biometano (ABRELPE, 2018).

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica, econômica e os benefícios ambientais da implantação de um sistema de aproveitamento energético do biogás na CTR/MA. Tendo em vista que, pesquisas nesse sentido apresenta benefícios para o governo e a população, pelo fato de gerar impactos econômicos e ambientais positivos, além de contribuir para redução da sobrecarga da concessionária de energia elétrica e consequentemente diminuição do lançamento de gases de efeito estufa na atmosfera e o aproveitamento do biogás como fonte bioenergética descentralizada.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Resíduos sólidos urbanos no Brasil**

O aumento do poder econômico da sociedade faz com que cresça a geração de resíduos e o consumo de combustíveis fósseis, o que agrava o aquecimento global. Os resíduos orgânicos gerados, normalmente são destinados para lixões, aterros sanitários, estações de tratamento ou se degradam no próprio ambiente onde são produzidos, contaminando águas superficiais, lençóis freáticos e a população ao seu entorno (VASCONCELOS; PEDROSO, 2016). Esses resíduos liberam gases constituídos em sua grande maioria por metano e dióxido de carbono que agravam o efeito estufa, sendo o metano 21 vezes mais danoso do que o dióxido de carbono (COSTA; BARROS; FALCÃO, 2015).

De acordo com a Abrelpe (2022), foram geradas no Brasil 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). Desse montante, 93% (76,1 milhões) foram coletados. A destinação adequada em aterros sanitários recebeu 61% dos resíduos sólidos urbanos coletados. O restante (39%) foi despejado em locais inadequados por 2.826 municípios. Ou seja, 29,7 milhões de toneladas de RSU acabaram indo para lixões ou aterros controlados, que não contam como um conjunto de sistemas e medidas necessárias para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações.

“Para fazer frente a todos os serviços de limpeza urbana no Brasil, os municípios aplicam mensalmente, em média, R\$ 10,95 por habitante. O mercado de limpeza urbana movimentou recursos correspondentes a R\$ 28 bilhões no país” (ABRELPE, 2022). Na caracterização nacional de resíduos, os resíduos orgânicos correspondem a mais de 50% do total de resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil. Somados aos resíduos orgânicos provenientes de atividades agrossilvipastoris e industriais, os dados do mesmo indicam que há uma geração anual de 800 milhões de toneladas de resíduos orgânicos (BRASIL, 2012).

Os resíduos orgânicos são constituídos basicamente por restos de animais ou vegetais descartados de atividades humanas. Podem ter diversas origens, como: doméstica ou urbana (restos de alimentos e podas), agrícola ou industrial (resíduos de agroindústria alimentícia, indústria

madeira, frigoríficos), saneamento básico (lodos de estações de tratamento de esgotos), entre outros. São materiais que em ambientes naturais equilibrados, degradam-se espontaneamente e reciclam os nutrientes nos processos da natureza. Mas, quando derivados de atividades humanas, especialmente em ambientes urbanos, podem transformar-se em um sério problema ambiental, pelo grande volume gerado e pelos locais inadequados em que são armazenados ou dispostos (BRASIL, 2020). A disposição inadequada de resíduos orgânicos gera chorume, emissão de metano na atmosfera e favorece a proliferação de vetores de doenças. Assim, faz-se necessário a adoção de métodos adequados de gestão e tratamento destes grandes volumes de resíduos (FERREIRA et al., 2011).

Quando separados na fonte, ou seja, quando os resíduos orgânicos não são misturados com outros tipos a reciclagem dos resíduos orgânicos e sua transformação em adubo ou fertilizante orgânico pode ser realizada em várias escalas e modelos tecnológicos. Visto que, pequenas quantidades podem ser tratadas de forma doméstica ou comunitária, enquanto grandes quantidades podem ser processadas em plantas industriais. Os processos mais comuns de reciclagem destes é a compostagem (degradação dos resíduos com presença de oxigênio) e a biodigestão anaeróbica (degradação dos resíduos com ausência de oxigênio) (MALINOWSKY, et. al., 2018).

Segundo dados de 2020, menos de 2% dos resíduos sólidos urbanos são destinados para compostagem, o que gera desperdício, pois dessa forma perde-se de devolver fertilidade aos solos brasileiros através dos nutrientes gerados e este é considerado um dos maiores desafios para a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Quanto à biodigestão, o Ministério do Meio Ambiente fez parte do Comitê Gestor do Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (BRASIL, 2020).

O Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil, o PROBIOGÁS tem como foco o aproveitamento do biogás gerado no tratamento anaeróbio dos esgotos sanitários, dos resíduos sólidos urbanos, agropecuários e dos efluentes agroindustriais. Além, de inserir o biogás e o biometano na matriz energética nacional e, por conseguinte, contribuir para a redução de emissões de gases indutores do efeito estufa. Para atingir seus objetivos, o PROBIOGÁS atuou pela melhoria das condições regulatórias, aproximou instituições

de ensino, pesquisa e fomentou a indústria nacional de biogás. Fruto da cooperação técnica entre o Governo Brasileiro e o Governo Alemão (BRASIL, 2015).

O biogás é uma fonte de energia renovável que se apresenta como ótima alternativa para o mercado nacional. Todo resíduo orgânico, como por exemplo, restos de comida, frutas e vegetais, resíduos industriais de origem animal e vegetal, sofre ações de bactérias que decompõem estes materiais e geram gases, principalmente dióxido de carbono e metano, que quando não aproveitados, são liberados no meio ambiente, contribuindo para o aumento das taxas de emissão de gases indutores do efeito estufa. Esta decomposição pode ser realizada de maneira controlada, possibilitando a geração de energia, por meio do aproveitamento do metano, presente em grandes concentrações no biogás. É a partir da geração de energia proveniente dos processos de biodegradação de compostos orgânicos que o biogás possibilita um retorno positivo para o setor saneamento básico no Brasil, bem como a redução de custos no setor agropecuário e da agroindústria, contribuindo para a redução do efeito estufa (BRASIL, 2015).

## **2.2 Biogás de aterros sanitários**

A recuperação de biogás de aterros sanitários é uma prática comum nos países desenvolvidos por questões de aproveitamento energético, assim como pela minimização tanto de riscos de segurança, no que se refere a possíveis explosões, quanto de impactos ambientais. A geração de metano aumenta de forma gradual de acordo com a disposição de resíduos durante o período de utilização do aterro, decaindo de modo acentuado cessada a disposição dos mesmos, mas continua a ser significativa por longos anos (DUARTE, 2011).

Podem haver ainda outros pontos que devem ser considerados, como, a coleta de chorume e o tipo de cobertura. Outros fatores que influenciam diretamente a produção de biogás em aterros sanitários são: o tipo e a quantidade de resíduos depositados, a temperatura, o índice de pluviosidade no local, o teor de umidade da massa depositada, o grau de compactação, a espessura das células e a idade do aterro (ZANBO; LUNA, 2016).

O biogás produzido por processo de digestão anaeróbica em aterro sanitário e em biodigestores consistem principalmente na geração de dois gases, metano (CH<sub>4</sub>) e o monóxido de

carbono (CO<sub>2</sub>). Além destes elementos, outros em menor quantidade, também são encontrados: H<sub>2</sub> (hidrogênio), NH<sub>3</sub> (amônia), H<sub>2</sub>S (sulfeto de hidrogênio), O<sub>2</sub> (oxigênio), CO (monóxido de carbono), N (nitrogênio) e H<sub>2</sub>O (água) (SANTOS; LIMA, 2016).

O potencial energético do biogás é estabelecido em função da quantidade de CH<sub>4</sub> contido no gás, o que determina o seu poder calorífico (MONTAGNA, 2013). A maioria dos aterros não fazem o aproveitamento energético do biogás, apenas queima-o nos poços de coleta através de *flares*.

Por se tratar de uma mistura gasosa, o biogás apresenta uma série de impurezas, com destaque para os compostos de enxofre e amoníaco. Um dos impactos causados pelas impurezas é a combinação de concentração de sulfeto de hidrogênio e amoníaco, que é corrosiva para diversos materiais, tais como cobre latão e aço podendo se tornar tóxico dependendo das condições de reação com os mesmos (ZANBO; LUNA, 2016). Segundo Ryckebosch et al., (2011) essas impurezas, se não retiradas e/ou tratadas podem gerar várias consequências, conforme Tabela 1.

**Tabela 1** – Impurezas no biogás e seus impactos

<b>Impureza</b>	<b>Impacto</b>
Água	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corrosão em compressores, tanques de armazenamento e motores devido à reação com H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> e CO<sub>2</sub> formando ácidos;</li> <li>▪ Acumulação de água nas tubagens;</li> <li>▪ Condensação e/ou congelamento a pressões elevadas;</li> </ul>
Poeiras	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Atascamento devido ao depósito em motores e tanques de armazenamento;</li> </ul>
H <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corrosão em compressores, tanques de armazenamento e motores;</li> <li>▪ Concentração tóxica de H<sub>2</sub>S (&gt;5 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) permanece no biogás;</li> <li>▪ SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub> são formados quando da combustão, os quais são mais tóxicos que o H<sub>2</sub>S e em conjunto com a água provocam corrosão;</li> </ul>
CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Afeta o poder calorífico inferior;</li> </ul>
Siloxanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Formação de SiO<sub>2</sub> e micro cristais de quartzo durante a combustão;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Depósito em velas de ignição, válvulas e cabeças de cilindros provocando abrasão nas superfícies;</li> </ul>
NH <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corrosivo quando dissolvido em água;</li> </ul>
Cl-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corrosão em motores de combustão;</li> </ul>
F-	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corrosão em motores de combustão.</li> </ul>

Fonte: Ryckebostch (2011)

O tratamento dessas impurezas acontece por meio de vários processos que podem variar considerando fatores, como: econômicos, processuais, qualidade e valores pretendidos do biogás (RYCKEBOSCH, 2011).

### 2.3 Benefícios ambientais da utilização do biogás

A redução do consumo de eletricidade proveniente do sistema de abastecimento que no Brasil é predominantemente de hidrelétricas, tende a reduzir a necessidade de construção de imensos reservatórios, os quais causam impactos em todo o ecossistema aquático, além das linhas de transmissão que percorrem grandes extensões. Ademais, a melhor gestão dos resíduos orgânicos evita sua destinação inadequada, causando danos ao meio ambiente, como poluição, proliferação de patógenos e emissão de gases de efeito estufa.

O uso da biomassa oferece grande potencial de exploração dentre as fontes renováveis de energia, sendo a bioenergia vista como uma das opções-chaves para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e substituição de combustíveis fósseis. Existem várias rotas possíveis para o aproveitamento da biomassa, dentre elas a digestão anaeróbia tem sido utilizada para a geração de biogás e nutrientes, além de ser um processo eficiente para a prevenção da poluição (ZAMBON, 2017).

Os resíduos são considerados um problema para a indústria e as comunidades e devem ser vistos como recursos valiosos, onde soluções responsáveis precisam ser adotadas para gerenciá-los de forma a viabilizar a sua coleta, separação e recuperação (LEHMANN, 2011). Trabalhos acadêmicos estão sendo realizados para mapear os entraves e fornecer soluções para a ampliação

do aproveitamento energético do biogás nos aterros sanitários a fim de colaborar no processo de tomada de decisão das autoridades competentes.

