



**INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS PENEDO  
CURSO TÉCNICO INTEGRADO EM MEIO AMBIENTE**

**PEDRO CARLOS MENDES DA SILVA  
THAUÃ ALBERT DA GRAÇA SANTOS**

**ATERROS SANITÁRIOS: TRATAMENTO E O APROVEITAMENTO DO BIOGÁS EM  
TRÊS CAPITAIS DO NORDESTE BRASILEIRO**

**PENEDO, AL  
2021**

PEDRO CARLOS MENDES DA SILVA  
THAUÃ ALBERT DA GRAÇA SANTOS

ATERROS SANITÁRIOS: TRATAMENTO E O APROVEITAMENTO DO BIOGÁS EM  
TRÊS CAPITAIS DO NORDESTE BRASILEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Técnico de Nível Médio Integrado em Meio Ambiente do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Penedo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Técnico em Meio Ambiente.

Orientador: Pablo Pinheiro, Me.

PENEDO, AL  
2021



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**Instituto Federal de Alagoas**  
**Campus Penedo**  
**Biblioteca**

S586a

Silva, Pedro Mendes Carlos da.

Aterros sanitários: tratamento e o aproveitamento do biogás em três capitais do nordeste brasileiro / Pedro Mendes Carlos da Silva, Thauã Albert da Graça Santos. – 2021.

54f. ; il.

Orientação: Prof. Pablo Pinheiro.

Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico de Nível Médio Integrado em Meio Ambiente) – Instituto Federal de Alagoas, Campus Penedo, Penedo, 2021.

Trabalho em formato digital.

1. Aterro sanitário. 2. Biogás – Energias renováveis. 3. Resíduos Sólidos. I. Santos, Thauã Albert da Graça. II. Pinheiro, Pablo. III. Título.

CDD: 665.776

**Maria Luzia Alexandre de Oliveira**  
**Bibliotecária/Documentalista**  
**CRB-4/2159**

PEDRO CARLOS MENDES DA SILVA  
THAUÃ ALBERT DA GRAÇA SANTOS

**ATERROS SANITÁRIOS: TRATAMENTO E O APROVEITAMENTO DO BIOGÁS  
EM TRÊS CAPITAIS DO NORDESTE BRASILEIRO**

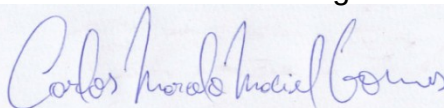
Aprovado em: 22 / 10 /2021

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Me. Pablo Pinheiro  
Instituto Federal de Alagoas



---

Prof. Me. Carlos Marcelo Maciel Gomes  
Instituto Federal de Alagoas



---

Profa. Dra. Elisângela Costa Santos  
Instituto Federal de Alagoas

## RESUMO

Os aterros sanitários são uma das soluções para a problemática da disposição final dos resíduos sólidos urbanos. A decomposição da matéria orgânica desses resíduos gera entre outros componentes, o Biogás, esse pode ser aproveitado para a produção de energia renovável. Com o crescimento na demanda de fontes de energia renováveis, novos estudos devem ser realizados para ampliar o conhecimento acerca do desenvolvimento do setor energético, especialmente no setor de Biogás. O presente estudo tem o objetivo de analisar e comparar os Sistemas de Gestão do Biogás em três aterros sanitários de capitais do Nordeste brasileiro (Aracaju, Natal e Fortaleza). A coleta dos dados foi feita por meio de um questionário virtual de dezessete perguntas, direcionado às empresas responsáveis pelo gerenciamento dos aterros. Apenas um dos aterros possui sistema de aproveitamento energético, produzindo gás natural renovável, resultados desanimadores para o cenário atual. Contudo, a viabilidade demonstrada no aterro que produz Gás Natural Renovável -GNR e distribui para a rede canalizada, é um grande incentivo para que outros aterros vislumbrem a possibilidade de implantação de sistemas semelhantes. Apesar de não produzir GNR, os demais aterros demonstraram interesse em usinas termoeletricas movidas a biogás, portanto esse cenário pode ser alterado futuramente.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. Biogás. Energia Renovável.

## **ABSTRACT**

Sanitary landfills are one of the solutions to the problem of final disposal of urban solid waste. The decomposition of organic matter in the waste generates, among other components, Biogas, this can be used for the production of renewable energy. With the growing demand for renewable energy sources, new studies must be carried out to increase knowledge about the development of the energy sector, especially in the Biogas sector. This study aims to analyze and compare the Biogas Management Systems in three sanitary landfills in Northeastern Brazilian capitals (Aracaju, Natal and Fortaleza). Data collection was carried out through a seventeen-question virtual questionnaire, aimed at companies responsible for managing the landfills. Only one of the landfills has an energy recovery system, producing renewable natural gas, disappointing results for the current scenario. However, the feasibility demonstrated in the landfill that produces Renewable Natural Gas -NGR and distributes it to the piped network, is a great incentive for other landfills to envision the possibility of implementing similar systems. Despite not producing GNR, the other landfills have shown interest in biogas-fired thermoelectric plants, so this scenario can be changed in the future.

Keywords: Sanitary Landfill. Biogas. Renewable Energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da concentração dos gases no processo de decomposição da matéria orgânica no aterro.....	23
Figura 2 - Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás.....	26
Figura 3 - Mapa Político da Região Nordeste.....	35
Figura 4 - Como você avalia o valor do custo inicial da instalação do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás?.....	42
Figura 5 - Como você avalia as dificuldades de implementação do projeto?.....	42
Figura 6 - Como você avalia o mercado da produção de energia elétrica a partir do biogás?.....	43
Figura 7 - Como você avalia o lucro mensal final do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás?.....	44
Figura 8 - Como você avalia a viabilidade do seu empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás?.....	45

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fatores que influenciam a taxa de geração do gás de aterro.....	24
Tabela 1 - Dados sobre os resíduos sólidos nas capitais do nordeste.....	36
Quadro 2 - Respostas sobre o aproveitamento do biogás nos aterros do estudo e razões para a ausência de aproveitamento.....	39
Quadro 3 - Há projetos futuros de instalação de usinas termoelétrica pra geração de energia elétrica?.....	40
Quadro 4 - Respostas sobre a vida útil do aterro e do biogás nos aterros do estudo. ....	41
Quadro 5 - Há a venda de créditos de carbono, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no empreendimento?.....	44
Quadro 6 - Respostas sobre o licenciamento ambiental nos aterros do estudo.....	46
Quadro 7 - Existe uma equipe técnica específica para o controle ambiental do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás?.....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ADEMA	Administração Estadual do Meio Ambiente de Sergipe
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASMOC	Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GEE	Gases do Efeito Estufa
GNR	Gás Natural Renovável
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IDEMA	Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RCE	Reduções Certificadas de Emissão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS.....	13
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	15
2.2	ATERRO SANITÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	17
2.3	BIOGÁS.....	19
<b>2.3.1</b>	<b>Histórico.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Composição.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Formação do biogás de aterro.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Fatores que influenciam na composição.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Filtragem.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Poder calorífico.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Riscos.....</b>	<b>25</b>
2.4	TRATAMENTO E APROVEITAMENTO DO BIOGÁS.....	26
<b>2.4.1</b>	<b>Flares.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Geração de Energia Elétrica.....</b>	<b>27</b>
2.4.2.1	Motores de combustão interna.....	28
2.4.2.2	Microturbinas a gás.....	28
<b>2.4.3</b>	<b>Geração de Energia Térmica.....</b>	<b>29</b>
2.4.3.1	Caldeiras.....	29
2.4.3.2	Tratamento de Chorume.....	29
<b>2.4.4</b>	<b>Combustível Veicular.....</b>	<b>30</b>
2.5	MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL).....	30
2.6	LICENCIAMENTO AMBIENTAL PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS.....	32
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	35
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS ATERROS.....	36
3.3	COLETA DE DADOS.....	37

3.4	TRATAMENTO DOS DADOS.....	38
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO ENVIADO AOS ATERROS PARA</b>	
	<b>COLETA DE DADOS.....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são uma das soluções ambientalmente adequadas para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos, visto que, acomoda uma maior quantidade de resíduos em um menor espaço, de modo a minimizar os possíveis danos ao meio ambiente.

Segundo o Panorama da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Sólidos (ABRELPE, 2019) o quadro nacional dos resíduos sólidos segue uma tendência de aumento dos indicadores de geração, coleta e destinação final. Os dados da ABRELPE revelam aumento de aproximadamente 1% na geração de resíduos sólidos em 2018 (cerca de 79 milhões de toneladas), houve aumento de 1,66% na coleta em comparação ao ano anterior (foi coletado 92% do que foi gerado) e houve pequeno avanço na destinação adequada, cerca de 59,5% dos resíduos coletados no Brasil tiveram a destinação para aterros sanitários.

O Nordeste foi a região com menor índice de cobertura de coleta de Resíduos sólidos Urbanos (RSU) no país: seus 1.794 municípios geraram 53.975 toneladas em 2018, das quais 81,1% foram coletadas. Dos resíduos coletados, ao menos 6 em cada 10 toneladas vão para aterros controlados e lixões (ABRELPE, 2019, p. 23).

Os resíduos sólidos urbanos, quando não são devidamente tratados, além de diversos impactos ambientais, sociais e econômicos que afetam inclusive a saúde pública, contribuem significativamente com as emissões globais de metano na atmosfera. (ICLEI, 2009, p. 7).

A matéria orgânica dos resíduos sólidos presentes nos aterros, ao ser decomposta em condições anaeróbicas geram, entre outros componentes, alguns gases. Esses gases provenientes da decomposição da matéria orgânica conhecido como biogás passou a ter grande relevância como fonte energética (SILVA, 2019). Cabe ressaltar que o biogás não é produzido somente em aterros sanitários, é produto do tratamento anaeróbico de resíduos orgânicos podendo ser encontrado em outras situações (ZANETTE, 2009).

O principal componente do biogás é o metano, encontrado em porcentagens diferentes dependendo de vários fatores. Além de ser um dos gases que contribuem com o efeito estufa (GEE), possui cerca de 21 vezes mais poder de acúmulo de calor do que o gás carbônico (MOREIRA, 2010).

Portanto é necessário impedir a liberação direta do metano na atmosfera e os aterros sanitários já são dotados de sistemas de drenagem de gases, composto de drenos verticais e horizontais, sopradores e filtros para a remoção de material particulado, tanques separadores de condensação, e posterior queima desses gases em *flares*.

Queimar o biogás produzido ajuda a diminuir as emissões e os impactos ambientais, no entanto, é desejável aproveitar a energia liberada no processo de combustão. “O objetivo de um projeto de aproveitamento energético do gás de lixo é convertê-lo em alguma forma de energia útil, como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões e combustível veicular, ou abastecer gasodutos com gás de qualidade.” (LANDIM; AZEVEDO, 2008, p. 77).

Devido ao crescimento na demanda de fontes de energia renováveis, sendo uma das alternativas o Biogás produzido naturalmente em aterros sanitários, é fundamental a ampliação e divulgação do conhecimento acerca da gestão do biogás. O biogás aparece como uma alternativa interessante, pois comparada a outras fontes renováveis é a que se encontra com uma maior facilidade de produção utilizando bactérias anaeróbicas e matéria orgânica.

Os Estados Unidos foram os pioneiros em projetos de aproveitamento de biogás gerados em aterros, implantados na década de 1970 impulsionados pela crise do petróleo da época (ENSINAS, 2003).