#### **2.4 Manejo e tratamento dos resíduos sólidos em Maceió**

De acordo com dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente (SEDET) em 2017, a geração per capita média de resíduos sólidos urbanos é de 0,97 kg/hab.dia. A coleta convencional possui atuação em 100% da zona urbana municipal. Contudo, devido a algumas deficiências, como a falta de garis comunitários em áreas com dificuldade de acesso como encostas, grotas e vales, habitadas por população de baixa renda, a coleta convencional abrange cerca de 98% das localidades. O serviço de coleta de resíduos não é realizado na área rural.

No município de Maceió desde 2014 possui a coleta de resíduos recicláveis, em que as cooperativas de recicladores atendem residências, industriais e o comércio local. O rejeito gerado no processo de triagem é coletado por um caminhão da Prefeitura Municipal, que o encaminha até a Central de Tratamento de Resíduos de Maceió (SEDET, 2017).

O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Maceió, aponta que todo o resíduo recolhido pelo serviço de coleta municipal é encaminhado à Central de Tratamento de Resíduos de Maceió – CTR/MA que está localizada no bairro Benedito Bentes e iniciou sua operação em 30/04/2010, sendo administrada pela empresa privada V2 Ambiental SPE S/A do Grupo Estre Ambiental, tendo essa uma concessão de 20 anos.

A Central é constituída das seguintes unidades:

- a) vala de recepção de resíduos classe IIA (não inertes);
- b) vala de recepção de resíduos classe IIB (inertes);
- e) vala para recepção de resíduos vegetais oriundos da poda;
- d) estação de tratamento de líquido percolado.

Os gases gerados na decomposição dos resíduos aterrados são conduzidos por drenos verticais até a superfície onde são queimados nos *flares*, transformando assim o gás metano em gás carbônico. Para tratamento do líquido percolado produzido no aterro, há uma estação de tratamento

de efluentes (ETE) devidamente licenciada pelo órgão ambiental. Também é importante registrar, que o líquido percolado gerado no antigo lixão é transportado até a ETE da CTR/MA (Central de Tratamento de Resíduos de Maceió) para tratamento. O líquido percolado tratado na CTR/MA é encaminhado para a estação de tratamento de efluentes da CASAL – Companhia de Saneamento de Alagoas. Há um emissário submarino que é o ponto de lançamento de efluentes (3km além da orla marítima).

## **2.5 Digestão anaeróbica como opção de tratamento dos resíduos orgânicos**

De acordo com Clercq et al. (2016) o potencial da digestão anaeróbica no tratamento de resíduos alimentares e os desafios associados demonstra que a produção da cidade Chinesa de Beijing em 2015 estimada em 956.300 toneladas de resíduos alimentares poderia produzir 300 milhões Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, correspondente a uma taxa de 313,7 Nm<sup>3</sup>/t, aproximadamente. Os maiores gargalos que se colocam no aproveitamento dessa tecnologia, principalmente nos países em desenvolvimento ocorre pela baixa produção de biogás, dificuldades no monitoramento e controle dos processos, utilização ineficiente do biogás e a ociosidade.

A digestão anaeróbica dos resíduos alimentares para fins energéticos, é uma tecnologia promissora. No entanto, a sua aplicação é também acompanhada por sérios desafios cuja superação passa por estudos detalhados dos procedimentos mais adequados para o pré-tratamento dos resíduos, condicionamento do substrato, arranque e monitoria dos reatores, dentre outros aspectos decisivos, para maximizar o desempenho do processo e tirar maior vantagem possível dessa tecnologia (VICTORIANO et al., 2016).

## **2.6 Descrição geral do processo de digestão anaeróbica**

De maneira geral, a digestão anaeróbica pode ser descrita em quatro estágios: o pré-tratamento, a digestão dos resíduos, a recuperação do biogás e o tratamento dos resíduos. A maioria dos sistemas requer pré-tratamento dos resíduos para obtenção da massa homogênea. Este pré-processamento envolve a separação ou triagem dos materiais não biodegradáveis seguido por

uma trituração. Dentro do digestor, a massa é diluída para obter o conteúdo de sólidos desejado e permanece no interior do reator por um determinado tempo de retenção. Para a diluição, pode ser utilizado água da torneira, lodo de esgoto, esgoto doméstico ou a recirculação do líquido efluente do reator. Um trocador de calor é usualmente requerido para manter a temperatura desejada. O biogás obtido com a digestão anaeróbia é purificado e armazenado em gasômetros. O efluente líquido é utilizado para recirculação ou enviado para tratamento (BRABER, 2003).

## **2.7 Fatores que influenciam a produção de biogás em aterro sanitário**

Os fatores que influenciam diretamente a produção de biogás em aterros sanitários são: o tipo e a quantidade de resíduos depositados, a temperatura, o índice de pluviosidade no local, o teor de umidade da massa depositada, o grau de compactação, a espessura das células e a idade do aterro. Podem haver ainda outros pontos que devem ser considerados, como: o teor de sólidos totais (ST); teor de sólidos voláteis (SV); pH; Taxa de carga orgânica (TCO); Temperatura; a coleta de chorume e o tipo de cobertura (ZANBO; LUNA, 2016).

## **2.8 Parâmetros ambientais e operacionais de controle da digestão anaeróbica**

### **2.8.1 Composição dos resíduos, teores de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV)**

A composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU), em especial os domésticos ou domiciliares (RSD) é muito diversificada e heterogênea, variando em função de fatores como; nível socioeconômico da população, época do ano e tipo de coleta existente. (MATA-ALVAREZ, 2003). O ST indica a proporção da massa sólida do substrato (biomassa) que sobra após a evaporação da parte líquida da amostra aquecida entre 100° a 105°C (VITORIANO, 2017). Enquanto que SV em resíduos sólidos são o resultado da subtração dos sólidos totais e das cinzas obtidas após combustão completa dos resíduos e são subdivididos em sólidos voláteis biodegradáveis (SVB) e sólidos voláteis refratários (SVR). De modo que, o conhecimento da

fração de SVB ajuda na melhor definição da biodegradabilidade dos resíduos, da geração de biogás, da taxa de carga orgânica (TCO) e da relação C/N (Carbono Nitrogênio).

A lignina é um material complexo de difícil degradação por bactérias anaeróbias e constitui a fração sólidos voláteis refratários (SVR) nos resíduos orgânicos municipais. Em geral, resíduos orgânicos de cozinha, com maior umidade, são mais propícios à degradação anaeróbia; e resíduos com alto teor de lignina e celulose, como resíduos de podas e jardinagem, são mais indicados para a degradação aeróbia (compostagem) (MATA-ALVAREZ et al., 2003).

### 2.8.2 Taxa de carga orgânica (TCO)

A taxa de carga orgânica volumétrica (TCO) em um sistema de digestão anaeróbia é considerado parâmetro importante para avaliar a quantidade de matéria orgânica carregada por unidade de volume do biodigestor por dia (VITORIANO, 2017). Pois, se houver alimentação do sistema a cima ou abaixo da carga orgânica sustentável poderá resultar em baixa produção de biogás devido à acumulação de substâncias inibidoras no interior do digestor, como os ácidos orgânicos voláteis (CRESPO, 2013). Através da avaliação do TCO, pode-se verificar a quantidade máxima de matéria orgânica que deve dar entrada no processo de digestão anaeróbia, num determinado intervalo de tempo, sem que ocorra o fenômeno de inibição do processo (CARRILHO, 2012).

### 2.8.3 pH

O valor do pH expressa a concentração de íons hidrogênio no meio. Soluções ácidas têm pH menor que 7 e soluções alcalinas têm pH maior que 7. Bactérias anaeróbias, especialmente as metanogênicas, são sensíveis às condições ácidas do reator e podem ser inibidas (ÖNDER, 2013). Rise-At (1998), descreve que o pH ótimo para a digestão anaeróbica é entre 5,5 e 8,5 e que durante a digestão, os dois processos de acidificação e metanogênese requerem valores diferentes de pH para controle dos seus processos. O tempo de retenção afeta o pH da massa em digestão.

#### 2.8.4 Temperatura

Há basicamente duas faixas de temperatura que resultam em condições ótimas para a produção de biogás – as faixas mesofílica e termofílica. A faixa mesofílica está entre 20°C – 40°C e a temperatura ótima está entre 30°C – 35°C. A temperatura termofílica fica entre 50° – 60°C. Os sistemas mesofílicos são muito sensíveis à variação da temperatura ambiente, podendo parar a geração de biogás no período de inverno em climas mais frios (SINGH; ANAND, 1994). Bouallagui et al. (2004), reportam que a digestão anaeróbica em processos termofílicos geram até 41% mais de biogás que os processos mesofílicos e 144 % a mais que os processo psicofílicos.

#### 2.8.5 Nutrientes

A matéria orgânica é fonte de energia e carbono necessários para o crescimento dos organismos vivos da flora microbiana que constitui o ecossistema dentro do biodigestor. Para além dessas fontes, os organismos vivos, incluindo microrganismos, precisam de doses certas de diferentes vitaminas, micro e macronutrientes para a manutenção e desenvolvimento das células (BISSCHOPS; SPANJERS; SCHUMAN, 2009).

Os nutrientes mais importantes que devem estar em quantidades adequadas, são: nitrogênio (N), carbono (C), fósforo (P), enxofre (S), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Além de outros elementos como, o cobalto (Co), níquel (Ni), manganês (Mn) e ferro (Fe). Em última instância, estes nutrientes determinam tanto a taxa de crescimento e de atividade da flora bacteriana quanto a taxa de produção do metano (FNR, 2010).

#### 2.8.6 Relação Carbono Nitrogênio (C/N)

Após o carbono, o nitrogênio é o nutriente mais importante, sendo necessário para a formação de enzimas responsáveis pela realização do metabolismo. Por isso, no decorrer do processo anaeróbio, uma razão ótima C/N é necessária para garantir um equilíbrio satisfatório de nutrientes, fundamental para o crescimento da flora bacteriana e para manutenção de um ambiente

estável. Uma relação C/N muito elevada (muito carbono e pouco nitrogênio) reduz a atividade metabólica. Como consequência, o carbono não é completamente degradado e o rendimento de metano não atinge o seu pico máximo. Inversamente, a abundância de nitrogênio pode causar a formação excessiva de amônia ( $\text{NH}_3$ ), capaz de inibir o crescimento das bactérias mesmo em baixas concentrações, podendo até ocasionar o colapso de toda a população de microrganismos (FNR, 2010).

Em relação a taxa ótima da biodigestão Zhang et al. (2014) analisaram vários estudos e concluíram que a taxa ótima de C/N na digestão anaeróbia depende tanto da matéria prima quanto do inóculo. E que independentemente do valor da taxa, o mais importante é o equilíbrio estável entre carbono e nitrogênio que vai determinar a eficácia e a eficiência do processo a longo prazo.

#### 2.8.7 Tempo de retenção ou de detenção hidráulica (TDH)

Segundo Reichert (2005), o tempo de retenção requerido para a ocorrência completa das reações de digestão anaeróbica nos reatores varia com as diferentes tecnologias que vai depender da temperatura do processo e da composição dos resíduos. O tempo de retenção para tratamento de resíduos em processos mesofílicos varia de 10 a 40 dias. Na faixa termofílica são requeridas menores TDH. Reatores de alta taxa de sólidos operando em condições termofílicas têm TDH de 14 dias.

#### 2.8.8 Mistura

O objetivo da mistura no interior do reator é colocar em contato o resíduo fresco com os microrganismos presentes na massa já digerida. O tipo de equipamento e o nível de mistura dependem do tipo de reator e do teor de sólidos contidos no reator (REICHERT, 2005).

### 2.9 Tipos de sistemas de digestão anaeróbica

De acordo com Reichert (2005), basicamente os métodos ou tipos de sistemas utilizados para tratar anaerobicamente os resíduos sólidos urbanos podem ser classificados nas seguintes categorias: estágio único; múltiplo estágio; e batelada. Estas categorias podem ser ainda classificadas com base no teor de sólidos totais (ST) contidos na massa do reator em relação a porção líquida. Sistemas com baixo teor de sólidos (BTS) tem menos de 15% de ST, médio teor de sólidos quando estiver entre 15 e 20%, e alto teor de sólidos (ATS) quando estiver na faixa de 22 a 40%.

## **2.10 Formas de obtenção do biogás de aterro sanitário controlado**

O biogás proveniente do aterro sanitário pode ser obtido de duas formas: extraído diretamente das valas onde os resíduos Classe IIA estão armazenados; ou não deixando os resíduos serem armazenados diretamente nas valas e os passando antes por um processo de triagem em uma Usina de Tratamento Mecânico Biológico (Usina de TMB).

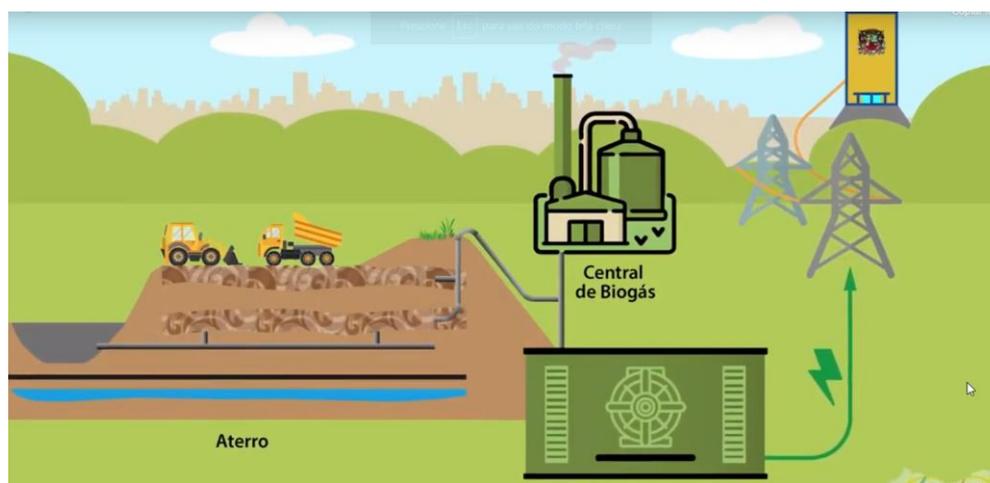
### **2.10.1 Obtenção do biogás através de extração direta**

A obtenção do biogás realizado por meio de sua extração direta nas valas do aterro sanitário, é executada através de drenos tubulares, apoiados por uma turbina que faz a sucção do mesmo, direcionando-o para um filtro que irá retirar as partículas de materiais que foram arrastadas com o gás. Depois, o biogás é conduzido a um desumidificador que separa as gotículas líquidas do biogás. A parte líquida é drenada através de gravidade para um tanque de coleta condensada e depois é bombeado para o sistema de coleta de chorume para receber tratamento.

Desta forma, o biogás já sem as partículas sólidas e as gotículas líquidas, passa pelo soprador e é conduzido para a queima controlada no *flare* e/ou para outros sistemas de aproveitamento energético, como pode ser visto na figura 1, tendo sua vazão de biogás controlada por uma válvula e por uma turbina, que quando acionada, succiona o biogás do interior do aterro (ALMEIDA, 2016).

Após esse processo para obtenção do biogás, este pode ser utilizado em caldeiras, veículos ou pode ser aproveitado em motogeradores instalados nos aterros sanitários para geração de energia elétrica. Os resíduos que sobram da queima do biogás (substância com aspecto de lodo que contém água, sais minerais e microrganismos) podem ser utilizadas como fertilizantes (SILVA, 2021).

**Figura 1** – Modelo de projeto para conversão do biogás em energia elétrica



Fonte: Mozart Luna (2022)

### 2.10.2 Obtenção do biogás através de uma Usina de Tratamento Mecânico Biológico

A Usina de Tratamento Mecânico Biológico (Usina de TMB), figura 2, surge como uma opção para deixar de aterrar os resíduos Classe IIA, passando a processá-los através de procedimentos manuais, mecânicos e biológicos, com o objetivo de possibilitar a recuperação dos materiais presentes no RSU, separando aqueles que possuem potencial de aproveitamento daqueles que devem ser destinados à disposição final no aterro sanitário. O principal objetivo da instalação de uma Usina TMB é reduzir a quantidade de materiais a serem destinados ao aterramento, reduzindo os passivos associados a esta atividade, e, simultaneamente, gerar receitas adicionais por meio da recuperação e da comercialização dos seus subprodutos.

Em uma instalação TMB, os processos de natureza manual e mecânica dizem respeito a mecanismos de separação/triagem e redução de dimensão. Já os processos biológicos são aqueles

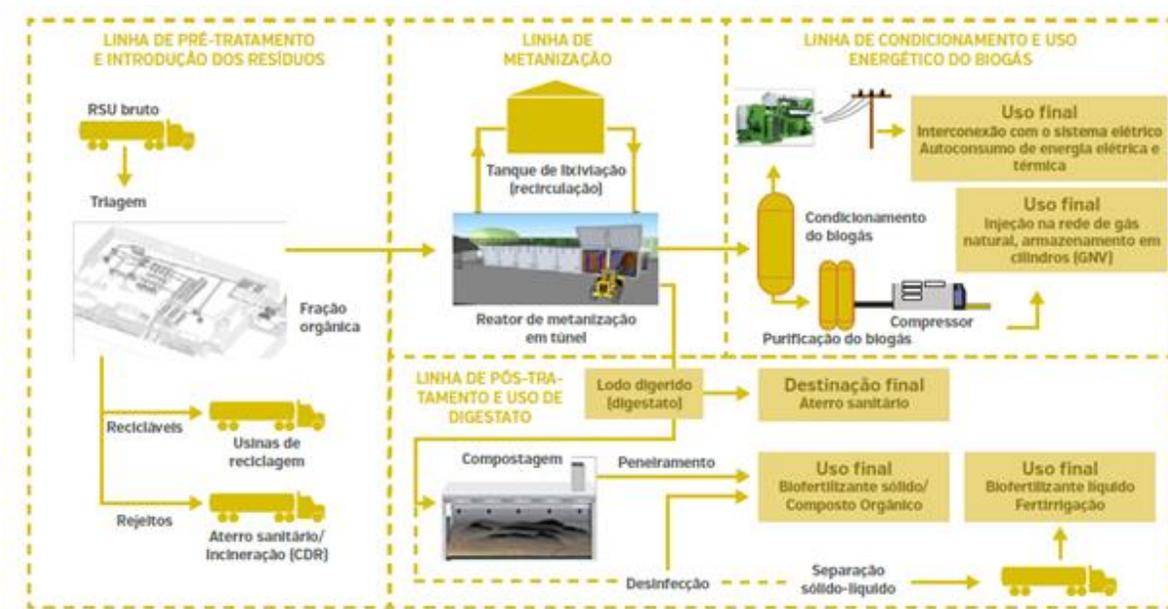
destinados a tratar a fração orgânica dos resíduos através do reator de metanização, ou reator anaeróbio, local onde ocorre a degradação da matéria orgânica em ambiente fechado, como a captação do biogás gerado no processo.

O biogás produzido nesse processo pode ser destinado à produção de energia elétrica e térmica por meio de sistemas de cogeração (conjunto motogerador). O lodo gerado nos reatores geralmente é direcionado a um sistema de compostagem, visando à estabilização final. Posteriormente, este pode ser submetido a um processo de peneiramento, com a finalidade de remover impróprios de dimensões reduzidas e agregar qualidade ao material (BRASIL, 2017).

De modo geral, é possível subdividir uma Usina TMB nas seguintes seções principais:

- Linha de pré-tratamento e introdução dos resíduos;
- Linha de metanização;
- Linha de condicionamento e aproveitamento energético do biogás;
- Linha de pós-tratamento do material digerido.

**Figura 2** – Fluxograma típico de Usina de Tratamento Mecânico-Biológico de RSU



Fonte: Brasil (2017)

## 2.11 Vantagens e desvantagens da digestão anaeróbica nos aterros sanitários

As principais vantagens da utilização da digestão anaeróbica nos aterros sanitários são: o aumento da vida útil dos mesmos; a retirada da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, fração que resulta em odores desagradáveis, geração de lixiviados de alta carga e grande volume; coleta do biogás gerado; minimização da emissão de gases que aumentam o efeito estufa; geração de produtos valorizáveis, como; biogás (energia e calor) e biofertilizante.

Os principais problemas que podem ocorrer na digestão anaeróbica nos aterros sanitários são: a grande variação da composição dos resíduos; a mistura ineficiente dos resíduos sólidos urbanos e o lodo de esgoto afetar a eficiência do processo; ocorrência de obstruções na canalização por pedaços maiores de resíduos, principalmente nos sistemas contínuos (BRABER, 1995).

## **2.12 Utilização da digestão anaeróbica no Brasil e no mundo**

A digestão anaeróbia teve seu desenvolvimento maior no campo dos resíduos rurais, com larga utilização a partir do século XIX principalmente na China e na Índia. Estes países por apresentarem uma enorme população rural, criaram políticas públicas que incentivaram o uso de biodigestores de escala familiar (BOND; TEMPLETON, 2011).

Na Europa, o grande crescimento na utilização da digestão anaeróbica deve-se basicamente a dois fatores: os altos preços de energia e às restrições ambientais, especialmente ao controle e a não permissão de matéria orgânica em aterros sanitários, bem como as dificuldades para a implantação de novos aterros ou a expansão dos existentes. (REICHERT, 2005).

No Brasil, o processo tem sido utilizado nas grandes indústrias de produção de álcool da cana-de-açúcar. Já para resíduos sólidos, as experiências com a fração orgânica são muito menos extensivas. A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos não é amplamente utilizada havendo um considerável potencial a ser desenvolvido. A principal etapa para a viabilidade deste sistema reside na triagem adequada, evitando a contaminação do resíduo orgânico por substâncias tóxicas, que diminuem ou cessam a atividade dos microorganismos no tratamento anaeróbio (VITORIANO, 2017).