O tratamento e aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários no Brasil não é estudado e carece de publicações científicas a esse respeito. Desse modo, levantar dados na região nordeste do Brasil, através das contribuições dos aterros de três capitais no que se refere ao tratamento e o aproveitamento energético do biogás pode ser uma contribuição inicial para a ampliação do conhecimento acadêmico e da sociedade sobre o tema.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo analisar, comparar e compreender os sistemas de tratamento e aproveitamento do Biogás gerado nos aterros sanitários de três capitais do nordeste do Brasil, sendo elas Aracaju, Natal e Fortaleza.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Identificar a quantidade de aterros sanitários da amostragem que possuem sistemas de aproveitamento energético para o biogás produzido.

Observar o interesse, dos aterros sem usinas de aproveitamento, em implantar projetos futuros.

Analisar os motivos que dificultaram a implantação dos projetos ou que justifiquem a ausência deles nos aterros.

Observar a viabilidade do projeto afirmada pelos gestores dos aterros que possuem aproveitamento energético para o biogás.

Identificar a quantidade de aterros sanitários da amostragem que recebem Reduções Certificadas de Emissão, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Identificar a quantidade de aterros sanitários da amostragem que possuem uma equipe técnica para o controle ambiental.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

O resíduo sólido urbano é um dos grandes problemas da sociedade contemporânea, gerado nas mais diversas atividades do setor econômico, sendo agravado pelo desenvolvimento industrial, crescimento de bens de consumo e aumento da população. Segundo dados do Panorama ABRELPE (2019) o Brasil em 2018 possui uma geração de resíduos de 1,039 kg/habitante/dia.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a partir da Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR) 10004 (2004), define resíduos como sendo:

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

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, feito pela ABRELPE, em 2018 foram gerados 79 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil. Comparando com os países da América Latina, o Brasil é o campeão de geração de lixo, representando 40% do total gerado na região, 541 mil toneladas/dia, segundo a ONU (Organização das Nações Unidas) Meio Ambiente (VANGASSE, 2020).

Ainda de acordo com a ABNT, a classificação de resíduos envolve a identificação da origem do resíduo, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Para esta Norma, os resíduos são classificados em:

- **Resíduos classe I – Perigosos:** Aqueles que apresentam periculosidade, ou algumas das seguintes características, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;

- **Resíduos classe II - Não perigosos:** Não apresentam nenhuma das características acima, podem ser divididos em Classe II A – Não inertes e Classe II B – Inertes.
- **Resíduos classe II A - Não inertes:** Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- **Resíduos classe II B – Inertes:** Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007 (2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006 (2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G.

Os resíduos sólidos podem ser classificados segundo a sua origem, A NBR 8419 (1992) que dispõem sobre apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos apresenta uma série de definições relevantes:

- **Resíduos industriais perigosos:** Todos os resíduos sólidos, semi-sólidos e os líquidos não passíveis de tratamento convencional, resultantes da atividade industrial e do tratamento de seus efluentes que, por suas características, apresentam periculosidade efetiva ou potencial à saúde humana ou ao meio ambiente, requerendo cuidados especiais quanto ao acondicionamento, coleta, transporte, armazenamento, tratamento e disposição.
- **Resíduos industriais comuns:** Resíduos sólidos e semi-sólidos industriais que admitem destinação similar à dos resíduos sólidos urbanos.
- **Resíduos hospitalares sépticos:** Resíduos sólidos hospitalares que requerem condições especiais quanto ao acondicionamento, coleta, transporte e disposição final por apresentarem periculosidade real ou potencial à saúde humana.
- **Resíduos hospitalares assépticos:** Resíduos sólidos hospitalares que admitem destinação similar à dos resíduos sólidos urbanos.

- **Resíduos sólidos urbanos:** Resíduos sólidos gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos, já definidos anteriormente.

## 2.2 ATERRO SANITÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Atualmente as formas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos são em lixões, aterros controlados ou em aterros sanitários, sendo os últimos a forma mais ambientalmente adequada. De acordo com a lei nº 12.305 de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos:

Disposição final ambientalmente adequada é distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Os lixões consistem na disposição dos resíduos em local inadequado, em céu aberto, sem nenhuma preparação do solo, sem nenhum controle ambiental, oferecendo assim riscos à saúde pública. Pela falta de preparo para receber os resíduos sólidos, o lixão se tornar um local para proliferação de vetores de doenças, a decomposição dos diferentes materiais contamina o ar, pela emissão de poluentes gasosos, o solo e os lençóis freáticos devido a geração do chorume. (MONTAGNA, 2013).

De acordo com a norma da ABNT NBR 8.419 (1992), o aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é definido como:

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

O projeto de um aterro sanitário deve possuir no mínimo os seguintes sistemas necessários para a garantia da qualidade ambiental e do mínimo impacto negativo sobre a área de influência do local:

- **Sistema de drenagem de gases:** Composto por drenos verticais e horizontais que tem a função de impedir a vazão dos gases para a atmosfera, evitando assim a contaminação e possíveis danos à saúde. “Os gases devem

ser queimados imediatamente após o início de sua produção.” (LANZA; CARVALHO, 2006, p. 17).

- **Sistema de impermeabilização:** Tem como objetivo “impedir a contaminação do lençol freático e do meio natural através de infiltrações de percolados e/ou substâncias tóxicas.” (LANZA; CARVALHO, 2006, p. 16). A cobertura da base do aterro e das laterais pode ser feita utilizando solo argiloso de baixa permeabilidade e/ou com geomembrana sintética, geralmente membrana de PEAD (Polietileno de Alta Densidade). Ao utilizar a cobertura com argila deve atentar-se para a compactação adequada desse solo.
- **Sistema de drenagem de percolados:** “A drenagem pode ser realizada por uma rede de drenos internos compostos de tubos perfurados e preenchidos com brita, levando o chorume drenado para um sistema de tratamento.” (MONTAGNA, 2013, p. 29).
- **Sistema de tratamento de percolados:** Com o objetivo de atender aos padrões de lançamento de efluentes em cursos d’água e de sua capacidade de autodepuração, “capacidade apresentada por um corpo d’água de, após receber uma carga poluidora, recuperar por processos naturais de cará ter físico, químico e biológico, as suas qualidades ecológicas e sanitárias.” (LANZA; CARVALHO, 2006, p. 23). Usualmente utiliza-se lagoas de estabilização, lagoas anaeróbias e lagoas facultativas. Sendo estes:

Reservatórios de pequena profundidade, de limitados por diques de terra, construídos de forma simples, nos quais o material orgânico presente no percolado é estabilizado por processos biológicos, portanto naturais, envolvendo principalmente algas e bactérias (LANZA; CARVALHO, 2006, p. 22).

O efluente tratado antes de ser lançado em curso d’água deve ser encaminhado para uma lagoa de acumulação. Pode, também, ser encaminhados para uma Estação de Tratamento de Esgotos.

- **Sistema de drenagem superficial:** Tem como objetivo impedir a entrada de água no maciço do aterro. Composto por bermas, taludes, vias de acesso e canaletas para minimizar a infiltração de águas pluviais.
- **Sistema de monitoramento:** “O monitoramento do aterro sanitário consiste de um sistema de medições de campo e ensaios de laboratório a serem realizados sistematicamente.” (LANZA; CARVALHO, 2006, p. 26). O

monitoramento é um dos sistemas mais importantes para o pleno funcionamento do aterro pois tem o objetivo de verificar possíveis falhas ou deficiências dos sistemas do aterro para a devida aplicação de medidas corretivas. Segundo Lanza e Carvalho (2006), para avaliar a eficiência do aterro quanto à sua operação e ao controle ambiental, devem ser previstos, no mínimo: o controle das águas superficiais da área; o controle das águas subterrâneas; o monitoramento da qualidade do chorume e do efluente tratado; a caracterização dos resíduos da massa aterrada; o monitoramento geotécnico do maciço do aterro; por fim, o controle da saúde do pessoal envolvido na operação do aterro.

## 2.3 BIOGÁS

É o composto de gases em porcentagens variadas com origem em processo biológico de tratamento anaeróbico de matéria orgânica. Ocorre nos aterros sanitários devido ao confinamento e processo de decomposição dos resíduos sólidos. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2008), o biogás é definido como sendo:

Um tipo de mistura gasosa de dióxido de carbono e metano, semelhante ao gás natural – mas com menor poder calorífero, produzido naturalmente em meio anaeróbico pela ação de bactérias em matérias orgânicas, que são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez. Pode ser produzido artificialmente com o uso de um equipamento chamado biodigestor anaeróbico e utilizando dejetos animais como fonte. (*apud* MONTAGNA, 2013, p. 34).

### 2.3.1 Histórico

Os primeiros registros científicos a respeito do biogás iniciam no século XVII, o ano de 1667 é atribuído a data de descoberta do “gás dos pântanos”, entretanto, somente um século mais tarde, Alessandro Volta confirma a presença de metano no gás e a partir do início do século XIX surgem as primeiras ideias de utilizar esse gás

como combustível para sistemas de aquecimento e iluminação urbana (CLASSEN; LIER; STAMRS, 1999, *apud* PRATI, 2010).

A Índia e a China foram os pioneiros na utilização do processo de biodigestão com finalidade energética mais intensa, nas décadas de 50 e 60, contribuindo para o desenvolvimento do setor através do desenvolvimento de seus próprios modelos de biodigestores (NOGUEIRA, 1986, *apud* PRATI, 2010).

Com os países em combate durante a Segunda Guerra Mundial, o biogás se difundiu pela Europa devido à necessidade de encontrar substitutos para os derivados do petróleo. Com o término do conflito o interesse pela possível nova fonte energética foi se desgastando, mas persistiu na Índia e na China (GASPAR, 2003, *apud* PALHARES, 2008).

Com a crise do petróleo na década de 70, foi trazida para o Brasil a tecnologia da digestão anaeróbia. Na região nordeste, foram implantados vários programas de difusão dos biodigestores e a expectativa era grande, porém, os benefícios obtidos a partir do biogás e do biofertilizante não foram suficientes para dar continuidade aos programas e os resultados não foram muito satisfatórios (BOLETIM ENFOQUE, 1999, *apud* PRATI, 2010, p. 13).

A construção de um dos primeiros biodigestores do Brasil ocorreu em 1979 na Granja do Torto em Brasília. Foi um marco importante, pois se tratava de uma unidade produtora de biogás com a utilização de materiais simples e de baixo custo, que incentivou o governo a estimular a instalação de projetos em propriedades rurais através do Programa de Mobilização Energética, através do Decreto Presidencial nº 87.079, de 2 de abril de 1982 (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021).

Problemas relacionados a falta de conhecimento técnico sobre a construção e operação dos biodigestores e a ausência de equipamentos devidamente projetados ocasionavam na perda de confiança nos sistemas de produção de biogás (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021).

No início dos anos 2000 o mercado de créditos de carbono deu novo impulso para o aproveitamento do biogás devido ao incentivo de recurso para a instalação de biodigestores. Ademais, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) objetivava ampliar a geração de energia elétrica por meio de pequenas centrais hidrelétricas e das fontes eólica e biomassa (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021).

### **2.3.2 Composição**

É difícil estimar a composição exata do biogás, pois as concentrações dos gases que o compõem sofrem influência de vários fatores durante sua produção, o principal fator é a matéria orgânica presente no lixo que passará pelo processo de tratamento anaeróbio.

Normalmente, o biogás é composto por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas e oxigênio, mas dependendo das condições da matéria orgânica, pressão e temperatura durante a fermentação, o biogás pode conter de 40% a 80% de metano. (ICLEI, 2009, *apud* SANTOS, 2015, p. 21).

A composição, em especial a concentração de metano, é de relevante importância para determinar a viabilidade econômica do aproveitamento energético.