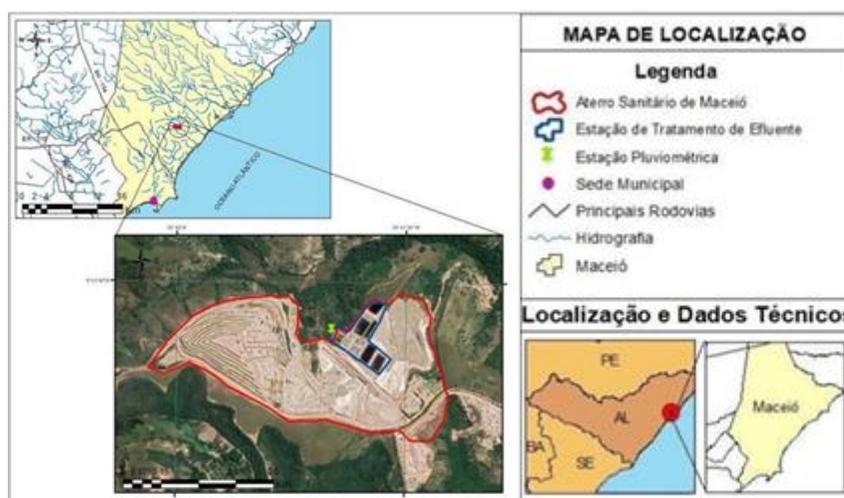
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Central de Tratamento de Resíduos de Maceió – CTR/MA, localizada na sede do município do estado de Alagoas. Maceió está localizada no nordeste do Brasil, onde ocupa área de 509, 320 km<sup>2</sup> e com população de 1.031.597 habitantes (IBGE, 2021), clima tropical, tem temperatura média anual de 25° a 29°C, e 9°4 39' 57" de latitude e 35°44' 6" de longitude.

A CTR/MA foi inaugurada em 2010 no bairro do Benedito Bentes, localizada na parte alta da cidade. Ocupa área de 140 hectares e recebe cerca de 57 mil toneladas de lixo por mês. É administrada pela empresa privada V2 Ambiental SPE S/A do Grupo Estre Ambiental, tendo essa uma concessão de 20 anos. Os gases gerados na decomposição dos resíduos aterrados na CTR/MA são queimados nos *flares*, transformando o gás metano em gás carbônico, diminuindo em parte o impacto ambiental. Para o tratamento do líquido percolado (chorume) produzido no aterro, há uma estação de tratamento de efluentes (ETE) devidamente licenciada pelo órgão ambiental. Na figura 3 pode ser vista a área que a CTR/MA ocupa no bairro do Benedito Bentes em Maceió/AL.

**Figura 3** – Localização do Aterro Sanitário de Maceió, Alagoas



Fonte: Araújo (2020)

## 3.2 Coleta e análise dos dados

Para elaboração do trabalho foram realizadas entrevistas com a diretora de Serviços Especiais e Planejamento da Sudes (Superintendência Municipal de Desenvolvimento Sustentável) e com funcionários da CTR/MA, além de visitas in loco.

### 3.2.1 Entrevistas e recebimento de relatórios

Durante as entrevistas foram aplicados questionários objetivando conseguir informações sobre: a quantidade de resíduos recebidos diariamente na CTR/MA; o volume de gases queimados nos *flares*; as características dos gases e dos resíduos; as formas de separação, armazenamento e tratamento dos resíduos. Também analisou-se relatórios e artigos sobre: a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de Maceió/AL; análise de amostra dos gases que são queimados nos *flares* instalados na camada de cobertura do aterro; e estudo sobre a utilização dos resíduos sólidos orgânicos do aterro de Maceió como substrato para produção de biogás.

### 3.2.2 Caracterização dos resíduos recebidos na CTR/MA

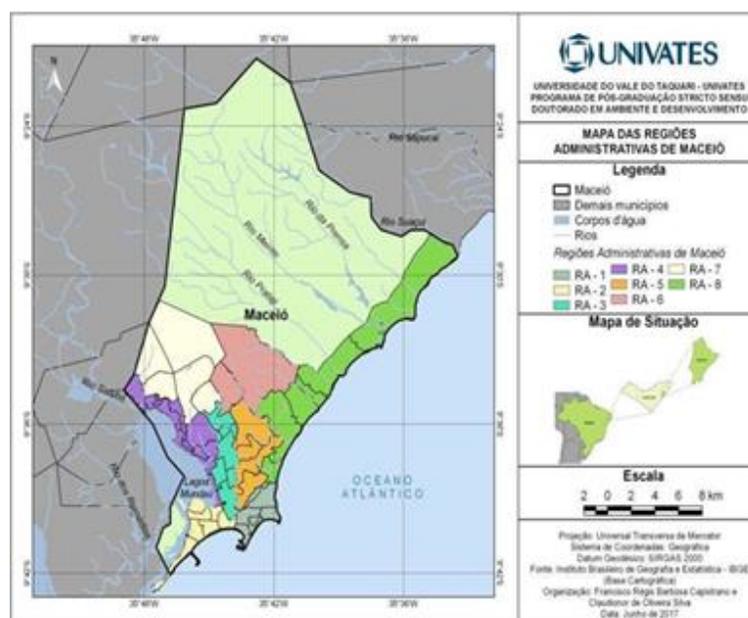
Realizou-se consulta dos relatórios da Superintendência de Limpeza Urbana de Maceió (SLUM) para obtenção de informações referente às pesagens dos resíduos do momento de chegada dos caminhões, cujo período abrange os meses de junho de 2017 a janeiro de 2018 (SILVA et al., 2020). A composição e a quantidade de resíduos podem variar de uma localidade para outra da cidade em função dos níveis de renda, sazonalidade, níveis tecnológico, sanitários e cultural (FEAM, 2019).

Para realização da composição gravimétrica dos resíduos realizou-se a escolha de bairros a partir de roteiros de coleta de resíduos, em que foram agregados por serem vizinhos e os resíduos coletados conjuntamente ser realizada pelos os mesmos caminhões compactadores (SILVA et al., 2020). Segundo o plano diretor vigente de 2009, a cidade Maceió está dividida em 50 bairros, que por sua vez, compõem a malha de 8 RAs - regiões administrativas municipais, como pode ser

constatado na figura 4. Esta etapa constituiu-se, portanto, na seleção de um conjunto de bairros pertencentes à cidade de Maceió, com objetivo de obter uma amostra capaz de representar os resíduos produzidos em toda a cidade. Nas RAs, os bairros ficaram divididos da seguinte maneira:

- RA 1 - Pajuçara, Ponta Verde, Ponta da Terra;
- RA 2 - Trapiche da Barra, Pontal da Barra;
- RA 3 - Jardim Petrópolis, Canaã, Santo Amaro;
- RA 4 - Chã da Jaqueira, Petrópolis, Chã de bebedouro, Santa Amélia;
- RA 5 - Jacintinho, Feitosa, São Jorge; RA6, Antares, Benedito Bentes;
- RA 7 - Cidade Universitária, Santos Dumont;
- RA 8 - Jacarecica, Guaxuma, Garça Torta, Riacho Doce, Pescaria, Ipioca.

**Figura 4-** Localização geográfica das regiões administrativas de Maceió, Alagoas



Fonte: Silva (2020)

A metodologia adotada para a frequência de coleta de dados e a realização dos ensaios foi realizada por duas amostras a cada roteiro de RA, sendo oito amostras parciais nos meses de junho, julho e agosto de 2017 e mais oito amostras na segunda coleta nos meses de novembro, dezembro de 2017 e janeiro de 2018, totalizando 16 amostras. A escolha dos períodos objetivou possibilitar a

análise da influência da sazonalidade nas propriedades dos resíduos, comparando dois períodos com características climáticas bastante distintas: época de chuvas e época de seca. As coletas para a realização dos ensaios aconteceram na CTR de Maceió e através da identificação da classe e da massa dos resíduos determinou-se a composição gravimétrica, empregando o método do quarteamento (SILVA et al., 2020).

O percentual de cada componente presente no resíduo foi determinado por meio da indicação de sua massa em relação à massa total da amostra, equação 1.

Equação 1:

$$CG (\%) = \frac{Mc}{Mt} \times 100$$

Onde:

CG - composição gravimétrica, em porcentagem;

Mc - a massa do componente, em quilogramas;

Mt - massa total, também em quilogramas.

### 3.2.3 Avaliação dos gases emitido pela CTR/MA:

Em 2016, a empresa Qualitex Engenharia e Serviços apresentou um relatório para a Sudes no qual foi exposta uma análise dos gases emitidos pelo aterro sanitário de Maceió, realizada através de amostragem conseguida em um dreno de gás (Flare) instalado na camada de cobertura do aterro. Essa análise teve como objetivo avaliar quantitativamente os parâmetros de; metano (CH<sub>4</sub>), sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), monóxido de carbono (CO) vazão do gás e temperatura ambiente para fins de conformidade quanto à qualidade do ar atmosférico.

Segundo a Qualitex Engenharia e Serviços (2016) a vazão dos gases (m<sup>3</sup>/h) foi obtida a partir da multiplicação da velocidade dos gases emitidos nos drenos por suas respectivas áreas em m<sup>2</sup>. O diâmetro dos drenos (*flares*) foram obtidos através de medição com trena, onde constatou-se que os mesmos têm 0,13 m de diâmetro.

### 3.2.4 Visita à CTR/MA

Em visita ao aterro sanitário buscou-se conseguir respostas que não foram obtidas através da aplicação do questionário e conhecer o funcionamento do local. Procurou-se obter informações sobre: se há separação dos resíduos recebidos; as formas de armazenamento dos mesmos; se é realizado algum pré-tratamento antes de armazená-los nas valas; quantidade de valas existentes no local; quantas já foram utilizadas; a quantidade de resíduos armazenados em cada vala; o volume dos gases queimados nos *flares*; o pH, a temperatura e o índice de umidade dentro das valas; o tempo de decomposição dos resíduos armazenados nas valas; qual a quantidade de chorume gerado por tonelada; qual o custo do tratamento de uma tonelada de chorume; qual o valor gasto com a construção do aterro.

No momento da visita foi acompanhada a chegada dos caminhões com os resíduos no município, onde os mesmos antes de adentrarem o aterro, passam por uma verificação do conteúdo (Figuras 5, 6) para em seguida serem destinados as áreas corretas, como: valas para armazenagem dos resíduos Classe IIA (não inertes), valas e área de transformação de resíduos IIB (inertes); área de recepção e transformação de resíduos vegetais oriundos de poda.

**Figura 5** – Chegada dos caminhões a CTR/MA



Fonte: Autora (2021)

**Figura 6** – Verificação do conteúdo do caminhão



Fonte: Autora (2021)

Após os caminhões serem inspecionados os mesmos são pesados, figuras 8 e 9, e destinados para as áreas correlacionadas ao seu conteúdo.

**Figura 7** – Balança instalada na entrada do aterro



Fonte: Autora (2021)

**Figura 8** – Caminhão sendo pesado



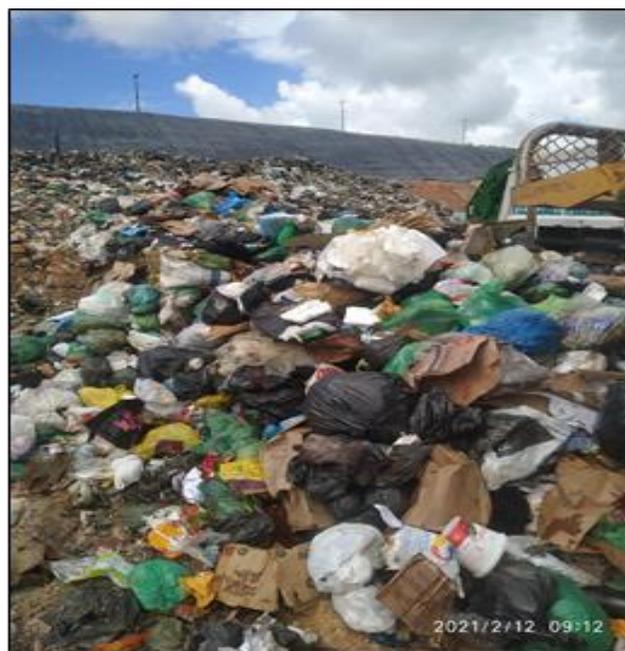
Fonte: Autora (2021)

**Figura 9** – Resíduos Classe II A sendo descarregados na vala



Fonte: Autora (2021)

**Figura 10** – Resíduos de Classe II A já na vala antes de serem compactação



Fonte: Autora (2021)

Os resíduos oriundos do processo de podas árvores e manutenção de jardins são destinados para uma área específica, figuras 12 e 13, onde são triturados e enviados para compostagem.

**Figura 11** – Resíduos de podas



Fonte: Autora (2021)

**Figura 12** – Trituração dos resíduos das podas das árvores



Fonte: Autora (2021)

Os resíduos Classe IIB, figuras 14 e 15, vão para o britador onde são separados em granulometrias distintas e triturados para serem reaproveitados nas obras da prefeitura. Os resíduos que não podem ser reaproveitados são enviados para valas específicas dessa classe de resíduos.

**Figura 13** – Entulhos a serem reaproveitados



Fonte: Autora (2021)

**Figura 14** – Britador que separa os resíduos



Fonte: Autora (2021)

Os gases gerados nas valas da CTR/MA são direcionados, através de drenos verticais, para os *flares* (queimadores), figuras 15 e 16, onde são queimados convertendo através desse processo o gás metano em gás carbônico.

**Figura 15** – *Flares* nas valas do aterro sanitário de Maceió/AL **Figura 16** – Exemplo de *flare* utilizado na CTR/MA



Fonte: Autora (2021)



Fonte: Autora (2021)

### 3.2.5 Fórmulas para estimar a produção de biogás e energia elétrica

Para estimar a produção de biogás nas áreas de disposição dos resíduos, foi adotado o modelo utilizado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). As diretrizes do IPCC descrevem um método no qual o perfil de emissões depende do tempo transcorrido e que reflete melhor o processo de degradação ao longo do tempo, de acordo com a equação 2 abaixo:

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOCF \times F \times 16/12$$

Equação 2: Potencial de geração de metano dos resíduos.

Onde:

$L_0$ : potencial de geração de metano dos resíduos ( $m^3$  biogás/kgRSD);

MCF: fator de correção do metano (%);

DOC: fração de carbono degradável (kgC/kgRSD);

DOCF: fração de DOC dissolvida (kgC/kgRSD);

F: fração de metano no biogás;

16/12: conversão de carbono (C) para metano (CH<sub>4</sub>);

MCF = 1 (aterro bem gerenciado).

A fração de carbono degradável é expressa pela equação 3:

$$DOC = 0,40A + 0,16(B + C) + 0,30D$$

Equação 3: Fração de carbono degradável.

Onde:

A: percentual de papelão e tecidos;

B+C: alimentos e outros resíduos orgânicos;

D: resíduos de madeira.

A fração de carbono degradável dissolvida é dada pela equação 4:

$$DOC_f = 0,014T + 0,28$$

Equação 4: Fração de carbono degradável dissolvida.

Onde:

T: temperatura (°C) na zona anaeróbia dos resíduos, estimada em 35° C.

A vazão de metano, em m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ano, pode ser calculada pela equação 5:

$$LFG = k \times R \times L_o \times e^{-k(x-T)}$$

Equação 5: Vazão de metano.

Onde:

Rx: fluxo de resíduo no ano (t/ano);

x: ano atual;

T: ano de deposição do resíduo no aterro;

k: constante de decaimento (1/ano).

Para a conversão do biogás em eletricidade, utilizou-se o fator de conversão apresentado em FEN (Fundação Ecológica Nacional), 2013: 0,84 kwh/m<sup>3</sup> de metano:

Equação 6 - Conversão do biogás em eletricidade:

$$\text{Eletricidade} = \text{fator de conversão} \left\{ \frac{\text{kwh}}{\text{m}^3} \right\} \times \text{quantidade de metano gerado} \left\{ \frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \right\}$$

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Verifica-se, na tabela 2, que a concentração de metano emitido de forma espontânea pelos resíduos aterrados na CTR/MA é em média 45,5%, estando, segundo Coelho 2011, dentro da média de 40 a 60% de liberação de metano dos resíduos orgânicos que se encontram armazenados nos aterros sanitários.

**Tabela 2** – Concentração de metano no ponto de dreno de gás da CTR/MA

Parâmetros	Período/Hora	Coleta	Concentração (% mol)	Emissão (m <sup>3</sup> /h)
Metano (CH <sub>4</sub> )	09/06/16 das 12h e	1 <sup>a</sup>	36,0	4,81
	19min às 12h e 35min	2 <sup>a</sup>	55,0	7,36
Valor Médio			45,5	6,08

Fonte: Qualitex (2016)

Se os resíduos orgânicos ao invés de serem aterrados passarem por uma Usina de Tratamento Biológico Mecânico (Usina de TMB), podem atingir percentual de até 75% de liberação de metano, segundo Silva et al. (2020).

Segundo Konrad et al. (2016) realizando monitoramento no Sistema Automatizado de Medição de Biogás (SAMB), obtivera-se como resultado do ensaio média de produção de metano de 60%, chegando a atingir um percentual máximo de 75%. Estes resultados demonstram a importância de utilizar a biodigestão anaeróbia como uma alternativa de destinação destes resíduos, pois além do ganho com o tratamento dos resíduos é possível obter um gás com alto teor calorífico que pode ser aproveitado como energia térmica, elétrica ou combustível veicular.

#### 4.1 Composição gravimétrica dos resíduos de Maceió, Alagoas

As tabelas 3 e 4, apresentam os resultados da composição gravimétrica de oito regiões administrativas do município de Maceió. A análise dividiu-se em duas fases para possibilitar a observação da influência da sazonalidade nas propriedades dos resíduos, comparando dois períodos com características climáticas distintas: época de chuvas e época de seca.

Pode-se verificar, através dos dados das tabelas 3 e 4, que se os resíduos orgânicos e os materiais recicláveis armazenados das valas na CTR/MA, deixassem de ser aterrados e passassem a ser reaproveitados nos processos de reciclagem e digestão anaeróbica de uma Usina de Tratamento Mecânico Biológico (TMB), além de gerarem biogás, deixariam de ocupar um espaço significativo nas valas do aterro sanitário.

**Tabela 3** - Composição gravimétrica nas RAs de Maceió em junho, julho e agosto de 2017

Material	RA-01	RA-02	RA-03	RA-04	RA-05	RA-06	RA-07	RA-08	Média
Papel	6,00%	0,50%	3,00%	1,50%	2,00%	4,50%	4,00%	5,50%	3,38%
Papelão	4,00%	4,50%	4,10%	4,00%	1,50%	3,50%	8,00%	2,50%	4,01%
Madeira			1,10%		0,50%	4,70%	0,75%	5,00%	2,41%
Trapos	2,80%	13,80%	3,40%	2,70%	2,00%	4,10%	2,35%	2,60%	4,22%
Couros				0,30%	0,30%	0,20%	0,20%	0,20%	0,24%
Borracha			3,50%	1,20%		0,30%	2,00%	0,30%	1,46%
Plástico Duro	2,00%	2,50%	2,90%	2,00%	0,50%	2,00%	3,50%	2,50%	2,24%
Plástico Mole	8,00%	2,90%	7,50%	11,00%	4,50%	8,00%	4,50%	1,35%	5,97%
Latas de alumínio						0,10%			0,10%
Metais Ferrosos	1,25%	0,60%	3,00%	0,30%	1,50%	0,40%	0,25%	0,60%	0,99%

Metais não ferrosos	0,20%	0,32%	0,50%	0,30%	1,50%	0,90%	0,30%	2,50%	0,82%
Vidro		0,63%	0,50%		2,00%	0,60%	0,20%	1,25%	0,86%
Terras e Similares	0,90%	0,80%			4,10%	0,30%	0,50%	0,50%	1,18%
Fraldas	3,00%	1,50%	14,50%	8,00%	6,10%	9,00%	1,00%	2,50%	5,70%
Papel Higiênico e absorvente	0,20%	0,20%	0,10%	0,30%	0,10%	0,70%	0,15%	0,40%	0,27%
<b>Matéria Orgânica</b>	<b>71,65%</b>	<b>71,75%</b>	<b>55,90%</b>	<b>68,40%</b>	<b>73,40%</b>	<b>60,70%</b>	<b>72,30%</b>	<b>72,30%</b>	<b>68,30%</b>
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Fonte: Silva (2020)

**Tabela 4** - Composição gravimétrica nas RAs de Maceió em novembro, dezembro de 2017 e janeiro 2018

Material	RA-01	RA-02	RA-03	RA-04	RA-05	RA-06	RA-07	RA-08	Média
Papel	4,50%	3,80%	4,50%	5,30%	6,90%	0,50%	6,50%	5,50%	4,69%
Papelão	5,60%	3,90%	5,50%	7,80%	6,50%	4,50%	6,00%	3,50%	5,41%
Madeira	0,10%	2,00%		0,20%	0,25%	0,50%	0,60%		0,61%
Trapos	3,80%	4,10%	7,50%	4,10%	3,90%	10,80%	3,75%	2,30%	5,03%
Couros	0,20%	0,20%	0,10%	0,30%	0,20%	1,00%	0,25%	0,50%	0,34%
Borracha	0,30%	0,10%	0,30%	0,50%	0,25%	0,20%	1,00%	0,60%	0,41%
Plástico Duro	2,10%	4,05%	6,20%	4,20%	3,70%	4,50%	4,90%	3,00%	4,08%
Plástico Mole	3,30%	6,92%	7,70%	5,40%	5,80%	6,45%	5,90%	1,95%	5,43%
Latas de alumínio	0,25%	0,13%	0,10%	0,10%	0,20%			0,05%	0,14%
Metais Ferrosos	0,30%	0,80%	1,60%	1,40%	2,62%	1,25%	0,70%	2,00%	1,33%
Metais não ferrosos	0,25%	0,40%	0,20%	0,75%	0,80%	0,80%	1,20%	1,00%	0,68%
Vidro	1,25%	1,25%	1,00%	0,70%	1,08%	0,20%	0,75%	0,65%	0,86%
Terras e Similares		0,40%	0,25%		0,50%	0,30%	0,45%	0,95%	0,48%
Fraldas	4,55%	2,60%	4,50%	4,00%	2,40%	4,70%	3,05%	3,80%	3,70%
Papel Higiênico e absorvente	0,20%	0,20%	0,30%	0,85%	0,70%	0,45%	0,75%	0,75%	0,53%
<b>Matéria Orgânica</b>	<b>68,70%</b>	<b>69,30%</b>	<b>60,50%</b>	<b>63,90%</b>	<b>64,40%</b>	<b>63,70%</b>	<b>63,70%</b>	<b>74,40%</b>	<b>66,08%</b>
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Fonte: Silva (2020)

Observa-se na tabela 5, as médias dos resíduos das RAs classificados como Classe IIA e destinados ao aterro os quais foram levados em consideração na resolução das fórmulas utilizadas para avaliar o quantitativo de metano que poderá ser produzido pelos resíduos armazenados na CTR de Maceió.