Dos gases que compõem o biogás, o gás carbônico e o gás sulfídrico devem receber atenção especial. São considerados como o principal problema na viabilização de seu armazenamento e na produção de energia, interferindo principalmente na qualidade do biogás, acarretando problemas de corrosão no sistema de condução do biogás até sua transformação como fonte de energia elétrica ou térmica, necessitando de processos de tratamento. (MAGALHÃES, 1986, *apud* PRATI, 2010, p. 18).

### 2.3.3 Formação do biogás de aterro

No período em que ocorre a decomposição dos resíduos sólidos dispostos no aterro, a formação dos gases é predominantemente gerada pelos processos microbiológicos, atuam na degradação dos resíduos as bactérias, aeróbias, anaeróbias ou facultativas a depender da quantidade do oxigênio disponível no ambiente e do andamento do processo de decomposição, e também os fungos e os protozoários, em menor proporção (MACIEL, 2003). Os microorganismos essenciais para o processo advém do próprio solo utilizado para a cobertura e impermeabilização das camadas e células do aterro.

“Embora o tratamento dos resíduos em aterros possa ser feito por digestão aeróbia, a imensa maioria dos aterros em operação têm como concepção técnica a bioestabilização anaeróbia do material orgânico” (ALCÂNTARA, 2007, p. 77). O processo de biodegradação de resíduos sólidos urbanos em aterros é dividido em cinco fases distintas, sendo 1 fase aeróbia e 4 fases anaeróbias, sem que haja uma ordem sequencial ou cronológica entre elas.

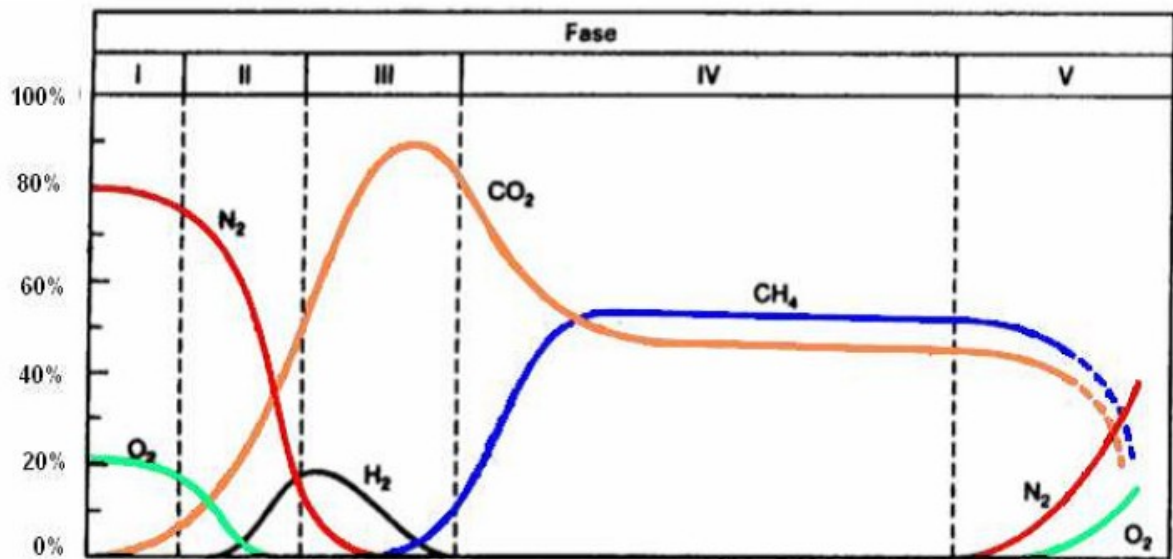
As cinco fases do processo estão listadas a seguir: (Tchobanoglous et al., 1994 *apud* ENSINAS, 2003; MOREIRA, 2010)

1. **Fase Aeróbia Inicial:** Fase de curto período de duração, estende-se até o consumo do oxigênio livre no interior das células do aterro após a execução do sistema de cobertura. “corre o processo de hidrólise sob condições aeróbia, e a principal fonte de carbono para a atividade dos microrganismos provém de açúcares solúveis.” (ALCÂNTARA, 2007, p. 77). O dióxido de carbono é o principal produto nessa fase, e o pH do lixo sai da neutralidade e decresce à medida que a decomposição anaeróbia se estabelece.
2. **Fase de Transição:** Fase de início das condições anaeróbias, é caracterizado pelo aumento da perda de oxigênio e decréscimo do pH do chorume, devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de dióxido de carbono. A queda do potencial de oxidação e a redução do resíduo, o que faz com que os microrganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em gás carbônico e metano iniciem suas atividades.
3. **Fase Ácida:** É a primeira fase puramente anaeróbia do processo. Com as reações dos microrganismos anaeróbios e facultativos, a matéria orgânica é transformada em ácidos orgânicos por reações de acidogênese, bem como o gás carbônico e hidrogênio. Essa fase é caracterizada pelo grande acúmulo de quantidades de ácidos orgânicos e dióxido de carbono, fazendo com que o pH atinja os valores mínimos de todo o processo, podendo chegar a valores inferiores a 5,0. “São características dessa fase os aumentos significativos na DQO, DBO e condutividade do percolado bem como a lixiviação de muitos nutrientes.” (ALCÂNTARA, 2007, p. 78).
4. **Fase Metanogênica:** São características dessa fase a predominância de microrganismos estritamente anaeróbios, a diminuição da presença de ácidos com a queda da população de bactérias acidogênicas e o aumento do pH devido a conversão do ácido acético e do gás hidrogênio em metano e dióxido de carbono pelas bactérias metanogênicas. As bactérias metanogênicas são divididas em metanogênicas acetoclásticas, que convertem ácido acético em metano, e as metanogênicas hidrogênotróficas, que convertem hidrogênio e dióxido de carbono em metano, sendo as primeiras mais sensíveis à mudanças no pH. (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Na ausência das metanogênicas acetoclásticas, o acetato produzido durante a biodigestão é oxidado pelas bactérias homoacetogênicas produzindo dióxido de carbono e gás hidrogênio, os quais são utilizados como substrato pelas arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, produzindo metano. (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 18).

5. **Fase de Maturação:** Fase final do processo, caracterizada pela redução da atividade biológica na célula do aterro, pela diminuição da produção de metano e dióxido de carbono e pelo aumento das concentrações de oxigênio e nitrogênio. Ocorre devido a escassez de nutrientes, a grande parte da matéria orgânica já foi convertida em biogás restando apenas os compostos de lenta degradação.

Figura 1 - Variação da concentração dos gases no processo de decomposição da matéria orgânica no aterro.



Fonte – Tchobanoglous et al. (1994) *apud* MOREIRA (2010)

A figura 1 representa a variação das concentrações dos gases componentes do biogás ao longo do processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos.

### 2.3.4 Fatores que influenciam na composição

A seguir serão apresentados alguns fatores que alteram a composição do biogás produzido nos aterros; (USEPA, 1991, *apud* ENSINAS, 2003, p. 15):

Quadro 1 - Fatores que influenciam a taxa de geração do gás de aterro.

<b>Composição do lixo</b>	Quanto maior a porcentagem de materiais biodegradáveis, maior a taxa de geração de gases. O lixo destinado aos aterros pode ter uma composição variada ao longo do ano dependendo do clima e dos hábitos de consumo da população local.
<b>Umidade do lixo</b>	Uma umidade alta (60 a 90 %) pode aumentar a geração de biogás. A construção do aterro com baixa permeabilidade para controle da formação do chorume mantém a umidade do lixo baixa e prejudica a formação de biogás.
<b>Idade do lixo</b>	A geração do biogás segue as fases de decomposição do lixo. A duração de cada fase e o tempo de produção de metano, dependem de condições específicas de cada aterro.
<b>Temperatura do aterro</b>	A produção de metano é afetada pela temperatura. A temperatura ideal para a digestão anaeróbia está entre 29 e 38°C para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70°C para as termofílicas. Abaixo de 10°C há uma queda brusca na taxa de geração do gás metano.
<b>pH do aterro</b>	O pH ótimo para a produção do metano está entre 7.0 e 7.2. Inicialmente os aterros apresentam pH ácido, que tende a aproximar-se da neutralidade.

Fonte – ENSINAS (2003)

### 2.3.5 Filtragem

O processo de filtragem se faz necessário para aumentar o poder calorífico do biogás, além disso o gás sulfídrico confere características corrosivas que afetará o maquinário. “A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente uma vez que, presentes na combustão absorvem parte da energia gerada.” (PRATI, 2010, p. 19).

Para a remoção do gás sulfídrico é recomendado dois processos distintos sendo eles a retirada através de reações com óxido de ferro ou remoção do gás sulfídrico e do dióxido de carbono por hidróxido de sódio, potássio ou cálcio. Desse modo, no primeiro caso, o processo:

Consiste em passar a mistura gasosa por uma torre com preenchimento de óxido de ferro e aparas de madeira. O gás é injetado pela base de torre e conforme vai circulando pela mesma vai perdendo o gás sulfídrico que fica retido ao reagir com o óxido de ferro. (CRAVEIRO, 1982, *apud* PRATI, 2010, p. 20).

Para este processo pode ser utilizado também o óxido de zinco, porém esse possui um custo maior. No segundo caso, o processo ocorre:

Quando o gás carbônico entra em contato com a solução de hidróxido de sódio, potássio ou cálcio, resultando na formação de bicarbonato, sendo essa formação irreversível. Se houver tempo suficiente o gás sulfídrico também será absorvido (CRAVEIRO, 1982, *apud* PRATI, 2010, p. 21).

### 2.3.6 Poder calorífico

Uma das características mais importante para a utilização do biogás com finalidades energéticas é seu poder calorífico que segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou volume de gás a pressão e temperatura constantes.

Em função das ligações químicas entre os átomos de Hidrogênio e Carbono, o metano possui um elevado potencial energético (energia química) que quando reage com oxigênio, libera grande quantidade de calor (energia térmica). É um gás de fácil combustão e por isso, nos locais onde ele é gerado, existe sempre o risco de ocorrer explosões. (ICLEI, 2009, p. 21).

O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura, variando entre 4,95 a 7,92 Kwh/m<sup>3</sup> a depender de sua concentração, o poder calorífico aumenta com o devido tratamento o biogás podendo chegar a valores próximos a 10.000 kcal/m<sup>3</sup> (COSTA, 2006, *apud* PRATI, 2010).

### 2.3.7 Riscos

Os principais componentes do Biogás como o Metano, o Dióxido de Carbono e o Sulfeto de Hidrogênio oferecerem perigo de explosão e de intoxicação. O biogás em contato com o organismo pode provocar a morte por asfixia do indivíduo, pois,

atua diluindo o oxigênio presente no corpo humano (PECORA, 2006, *apud* PRATI, 2010).