**Tabela 5** – Percentual de papel, papelão, trapos, madeira e matéria orgânica das RAs de Maceió

<b>RAs</b>	<b>Jun., Jul. e Ago. de 2017</b>	<b>Nov., Dez. 2017 e Jan. 2018</b>	<b>Média</b>
Papel	3,38%	4,69%	4,03%
Papelão	4,01%	5,41%	4,71%
Trapos	4,22%	5,03%	4,62%
Madeira	2,41%	0,61%	1,51%
Matéria Orgânica	68,30%	66,60%	67,45%
Total	82,32%	82,34%	82,32%

Fonte: Autora (2023)

#### 4.2 Estimativa do potencial de geração de metano

Para estimar o potencial de geração de metano dos RSU do aterro sanitário utilizou-se a equação 2, obtendo-se um potencial de geração de metano dos resíduos de 0,07 kgCH<sub>4</sub>/kg RSD.

Como a estimativa do potencial de geração de metano calculada mostrou a quantidade de metano em kgs presente em um kg de RSD, para que a unidade pudesse ser transformada em m<sup>3</sup> de metano por tonelada de RSD, dividiu-se o valor obtido por 0,0007168 ton/m<sup>3</sup>, corresponde a densidade do metano. Obtendo-se assim, uma estimativa de produção de metano de 97,66 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tRSD.

Mostrando que em cada tonelada de RSD recebida na CTR/MA tem um potencial de geração de metano de 97,66 m<sup>3</sup>. Resultado, proporcionalmente, similar ao obtido por Coelho (2011) ao calcular a geração de metano no aterro sanitário de Palmas/TO.

#### 4.3 Estimativa da vazão de metano

Para obter a vazão de metano por ano utilizou-se a equação 5, que juntamente com a análise do fluxo de RSD no ano de 2022, 365000t/ano, e a constante de decaimento em um ano para clima tropical, 0,09, possibilitou o cálculo da vazão de metano gerada por ano na CTR/MA, 963.970,11 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano, a qual por mês equivale a 80.330,8425 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/mês. Verificando-se assim, um alto poder de geração de metano obtido através da decomposição direta dos RSD aterrados na CTR/MA, possibilitando a utilização desse gás como energia térmica, elétrica, combustível veicular ou gás de cozinha.

#### **4.4 Conversão do biogás em eletricidade**

Para a conversão do biogás em eletricidade, utilizou-se o fator de conversão apresentado por FEN, 2013, 0,84 kwh/m<sup>3</sup>. O aterro sanitário de Maceió apresentou uma capacidade de produzir, mensalmente, 67.477,91 kwh/mês de energia elétrica, a qual pode ser utilizada para beneficiar a população local, o próprio aterro sanitário ou as repartições públicas da cidade diminuindo assim, os gastos com energia elétrica para o município.

#### **4.5 Viabilidade técnica**

O biogás gerado através da decomposição dos resíduos Classe IIA destinados ao aterro sanitário de Maceió pode ser obtido por um dos dois métodos mencionados nos itens 2.10.1 e 2.10.2 da revisão de literatura. Uma vez que pode ser extraído diretamente das valas do aterro sanitário, através da decomposição direta dos RSD aterrados, ou através da instalação de uma Usina de Tratamento Mecânico Biológico. Das duas maneiras o gás produzido poderá ser destinado para caldeiras, veículos ou utilizado em motogeradores para geração de energia elétrica. Porém, apenas através da triagem dos resíduos brutos e do direcionamento da fração orgânica para um reator anaeróbio, método utilizado nas Usinas de TMB, os resíduos orgânicos deixarão de ser passivos ambientais ocupando mais de 60% da área das valas onde seriam aterrados e os produtos recicláveis podem ser destinados para reaproveitamento.

#### **4.6 Viabilidade econômica**

O consumo por residência no nordeste do Brasil gira em torno de 125,2 kWh/mês (EPE, 2019). A energia elétrica que poderá ser produzida pelo aterro sanitário de Maceió é 67.477,91 kwh/mês, o que equivale ao consumo mensal de 539 residências, podendo beneficiar em torno de 1614 pessoas. Para estimar a economia financeira que o município de Maceió poderá ter utilizando do biogás do aterro sanitário como fonte geradora de energia elétrica, utilizou-se o valor do kWh apresentado pela Equatorial, R\$ 0,75 kWh no mês de março de 2023. Onde pôde-se constatar a

possibilidade de haver uma redução de custos em torno de R\$ 607.301,16 por ano para o município de Maceió.

O aterro de Maceió recebe diariamente cerca de 1000 toneladas de resíduos domiciliares por dia, desses 670 kg são compostos por resíduos orgânicos. Deixar de depositar esses resíduos nas valas e passar a aproveitá-los no processo de biodigestão, aumentará em 67% o tempo de vida útil do aterro sanitário, ou seja, 13 anos, e reduzirá o custo mensal com a destinação nesses resíduos.

Segundo os responsáveis pelo aterro sanitário de Maceió, o custo com destinação por tonelada dos resíduos Classe IIA é R\$84,00, o que equivale a um gasto de R\$ 84.000,00 por dia. Instalando uma Usina de Tratamento Mecânico Biológico na CTR/MA e destinando a fração orgânica para um biodigestor, o município deixará de gastar por dia R\$ 56.280,00. O que equivale a R\$ 20.260.800,00 por ano.

Através do processo de triagem, realizado na Usina de Tratamento Mecânico Biológico, os resíduos passíveis de reciclagem, também deixarão de ser aterrados e passarão a ser destinados para reciclagem, diminuindo os custos com aterramento e a utilização das valas.

É importante destacar que existem impactos positivos também para a empresa operadora do aterro sanitário, relacionados à ampliação do horizonte operacional do negócio, no qual as receitas não são apenas diluídas em maior espaço de tempo, mas acompanham a valorização gradual deste serviço, que tende, invariavelmente, a ser positiva face à menor disponibilidade de áreas e o aumento crescente dos custos de novos contratos. Esta situação tende a mudar a visão de negócio neste setor, que se baseia na prospecção de receitas por tonelada recebida – situação que o faz desejar apenas ampliar a quantidade de resíduos aterrada (BRASIL, 2017).

Ao todo, o município poderá deixar de gastar anualmente em torno de R\$ 20.868.101,00, sendo R\$ 607.301,16 através do aproveitamento do biogás em geração de energia elétrica e R\$ 20.260.800,00 deixando de armazenar os resíduos orgânicos nas valas e destinando-os para a Usina de Tratamento Mecânico Biológico.

Com o uso do biodigestor, além da redução de custos com eletricidade e aterramento dos resíduos, agrega-se valor a estes, podendo comercializá-los como material digerido, os

biofertilizantes, além de possibilitar a participação no comércio de créditos de carbono, devido à utilização do metano gerado, deixando de lança-los na atmosfera.

#### **4.7 Benefícios ambientais**

A adoção de soluções tecnológicas para o tratamento das frações reaproveitáveis dos RSU (Resíduos Sólidos Urbanos), utilizando a separação dos recicláveis e a metanização da fração orgânica, tem como principal benefício a adequação legal à PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos), que proíbe o aterramento integral dos resíduos e estimula ações que visam o reaproveitamento dos materiais e seus potenciais energéticos.

Sendo instalada na CTR/MA uma Usina de TMB, na qual serão tratados e valorizados energeticamente os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), além de está atendendo à PNRS, a gestão integrada do RSU gera impactos positivos nas esferas ambiental, econômica e social. Os benefícios do projeto transcendem aqueles gerados diretamente aos agentes envolvidos e de cunho estritamente financeiro de curto e médio prazo, e que tais aspectos devem ser considerados como fatores positivos adicionais na análise de viabilidade de um projeto desta natureza (BRASIL, 2017). A principal vantagem do enquadramento legal é a redução dos passivos ambientais e a melhoria da saúde pública, que afeta diretamente a sociedade.

Como benefícios adicionais de uma iniciativa de gestão integrada de resíduos visando à redução dos materiais destinados ao aterramento, podem-se mencionar os seguintes fatores positivos:

- Redução na demanda de frota para transporte dos rejeitos até a disposição final, reduzindo a utilização de combustível;
- Menor demanda de espaço nas valas, com aumento da vida útil total do aterro;
- Maior segurança operacional devido a ganhos de estabilidade geológica, com redução de riscos de deslizamentos e explosões, devido à menor presença de umidade da matéria orgânica e, conseqüentemente, menor formação de biogás;
- Redução do risco de poluição ambiental relacionada a vazamentos de chorume e contaminação de solo e corpos hídricos;

- Redução da liberação de metano para a atmosfera, em torno de 963.970,08 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano;
- Melhora da salubridade ambiental da área, com redução de atração de vetores e doenças associadas.

O custo ambiental evitado na redução da extração de recursos naturais, através da reciclagem dos materiais, implica na redução de gastos com água, transporte e mão de obra, como verificado na tabela 7. Além disso, a preservação de áreas que seriam exploradas garante a redução do consumo de recursos naturais e aumento da vida útil das reservas de recursos não renováveis.

**Tabela 6** – Estimativa dos custos ambientais associados à redução do consumo de insumos através da reciclagem

Materiais	Custos ambientais associados à geração de energia para produção primária (R\$/t)	Custos ambientais associados à geração de energia para reciclagem (R\$/t)	Benefícios líquidos da reciclagem (R\$/t)
Aço	34,18	7,81	26,37
Alumínio	176,78	7,92	168,86
Celulose	11,98	2,26	9,72
Plástico	6,56	1,40	5,16
Vidro	23,99	20,81	3,18

Fonte: Brasil (2017)

A autonomia na geração a partir do biogás de RSU é possível, devido à garantia de continuidade de recebimento desses resíduos durante todo o ano. Isso favorece a seguridade e a estabilidade no fornecimento de energia das usinas de TMB, sendo um diferencial entre outras fontes, como a energia hidrelétrica e eólica as quais são diretamente afetadas com a redução de capacidade, devido a alterações climáticas (BRASIL, 2017).

Portanto, os recursos direta ou indiretamente envolvidos devem ser levados em conta, pois sua redução se mostra como um expressivo serviço ambiental com reflexos estratégicos consolidados no custo evitado dos empreendimentos e principalmente na transformação de gastos e agravos em geração de valor e preservação ambiental.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização deste trabalho, conclui-se que cerca e 67% dos resíduos aterrados nas valas da Central de Tratamento de Resíduos de Maceió podem ser aproveitados no processo de biodigestão, aumentando o tempo de vida útil do aterro e reduzindo o custo mensal com sua destinação. O aterro sanitário de Maceió apresentou capacidade de produzir 80.330,8425 m<sup>3</sup> de metano por mês que convertido em energia elétrica resulta em 67.477,91 kwh/mês. O potencial de geração de eletricidade equivale ao consumo mensal de 539 residências o que poderá beneficiar em torno de 1614 pessoas.

Ao todo, o município poderá deixar de gastar anualmente R\$ 20.868.101,00, sendo R\$ 607.301,16 através do aproveitamento do biogás em geração de energia elétrica e R\$ 20.260.800,00 deixando de armazenar os resíduos Classe IIA nas valas e destinando-os para a Usina de Tratamento Mecânico Biológico.

Sugere-se que seja realizada uma análise mais aprofundada da viabilidade econômica, avaliando os custos da construção de uma Usina de TMB na Central de Tratamento de Resíduos de Maceió, sendo incontestável a viabilidade ambiental, dada a redução do potencial poluidor dos resíduos: diminuindo o risco de vazamentos de chorume, fonte de contaminação do solo e corpos hídricos; reduzindo em torno de 963.970,08 m<sup>3</sup> a liberação de metano ao ano para a atmosfera; e melhorando a salubridade da área, com a diminuição de atração de vetores e doenças associadas.

Espera-se que a Prefeitura de Maceió analise o projeto e o inclua na sua programação de investimentos para melhoria da infraestrutura sanitária e ambiental do município. Tornando-se um caso de sucesso e servindo de modelo para outras cidades do país, deixando de queimar nos *flares* da Central de Tratamento de Resíduos de Maceió os gases gerados no processo de aterramento dos resíduos, provocando danos ambientais, e passem a reaproveitá-los, contribuindo assim, para o aumento da utilização da biomassa na matriz energética do brasileiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. cap. 2.4, p.26-27. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>> Acesso em: 10 de jan. 2023.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. cap.2.2 a 2.4, p.16-21. Disponível em: < <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2014/> > Acesso em: 15 de mar. 2020.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. cap.1, p.16. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>> Acesso em: 20 de mar. 2022.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2014**. cap.4, p.59. Disponível em: < <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2014/> > Acesso em: 15 de mar. 2020.

AGUIAR, A. O.; PEDOTT, J. G. J. Biogás em Aterros Sanitários: Comparando a Geração estimada com a quantidade verificada em Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. **HOLOS**, v. 4, n. 1715, p. 2-17, 2014. ISSN 1807-1600, 2014. Disponível em: < <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1715287211142> >. Acesso em: 17 de mar. 2020.

ARAÚJO, L.G.S. et al. . Temporal analysis of environmental parameters of the leachate from the landfill in Maceió-AL, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 9, n.7, p. 1-23, 2020. ISSN 2525-3409. Disponível em: < <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4435>>. Acesso em: 30 de mar. 2020.

DE ALMEIDA, L. I. J. **Potencial de produção de biogás e energia elétrica a partir da remoção da matéria orgânica oriundo de tratamento de esgotamento sanitário na ETE Norte**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016. Disponível em: < <https://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/271>>. Acesso em: 17 de mar. 2022.

BARROS, T. F. **Geração de energia elétrica com biogás gerado em aterro sanitário** – Estudo de viabilidade técnica e econômica. 2013. 53 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, Porto Alegre, RS, 2013. Disponível em: < <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/108487> >. Acesso em: 20 de mar. 2020.

BELLO, P. F. DA S.; COELHO, S. L. Captação de biogás em aterro sanitário para reutilização sustentável. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**. São Paulo, SP,

v.8, n. 6, p. 1-13. 2022. Disponível em: < <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/6063>>. Acesso em: 10 de fev. 2023.

BISSCHOPS, I.; SPANJERS, H.; SCHUMAN, E. **Development of decentralised anaerobic digestion systems for application in the UK Phase 1** - Final report Date: Wageningen, 2009. Disponível em: < <http://www.leaf-water.org> >. Acesso em 22 de fev. de 2020.

BRASIL, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Dados da cidade de Maceió**, 2019. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/maceio.html> >. Acesso em: 20 de mar. 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, 2012. Disponível em: < [https://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos\\_diversos\\_do\\_portal/PNRS\\_Revisao\\_Decreto\\_280812.pdf](https://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf) >. Acesso em 01 de fev. de 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Gestão de Resíduos Orgânicos**. Brasília, DF. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gest%C3%A3o-de-res%C3%ADuos-org%C3%A2nicos.html> >. Acesso em: 15 de fev. 2020.

BRASIL. Ministério de Desenvolvimento Regional – **PROBIOGÁS**, Brasília, DF. 2017. Viabilidade econômica de projetos de valorização integrada de resíduos sólidos urbanos com produção de biogás. Disponível em: < <https://www.mdr.gov.br/saneamento/probiogas> >. Acesso em: 10 de fev. 2020.

BROWNE, J. **Biomethane production from food waste and organic residues**. Thesis (Doctorate in Philosophy) - University College Cork, School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering & Environmental Research Institute, Ireland, 2014. 228 f. Disponível em: < [https://cora.ucc.ie/bitstream/handle/10468/1362/BrowneJD\\_PhD2014.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://cora.ucc.ie/bitstream/handle/10468/1362/BrowneJD_PhD2014.pdf?sequence=4&isAllowed=y) >. Acesso em: 04 de fev. 2020.

BNS. **BIOGÁS: o aproveitamento energético do gás metano gerado em aterros sanitários**. Disponível em: < <https://meuartigo.brasilecola.uol.com.br/biologia/biogas-aproveitamento-energico-gas-metano-gerado-aterros-sanitarios.htm> >. Acesso em: 01 de fev. 2020.

BOND, T.; TEMPLETON, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, n. 4, p. 347–354, Dec. 2011. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/257434420\\_History\\_and\\_future\\_of\\_domestic\\_biogas\\_plants\\_in\\_the\\_developing\\_world](https://www.researchgate.net/publication/257434420_History_and_future_of_domestic_biogas_plants_in_the_developing_world) >. Acesso em: 05 de fev. 2020.

CAMAROTTO, J.A. **Projeto de Unidades Produtivas**: Apostila. Universidade Federal de São

Carlos, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Engenharia de Produção, São Carlos, SP, 2006. Disponível em: < <https://document.onl/download/link/apostila-projeto-fabrica> >. Acesso em: 30 de mar. 2020.

CARRILHO, N. F. Q. **Valorização de Bio-resíduos Alimentares por Digestão Anaeróbia Descentralizada** – Caso de Estudo: Campus da FCT / UNL. 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) - Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de ciências e Tecnologias, Lisboa, Portugal, 2012. Disponível em: < <https://run.unl.pt/handle/10362/7975> >. Acesso em: 01 de fev. 2020.

CHAVES, G.G.; SOARES, R. F; SEO, M. S. E. Análise comparativa do desempenho ambiental de processos de destinação de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético. **Revista SciELO - Scientific Electronic Library Online**, São Paulo/SP. p. 1-11. 2017. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/esa/a/qxvLfvfjY6C8RWTFTw3CRZL/abstract/?format=html&lang=pt> >. Acesso em: 01 de fev. 2020.

COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. B.; GUILARDI, A.; KARNIOL, M. **Atlas de Bioenergia do Brasil**. Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), 2008. Disponível em: < [http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/eletrificacao\\_rural/livro\\_atlas\\_de\\_bioenergia\\_2008.pdf](http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/eletrificacao_rural/livro_atlas_de_bioenergia_2008.pdf) >. Acesso em: 04 de fev. 2020.

COELHO, T. C.; ALENCAR, R.; DE OLIVEIRA, R. M. S. Estimativa da produção teórica do metano gerado no aterro sanitário de Palmas - TO. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, V. 07, N. 12, 2011. Disponível em: < [https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum\\_ambiental/article/view/214](https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/214) >. Acesso em: 20 de fev. 2023.

COSTA, S.; BARROS, S. L. P.; FALCÃO, V. A Utilização energética do biogás produzido em aterros sanitários. **Sistema Integrado de Publicações Eletrônicas da Faculdade Araguaia – SIPE**, Goiânia, v. 5. n. 1. p. 326-332, 2014. ISSN 2238-6378. Disponível em: < <https://sipe.uniaraguaia.edu.br/index.php/index/search/search?simpleQuery=Utiliza%C3%A7%C3%A3o+energ%C3%A9tica+do+biog%C3%A1s+produzido+em+aterros+sanit%C3%A1rios&searchField=query> >. Acesso em: 20 de fev. 2023.

CRESPO, E. DE J. M. **Digestão Anaeróbia de resíduos agroalimentares**: Reutilização das frações líquidas e sólidas (state-of-art). 112 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) - Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de ciências e Tecnologias, Lisboa, Portugal, 2013. Disponível em: < [https://run.unl.pt/bitstream/10362/11101/1/Crespo\\_2013.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/11101/1/Crespo_2013.pdf) >. Acesso em: 20 de mar. 2020.

FEITOSA, S. A.; SILVA, F. C.; SILVA, F. G.; SILVA, M. R. Análise da produção e aproveitamento energético do biogás no aterro sanitário da cidade de porto velho-Ro. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, 2010, Ilhéus, Brazil. **Anais...** Ilhéus, Brasil, 2010.

FEAM - **Fundação Estadual do Meio Ambiente**. 2019. Disponível em: <<http://www.feam.br/residuos-solidos>>. Acesso em: 07 de agos. 2019.

FEN - **Fundação Ecológica Nacional. Biogás**. 2013. Disponível em: <<http://fen.org.br/wpcontent/uploads/2013/05/Fontes-Alternativas-de-Energia.pdf>>. Acesso em: 07 de nov. 2020.

FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5ª ed., Gülzow, DE, 2010. Disponível em: <[http://web-resol.org/cartilhas/giz\\_-\\_guia\\_pratico\\_do\\_biogas\\_final.pdf](http://web-resol.org/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf)>. Acesso em: 10 de mar. 2020.

FERREIRA, C. M., et. al. Biodigestor para o Gás do Lixo Orgânico. **e-xacta**, Belo Horizonte, MG. v. 4, n. 2, p. 5-1, 2011. Edição Especial Interdisciplinaridade, UniBH. Disponível em: <[www.unibh.br/revistas/exacta/](http://www.unibh.br/revistas/exacta/)>. Acesso em: 22 de fev. 2020.