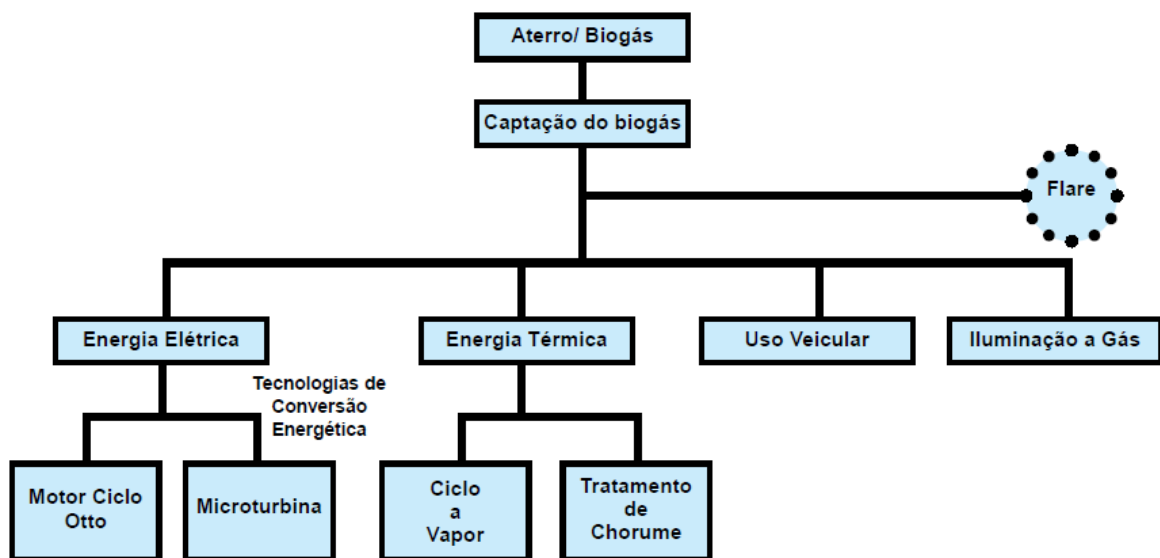
Apesar de conter metano, que é um gás inflamável, o biogás sozinho não tem propriedades explosivas. Para a formação de uma mistura explosiva, o metano e o ar devem se combinar em um determinado intervalo de concentração. Os extremos desse intervalo são os limites inferior e superior de explosividade, e o intervalo entre eles é denominado faixa explosiva. Não é possível ocorrer explosões fora da faixa explosiva. (Gomes et al., 2016, p. 91)

Portanto a queima do biogás além de proporcionar benefícios para o meio ambiente traz também a redução de riscos à saúde humana, odores desagradáveis e toxinas do ar.

## 2.4 TRATAMENTO E APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

O biogás captado no aterro sanitário após sofrer o devido tratamento poderá ser encaminhado para as usinas de aproveitamento energético com finalidade de atender determinadas demandas.

Figura 2 - Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás.



Fonte - Instituto Agir Sustentável *apud* ICLEI (2009)

Os drenos existentes no sistema de drenagem de gases poderão ser adaptados e integrados ao sistema de captação, efetuando adaptações que segundo ICLEI (2009), consiste na impermeabilização da parte superior dos drenos e na instalação de um cabeçote para a ligação com o sistema de coleta para aproveitamento energético.

As tubulações provenientes dos drenos são interligadas a pontos de regularização de fluxo ou *manifolds* e estes são interligados a uma linha principal, que conduz o biogás para os sistemas de queima em *flare* e/ou reaproveitamento energético. (ICLEI, 2009, p. 28).

Ainda segundo ICLEI (2009), após a extração do biogás a primeira etapa de tratamento ocorre através da passagem do gás por filtros para remoção de material particulado eventualmente arrastado, seguido então para tanque separador de líquidos, denominado desumidificador. Limpo de partículas sólidas e de gotículas líquidas, o biogás passa por último pelo soprador.

O biogás possui aproveitamento para atender diversas demandas energéticas, pode ser usado para geração de eletricidade, geração de calor, trabalho mecânico, ou uso direto como combustível automotivo, usado como combustível auxiliar ou como substituto de algum derivado de petróleo, e também na evaporação do chorume gerado no aterro.

A co-geração de eletricidade e energia térmica (vapor) com base no gás de lixo pode ser uma alternativa ainda melhor. Obtém-se eficiência mais alta pela disponibilização do vapor resultante do processo de geração, que pode ser usado localmente para aquecimento e refrigeração, para outras necessidades de processo, ou ainda transportado por tubo para uma indústria ou comércio próximos, obtendo um segundo rendimento para o projeto (LANDIM; AZEVEDO, 2008, p. 77).

#### 2.4.1 Flares

São dispositivos simples utilizados para a queima direta do gás gerado como o objetivo de diminuir as emissões de gases nocivos ao meio ambiente, não utilizando para a geração de energia útil. São muito utilizados na indústria petroquímica como dispositivos de segurança, permanecem acesos para absorver descontroles operacionais e despressurizar o sistema. Podem ser abertos (ou velas) ou *flares* enclausurados (com queimadores internos).

Independentemente da utilização energética escolhida para o biogás, recomenda-se a instalação de um *flare* enclausurado, especialmente para projetos destinados à obtenção de créditos de carbono. Isto porque, em caso de falha no sistema de geração de energia ou outro tipo de aproveitamento, evita-se a emissão de metano para a atmosfera e a consequente perda de créditos de carbono. (ICLEI, 2009, p. 30).

#### 2.4.2 Geração de Energia Elétrica

#### 2.4.2.1 Motores de combustão interna

São equipamentos destinados a converter a energia térmica de um combustível em energia mecânica, sendo posteriormente aproveitado para geração de energia elétrica pelo acoplamento do motor a um gerador. É a alternativa mais utilizada devido ao seu baixo custo, facilidade de operação e manutenção, além de flexibilidade de implantação do sistema (MENDES, 2005).

Os motores podem utilizar o ciclo de Otto ou a Diesel, funcionando da seguinte maneira: primeiramente a válvula de admissão permite a entrada do combustível dentro do cilindro empurrando o pistão, a válvula é fechada e ocorre a compressão da mistura dentro do cilindro seguida da combustão que empurra novamente o pistão pela expansão dos gases quentes formados na explosão, a válvula de exaustão é aberta e os gases são expulsos pelo movimento do pistão (ICLEI, 2009). Esse trabalho mecânico do pistão é utilizado para girar um eixo acoplado a um gerador elétrico.

#### 2.4.2.2 Microturbinas a gás

São versões de dimensões reduzidas de turbinas a gás, ideais para aplicação de projetos de pequeno porte, baixa vazão de biogás ou para projetos de geração de energia elétrica de potências reduzidas (MENDES, 2005).

Nas microturbinas o ar é aspirado e forçado para seu interior à alta velocidade e pressão, misturado ao combustível para, então, ser queimado na câmara de combustão. Os gases quentes resultantes da combustão são expandidos na turbina e o calor remanescente dos gases de exaustão pode ser aproveitado para aquecimento do ar de combustão (ICLEI, 2009, p. 33).

Possui vantagem pelo porte reduzido sendo de fácil transferência, além disso se adéqua à biogás de baixa qualidade operando com reduzidos teores de metano, contudo, a eficiência reduzida em comparação com motores de combustão interna e turbinas a gás maiores é uma das desvantagens apresentadas, consumindo mais por kWh produzido (USEPA, 2002, *apud* MENDES, 2005).

## 2.4.3 Geração de Energia Térmica

### 2.4.3.1 Caldeiras

Consiste no uso direto do biogás como combustível para aquecedores a gás que utilizaram o calor para produção de vapor que será utilizado em processos industriais.

Para a utilização do biogás são necessárias pequenas adaptações para adequação do equipamento às características do combustível. A vazão de gás deve ser aumentada pois o biogás possui menor quantidade de metano que o gás natural (MENDES, 2005).

A corrosão é um problema pois compostos presentes no gás comprometem componentes do sistema como pré-aquecedores de ar e tubulações, sendo necessário o revestimento com material anticorrosivo (MENDES, 2005). Ademais, é necessário manutenção regular para impedir depósitos de sílica, enxofre e cloro nos equipamentos (ICLEI, 2009).

Para melhor eficiência do aproveitamento energético do biogás recomenda-se o uso da cogeração (energia elétrica e calor) utilizando vapor resultante do processo de geração elétrica para aquecimento. Nas turbinas e motores de combustão interna a energia térmica presente nos gases de exaustão e nos fluidos de refrigeração podem ser conduzidos à caldeira para aproveitamento do calor.

### 2.4.3.2 Tratamento de Chorume

É a utilização do biogás como combustível para realizar o tratamento do chorume produzido no aterro, por meio do processo de evaporação, utilizando equipamento denominado Evaporador de Chorume. O processo permite uma

redução de até 70% do volume do lixiviado e o tratamento independe do porte do aterro podendo ser implantado em todo aterro sanitário (ICLEI, 2009).

O chorume é bombeado até o tanque de estocagem onde aguarda o seu tratamento. Em seguida, o chorume é bombeado do tanque de estocagem até o evaporador. O biogás proveniente do aterro entra no evaporador passando pelo queimador de gás, onde entra em combustão oferecendo calor suficiente para evaporar a água presente no chorume. O vapor d'água originário do processo de evaporação do chorume passa por um filtro onde são removidas impurezas e segue para o *flare*. (MENDES, 2005, p. 94).

#### 2.4.4 Combustível Veicular

Após um intenso processo de purificação do biogás, com o objetivo de remoção de alguns componentes como o dióxido de carbono e aumento do poder calorífico, o produto final é o biometano, biocombustível gasoso com elevado teor de metano com aplicações semelhantes ao do gás natural.

No processo de purificação do biogás é importante retirar o dióxido de carbono até que a porcentagem de metano fique próxima à do gás natural, para que possa ser utilizado para os mesmos fins. Segundo a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) na Portaria 128, de 28 de agosto de 2001, a porcentagem mínima de metano no gás natural para uso veicular deve ser de 86% e máxima de dióxido de carbono de 5%. (ICLEI, 2009, p. 36).

Para uso e comercialização do biogás como biometano devem ser atendidas as especificações da Resolução ANP nº 685/2017 que estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional.

## 2.5 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL)

A preocupação com as mudanças advindas do efeito estufa no globo emergiu a necessidade de ações internacionais efetivas, que resultou na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC). Este, segundo o Ministério do Meio Ambiente tem o objetivo de estabilizar as concentrações de gases

de efeito estufa na atmosfera em um nível que impeça uma interferência humana perigosa no sistema climático. Na Terceira Conferência das Partes, em 1997, foi estabelecido o Protocolo de Quioto.

O Protocolo determina o estabelecimento de compromissos por parte dos países desenvolvidos (Anexo I à Convenção) para atingir uma meta de redução média de 5,2% nas emissões de GEE (Gases do Efeito Estufa), do Anexo I, em relação ao ano de 1990, durante o período de 2008 a 2012 (CETESB, 2006, p. 90).

O protocolo tem por objetivo reduzir as emissões de Gases do Efeito Estufa dos países do anexo 1 da Convenção, países industrializados membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) além de países industrializados em processo de transição para economias de mercado (CETESB, 2006), para níveis que estabilizem o aumento da temperatura global, impedindo uma interferência perigosa no sistema climático terrestre. Ele estabelece três “mecanismos econômicos de flexibilidade” sendo um deles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo que é definido pelo artigo 12.2 do protocolo como sendo:

O objetivo do mecanismo de desenvolvimento limpo deve ser assistir às Partes não incluídas no Anexo I para que atinjam o desenvolvimento sustentável e contribuam para o objetivo final da Convenção, e assistir às Partes incluídas no Anexo I para que cumpram seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões, assumidos no art.3º.

Baseia-se no auxílio às reduções de GEE para o alcance das metas por meio do desenvolvimento de atividades de projetos nos territórios dos países não incluso no Anexo 1 da Convenção.

O MDL resolveu que nações desenvolvidas e com dificuldades de implementar medidas internas de minoração da emissão de GEE poderiam investir em projetos de igual teor em países em desenvolvimento ou adquirir destes as respectivas Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) ou créditos de carbono (LINARD; AQUINO, 2015, p. 23).

O artigo 12.3 do protocolo afirma que:

(a) As Partes não incluídas no Anexo I beneficiar-se-ão de atividades de projetos que resultem em reduções certificadas de emissões; e (b) As Partes incluídas no Anexo I podem utilizar as reduções certificadas de emissões, resultantes de tais atividades de projetos, para contribuir com o cumprimento de parte de seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões, assumidos no Artigo 3, como determinado pela Conferência das Partes na qualidade de reunião das Partes deste Protocolo.

O artigo 12.5 do protocolo de kyoto afirma que:

As reduções de emissões resultantes de cada atividade de projeto devem ser certificadas por entidades operacionais a serem designadas pela Conferência das Partes na qualidade de reunião das Partes deste Protocolo, com base em: (a) Participação voluntária aprovada por cada parte envolvida; (b) Benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo relacionados com a mitigação da mudança do clima, e (c) Reduções de emissões que sejam adicionais as que ocorreriam na ausência da atividade certificada de projeto.

A quantidade de Reduções Certificadas de Emissão (RCE) que o projeto gera é determinada pela diferença de emissões entre dois cenários, um cenário com o projeto em atividade e outro cenário na ausência do projeto MDL, este é denominado cenário de referência ou linha de base. As RCE adquiridas podem ser comercializadas por meio do mercado de carbono, que “consiste em um ambiente de troca, regulado pelo MDL, o qual permite que países com elevadas emissões de carbono comprem o ‘excedente’ das cotas de nações que produzem menos dióxido de carbono” (BRASIL, 2012, *apud* LINARD; AQUINO, 2015, p. 23).

A vantagem do MDL para os países desenvolvidos é que, para atingir as metas de redução, a obtenção de RCE com os projetos nos países em desenvolvimento apresenta um custo menor do que o custo de abatimento de redução nos próprios países com medidas de diminuição das emissões nacionais (CETESB, 2006).

Segundo CETESB (2006) o ciclo do MDL é composto por seis passos, o primeiro é a preparação do projeto, seguido pela validação, depois ocorre o registro, seguido então para a monitoração, em penúltimo vem a fase de verificação/certificação e pôr fim a fase de emissão das RCE.

O administrador de registro do MDL, sob a autoridade do Conselho Executivo, emite a quantidade devida de RCEs, descontando uma parte para cobrir gastos administrativos e outra (2% das RCEs emitidos) destinada a um Fundo de Adaptação que atenderá os países em desenvolvimento particularmente vulneráveis aos efeitos adversos da mudança do clima, de acordo com o artigo 12, parágrafo 8º do Protocolo de Quioto (CETESB, 2006, p. 97).

## 2.6 LICENCIAMENTO AMBIENTAL PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

O licenciamento ambiental é uma importante ferramenta de controle de impactos ao meio ambiente, todo empreendimento potencialmente poluidor estabelecido pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 237 (1997) é passível de licenciamento ambiental. De acordo com a Resolução CONAMA nº 237 (1997), o licenciamento ambiental é:

Procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais,

consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso.

Todo empreendimento potencialmente poluidor deve obter a Licença Prévia, concedida na fase preliminar do planejamento determinando o local e as demais informações preliminares que definem o empreendimento e comprova sua viabilidade ambiental; a Licença de Instalação, autoriza a instalação do empreendimento seguindo as condicionantes aprovadas pelo órgão competente; e a Licença de Operação, autoriza o início dos trabalhos após devidas verificações.

O órgão ambiental competente define o porte e o potencial poluidor do empreendimento, bem como estabelece, quando necessário, os estudos ambientais que deverão ser apresentados em cada etapa do processo de licenciamento ambiental (GOMES et al., 2016, p. 109).

O órgão ambiental competente pode ser de nível federal, estadual ou municipal dependendo do tipo e do porte do empreendimento. O mesmo deve estar em conformidade com uma série de Resoluções CONAMA que disciplinam o controle de poluição por fontes fixas, que formam a competência normativa para o licenciamento, além disso o processo de licenciamento varia de estado para estado conforme a legislação vigente.

Segundo a Resolução CONAMA 237/1997 o licenciamento ambiental deve seguir as seguintes etapas: definição do órgão competente; requerimento da licença ambiental pelo empreendedor, acompanhado dos documentos, projetos e estudos pertinentes; análise pelo órgão ambiental competente; solicitação de esclarecimentos e complementações pelo órgão ambiental competente; audiência pública, quando couber; solicitação de esclarecimentos e complementações pelo órgão ambiental competente; emissão do parecer técnico conclusivo e, quando couber, do parecer jurídico; por fim, deferimento ou indeferimento do pedido de licença.

Além das licenças ambientais pertinentes às atividades potencialmente poluidoras em geral, “as atividades relacionadas à produção e à utilização de biogás devem ser registradas junto ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), por meio do Cadastro Técnico Federal, que foi estabelecido pela Resolução CONAMA nº 01/88 e pela Instrução Normativa do IBAMA nº 10/13” (GOMES et al., 2016, p. 109).

Ademais, a produção do biogás a partir de resíduos sólidos ou esgotos sanitários é também sujeita a legislação atual sobre o setor de saneamento básico, sendo necessário a verificação de exigências adicionais.

No caso da utilização para a geração de energia elétrica, devem ser observadas as definições e obrigações estabelecidas na Lei nº 9.074/1995, que define o marco regulatório do setor elétrico e estabelece as formas de comercialização de energia elétrica no Sistema Integrado Nacional (SIN) (GOMES et al., 2016, p. 110).

Esta lei estabelece a figura do Produtor Independente de Energia e a figura do Autoprodutor, que permite a possibilidade de comercialização de energia elétrica por empresa privada ou pelo titular de concessão mediante autorização para comercializar seus excedentes de energia, respectivamente. Conforme a Resolução Normativa ANEEL nº 390/09, para o aproveitamento energético do biogás visando à comercialização de energia é necessário o registro de centrais geradoras de energia elétrica, para o devido acesso ao SIN, variando conforme a potência instalada.

Para a comercialização da energia há duas opções, o Ambiente de Contratação Regulado (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), neles o empreendimento que faz a geração da própria energia consumida pode vender o excedente de energia elétrica (GOMES et al., 2016). No primeiro, as distribuidoras ligadas ao SIN compram a energia por meio de leilões públicos, e no segundo, os próprios consumidores com demandas acima de 3MW podem comprar energia diretamente dos geradores. Fontes de energia como eólica, solar e biomassa, incluindo o biogás são incentivadas para consumidores com demandas energéticas na faixa de 500kW até 3MW (GOMES et al., 2016).

Caso a utilização do biogás seja para a injeção na rede de Gás Natural ou utilização/comercialização como Gás Natural Veicular, devem ser observadas as regulamentações estabelecidas pelo Ministério de Minas e Energia e pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (GOMES et al., 2016, p. 111).

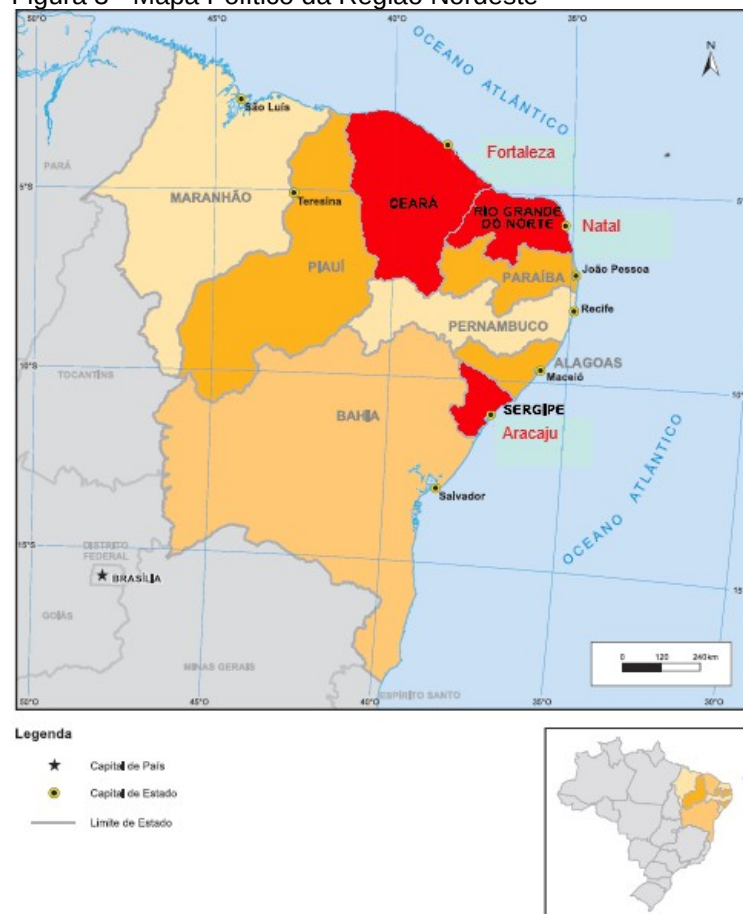
A Resolução ANP nº 08/15 define as especificações e o controle de qualidade do biometano e suas regras de uso e a Resolução ANP nº 23/12 estabelece as regras envolvidas no uso dos biocombustíveis. Em suma, é necessário para elaboração de projetos a verificação das Normas Brasileiras Regulamentadoras, sendo que não existem NBRs que tratam especificamente do tema biogás, todavia pode se adotar as normativas referentes ao gás natural.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho tem como objeto de estudo três aterros sanitários que recebem resíduos de três capitais diferentes do Nordeste Brasileiro, o Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia que recebe o lixo de Fortaleza capital do estado de Ceará, o Aterro Sanitário da Estre Unidade Rosário do Catete que recebe o lixo de Aracaju capital do estado de Sergipe, e o Aterro Sanitário Metropolitano de Natal capital do estado do Rio Grande do Norte. Nenhum dos aterros fica localizado nas capitais, encontram-se em municípios próximos.

Figura 3 - Mapa Político da Região Nordeste



Fonte - Portal de mapas do IBGE (Adaptado)

De acordo com Estudo Técnico da Gestão Municipal de Resíduos Sólidos, realizado pela Conferência Nacional de Municípios em 2015, no Nordeste a Bahia é o estado com maior número de municípios servidos por aterros sanitários, entretanto possui também o maior número de cidades a destinar seus resíduos a lixões, seguida pela Paraíba e Ceará. Alagoas liderou o ranking de estados que menos destina resíduos a lixões declaradamente, seguido de Sergipe e Maranhão. A seguir serão apresentados alguns dados relativos as capitais de cada estado do nordeste disponíveis no Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS):

Tabela 1 - Dados sobre os resíduos sólidos nas capitais do nordeste.

Estado	Capital	População total da capital	População urbana da capital	Massa coletada de resíduos públicos e domiciliares per capita em relação à população urbana	Taxa de cobertura regular do serviço de coleta de resíduos domiciliares em relação à população urbana
Alagoas	Maceió	1.018.948 hab.	1.018.272 hab.	1.04 Kg/hab/dia	99.36 %
Bahia	Salvador	2.872.347 hab.	2.871.560 hab.	0.89 Kg/hab/dia	96.68 %
Ceará	Fortaleza	2.669.342 hab.	2.669.342 hab.	1.62 Kg/hab/dia	100.00 %
Maranhão	São Luiz	1.101.884 hab.	1.040.739 hab.	1.15 Kg/hab/dia	100.00 %
Paraíba	João Pessoa	809.015 hab.	805.962 hab.	0.87 Kg/hab/dia	100.00 %
Pernambuco	Recife	1.645.727 hab.	1.645.727 hab.	1.45 Kg/hab/dia	100.00 %
Piauí	Teresina	864.845 hab.	815.271 hab.	1.49 Kg/hab/dia	99.00 %
Rio Grande do Norte	Natal	884.122 hab.	884.122 hab.	1.26 Kg/hab/dia	98.91 %
Sergipe	Aracaju	657.013 hab.	657.013 hab.	1.61 Kg/hab/dia	100.00 %

Fonte - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (Adaptado)(2019)

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ATERROS

O Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC) recebe resíduos do município de Fortaleza e Caucaia. Em 2010, completou-se o 12º ano de operação do

ASMOC; o aterro já tem 70% de sua capacidade ocupada. “Estima-se que o aterro tenha condições de operar com segurança até o ano de 2014 e no limite até o ano de 2015.”(ACFOR, 2010, apud MOREIRA, 2010, p. 33). O aterro teve uma sobrevivência, devido a vários fatores entre eles a um maior rigor na compactação dos resíduos, chegando ao seu limite em janeiro de 2019. Entretanto, “a concessionária ECOFOR Ambiental já adquiriu um terreno vizinho ao existente garantindo, dessa forma, o recebimento dos resíduos de Fortaleza e Caucaia.” (ACFOR, 2010).

O Aterro Sanitário Metropolitano de Natal fica localizado no distrito de Massaranduba município de Ceará-Mirim, gerenciado pela empresa BRASECO S/A está em operação desde o dia 24 de junho de 2004. Segundo o site da empresa o empreendimento ocupa uma área total de 90 hectares e é destinado à descarga de resíduos sólidos e semissólidos Classe II (conforme NBR-10004/04). O dimensionamento de projeto é para o recebimento de 1.300 toneladas de resíduos por dia.

Atualmente, o aterro atende 14 municípios do estado: Natal, Parnamirim, Ielmo Marinho, Macaíba, São Gonçalo do Amarante, Extremoz, Rio do Fogo, Touros, Taipu, Bento Fernandes, Ceará-Mirim, Maxaranguape, São Miguel do Gostoso e Pedro Velho. Até o final de sua vida útil (2035), estima-se que sejam acumuladas cerca de 12.562.122, 88 toneladas de resíduos urbanos dispostos em 9 células (SILVA, 2019, p. 36).

O Centro de Gerenciamento de Resíduos da ESTRE Ambiental Unidade Rosário do Catete, localiza-se na Rodovia BR 101, s/n-km 65-Zona Rural, Rosário do Catete, oferece os serviços de disposição final de resíduos Classe I e classe II. “Processa cerca de 1.500 toneladas por dia de resíduo domiciliar, comercial e industrial. A unidade de Sergipe é responsável ainda por receber resíduos de 11 municípios, além da Grande Aracaju.” (LESSA, 2017, p.16).

### 3.3 COLETA DE DADOS

A coleta dos dados foi feita por meio de um questionário virtual direcionado às empresas responsáveis pelo gerenciamento dos aterros sanitários das cidades estudadas. A escolha desse método de coleta se deve pelas vantagens apresentadas como por exemplo a rapidez na obtenção de respostas, a economia de tempo e de recurso financeiro, o ambiente virtual exclui a necessidade de contato

direto com os participantes, além de propiciar maior conforto para os participantes do estudo.

O questionário é composto de dezessete perguntas de caráter quantitativo, sendo treze perguntas objetivas, quatro perguntas subjetivas, alternadas entre questões de múltipla escolha e questões cuja a resposta é uma escala de 1 a 10. A escolha de perguntas com escalas pré-determinadas se deve aos motivos de simplicidade da escala numérica, fácil compreensão, os entrevistados mostram mais especificamente o quanto eles avaliam a questão e a facilidade para conduzir análises estatísticas.

As perguntas foram criadas e selecionadas pelos autores a partir de produção científica a respeito do tema do aproveitamento do biogás em aterros sanitários. As temáticas centrais das questões direcionadas aos Gestores foram: 1. Qual o tipo de aproveitamento dado ao biogás, com foco no aproveitamento energético a partir de termelétricas movidas a biogás; 2. As dificuldades enfrentadas na implementação do empreendimento; 3. A viabilidade econômica do empreendimento; 4. A licença ambiental necessária; e 5. O necessário controle ambiental para a operação.

O contato com as empresas estudadas foi efetuado via e-mail comercial encontrado por meio do endereço eletrônico próprio das empresas disponíveis na internet. O questionário previamente validado foi transportado para a plataforma virtual *Google Forms* e em seguida disponibilizado para preenchimento pelas empresas. O questionário foi disponibilizado a partir do dia 10 de abril de 2021 para que as empresas pudessem responder e devolver os mesmos.

### 3.4 TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados coletados foram devidamente organizados em gráficos e quadros com finalidade de facilitar a interpretação destes, a partir do tipo de pergunta e de critérios dos autores sobre qual a forma de melhor compreensão. Foi utilizado o método de análise uni variada, examinando as respostas para cada uma das perguntas, uma após a outra.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A realização do questionário teve como objetivo identificar se os aterros das capitais nordestinas aproveitavam o biogás que é gerado. Com a aplicação do questionário foi possível identificar a destinação que os aterros dão ao biogás produzido. Nenhum dos aterros do estudo possui usinas termoelétricas funcionando a partir do biogás produzido pelos resíduos sólidos, portanto nenhum aterro produz energia elétrica, nem há ganhos de receita com a venda de energia elétrica para a concessionária local.

Quadro 2 - Respostas sobre o aproveitamento do biogás nos aterros do estudo e razões para a ausência de aproveitamento.

Pergunta	BRASECO - Natal RN	ESTRE - Aracaju SE	ECOFORMARQUISE - Fortaleza CE
Qual é o tipo de tratamento e/ou aproveitamento que se dá ao biogás produzido no aterro sanitário?	Queima em flares.	Queima em flares e Tratamento de chorume.	Produção de gás natural renovável (GNR).
Quais fatores contribuem para a ausência de projetos de aproveitamento no presente aterro?	Outros.	Custo de operação e Ausência de parcerias.	Não respondeu.

Dos três aterros sanitários participantes do estudo apenas um deles, o Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia da empresa ECOFOR e MARQUISE Ambiental, possui aproveitamento energético indireto do biogás através da produção de gás natural renovável com o fornecimento deste para a rede de gasodutos da região. Os demais aterros possuem em comum o direcionamento do biogás gerado para ser queimado em *flares*, em conformidade com a obrigação dos aterros sanitários de queimarem os gases provenientes do sistema de drenagem interna.

Ademais, o Centro de Gerenciamento de Resíduos da ESTRE é o único que afirma usar o biogás para o tratamento do chorume produzido pela decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos. O lodo adensado resultante do tratamento pode voltar ao aterro. Segundo Moreira (2010) um sistema de recirculação do chorume contribuiria positivamente para a taxa de geração de metano do biogás.

A segunda pergunta do questionário foi formulada com o objetivo de que os gestores dos aterros sanitários que não possuem projetos implementados de

aproveitamento energético do Biogás, relatassem as dificuldades ou os entraves que impossibilitam essa atividade. Para o envio da resposta, foram dadas as seguintes alternativas para preenchimento: Custo inicial; Falta de estudo prévio; Qualidade do biogás; Custo de operação; Quantidade de produção do biogás; Ausência de parcerias; Vida útil de produção; Outros.

Os gestores do aterro sanitário de Aracaju-SE relataram o custo de operação e a ausência de parcerias como fatores para ausência de projetos de aproveitamento, o Aterro Sanitário Metropolitano de Natal gerenciado pela empresa BRASECO marcou a opção de outros fatores.

O quadro 3 apresenta o interesse dos gestores em projetos de instalação de usinas termoelétricas para aproveitamento do biogás gerado. Os aterros de Natal-RN e Aracaju-SE informaram possuir projetos nesse sentido, no entanto o Aterro Sanitário Municipal de Fortaleza-CE foi o único a responder que não possui. Entretanto, este também é o único a já oferecer um aproveitamento energético do biogás para a geração de energia útil, mostrando assim o interesse dos demais aterros que não possuem sistema semelhante em adquirir usinas de geração de energia elétrica a partir do gás produzido, dando desse modo uma destinação proveitosa.

Quadro 3 - Há projetos futuros de instalação de usinas termoelétrica pra geração de energia elétrica?

<b>BRASECO - Natal RN</b>	<b>ESTRE - Aracaju SE</b>	<b>ECOFORMARQUISE - Fortaleza CE</b>
SIM	SIM	NÃO

O quadro 4 apresenta a vida útil estimada dos aterros e da produção de biogás de acordo com as informações passadas pelos seus respectivos gestores. O objetivo de saber os tais dados é de extrema importância para estimar o período de tempo que será viável economicamente o aproveitamento do biogás, visto que em dado momento a produção do gás se encontra inferior ao necessário para cobrir os custos. “Uma vez fechado o aterro este tende a atingir seu pico de produção de biogás dentro de poucos anos e continuará produzindo a taxas cada vez menores por um longo período de tempo.” (ENSINAS, 2003, p. 83).

Quadro 4 - Respostas sobre a vida útil do aterro e do biogás nos aterros do estudo.

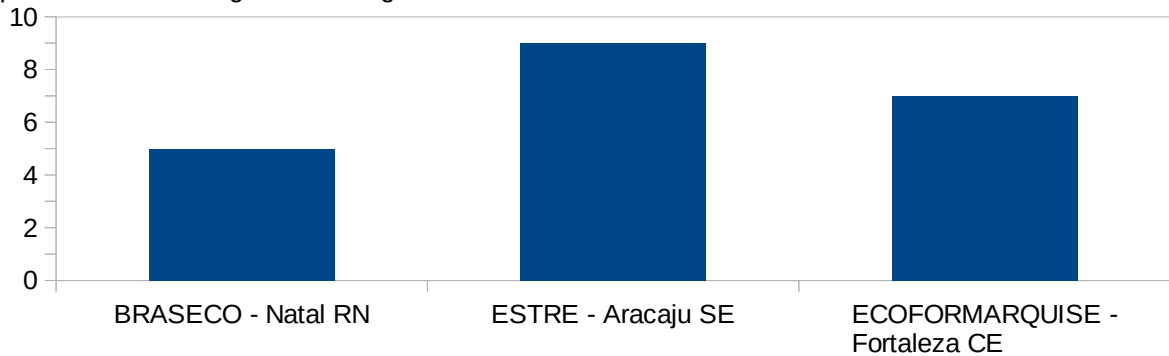
<b>Pergunta</b>	<b>BRASECO - Natal RN</b>	<b>ESTRE - Aracaju SE</b>	<b>ECOFORMARQUISE - Fortaleza CE</b>
Qual a vida útil do aterro?	15 anos.	25 anos.	Até 2031.
Qual a vida útil de produção de biogás do aterro?	De 3 a 4 anos depois do fechamento do aterro.	Vida útil variável.	Até 2035.

As respostas de estimativas recebidas foram consideradas a partir do ano de envio do questionário. O aterro sanitário de Natal-RN afirma uma vida útil de 15 anos, logo a estimativa do ano final de recebimento de resíduos sólidos é entre o final de 2035 e o começo de 2036, o aterro sanitário de Aracaju-SE possui maior vida útil estimada até cerca de 2045 e o Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (Fortaleza-CE) assegura vida útil de até 2031. Quanto a produção de biogás o Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia respondeu que após o fechamento de recebimento de novos resíduos a produção útil continua até o ano de 2035, enquanto que no Aterro Sanitário Metropolitano de Natal continuará até 3 ou 4 anos após o fechamento.

Esses resultados se assemelham aos afirmados por Zanette (2009), “Cabe destacar que o máximo aproveitamento do metano para a geração de eletricidade durante a vida útil do projeto ocorre do início do 5º ano da disposição de resíduos até 4 anos após o fim da utilização do aterro” (ZANETTE, 2009, p. 50). O aterro sanitário de Aracaju-SE não apresentou um ano final, afirmando ser variável.

O custo inicial de instalação pode ser um dos empecilhos para a implementação de projetos que visam o aproveitamento energético do biogás, a figura 3 apresenta a avaliação dos gestores dos aterros sobre esses custos para seus empreendimentos. Segundo Zanette (2009) os custos envolvem sistema de coleta e queima de gás, para projetos de uso direto do biogás é necessário um sistema de tratamento, um sistema de compressão e um gasoduto para transporte, para de geração de eletricidade são necessários compressores, um sistema de geração para início da operação, um gerador e um sistema de monitoramento e controle.

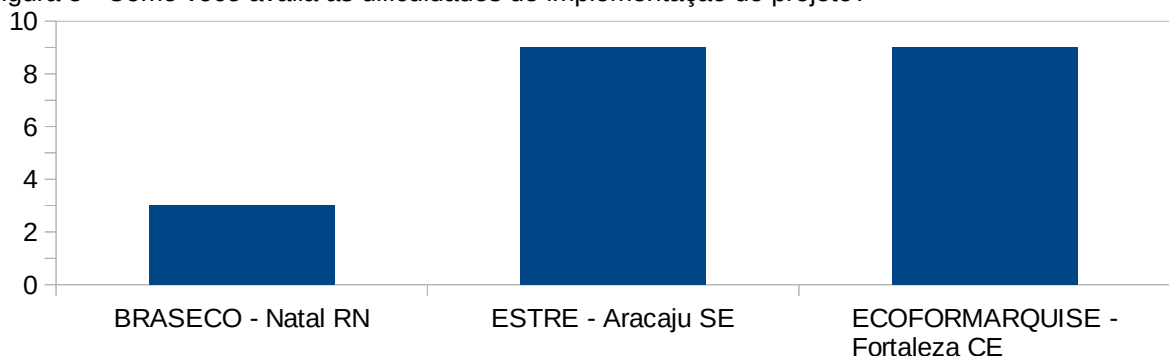
Figura 4 - Como você avalia o valor do custo inicial da instalação do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás?



A nota mais baixa é 1, classificado como custo muito baixo, e 10 a nota mais alta classificado como custo muito elevado. Entre os alvos do estudo houve uma média 7 de custo inicial da instalação do empreendimento destinado ao aproveitamento energético, sendo considerado como um gasto médio de investimento pouco elevado, acima de razoável e abaixo de alta despesa. Vale ressaltar que o aterro sanitário de Aracaju-SE relatou uma nota 9, sendo assim uma alta despesa de investimento.

Sendo o valor de investimento um dos possíveis empecilhos, a figura 4 complementa a análise das dificuldades encontradas pelos gestores na implementação do projeto. A nota mais baixa 1 seria classificado como pouquíssimas dificuldades e 10 seria classificado como extremas dificuldades. Dos três aterros, o de Aracaju-SE e o de Fortaleza-CE responderam a nota 9 afirmando assim altíssimas dificuldades na instalação dos projetos. O de Natal-RN foi o único a responder a nota 3 afirmando assim baixas dificuldades encontradas.

Figura 5 - Como você avalia as dificuldades de implementação do projeto?

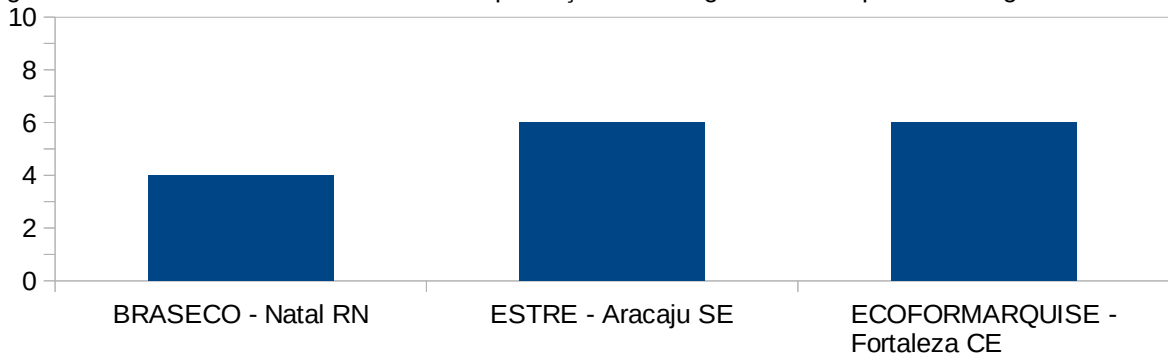


Cabe retomar que o aterro sanitário de Natal-RN havia alegado um custo razoável de instalação do empreendimento, atribuindo a nota 5, e afirmou que os seguintes fatores não eram motivos para a ausência de projetos de aproveitamento energético: Custo inicial; Falta de estudo prévio; Qualidade do biogás; Custo de

operação; Quantidade de produção do biogás; Ausência de parcerias; Vida útil de produção.

A figura 5 apresenta a avaliação dos gestores dos aterros sobre o mercado da produção de energia elétrica a partir do gás gerado pelos resíduos sólidos. Esses resultados apresentam o interesse dos gestores no investimento do biogás como fonte de energia. A nota mais baixa 1 seria classificado como extremamente ruim e 10 como extremamente bom. O Aterro Sanitário Metropolitano de Natal respondeu com a nota 4 enquanto que os outros dois responderam com a nota 6, ou seja, os três aterros afirmaram notas próximas da razoável ou mediana.

Figura 6 - Como você avalia o mercado da produção de energia elétrica a partir do biogás?



A venda de créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo pode ser uma das alternativas que tornem projetos de aproveitamento energético do biogás economicamente viáveis para instalação, pois significa uma receita extra para a operação do empreendimento. Portanto é necessário estimar a quantidade de Reduções Certificadas de Emissão que serão obtidas com o empreendimento.

O quadro 5 informa que dos três apenas um, o Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia, consegue Reduções Certificadas de Emissão. Segundo Zanette (2009) o volume de créditos de carbono que pode ser obtido depende da etapa de recuperação do metano e também do aproveitamento desse mesmo volume de metano como substituto de combustíveis fósseis. Portanto o Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia recebe créditos tanto pela redução de emissões de metano na atmosfera quanto pela diminuição da demanda de gás natural da região. Ainda segundo Zanette (2009) o ganho de receita com a recuperação de metano e a utilização do biogás em substituição do gás natural é quase três vezes maior do que o ganho com a substituição de eletricidade (receita de 17,84 US\$/1000m<sup>3</sup> e 6,17 US\$/1000m<sup>3</sup>, respectivamente).

Quadro 5 - Há a venda de créditos de carbono, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no empreendimento?

<b>BRASECO - Natal RN</b>	<b>ESTRE - Aracaju SE</b>	<b>ECOFORMARQUISE - Fortaleza CE</b>
NÃO	NÃO	SIM

A figura 6 apresenta os resultados de como os gestores avaliam o lucro mensal final do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás. A nota mais baixa 1 seria classificado como grande prejuízo e 10 seria classificado como enormes lucros. Não houve respostas dos aterros de Natal-RN e de Aracaju-SE, pois não fazem aproveitamento energético do biogás. O Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia avaliou o seu ganho mensal como sendo altos lucros com o empreendimento de produção de gás natural renovável.

Figura 7 - Como você avalia o lucro mensal final do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás?



O fato do alto lucro do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia com a GNV Fortaleza é um grande incentivo para outros aterros com capacidades semelhantes de analisar os ganhos ambientais e econômicos com projetos de aproveitamento similares. Ademais, ressalta-se que o lucro é atrativo econômico para o projeto, não desvalorizando os benefícios sociais e ambientais com a redução de emissões e da demanda por combustíveis fósseis.

Além do lucro mensal, foi questionado aos gestores suas avaliações quanto a viabilidade de projetos destinados ao aproveitamento energético do biogás proveniente de aterros sanitários, as respostas estão expostas na figura 7. A nota mais baixa 1 seria classificado como extremamente inviável e 10 seria classificado como extremamente viável. Não houve respostas dos aterros de Natal-RN e de Aracaju-SE, pois não fazem aproveitamento energético do biogás.

Figura 8 - Como você avalia a viabilidade do seu empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás?



O aterro sanitário de Fortaleza-CE respondeu com a nota 9 afirmando assim que há uma altíssima viabilidade para a instalação e operação de empreendimentos de aproveitamento energético em aterros sanitários utilizando o gás gerado na decomposição dos resíduos sólidos dispostos no local. Sendo assim um forte incentivo para que outros aterros efetuem um estudo de viabilidade detalhado que verifique os custos de investimento, operação e manutenção, além dos ganhos de receita com venda de energia para a concessionária energética e com a venda de créditos de carbono.

Parte do questionário enviado teve ênfase em perguntas sobre o licenciamento ambiental dos aterros sanitários do estudo, foi questionado qual o órgão expedidor da licença, o prazo para renovação da licença do empreendimento e as condicionantes necessárias para a licença do projeto. Para aterros sanitários de Natal-RN, Aracaju-SE e Fortaleza-CE, tiveram como órgão ambiental competente expedidor da licença ambiental do empreendimento o Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente (IDEMA), a Administração Estadual do Meio Ambiente de Sergipe (ADEMA), e a Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE), respectivamente, todos órgãos ambientais de nível estadual.

Para aterros sanitários de Natal-RN, Aracaju-SE e Fortaleza-CE, seus prazos de renovação de licença de operação são de quatro anos, três anos e dois anos, respectivamente. O quadro 6 apresenta as respostas dos gestores sobre as condicionantes previstas na licença. Para o envio da resposta pelos gestores, foi disponibilizado uma série de alternativas para preenchimento.

Quadro 6 - Respostas sobre o licenciamento ambiental nos aterros do estudo.

<b>Pergunta</b>	<b>BRASECO - Natal RN</b>	<b>ESTRE - Aracaju SE</b>	<b>ECOFORMARQUISE - Fortaleza CE</b>
A licença ambiental, do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás, abrange qual/is das seguintes condicionantes?	Implementação do Programa de Monitoramento de Emissão Atmosféricas.	Implementação do Programa de Monitoramento de Emissão Atmosféricas; Aplicar a gestão adequada dos resíduos sólidos que serão gerados na fase de operação; Implementação do Programa de Educação Ambiental para os Trabalhadores; Implementação do Programa de Monitoramento de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos.	Implementação do Programa de Monitoramento de Emissão Atmosféricas; Aplicar a gestão adequada dos resíduos sólidos que serão gerados na fase de operação; Implementação do Programa de Educação Ambiental para os Trabalhadores; Implementação do Programa de Monitoramento de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos.

Dando destaque ao controle ambiental necessário para operações em aterros sanitários o quadro 7 apresenta as informações dos gestores a respeito se há uma equipe técnica específica para o controle ambiental do empreendimento destinado ao tratamento e aproveitamento energético do biogás. Dos três alvos do estudo apenas o Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (Fortaleza-CE), respondeu que não há a presença de tal equipe. Entretanto, este afirma que “temos técnicos que se dedicam aos controles diários da planta de extração e de queima do biogás”.

Quadro 7 - Existe uma equipe técnica específica para o controle ambiental do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás?

<b>BRASECO - Natal RN</b>	<b>ESTRE - Aracaju SE</b>	<b>ECOFORMARQUISE - Fortaleza CE</b>
SIM	SIM	NÃO

Todos os gestores do estudo afirmam que há a presença de técnicos em Meio Ambiente trabalhando em seus aterros sanitários, a existência desses profissionais em empreendimentos deste porte é de suma importância para o sistema de monitoramento e controle ambiental. Aterros sanitários e outros tipos de estações de tratamento de resíduos são grandes áreas de atuações para técnicos em meio ambiente, pois são setores que demandam de profissionais atuantes em ações de preservação, conservação, redução de impactos, reciclagem, entre outros.

## 5 CONCLUSÕES

O questionário online mostrou-se eficaz para a obtenção dos dados necessários para a realização do estudo. Nenhum aterro possui usinas termoelétricas para geração de energia elétrica e apenas o Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia, possui uma usina destinada ao aproveitamento energético do biogás para a produção de gás natural renovável através da GNR Fortaleza.

Esses resultados são desanimadores para o cenário atual, mostra que há a necessidade de grandes avanços na área de destinação adequada de resíduos sólidos. Contudo, os gestores afirmam que há projetos futuros para instalação de termoelétricas nos aterros, portanto esses resultados podem ser alterados posteriormente.

A viabilidade do empreendimento afirmada pelo Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia é um grande incentivo para que outros aterros estudem a possibilidade de implantação dessas usinas gerando ganhos econômicos, sociais e ambientais contribuindo para a diminuição de emissões de gases de efeito estufa.

Com o aumento dos indicadores de destinação adequada dos resíduos no Brasil a expectativa para o futuro é que haja um melhor aproveitamento do potencial energético que é gerado nesses aterros sanitários, que novos estudos sejam conduzidos para o desenvolvimento do setor de resíduos sólidos incentivando os gestores dos aterros para instalação de projetos futuros para o aproveitamento do biogás gerado.

Para que ocorra o melhor aproveitamento do potencial energético dos resíduos sólidos do país é necessário a produção e o compartilhamento de conhecimento e informação para estímulo do setor. É essencial mão de obra capacitada com conhecimentos necessários na área, como técnicos em meio ambiente e profissionais especializados no setor de energia, no setor de resíduos sólidos e etc. É de vital importância para o sucesso do projeto possuir técnicos qualificados para operação do empreendimento potencializando sua eficiência e viabilidade.

Com base nos dados coletados no estudo foi possível a realização dos objetivos do trabalho. Por fim, mencionamos o Mecanismo de Desenvolvimento

Limpo como atrativo econômico possibilitando ganho de receita e redução do investimento através da venda de créditos de carbono, incentivando assim projetos de cunho ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2018/2019.
- ACFOR – AUTARQUIA DE REGULAÇÃO, FISCALIZAÇÃO E CONTROLE DOS SERVIÇOS PÚBLICOS DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2010). **Relatório Técnico Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – ASMOC**. Fortaleza, CE.
- ALCÂNTARA, Perboyre Barbosa. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR.- 10.004. **Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR.- 8419: **apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.
- BRASIL. **Lei Nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2 de agosto de 2010.
- BRASIL. Felipe Correa de Souza Pereira Gomes *et al.* Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás**. Brasília, Df: Ministério das Cidades, 2016. p. 90-114. (Desenvolvimento do mercado de biogás; 3).
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Protocolo de Quioto**: a convenção sobre mudança do clima: O Brasil e a convenção – quadro das nações unidas. Brasília: MCT, [200-]. Apoio do Ministério das Relações Exteriores. 29 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 237**, de 19 de dezembro de 1997.
- CETESB (São Paulo). Secretaria do Meio Ambiente. **Inventário e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)**. In: CETESB (São Paulo). Secretaria do Meio Ambiente. **Biogás**: pesquisas e projetos no Brasil. São Paulo: Sma, 2006. p. 63-107. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 12 mar. 2021.
- ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas-SP**. 2003. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- ICLEI (Brasil). Governos Locais Pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás**: volume um, aterros sanitários. São Paulo: ICLEI, 2009. p. 13-38.
- KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A.C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Sbera: Embrapa Suínos e Aves. Concórdia/SC. 2019.

LANDIM, Ana Luiza Pinto Ferreira; AZEVEDO, Lizandra Prado de. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários**: unindo o inútil ao sustentável. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-99, mar. 2008.

LANZA, V. C. V.; CARVALHO, A. L. **Orientações básicas para a operação de aterro sanitário**. Belo Horizonte, 2006.

LESSA, Ana Carolina Vilar. **Caracterização do chorume do Centro de Gerenciamento de Resíduos de Sergipe**. 2017. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnólogo em Saneamento Ambiental) - Instituto Federal de Sergipe, Aracaju, 2017.

LINARD, A. de F. G.; AQUINO, M. D. de. **Biogás de aterro sanitário**: análise de duas medidas mitigadoras das mudanças climáticas sob a perspectiva do mecanismo de desenvolvimento limpo. Revista DAE, São Paulo, n. 201, p. 21-32, jan./abr. 2016.

MACIEL, Felipe Jucá. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MENDES, Luiz Gustavo Galhardo. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

MILANEZ, Artur Yabe; MAIA, Guilherme Baptista da Silva; GUIMARÃES, Diego Duque. **Biogás**: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. [177]-213, mar. 2021.

MONTAGNA, Tainara Bruna. **Biogás Produzido em Aterro Sanitário como Fonte de Energia**: uma revisão bibliográfica. 2013. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Faculdade Educacional de Dois Vizinhos – União de Ensino do Sudoeste do Paraná, Dois Vizinhos, 2013.

MOREIRA, Felipe Fernandes. **Estudo do potencial energético de aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário metropolitano oeste de Caucaia**. 2010. 64 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

PALHARES, J. C. P. **Biodigestão Anaeróbia de Dejetos de Suínos**: Aprendendo com o Passado Para Entender o Presente e Garantir o Futuro. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Brasília, 2008.

PRATI, Lisandro. **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Gerado por Biodigestores**. 2010. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SANTOS, Edilene Lima. **Obtenção de energia limpa a partir da captação do biogás no aterro sanitário de Salvador**. 2015. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

SILVA, Ana Luiza Ferreira da. **Potencial de aproveitamento energético do biogás produzido no Aterro Sanitário Metropolitano de Natal**. 2019. 56 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

VANGASSE, Carlos Alberto Vanderlei. **O Vórtice do Lixo Eletrônico no Instituto Federal de Alagoas**: prolongamento do reaproveitamento de componentes eletrônicos. 2020. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Análise de Sistemas Ambientais, Programa de Pós-Graduação Análise de Sistemas Ambientais, Centro Universitário Cesmac, Maceió, 2020.

ZANETTE, André Luiz. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

## APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO ENVIADO AOS ATERROS PARA COLETA DE DADOS

# O Aproveitamento do Biogás em Aterros Sanitários do Nordeste Brasileiro.

Este trabalho se justificativa pelo crescimento na demanda de fontes de energia renováveis, sendo uma das alternativas o Biogás produzido naturalmente em aterros sanitários. A partir dele o gás metano, principal gás causador do efeito estufa, é filtrado e é transformado em energia. A partir do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, focamos em observar a região do nordeste brasileiro, através das contribuições dos aterros de suas capitais para o aproveitamento energético do biogás. Temos como objetivo compreender como é realizado o aproveitamento do biogás gerado nos aterros sanitários das capitais do nordeste do Brasil, analisar a quantidade de aterros sanitários da amostragem que possuem sistemas de aproveitamento energético para o biogás produzido e observar o interesse, dos aterros sem usinas de aproveitamento, em implantar projetos futuros.

\*Obrigatório

E-mail \*

---

1. Qual é o tipo de aproveitamento que se dá ao biogás produzido no aterro sanitário? \*

Marque todas que se aplicam.

- Produção de combustível veicular
- Produção de gás natural renovável
- Produção de energia elétrica
- Queima em flares
- Aproveitamento térmico
- Tratamento de chorume
- Nenhum

2. Qual dos motivos abaixo você considera como fatores para a ausência de projetos de aproveitamento no presente aterro? (se responder nenhum na primeira questão)

Marque todas que se aplicam.

- Custo inicial
- Falta de estudo prévio
- Qualidade do biogás
- Custo de operação
- Quantidade de produção do biogás
- Ausência de parcerias
- Vida útil de produção
- Outros

3. Há projetos futuros de instalação de usinas termoelétrica pra geração de energia elétrica? \*

Marcar apenas uma oval.

- sim
- Não

4. Qual a vida útil do aterro? \*

---

5. Qual a vida útil de produção de biogás do aterro? \*

---

6. Numa escala de 1 a 10, onde 1 seria classificado como muito baixo e 10 seria classificado como muito elevado, como você avalia o valor do custo inicial da instalação do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás? (incluindo compra de maquinário, planta do projeto, aquisição das licenças previstas) \*

Marcar apenas uma oval.

1      2      3      4      5      6      7      8      9      10

---

7. Numa escala de 1 a 10, onde 1 seria classificado como pouquíssimas dificuldades e 10 seria classificado como extremas dificuldades, como você avalia as dificuldades de implementação do projeto? \*

Marcar apenas uma oval.

1      2      3      4      5      6      7      8      9      10

---

8. Numa escala de 1 a 10, onde 1 seria classificado como extremamente ruim e 10 como extremamente bom, como você avalia o mercado da produção de energia elétrica a partir do biogás? \*

Marcar apenas uma oval.

1      2      3      4      5      6      7      8      9      10

---

9. Há a venda de energia elétrica excedente para concessionária de energia elétrica da região?

Marcar apenas uma oval.

- sim
- Não há excedente
- Não vendemos o excedente

10. Há a venda de créditos de carbono, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) definido pelo protocolo de Kyoto, no empreendimento? \*

Marcar apenas uma oval.

- Sim
- Não

11. Numa escala de 1 a 10, onde 1 seria classificado como grande prejuízo e 10 seria classificado como enormes lucros, como você avalia o lucro mensal final do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás? (somente para aqueles que possuem empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás)

Marcar apenas uma oval.

1      2      3      4      5      6      7      8      9      10

---

12. Numa escala de 1 a 10, onde 1 seria classificado como extremamente inviável e 10 seria classificado como extremamente viável, como você avalia a viabilidade do seu empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás? (somente para aqueles que possuem empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás)

Marcar apenas uma oval.

1      2      3      4      5      6      7      8      9      10

---

13. Qual o órgão ambiental competente expedidor da licença ambiental do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás? (somente para aqueles que possuem empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás)

---

14. A licença ambiental, do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás, abrange qual/is das seguintes condicionantes: (somente para aqueles que possuem empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás)

Marque todas que se aplicam.

- Implementação do Programa de Monitoramento de Emissão Atmosféricas;
- Implementação do Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD);
- Implementação do Programa de Prevenção, Controle e Acompanhamento de Processos Erosivos;
- Instalação de sistemas de drenagem de águas pluviais evitando escoamento superficial;
- Aplicar a gestão adequada dos resíduos sólidos que serão gerados na fase de operação;
- Implementação do Programa de Educação Ambiental para os Trabalhadores;
- Implementação do Programa de Monitoramento dos Efluentes Líquidos;
- Implementação do Programa de Monitoramento de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos;
- Implementação de serviços de recuperação ambiental, baseados em técnicas de recuperação de solo nas áreas e respectivo entorno onde ocorrerá a limpeza do terreno;

- Implementação do Programa de Priorização de Contratação de Mão-de-Obra Local.

15. Qual o tempo de renovação da licença ambiental do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás? (somente para aqueles que possuem empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás)

---

16. Existe uma equipe técnica específica para o controle ambiental do empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás? (somente para aqueles que possuem empreendimento destinado ao aproveitamento energético do biogás)

Marcar apenas uma oval.

- Sim
- Não

17. Dentre os profissionais técnicos da equipe há a presença de um técnico em Meio Ambiente?

Marcar apenas uma oval.

- Sim
- Não