FRIAS, J. F. **Proposta de um Biodigestor para geração de Energia Elétrica do restaurante universitário – Campus A.C. Simões**. 2016. 66 f. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) - Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Rio Largo, AL, 2016. Disponível em: <<https://ceca.ufal.br/pt-br/pos-graduacao/energia-da-biomassa/documentos/dissertacoes-ppgeb/dissertacoes-arquivos/JESSICA%20FRANCYNE%20FRIAS.pdf>>. Acesso em: 10 de jan. 2020.

GOMES, J. N. C. **Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do Câmpus Pampulha da UFMG**. 2014. 113 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG, 2014. Disponível em: <[https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9QEGLS/1/disserta\\_\\_o.j\\_lianunes.entregue\\_ao\\_desa.24.10.2014.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9QEGLS/1/disserta__o.j_lianunes.entregue_ao_desa.24.10.2014.pdf)>. Acesso em: 20 de mar. 2020.

KAELSSON, T. et. al. **Manual Básico de Biogás** 1.ed. Lajeado, RS: UNIVATES, 2014. Disponível em: <[https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf\\_71.pdf](https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf)>. Acesso em: 8 de jan. 2020.

LORA, E. E. S; SOLOMON, K. R. Análise comparativa da utilização da biomassa com tecnologias convencionais de geração aplicando a eficiência ecológica. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas, SP. **Anais...** Campinas, SP, 2004.

MACEDO, L. V; JOHNSTON, G; CORDARO, V. M; PÉCOR, V; TOTTI, P; BARBI, F; KRANS, PATRÍCIA; NOJIRI, E. **Manual para aproveitamento do biogás**. Volume I – Aterros Sanitários, 2009. Disponível em: <[http://www.resol.com.br/cartilha12/manual\\_iclei\\_brazil.pdf](http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf)> Acesso em: 10 jun. 2021.

SEDET - Secretaria Municipal de Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente (). **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Maceió/AL**. Maceió, AL, 2017. Disponível em: < <http://www.sedet.maceio.al.gov.br/servicos/pmsb/pdf/pmgirs/pmgirs2.pdf> >. Acesso em: 04 fev. 2020.

MALINOWSKY, C. et. al. A Avaliação da Produção de Metano na Co-Digestão Anaeróbica de Resíduos Sólidos Orgânicos e Resíduos de Jardinagem. In: 1º CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 2018, Gramado. **Anais...** Bauru, IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2018.

MATA-ALVAREZ, J. **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. Cornwall, UK: IWA Publishing, 2003. Disponível em: < [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=BBxRYaSaapQC&oi=fnd&pg=PA1&dq=MATA-ALVAREZ,+J.+et+al.+Biomethanization+of+the+organic+fraction+of+municipal+solid+wastes.+Cornwall,&ots=79bBjDedL\\_&sig=uEFbFTNgnY3Z3HU9\\_7jfStfCwAQ#v=onepage&q&f=true](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=BBxRYaSaapQC&oi=fnd&pg=PA1&dq=MATA-ALVAREZ,+J.+et+al.+Biomethanization+of+the+organic+fraction+of+municipal+solid+wastes.+Cornwall,&ots=79bBjDedL_&sig=uEFbFTNgnY3Z3HU9_7jfStfCwAQ#v=onepage&q&f=true) >. Acesso em: 20 fev. 2020.

MELO, R. A.; GRASSI, R. **Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário do município de Francisco Beltrão – PR**. 2014. 78 f. Monografia (Trabalho Final de Curso) do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão – PR, 2014.

MONTAGNA, T. B. **Biogás produzido em aterro sanitário como fonte de energia**. 2013. 53 f. Monografia (Trabalho Final de Curso) – União de Ensino do Sudoeste do Paraná. Dois Vizinhos - Paraná, 2013. Disponível em: < [https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/biogas\\_produzido\\_em\\_aterro\\_sanitario\\_com\\_o\\_fonte\\_de\\_energia.pdf](https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/biogas_produzido_em_aterro_sanitario_com_o_fonte_de_energia.pdf) >. Acesso em: 10 abr. 2020.

NAZARO, M. S. **Desenvolvimento de um biodigestor residencial para tratamento dos resíduos sólidos orgânicos**. Dissertação (Graduação em Engenheiro Sanitarista e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental, Florianópolis, Santa Catarina, 2015. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/166781/ARTIGO.pdf?sequence=2> >. Acesso em: 22 fev. 2020.

ÖNDER, E. D. **Biogas Production from Household Wastes: A Quantitative Feasibility Study for Student Apartments in Albano**. 2013. 54 f. Dissertation (Graduation in Energy and Environment) – KTH Royal Institute of Technology, Stochholm, SWE, 2013. Disponível em: < <https://pdfs.semanticscholar.org/52e8/e9d2c3e7bfd7b08b82b74ac89981bf8df081.pdf> >. Acesso em: 02 de mar. 2020.

PECORA, T., et. al. **Biogás de Aterro Sanitário para Iluminação a Gás e Geração de Energia Elétrica**. In: XVIII SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008. Olinda. **Anais...** Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), 2006.

QUETIZALLI, A. et al. Power generation with biogás from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 30, n.??, p. 412-419, 2014. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113007132> >. Acesso em: 07 de mar. 2020.

REICHERT, G. A. Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23. Campo Grande, MS. **Anais...** Campo Grande, MS: ABES, 18 a 23 de set. 2005. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2005/12/01/aplicacao-da-digestao-anaerobia-de-residuos-solidos-urbanos/> >. Acesso em: 26 de fev.2020.

RIGHI, A. V.; PEDROSO, N. H. Alternativas de Obtenção de Energia Limpa: Atualidade e Perspectivas. In: FÓRUM INTERNACIONAL ECOINOVAR, 5; CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO, 1., Santa Maria, RS, 2016. **Anais ...** Santa Maria, RS: CISI, 9 a 12 ago. 2016. Disponível em: < <http://docplayer.com.br/32396774-Alternativas-de-obtencao-de-energia-limpa-atualidade-e-perspectivas-alternatives-to-obtain-clean-energy-present-and-perspectives.html> >. Acesso em: 10 de mar. 2020.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to Biomethane, Biomass & Bioenergy**, v. 35, n.5, p. 1633-1645, 2011. Disponível em: < [https://www.springer.com/journal/13399?gclid=Cj0KCQjwuLShBhC\\_ARIsAFod4fLIKAWWCxO\\_Wa8AIDE7zQpUxjG\\_BZWxGxM9r\\_92Cpf5ThnWlx5Y-TMaAv6tEALw\\_wcB](https://www.springer.com/journal/13399?gclid=Cj0KCQjwuLShBhC_ARIsAFod4fLIKAWWCxO_Wa8AIDE7zQpUxjG_BZWxGxM9r_92Cpf5ThnWlx5Y-TMaAv6tEALw_wcB) >. Acesso em: 14 de mai. 2022.

RODRIGUES, A. A. L. DE S. **Co-digestão anaeróbia de resíduos de natureza orgânica**. 2005. 164 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos) - Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Aveiro, PT, 2005. Disponível em: < <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/537/1/2007001234.pdf> >. Acesso em: 15 de mar. 2020.

ROCHA, C. M. **Proposta de implementação de um biodigestor anaeróbico de resíduos alimentares**. 2016. 161 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Juiz de Fora, 2016. Disponível em: < <https://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2014/02/TCC-camila-final-pdf.pdf> >. Acesso em 12 de fev. 2020.

SILVA, C. O.; KONRAD, O.; CALLADO, N. H.; ARAUJO, L. G. S.; HASAN, C. Resíduos sólidos urbanos de Maceió/AL: análise da composição gravimétrica sob influências sazonais. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.3, p.426-439, 2020. Disponível em: <<http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.003.0033>>. Acesso em 1 de fev. 2023.

SILVA, C. O.; KONRAD, O.; CALLADO, N. H.; MARDER, M.; ARAUJO, L. G. S.. Resíduos sólidos orgânicos domésticos como substrato potencial para produção de biogás. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.2, p.204-212, 2020. Disponível em: <<http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.002.0022>>. Acesso em 10 de fev. 2023.

VICTORIANO, A. et. al. Biotecnologia e Sustentabilidade: Potencial de digestão anaeróbia na redução de resíduos, na produção de energia e de biofertilizantes. **Journal of Social, Technological and Environmental Science**. v. 5 n. 1, p.1-20, 2016. ISSN 2238-8869. Disponível em: <<http://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/article/view/1620>>. Acesso em 14 de fev. 2020.

VICTORIANO, A. **Potencial da digestão anaeróbica na gestão de resíduos e produção de energia renovável** - estudo de caso. 2017. 154 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, DF. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/31482>>. Acesso em: 02 de mar. 2020.

ZAMBON, M. M.; LUNA, M. M. M. Resíduos Orgânicos Urbanos: Um olhar sobre Florianópolis. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE - ENGEMA, 18, São Paulo, SP, 2016. **Anais...** São Paulo, SP: FEA/USP, 28 a 29 nov. 2016. Disponível em: <<http://engemasp.submissao.com.br/18/anais/arquivos/167.pdf>>. Acesso em: 20 mar.2020.

ZHANG, C. et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. , v. 38, p. 383–392, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114003633>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

## APÊNDICE



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
MESTRADO EM ENERGIA DA BIOMASSA**



Questionário objetivando obter dados para avaliar a viabilidade técnica, econômica e os benefícios ambientais da implantação de um sistema de aproveitamento energético do biogás na Central de Tratamento de Resíduos de Maceió.

**Pesquisador (a):** Mariana Bezerra Gayoso Mendes

**Instituição de Ensino:** Universidade Federal de Alagoas

**Cursando:** Mestrado em Energia da Biomassa

**Orientador (a):** Profa. Dra. Andréa de Vasconcelos Freitas Pinto

**Entrevistado (a):**

**Cargo:**

**Local:** Central de Tratamento de Resíduos de Maceió.

**Endereço:** Unnamed Road - Benedito Bentes

### QUESTIONÁRIO

1. Qual a quantidade média de resíduos recebidos diariamente?
2. Quantos por cento desses resíduos são orgânicos?
3. Quais são as características desses resíduos? Percentual de papelão, tecidos, resíduos de madeira, alimentos e outros resíduos orgânicos.
4. Há alguma separação dos resíduos após o seu recebimento?

Em caso afirmativo:

- 4.1 Como os mesmos são armazenados após separados?
- 4.2 Há algum tratamento desses resíduos?
- 4.3 Qual a sua destinação final?
5. Há algum pré-tratamento dos resíduos antes deles serem armazenados nas valas?

6. Há quantas valas de cada tipo de resíduo?
7. Qual a quantidade de resíduos armazenados em cada vala?
8. Qual o ph dentro das valas?
9. Qual a temperatura dentro das valas?
10. Qual o índice de umidade dentro das valas?
11. Qual o tempo de decomposição dos resíduos armazenados nas valas?
12. Qual a quantidade de resíduos recebido anualmente desde a inauguração da CTR?
13. Quais são as características dos gases queimados nos *flares*?
14. Qual o volume de cada gás queimado nos *flares*?
15. Até que ano está previsto o funcionamento da CTR?
16. Qual a previsão anual de recebimento de resíduos até o encerramento de suas atividades?
17. Outras observações apontadas pelo entrevistado: