



**INSTITUTO
FEDERAL**
Ceará

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE - CAMPUS MARACANAÚ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

FRANCISCO EDMAR CHAGAS BEZERRA

**GERAÇÃO DE BIOMETANO PRODUZIDO EM ATERRO SANITÁRIO
MUNICIPAL**

MARACANAÚ - CE

2020

FRANCISCO EDMAR CHAGAS BEZERRA

GERAÇÃO DE BIOMETANO PRODUZIDO EM ATERRO SANITÁRIO
MUNICIPAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – Campus Maracanaú como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis.

Área de Concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria

MARACANAÚ – CE

2020

Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação Instituto Federal do Ceará -
IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a)

B574g Bezerra, Francisco Edmar Chagas.
Geração de Biometano Produzido em Aterro Sanitário Muinicipal / Francisco Edmar Chagas
Bezerra. - 2020.
88 f.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias
Renováveis, Campus Maracanaú, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Auzuir Ripardo De Alexandria.

1. Biogás. 2. Biometano. 3. Resíduos Sólidos Urbanos. 4. Energia Renovável. 5. Cidades
Inteligentes.

I. Título.

CDD 620.91

FRANCISCO EDMAR CHAGAS BEZERRA

GERAÇÃO DE BIOMETANO PRODUZIDO EM ATERRO
SANITÁRIO MUNICIPAL

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Auzuir Ripardo de Alexandria (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará IFCE

Bruno César Barroso Salgado
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará- IFCE

Victor Hugo Costa Albuquerque
Universidade de Fortaleza- UNIFOR

Dedico este trabalho aos meus pais, Vilmar Freire Bezerra (in Memoriam) e Tereza Neuma Chagas Bezerra, que me ensinaram pelo testemunho meus valores e princípios, e que me fizeram conquistar meus objetivos, seguindo seus exemplos de fé, honestidade e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto minha homenagem:

A Deus que me abençoa com o seu amor todos os dias da minha vida.

Aos meus pais, Vilmar Freire Bezerra (in Memoriam) e Tereza Neuma Chagas Bezerra por todo ensinamento e amor a mim dedicado.

À minha esposa Tereza Eugênicia Moreira da Silva, pela paciência e dedicação.

Aos meus filhos, Edmar Schramm Bezerra, Daniele Schramm Bezerra, Debora Schramm Bezerra e Mateus Moreira Bezerra, e aos meus netos Lucca Schramm de Castro e Davi Schramm de Castro, pelo apoio incondicional, psicológico e emocional.

A todos meus familiares, em nome do meu tio Raimundo Witt Rebouças Chagas, pelo incentivo, conforto e amizade.

Ao Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria pelas contribuições que enriqueceram este trabalho e disponibilidade para a orientação.

À instituição IFCE - PPGER, pela oportunidade de realizar este trabalho.

Muito obrigado!

RESUMO

O Biogás trata-se de uma tecnologia renovável utilizado na produção de energia e gerado pela biodigestão anaeróbica. Entre os seus componentes, o metano é o mais relevante, no quesito combustão de motores veiculares. A utilização do metano derivado dos resíduos orgânicos dos aterros sanitários para substituir o combustível fóssil minimiza o impacto ambiental proporcionando uma redução significativa na emissão de gases de efeito estufa, além de usar de forma planejada o montante dos resíduos urbanos gerados pela população, tema que engloba os interesses das ditas cidades inteligentes. Assim, este estudo baseia-se na investigação e análise da potencialidade do biogás gerado pelo Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC), localizado no município de Caucaia/CE. Onde objetivo principal analisar a capacidade da produção de metano gerado por meio do biogás do referido aterro. Baseando-se em dados já publicados relativos à quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) dispostos no aterro e aplicando-os no software Biogás, geração e uso energético – Aterro 1.0 desenvolvido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Estimou-se, então, que no período de estudo serão despejados no ASMOC mais de 1 milhão de ton/ano de RSU no ASMOC, e por mais que o padrão de cidades inteligentes fossem obtidos, ainda assim gerariam resíduos sólidos. Diante deste quadro, constatou-se que o aterro poderá gerar, entre os anos de 2018 a 2034, mais de 3 milhões de m³ de CH₄, capazes de abastecer mais de 201.362 veículos.

Palavras-chave: Biogás. Biometano. Resíduos Sólidos Urbanos. Energia Renovável. Cidades Inteligentes.

ABSTRACT

Biogas is a renewable technology used in energy production and generated by anaerobic biodigestion. Among its components, methane is the most relevant when it comes to combustion of vehicle engines. The use of methane derived from organic waste from landfills to replace fossil fuel minimizes the environmental impact, providing a significant reduction in the emission of greenhouse gases, in addition to using in a planned way the amount of urban waste generated by the population, a theme that encompasses the interests of so-called smart cities. Thus, this study is based on the investigation and analysis of the potential of biogas generated by the Municipal Landfill West of Caucaia (ASMOC), located in the municipality of Caucaia/CE. Where the main objective is to analyze the methane production capacity generated by the biogas from the referred landfill. Based on data already published regarding the amount of solid urban waste (MSW) disposed in the landfill and applying it in the Biogas, generation and energy use software - Landfill 1.0 developed by the Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). It was estimated, then, that in the study period more than 1 million ton / year MSW will be dumped into the ASMOC in the ASMOC, and as much as the standard of smart cities were obtained, they would still generate solid waste. Given this scenario, it was found that the landfill could generate, between the years 2018 to 2034, more than 3 million m³ of CH₄, capable of supplying more than 201,362 vehicles.

Keywords: Biogas. Biomethane. Urban solid waste. Renewable energy. Smart Cities.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:Classificação dos resíduos sólidos.	23
Figura 2 - Esquema explicativo simplificado de um lixão.	24
Figura 3 - Esquema explicativo simplificado de um aterro controlado.	25
Figura 4 - Esquema simplificado de um aterro sanitário.	25
Figura 5 - Disposição final dos RSU coletados no Brasil (ton/dia) nos anos de 2017 e 2018.	26
Figura 6 - Mapa de localização dos Lixões e Aterros Sanitários.	28
Figura 7 - Configuração básica de um aterro sanitário.	32
Figura 8 - Fluxograma de produção e uso do biogás.	39
Figura 9 - A digestão anaeróbia via conversão bioquímica.	40
Figura 10 - Processo de remoção de H ₂ S.	43
Figura 11 - Retirada de siloxanos e VOC do biogás.	44
Figura 12 - Retirada de dióxido de carbono do biogás.	45
Figura 13 - Efeito do EGR nas emissões de NO _x e na eficiência de um motor de ignição por centelha com biogás/hidrogênio como combustível.	51
Figura 14 – Procedimento da pesquisa.	55
Figura 15 - Fotografia aérea do ASMOC.	60
Figura 16 - Gráfico da estimativa de vazão de CH ₄ no ASMOC.	65
Figura 17 – Consolidação das divisas intermunicipais: projeto atlas geográfico	69
Figura 18 – Biodigestor do tipo canadense.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com enfoque no aproveitamento e geração de metano.	21
Tabela 2 - Representação das tipologias para os municípios de maior geração de RSU estimada para cada regional.....	29
Tabela 3 - Componentes putrescíveis, recicláveis e combustíveis.	30
Tabela 4 - Critérios técnicos para o aterro sanitário.	31
Tabela 5 - Usinas de aproveitamento do biogás para geração de biometano implantadas no Brasil.....	46
Tabela 6 - Comparação das propriedades do GLP, do gás natural e do biogás.	47
Tabela 7 - Valores do poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS) de diferentes gases.....	48
Tabela 8 - Valores sugeridos para K.	58
Tabela 9 - Tipologia Estimada de Resíduos Sólidos Urbanos do ASMOC (%).	61
Tabela 10 - Histórico de aterramento de resíduos no ASMOC.	63
Tabela 11 - Estimativa de RSU Médio (2018 a 2037).....	64
Tabela 12 - Estimativa da produção de CH ₄ no ASMOC e quantidade de veículos abastecidos entre os anos de 2018 e 2050.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
ASMOC	Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia
BEM	Balanco Energético Nacional
CEG	Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro
Cegás	Companhia de Gás do Ceará
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CO	Óxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono / Gás Carbono
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Estado Rio de Janeiro
EGR	Recirculação dos Gases de Escape
EMLURB	Empresa Municipal de Limpeza e Urbanização
GDL	Gás do Lixo
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNR	Gás Natural Renovável
GNR Fortaleza	Gás Natural Renovável de Fortaleza
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Gás sulfúrico
HS ⁻	Hidrossulfeto
IC	Combustão Interna
IFCE	Instituto Federal do Ceará
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MBT	<i>Maximum Brake Torque</i>
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MMA	Ministério do Meio Ambiente
N ₂	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
REDUC	Refinaria Duque de Caxias

RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S ⁰	Enxofre Elementar
SEINFRA	Secretária da Infraestrutura
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Estado do Ceará
SMA/CE	Secretária do Meio Ambiente do Estado do Ceará
SMA/SP	Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
UECE	Universidade Estadual do Ceará
UFC	Universidade Federal do Ceará
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.1 <i>Objetivos específicos</i>	16
2.1 Organização do texto	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTUDO DA ARTE	18
2.1 Cidades inteligentes.....	18
2.2 Resíduos sólidos	22
2.2.1 <i>Resíduos sólidos urbanos no Brasil</i>	23
2.2.2 <i>Resíduos sólidos urbanos no Ceará</i>	27
2.2.3 <i>Caracterização física dos resíduos no estado do Ceará</i>	29
2.3 Aterro sanitário	30
2.4 Biogás	35
2.4.1 <i>Biogás como fonte de energia</i>	38
2.4.2 <i>Processos de produção de biogás</i>	39
2.4.3 <i>Biometano</i>	41
2.4.4 <i>Projetos de biogás implantados no Brasil</i>	45
2.4.5 <i>Aplicação de biogás em motores de combustão interna</i>	47
2.5 Estado da arte.....	52
2.6 Considerações finais do capítulo.....	54
3 METODOLOGIA.....	55
3.1 Biogás - geração e uso energético (Aterro versão 1.0).....	56
3.1.1 <i>Constantes</i>	57
3.2 Estimativa de frota de veículos abastecidos	58
3.3 Considerações finais do capítulo.....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1 Caracterização da área de estudo	60
4.2 Caracterização dos RSUs dispostos no ASMOC	61
4.3 Histórico e estimativa de aterramento de resíduos no ASMOC	62
4.4 Potencial presente e futuro do ASMOC	64
4.5 Considerações finais do capítulo.....	70
5 CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial a demanda por energia cresce a cada ano em todo o mundo. Segundo Tolmasquim (2012), no Brasil para a próxima década haverá um aumento de 5,3% na demanda de energia por ano, atingindo 372 milhões de tonelada equivalente de petróleo.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) expedido pela Empresa de Pesquisa Energética (2019) foi relatado que no ano de 2018 o dióxido de carbono (CO₂) emitido no Brasil atingiu 416,1 milhões de tonelada de CO₂ equivalentes, sendo o setor de transporte responsável por 46,3% desse total, seguido pelo setor industrial, com 24,9%. Por conseguinte, segundo Nashawi *et al.* (2010), os combustíveis fósseis precisam ser substituídos por fontes de energia renováveis e limpos, a fim de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e assim, contribuir para a diminuição do aquecimento global.

Outro ponto importante para destacar é o crescimento da presença da sociedade na área urbana. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) mais da metade da população no planeta (54,6% ou 3,6 bilhões de pessoas) vive em cidades. Esse estudo indica que, em 2050, 70% da população global viverá em cidades (HABITAT, 2015).

Segundo Rodríguez-Bolívar (2015), com o crescimento das cidades, há uma preocupação dos governantes em elaborar projetos inovadores sobre temas como, desenvolvimento sustentável, educação, energia e meio ambiente, segurança e serviços públicos. Alguns autores visam explicar uma definição mais contextualizada a respeito do tema cidade inteligente (PRASAD e ALIZADEH, 2020) levando em consideração alguns pontos menos discutidos como a importância socioeconômica da implementação dos planejamentos ditos inteligentes (EICHELBERGER *et al.*, 2020).

Diante disso, o planejamento, gerenciamento e a sustentabilidade dos resíduos urbanos, estão ganhando destaque nos últimos anos (QU *et al.*, 2019; ORNELAS-FERREIRA *et al.*, 2020; SOHOO *et al.*, 2021). Vilaca *et al.* (2014) afirmaram que projetos voltados para criação de infraestrutura para desenvolvimento das cidades inteligentes estão se tornando uma realidade em diversas partes do mundo, onde se identifica uma necessidade de mudança do setor energético com vistas a integrar fontes renováveis à matriz energética.

Diante desse cenário, os biocombustíveis ganham destaque nesses dois aspectos. O primeiro como forma de diminuir a demanda mundial por energia e a taxa de esgotamento anual da quantidade mundial de reservas de petróleo, atualmente principal fornecedor, com cerca de 90%, da energia global (DADA e MBOHWA, 2017). E como segundo aspecto, os biocombustíveis que utilizam RSU como base de obtenção, tornando-se uma alternativa limpa e inteligente para esse agravante nas cidades, sendo um produto gerado a partir de fontes de biomassa comuns e disponíveis.

Segundo Qian *et al.* (2017), a maioria dos biocombustíveis, como o biodiesel e bioetanol, têm propriedades físico-químicas adequadas para uma combustão eficaz em motores de combustão interna, sem ou com pequenas modificações. Na verdade, já é sucesso a aplicação de biocombustíveis nos motores de combustão interna (IC). Por exemplo, o Bioetanol tem sido amplamente utilizado como um substituto renovável da gasolina em motores de ignição por centelha (SI) (DINESHA *et al.*, 2019; ARCE-ALEJANDRO *et al.*, 2018; KIANI *et al.*, 2018). Bem como também a aplicação de biogás nesses tipos de motores (IYER, 2020; HOTTA *et al.*, 2019; NADALETI E PRZYBYLA, 2018).

Hoje em dia, o biogás é produzido em todo o mundo em grande escala. Tal produção ocorre a partir da digestão anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos, lamas de esgoto, estrume, entre outros (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011). Seu uso potencial como fonte de energia limpa tem sido enfatizado nos últimos anos (YÜCENUR *et al.*, 2020; CRISTIANO *et al.*, 2020; VITA *et al.*, 2018).

Segundo Scarlat *et al.* (2018), a degradação natural do material orgânico resulta na produção de biogás, um combustível renovável que pode ser usado para produzir eletricidade, calor ou combustível veicular. Contudo, nos últimos anos, tornou-se uma das vias de energia renovável mais atraente.

A partir deste cenário, o presente estudo propõe um levantamento sobre a quantidade de biogás gerado no ASMOC por ano e o uso do seu potencial na frota de veículos, como um substituto para os combustíveis fósseis, que são altamente contaminantes e ambientalmente indesejáveis. Pois a realidade do cenário atual possui a necessidade de mudança do setor energético com vista a integrar fontes de energias renováveis à matriz energética, o que remete também ao desenvolvimento das cidades inteligentes com aplicação de tecnologia e gerenciamento dos resíduos sólidos.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo é analisar a capacidade da produção de metano gerado por meio do biogás do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia.

1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, objetivos específicos foram definidos, como apresentado a seguir:

- Realizar uma revisão bibliográfica e documental, fazendo uso dos principais relatórios técnicos dos órgãos responsáveis do estado do Ceará para levantamento de dados;
- Caracterizar a área de estudo, bem como saber da tipologia dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) disponível no aterro;
- Saber do histórico e da estimativa dos RSU no ASMOC;
- Estimar a produção da quantificação de metano produzido no aterro;
- Discutir a viabilidade ambiental desse tipo de aproveitamento energético para a área de estudo.

2.1 Organização do texto

No Capítulo 2 são apresentadas definições básicas sobre cidades inteligentes e em seguida os conceitos técnicos que envolvem a geração do biogás, desde os resíduos sólidos; o panorama geral da geração desses resíduos no âmbito nacional, regional e estadual; e a caracterização física destes para o estado do Ceará. Em seguida, foi realizada uma breve explanação sobre os aterros sanitários e sobre processo de geração do biogás com foco na aplicação em motores de combustão interna.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada, desde o levantamento de dados e de informações junto aos órgãos especiais do estado do Ceará, escolha do *software* utilizado para a análise do potencial de biometano de ASMOC, até a estimativa da quantidade de carros abastecidos pelo biogás.

Os resultados são apresentados, no Capítulo 4, em forma de gráficos e tabelas onde também são analisados e discutidos. No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e considerações finais deste estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTUDO DA ARTE

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre conceitos básicos que envolvem o tema cidades inteligentes. Em seguida, são apresentadas definições que introduzem o tema biogás, desde as classificações e o panorama da situação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em esfera nacional, regional e estadual, características básicas que envolvem o aterro sanitário, até os processos de produção de biogás. Assim como, os tipos de projetos de biogás implantados no Brasil e estudos que mostram a aplicação desse gás em motores de combustão interna.

2.1 Cidades inteligentes

O aumento acelerado da população urbana em todo o mundo tem levantado uma variedade de problemas técnicos, sociais, econômicos e organizacionais, como por exemplo, gerenciamento de resíduos, escassez de recursos, congestionamento de tráfego, poluição e aumento da desigualdade social, que tendem a comprometer a sustentabilidade econômica e ambiental das cidades (NEIROTTI *et al.*, 2014). Nesse contexto, surge a definição de cidade inteligente, que é baseada em novas soluções tecnológicas, com novas abordagens para o planejamento e o estilo de vida urbano que pretendem assegurar a viabilidade futura e a prosperidade para as áreas urbanas (CHOURABI *et al.*, 2012).

O conceito de cidade inteligente está parcialmente relacionado com os termos cidade de informações, cidade digital e cidade sustentável (ISMAGILOVA *et al.*, 2019) estes termos contextualizam a definição da tecnologia utilizada em favor de sistemas e serviços para pessoas (DE JONG *et al.*, 2015). Assim, Caragliu *et al.* (2011) conceituam cidade inteligente com as seguintes características principais:

- Maior eficiência administrativa e econômica que possibilite o desenvolvimento da cultura e da sociedade utilizando infraestruturas em rede;
- Uma ênfase subjacente ao desenvolvimento urbano orientado para os negócios;
- Foco no objetivo de realizar a inclusão social de diferentes tipos de residentes urbanos nos serviços públicos;

- Uma importância no papel significativo das indústrias de alta tecnologia e criativas no crescimento a longo prazo;
- Uma perspectiva para prestar muita atenção à função do capital social e relacional no desenvolvimento da cidade e;
- Uma visão a ser tomada sustentabilidade social e ambiental como um aspecto importante do desenvolvimento de cidades inteligentes.

Alguns autores também apontam fatores necessários para a composição de uma cidade inteligente, tais como: economia inteligente, mobilidade inteligente, ambiente inteligente, pessoas inteligentes, vida inteligente e governança inteligente (LEE *et al.*, 2014; DE JONG *et al.*, 2015).

Conforme Marsal-Llacuna *et al.* (2015), a avaliação de uma cidade inteligente considera as experiências passadas de cidades ambientalmente amigáveis e habitáveis, abrangendo sustentabilidade e qualidade de vida, além, é claro, da composição dos fatores das tecnologias. Essa nova realidade está incentivando o aumento de novos fornecedores para o nicho do mercado de cidades inteligentes, usando recursos tecnológicos para gestão de serviços urbanos (CARVALHO e CAMPOS, 2013; ANGELIDOU, 2015).

Algumas cidades que se apropriaram do conceito de cidades inteligentes se empenharam em aproveitar seus benefícios para que as necessidades da cidade fossem cumpridas. Barcelona (Espanha) é uma cidade avançada e intensiva, de alta tecnologia que conecta pessoas, informações e elementos da cidade para criar uma cidade sustentável e ecológica, comércio competitivo e inovador e um aumento da qualidade de vida. Amsterdã (Holanda) aborda a questão com uma tecnologia inovadora e está disposta a mudar o comportamento relacionado à energia das pessoas para enfrentar os desafios climáticos (LEE *et al.*, 2014). No caso de Doha (Emirado do Catar), a prática de cidade inteligente é mais uma interação de tecnologias urbanas e atividades de economia do conhecimento (CONVENTZ *et al.*, 2015); já em Brisbane (Austrália), a prática é integrar tecnologias inteligentes a boas práticas de design urbano e espacial (PANCHOLI *et al.*, 2015).

No Brasil, percebe-se que a maioria das pesquisas sobre cidades inteligentes segue uma abordagem dupla. Uma vertente aborda as questões tecnológicas relacionadas com a implementação de cidades inteligentes e propõe modelos de maturidade para avaliar tais iniciativas (BATISTA e FARINIUK, 2017; PEREIRA e

CHWIF, 2017; BORJA e GAMA, 2014). Por outro lado, a segunda vertente descreve e discute a implementação de empreendimentos de cidades inteligentes no Brasil (HOJDA *et al.*, 2019; WEISS *et al.*, 2017). No entanto, nota-se que ambas as abordagens não têm uma visão crítica das cidades inteligentes, estando muito focadas na questão tecnológica de uma cidade inteligente. Há ainda poucos trabalhos recentes que abordam esse campo do conhecimento de uma perspectiva crítica e mais abrangente, como o papel das cidades inteligentes em uma nova administração pública e modelo de governança (WEISS E CONSONI, 2017).

Os investimentos em tecnologia, população e instituições que visam o conceito de cidade inteligente geram desenvolvimento sustentável e qualidade de vida, promovendo a gestão responsável dos recursos naturais e permitem que as instituições contribuam com inovação e melhores serviços para os cidadãos, fortalecimento dos debates e participação política (CARAGLIU *et al.*, 2011).

De acordo com Dhingra e Chattopadhyay (2016), uma cidade inteligente e sustentável tem objetivos a serem alcançados de forma adaptável, confiável, escalável, acessível e resiliente, por exemplo:

- Melhorar a qualidade de vida de seus cidadãos;
- Garantir crescimento econômico com melhores oportunidades de emprego;
- Melhorar o bem-estar de seus cidadãos, garantindo acesso a serviços sociais e comunitários;
- Estabelecer uma abordagem ambientalmente responsável e sustentável ao desenvolvimento;
- Assegurar a prestação eficiente de serviços e infraestrutura básica, como transporte público, abastecimento e drenagem de água, telecomunicações e outros serviços públicos;
- Capacidade de lidar com mudanças climáticas e questões ambientais, e;
- Fornecer um mecanismo regulatório e de governança local eficaz que garanta políticas equitativas.

Observa-se que quando se trata de questões ambientais de cidades inteligentes, a discussão é de natureza mais política, considerando resoluções internacionais e soluções inovadoras para combater desafios urbanos complexos. Existindo quatro

atributos das cidades inteligentes e sustentáveis: sustentabilidade; qualidade de vida; aspectos urbanos e inteligência. Estes são analisados sob quatro temas principais: Sociedade; economia; meio ambiente e governança (CARRILLO *et al.*, 2014).

Diante desta perspectiva, o tema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos vem ganhando destaque nos últimos anos dentre a sociedade científica. Pois, a recuperação do metano gerado a partir dos RSU remete a grandes ganhos energéticos e ambientais. A tabela 1 revela uma breve visão dos estudos do potencial do metano nos últimos anos.

Tabela 1 – Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com enfoque no aproveitamento e geração de metano.

País	Enfoque	Método	Resultado	Autores
Brasil	Uso de energia do biogás como eletricidade renovável ou biometano..	Sistema de metanização em estado sólido	Maiores ganhos econômicos ao substituir eletricidade por biometano.	ORNELAS-FERREIRA <i>et al.</i> , 2020.
China	Redução das emissões de metano em um aterro sanitário municipal de tratamento de resíduos sólidos.	Modelo de dinâmica do sistema acoplado ao método do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas	Emissões de metano decrescem após a adoção da tecnologia de redução de emissão de metano.	QU <i>et al.</i> , 2019.
Índia	Avaliação do potencial energético com base nas características do RSU, e investigação da concentração de metano gerado dos RSU.	Cromatografia gasosa; método ANOVA de duas vias.	O conteúdo energético dos RSU locais pode ser utilizado para geração de energia e o metano gerado pode ser usado para recuperação energética.	MBOOWA <i>et al.</i> , 2017.
Paquistão	Avaliação do potencial bioquímico do metano de RSU	Digestão anaeróbica; avaliação das características dos RSU (quantidade, fração orgânica, e teor de umidade).	A energia gerada pode contribuir com 2,1% a participação no fornecimento de energia diário.	SOHOO <i>et al.</i> , 2021.

Fonte: Autor (2020).

Assim, nas sessões a seguir deste capítulo é apresentada uma revisão sobre a definição, as classificações e o panorama da situação dos RSU em esfera nacional, regional e estadual. Uma breve explicação do que se trata o aterro sanitário e o biogás com o propósito de demonstrar os conceitos básicos ligados a este tipo de energia renovável, os tipos de projetos de biogás implantados no Brasil e estudos que mostram a aplicação desse gás em motores de combustão interna. Tais conceitos vinculam-se a tecnologia de geração de energia através dos resíduos sólidos gerados nas cidades

para suscitar desenvolvimento sustentável e qualidade de vida para os cidadãos, investimento modelos e aplicações de negócios de cidades inteligentes.

2.2 Resíduos sólidos

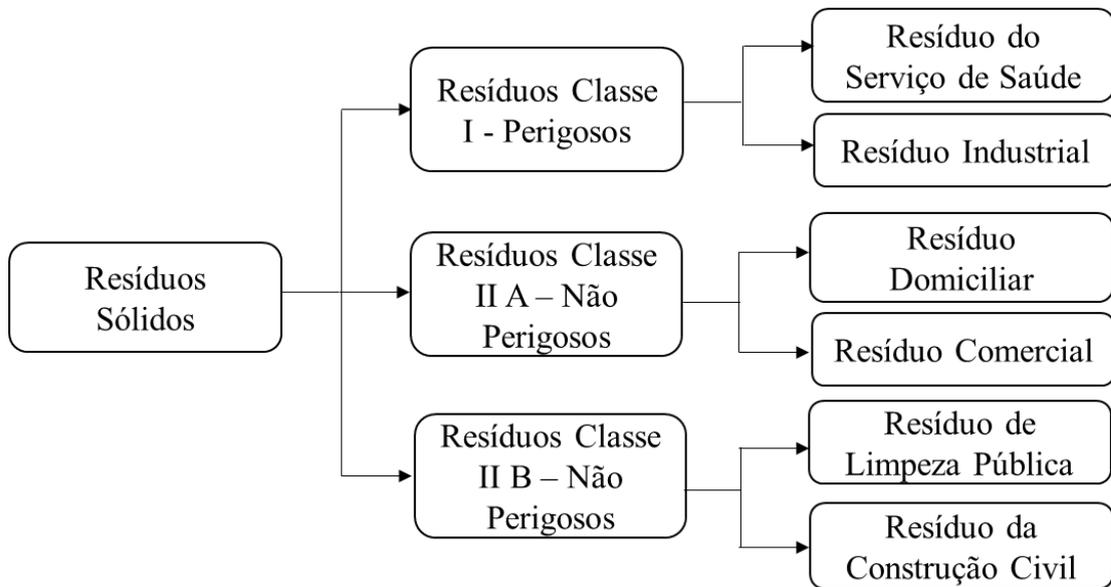
Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na Norma Brasileira (NBR) 10.004 (2004), os resíduos sólidos são substratos no estado sólido e semissólido provenientes de diversas atividades de origem industrial, hospitalar, comercial, serviços e de varrição. Além desses existem os resíduos que exigem tratamentos e soluções técnicas para seu descarte adequado, por exemplo, os lodos oriundos dos sistemas de tratamento de água, os resíduos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, entre outros.

A NBR 10.004 (2004) dispõe sobre a classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública para que possam ser gerenciados adequadamente, e podem ser classificados como:

- **Resíduos classe I – Perigosos:** aqueles que apresentam periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- **Resíduos classe II – Não perigosos:** subdivididos em não inertes (A) e inertes (B);
- **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 da norma. Além disso, os resíduos dessa classe 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 e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem. Na Figura 1 é representada essa classificação para todos os resíduos gerados dentro de um município de acordo com a atividade ou origem.

Figura 1 - Classificação dos resíduos sólidos.



Fonte: NBR 10.004 (2004).

Segundo Santos (2016), todas essas classificações demonstram o quanto os municípios e os geradores precisam de planejamento para realizar a gestão integrada e o gerenciamento dos seus resíduos sólidos com economia e respeito ao meio ambiente para estimular a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

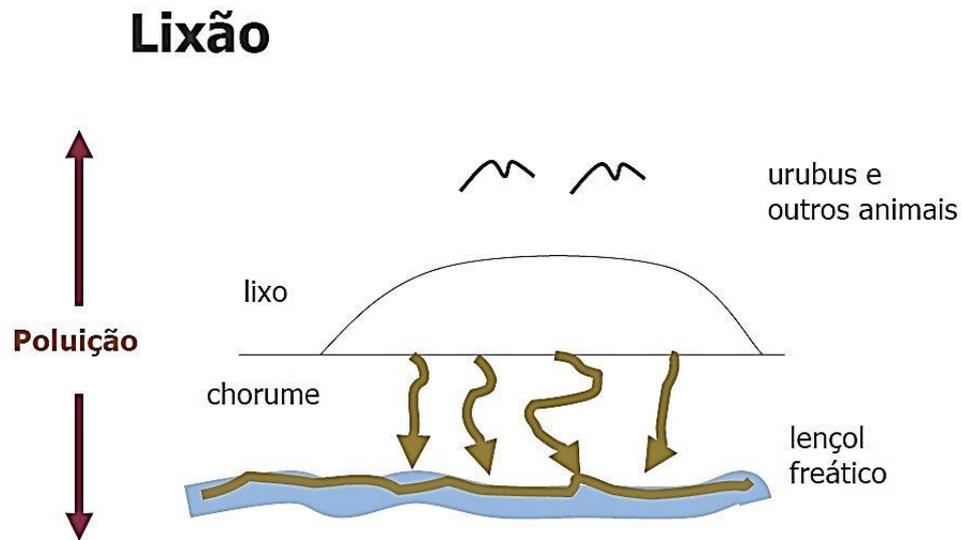
2.2.1 Resíduos sólidos urbanos no Brasil

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2018, publicou que foram geradas 79 milhões de toneladas de RSU no país, um aumento de pouco menos de 1% em relação ao ano anterior. Quanto ao índice de coleta, registrou-se um índice de cobertura de 92% (72,7 milhões). Isso significa uma alta de 1,66% em comparação a 2017, ou seja, a coleta aumentou num ritmo um pouco maior que a geração.

Quanto à disposição final dos resíduos, no Brasil predominam-se três formas: lixões, aterro controlado e aterro sanitário. Segundo Sales *et al.* (2019) os lixões são

práticas antigas e constantes nas cidades brasileiras, nos quais os resíduos sólidos são depositados em locais inadequados e sem qualquer tratamento, o que vem a ocasionar impactos para a população, a saúde pública e o meio ecológico. Na Figura 2 é apresentada a exemplificação de lixão.

Figura 2 - Esquema explicativo simplificado de um lixão.

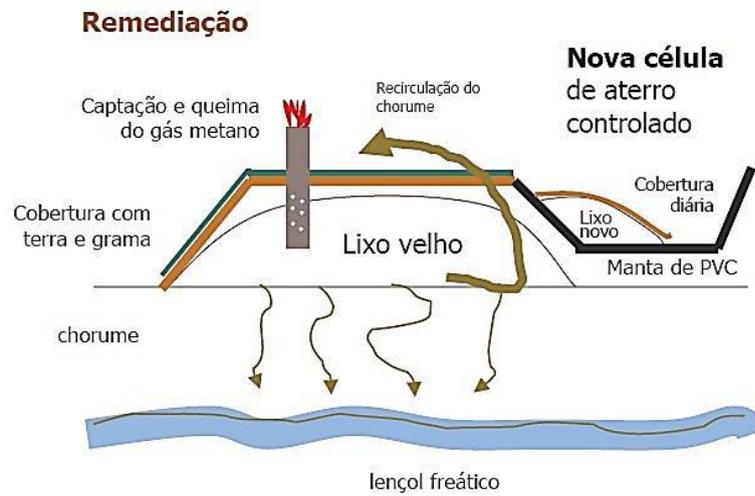


Fonte: Gonçalves (2003).

O aterro controlado é uma forma de se confinar tecnicamente o lixo coletado por meio de recobrimento diário, embora não conte com impermeabilização do solo e nem sempre possui sistema de drenagem do chorume e de gases (DA SILVA, 2016). Na Figura 3 é demonstrada a ilustração de aterro controlado.

Figura 3 - Esquema explicativo simplificado de um aterro controlado.

Aterro Controlado

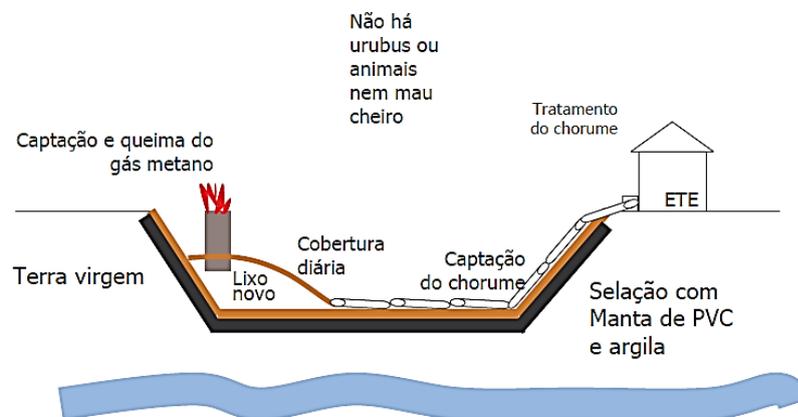


Fonte: Gonçalves (2003).

Segundo Santos *et al.* (2018), aterro sanitário é uma unidade de tratamento e valorização de resíduos indiferenciados. Nele são depositados os resíduos que não puderem ser valorizados de outras formas, nomeadamente reutilização, reciclagem e valorização orgânica ou energética. Porém, também causam impactos que devem ser mitigados com a recuperação das áreas degradadas. Pode observar exemplificação de aterro sanitário na Figura 4.

Figura 4 - Esquema simplificado de um aterro sanitário.

Aterro Sanitário

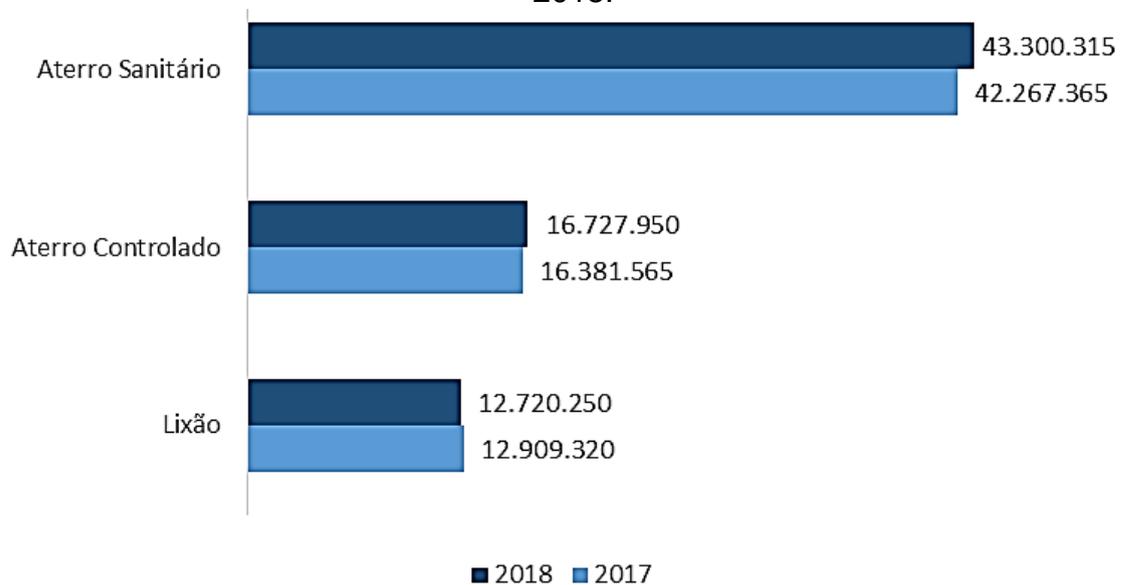


Não há contaminação do lençol freático

Fonte: Gonçalves (2003).

Segundo os dados publicados pela ABRELPE (2018), das 72,7 milhões de toneladas coletadas no Brasil em 2018, 59,5% tiveram disposição final adequada e foram encaminhadas para aterros sanitários – uma expansão de 2,4% em relação ao valor total do ano anterior. Porém, unidades inadequadas como lixões e aterros controlados ainda têm participação significativa de 23% e 17,5%, respectivamente. Estão presentes em todas as regiões e recebem mais de 80 mil toneladas de resíduos por dia (ton/dia), com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Disposição final dos RSU coletados no Brasil (ton/dia) nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2018).

Quando se relata o panorama da situação dos resíduos sólidos na região Nordeste, a ABRELPE (2018) afirma que os 1.794 municípios da região Nordeste geraram, em 2018, a quantidade de 53.975 ton/dia de RSU, das quais aproximadamente 81,1% foram coletadas. No entanto, ao menos 6 em cada 10 toneladas são destinados para aterros controlados e lixões, ou seja, mais de 28 mil toneladas diárias dos resíduos coletados foram encaminhadas para locais que podem causar poluição ambiental, com danos à saúde da população.

2.2.2 Resíduos sólidos urbanos no Ceará

Em agosto de 2010 foi sancionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), através da Lei nº 12.305 (2010) que institui responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos, cria metas e institui instrumentos de planejamento nas mais diferentes escalas, inclusive estadual, municipal e intermunicipal. A partir de então, criou-se uma necessidade de elaboração do Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Ceará com o apoio da Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará (SEMACE) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA) através da Lei 16.032 (2016) e cria Consórcios Públicos Intermunicipais para gestão integrada de resíduos sólidos conforme Lei 11.107 (2005) e seu Decreto Regulamentar nº 6.017 (2007).

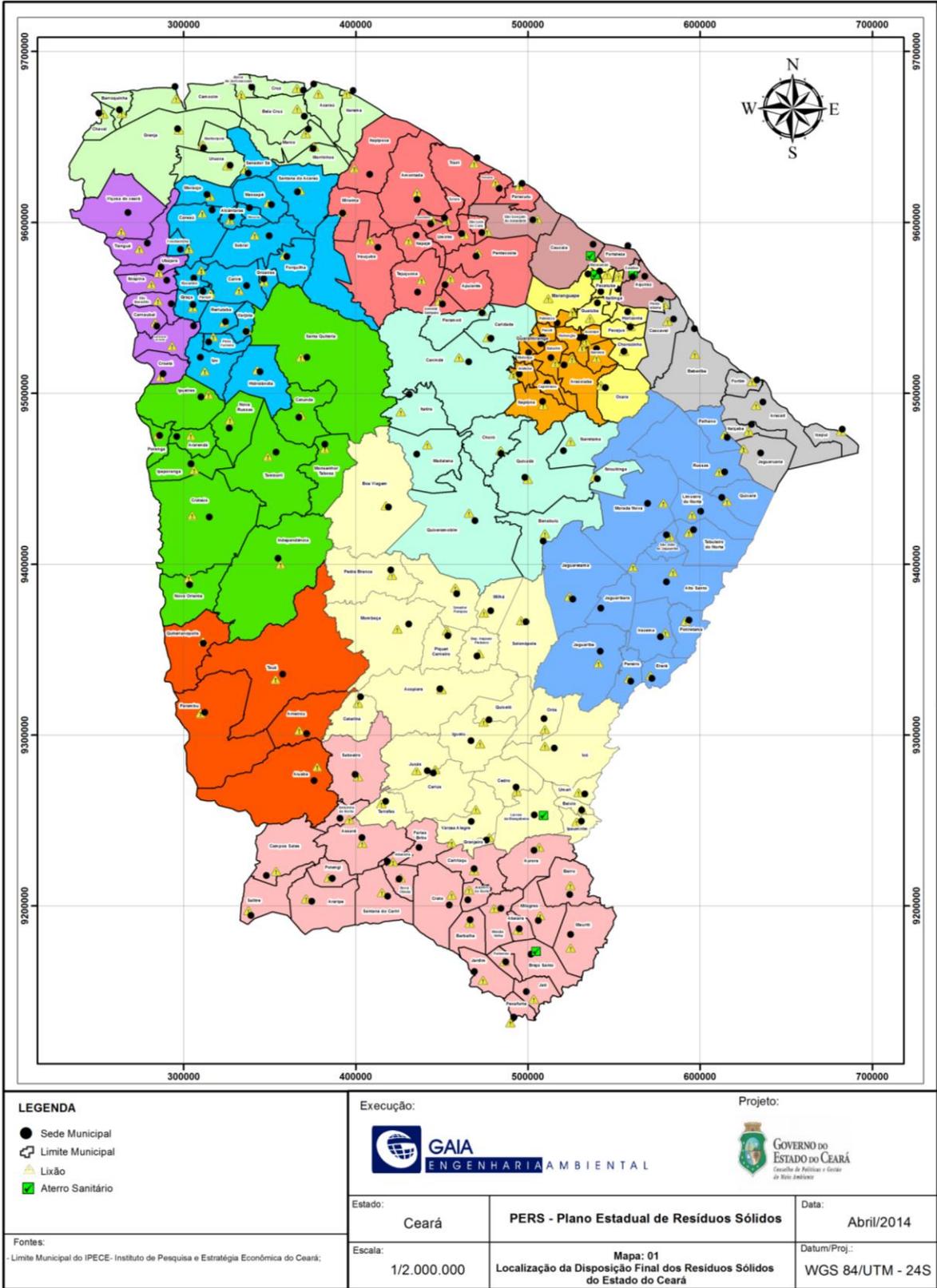
Por meio dos consórcios pretende-se desativar os lixões e construir aterros sanitários. O objetivo é melhorar a saúde pública na área de saneamento básico e alinhar as políticas do Estado com as políticas ambientais de sustentabilidade. Em resumo, tem-se que dos 184 municípios existentes no estado do Ceará, 168 encontram-se consorciados (143 por iniciativa do estado e 25 por iniciativa dos municípios), 6 não se associaram em consórcio por existir acordos bilaterais na região metropolitana de Fortaleza, 4 decidiram não aderir ao modelo de consórcio e 6 não puderam se consorciar (SEMACE e GAIA ENGENHARIA AMBIENTAL, 2015).

Contudo, mesmo com o destaque do estado nas ações políticas para estruturação da gestão dos resíduos sólidos, os resultados obtidos ainda se apresentam de maneira discreta. No âmbito do estado ocorre a predominância da disposição inadequada dos resíduos sólidos. Dos municípios do Ceará apenas Caucaia, Maracanaú, Eusébio, Lavra da Mangabeira e Brejo Santo possuem aterro sanitário. A localização dos aterros e lixões no estado está disposta na Figura 6 subdividida por cada regional do Ceará.

Segundo Rodrigues *et. al.* (2018), esse cenário é delineado em função das limitações que os municípios brasileiros de pequeno e médio porte possuem para viabilizar a implantação e operação de aterros sanitários para destinação de seus resíduos sólidos. Neste contexto, a solução mais adequada é a instauração de consórcios intermunicipais, indicada na política nacional, proposta na política estadual e nos planos intermunicipais de gestão integrada destes municípios. Contudo, na prática, muitos têm sido os empecilhos para o estabelecimento destes consórcios, o que vem

atrasando fortemente os avanços dos resultados esperados no planejamento estabelecido.

Figura 6 - Mapa de localização dos Lixões e Aterros Sanitários.



Fonte: SEMACE e Gaia Engenharia Ambiental (2015).

2.2.3 Caracterização física dos resíduos no estado do Ceará

A tipologia dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do estado do Ceará foi divulgada no Panorama Dos Resíduos Sólidos Do Ceará Contrato Nº 38/2012/CONPAM (SEMACE e Gaia Engenharia Ambiental, 2015), a análise deu-se por amostragem tomando-se por base o Município de maior geração de RSU, estimada para cada Regional no ano de 2013. Os dados da representação tipológica estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Representação das tipologias para os municípios de maior geração de RSU estimada para cada regional.

Regional	Município Representativo da Regional	RSU Gerados no Município 2013 (ton/dia)	RSU do Maior Gerador em Relação à Respectiva Regional	Amostra Representativa de RSU do maior Gerador de Cada Regional em Relação ao Estado
Cariri	Juazeiro do Norte	329,34	46,96%	3,44%
Chapada da Ibiapaba	Tianguá	42,34	31,53%	0,44%
Litoral Leste	Cascavel	59,83	36,83%	0,62%
Litoral Norte	Camocim	39,87	22,21%	0,42%
Litoral Oeste	Itapipoca	74,65	29,37%	0,78%
Maciço de Baturibe	Batunité	22,27	25,37%	0,23%
Médio Jauaribe	Russas	42,03	21,59%	0,44%
RMF - A*	Fortaleza	5.530,83	90,83%	57,76%
RMF - B	Maracanaú	269,03	43,42%	2,81%
Sertão Central	Quixadá	61,91	31,25%	0,65%
Sertão Centro Sul	Iguatu	79,83	23,47%	0,83%
Sertão Crateús	Crateús	55,05	31,84%	0,57%
Sertão dos Inhamuns	Tauá	29,67	55,29%	0,31%
Sertão Norte	Sobral	218,10	56,20%	2,28%
Total	-	6.85475	-	72,58%

*Municípios que compõem a Regional RMF-A: Aquiraz, Caucaia, Eusébio, Fortaleza e São Gonçalo do Amarante.

Fonte: SEMACE e Gaia Engenharia Ambiental LTDA (2015).

Segundo SEMACE e Gaia Engenharia Ambiental LTDA (2015), as caracterizações físicas dos RSU dos municípios visitados pela Gaia Engenharia

Ambiental LTDA, de maior gerador de cada regional foram segregadas e identificadas em doze itens, mostrados na Tabela 3, no qual posteriormente estes foram agrupados em: Putrescível, Reciclável e Combustível.

Tabela 3 - Componentes putrescíveis, recicláveis e combustíveis.

Componente	Putrescível	Reciclável	Combustível
Borracha		X	X
Couro	X		X
Madeira	X	X	X
Matéria Orgânica	X	X	
Matéria de Origem Sanitária	X		X
Metais Ferrosos		X	
Metais Não Ferrosos		X	
Papel	X	X	X
Papelão	X	X	X
Plástico Duro		X	X
Plástico Filme		X	X
Trapos e Panos		X	X

Fonte: SEMACE e Gaia Engenharia Ambiental LTDA (2015).

Os municípios estudados apresentam os valores bastante significativos no tocante aos materiais recicláveis, em que os percentuais oscilam em 19% a 48%. Já os valores putrescíveis encontram valores elevados. Os materiais combustíveis chegam a um valor muito elevado, o que reforça ainda mais a necessidade da disposição final adequada.

2.3 Aterro sanitário

Conforme Elk (2007), aterro sanitário é o resultado de uma obra de engenharia, cujo projeto atende a critérios técnicos, conforme mostrados na Tabela 4, com o objetivo de, efetivamente, possibilitar a disposição dos resíduos sólidos urbanos, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.

Para elaborar um projeto de aterro sanitário para resíduos sólidos de Classe II (não perigosos) é necessário o atendimento à norma NBR 8.419 (1992) estabelecida pela ABNT que cita as diretrizes técnicas dos elementos básicos de projetos de aterros,

como, impermeabilização da base e superior, monitoramento ambiental e geotécnico, sistema de drenagem de lixiviados e de gases, exigência a respeito de células específicas para resíduos de serviços de saúde, disponibilização do manual de operação do aterro e o uso futuro da área do aterro, pós-atividades.

Tabela 4 - Critérios técnicos para o aterro sanitário.

Critérios	Observações
Uso do solo	As áreas têm que se localizar numa região onde o uso do solo seja rural (agrícola) ou industrial e fora de qualquer unidade de conservação ambiental.
Proximidade a cursos d'água relevantes	As áreas não podem se situar a menos de 200 metros de corpos d'água relevantes, tais como, rios, lagos, lagoas e oceano. Também não poderão estar a menos de 50 metros de qualquer corpo d'água, inclusive valas de drenagem que pertençam ao sistema de drenagem municipal ou estadual.
Proximidade a núcleos residenciais urbanos	As áreas não devem se situar a menos de mil metros de núcleos residenciais urbanos que abriguem 200 ou mais habitantes.
Proximidades a aeroportos	As áreas não podem se situar próximas a aeroportos ou aeródromos e devem respeitar a legislação em vigor.
Distância do lençol freático	As distâncias mínimas recomendadas pelas normas federais e estaduais são as seguintes: <ul style="list-style-type: none"> • Para aterros com impermeabilização inferior através de mata plástica sintética, a distância do lençol freático à manta não poderá ser inferior a 1,5 metro. • Para aterros com impermeabilização inferior através de camada de argila, a distância do lençol freático à camada impermeabilizante não poderá ser inferior a 2,5 metros e camada impermeabilizante deverá ter um coeficiente de permeabilidade menos que 10^{-6} cm/s.
Vida útil mínima	É desejável que as novas áreas de aterro sanitário tenham, no mínimo, cinco anos de vida útil.
Permeabilidade do solo natural	É desejável que o solo do terreno selecionado tenha uma certa impermeabilidade natural, com vistas a reduzir as possibilidades de contaminação do aquífero. As áreas selecionadas devem ter características argilosas e jamais deverão ser arenosas.
Extensão da bacia de drenagem	A bacia de drenagem das águas pluviais deve ser pequena, de modo a evitar o ingresso de grandes volumes de água de chuva na área do aterro.
Facilidade de acesso a veículos pesados	O acesso ao terreno deve ter pavimentação de boa qualidade, sem rampas íngremes e sem curvas acentuadas, de forma a minimizar o desgaste dos veículos coletores e permitir seu livre acesso ao local de vazamento mesmo na época de chuvas muito intensas.
Disponibilidade de material de cobertura	Preferencialmente, o terro deve possuir ou se situar próximo a jazidas de material de cobertura, de modo a assegurar a permanente cobertura do lixo a baixo custo.

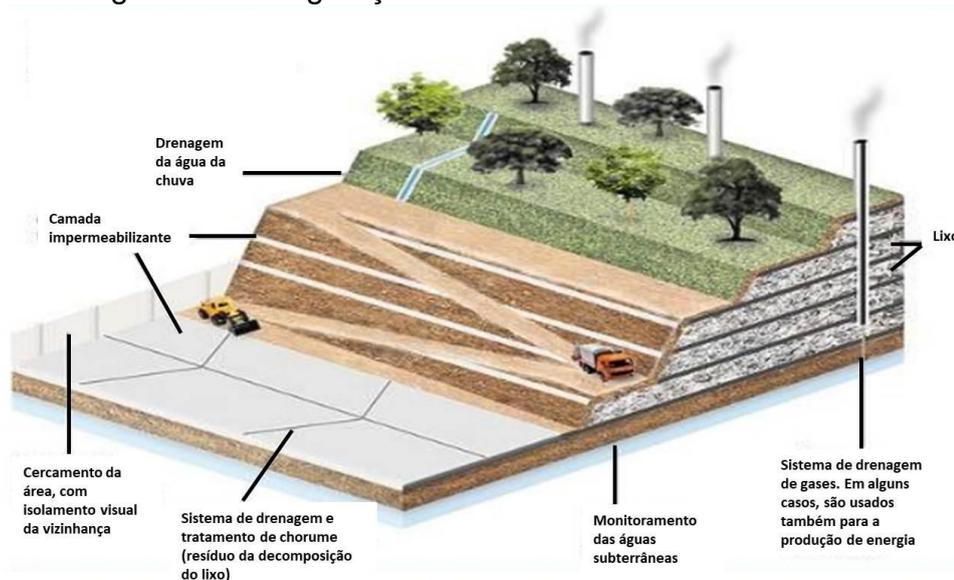
Fonte: Monteiro et. al. (2001).

Conforme Carvalho *et al.* (2008), o aterro sanitário é como um reator bioquímico de grandes proporções que tem resíduos e água como importantes produtos de *input*, gás e lixiviados, como produtos de *output*. No que se refere ao projeto de construção de um aterro sanitário, segundo Nascimento (2007), deve haver o seguinte conjunto de componentes: divisão em células, compactação de resíduos, cobertura, sistema de

impermeabilização do solo de fundação, sistema de coleta e drenagem de líquidos e gases, tratamento do lixiviado, monitoramento geotécnico e ambiental, entre outros.

De acordo com Naime (2012), a preparação se efetiva com a impermeabilização e o nivelamento do terreno, com obras de drenagem que visam a impedir que a percolação, na massa dos resíduos depositados (lixo), atinja as águas pluviais e, desta forma, aumente o volume de chorume a ser tratado. No setor de execução, os resíduos são discriminados conforme as suas características, e dispostos separadamente. Na conclusão do processo, momento em que é atingida a capacidade de disposição final de um setor do aterro sanitário já esgotado, é feito um selamento com manta de polietileno de alta densidade. Acima é colocada uma camada de matéria orgânica onde são plantadas gramíneas. Na Figura 7 são ilustrados a configuração básica e os sistemas inerentes ao funcionamento de um aterro sanitário.

Figura 7 - Configuração básica de um aterro sanitário.



Fonte: Soares e Lopes (2019).

Elk (2007) relata algumas etapas indispensáveis na construção de um aterro sanitário:

- **Sistema de drenagem das águas superficiais:** Tem a função de evitar a entrada de água de escoamento superficial no aterro. Além de aumentar o volume de lixiviados, a infiltração das águas superficiais pode causar instabilidade na massa de resíduos pelas poro-pressões induzidas.

- **Sistema de impermeabilização de fundo e de laterais:** A impermeabilização da fundação e das laterais do aterro tem a função de proteger e impedir a percolação do chorume para o subsolo e aquíferos existentes. No Brasil, a exigência mínima para a contenção de lixiviados não-perigosos é de que as camadas de fundo e laterais consistam de uma camada simples, podendo ser de argila compactada de permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s ou geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) com espessura mínima de 1 mm.
- **Sistema de drenagem dos lixiviados:** O lixiviado, também chamado de chorume ou percolado, é originado de várias fontes: da umidade natural dos resíduos que podem reter líquidos através da absorção capilar; de fontes externas, como água de chuvas, superficiais e de mananciais subterrâneos, de água de constituição da matéria orgânica e das bactérias que expelem enzimas que dissolvem a matéria orgânica para a formação de líquidos.

A composição, quantidade e produção dos lixiviados dependem de uma série de fatores, como condições climáticas, temperatura, umidade, pH, composição, densidade dos resíduos, forma de disposição e idade dos resíduos. Os lixiviados apresentam grande concentração de substâncias sólidas e alto teor de matéria orgânica. Esses líquidos, quando passam do substrato inferior do aterro sem que antes tenham passado por um processo de tratamento, contaminam os lençóis de água subterrâneos.

Por essa razão, um sistema eficiente de drenagem é importante para evitar a acumulação de lixiviados dentro do aterro. A drenagem dos lixiviados pode ser executada através de uma rede de drenos internos – geralmente constituídos de tubos perfurados preenchidos com brita, com conformação similar a uma “espinha de peixe” – que levam o chorume drenado para um sistema de tratamento. O material utilizado na construção do dreno deve ser resistente ao resíduo e ao chorume, e projetado de forma a não sofrer obstruções. A drenagem deve estar acima da camada impermeabilizante inferior.

- **Sistema de tratamento de lixiviados:** Os lixiviados são considerados um problema do ponto de vista do tratamento, uma vez que são

altamente contaminantes e sua qualidade e quantidade se modificam, com o passar do tempo, em um mesmo aterro.

A legislação ambiental exige tratamento adequado para o lançamento dos lixiviados, e normalmente para atender os padrões estabelecidos é necessária uma combinação de diferentes métodos. Os mais usuais são: tratamentos biológicos aeróbios ou anaeróbios (lodos ativados, lagoas, filtros biológicos) e os tratamentos por processos físico-químicos (diluição, filtração, coagulação, floculação, precipitação, sedimentação, adsorção, troca iônica, oxidação química).

Os tratamentos biológicos e físico-químicos podem ser combinados. No caso de haver necessidade de melhoria na qualidade final do efluente, admite-se o uso de tecnologias mais sofisticadas para o polimento do efluente, como é o caso da nanofiltração. O chorume também pode ser recirculado para o interior da massa de resíduos (com o objetivo de manter o grau de umidade necessário ao processo de decomposição dos resíduos orgânicos), para molhar as vias internas ou, ainda, pode ser encaminhado para estações de tratamento de esgoto em condições especiais e desde que estas suportem a carga adicional representada pelo chorume sem prejudicar seu processo de tratamento.

- **Sistema de drenagem dos gases:** É constituído através de uma rede de drenagem adequada, evitando que os gases escapem através dos meios porosos que constituem o subsolo e atinjam fossas, esgotos e até edificações. Os drenos são compostos, na maioria dos casos, por uma coluna de tubos perfurados de concreto armado envoltos por uma camada de brita ou rachão, que é fixada à coluna de tubos através de uma tela metálica.
- **Cobertura intermediária e final:** O sistema de cobertura diário (intermediário e final) tem a função de eliminar a proliferação de vetores, diminuir a taxa de formação de lixiviados, reduzir a exalação de odores e impedir a saída descontrolada do biogás.

A cobertura diária é realizada ao final de cada jornada de trabalho; a cobertura intermediária é necessária naqueles locais onde a superfície de disposição ficará inativa por mais tempo, aguardando, por exemplo, a conclusão de um determinado patamar, para então dar início ao seguinte;

e a cobertura final tem por objetivo evitar a infiltração de águas pluviais – o que resultaria em aumento do volume de lixiviado – e o vazamento dos gases gerados na degradação da matéria orgânica para a atmosfera.

A cobertura final pode ser de diferentes tipos: camada homogênea de argila, ou mistura de argila e material granulado, argila com diferentes geossintéticos, solos orgânicos, lamas e lodos de estação de tratamentos de água e esgotos, entre outros.

No Brasil, a grande maioria dos aterros possui cobertura com camada homogênea de argila compactada.

- **Componentes complementares:** Além desses dispositivos, os aterros sanitários devem conter outros componentes que são considerados básicos, como cerca para impedir a entrada de pessoas e animais, vias de acesso interno transitáveis, cinturão verde ao redor do aterro, guarita para o controle da entrada de veículos, sistema de controle da quantidade e do tipo de resíduo, escritório para o desenvolvimento de atividade administrativa, oficina de manutenção e guarda de equipamentos, sistema de comunicação interna e externa, iluminação para operação noturna, banheiros, refeitórios, identificação do local e acessos às frentes de aterramento.

2.4 Biogás

O biogás é uma fonte de energia renovável, pois pode ser produzido com matérias primas que se renovam em uma escala de tempo curta para a humanidade, ou seja, apenas meses ou anos, como os resíduos orgânicos. Dentre os benefícios ambientais, destaca-se que o biogás é um indutor da destinação e tratamento adequados de efluentes e resíduos, reduzindo o risco de contaminação do solo, do ar e dos recursos hídricos. Os aspectos ambientais que envolvem na geração do biogás são importantes, porque muitas vezes sua produção é motivada pela obrigação legal de tratamento de efluentes e resíduos. Assim, além da exigência de tratamento adequado, tem-se a possibilidade de ganhos econômicos e financeiros com a produção de energia a partir de um dos produtos do tratamento, o processo passa a ser mais atrativo e causa também impactos ambientais positivos (MARIANI, 2018).

Ainda que após o processo de biodigestão a carga orgânica do efluente seja reduzida, diminuindo seu potencial de impacto, os nutrientes comumente encontrados em efluentes e resíduos não são degradados e continuam compondo o digestato. Esses nutrientes, como o Nitrogênio, Fósforo e Potássio podem causar a eutrofização em recursos hídricos, ou seja, a proliferação de algas, causando impacto ambiental em corpos d'água. Ao mesmo tempo, justamente por conta de sua composição, o digestato produzido no processo de digestão anaeróbia pode ser utilizado como fertilizante do solo, promovendo o aumento da produtividade e redução de custos na agricultura. Ao reduzir a demanda por fertilizantes químicos, benefícios indiretos são obtidos, uma vez que, segundo Costa e Silva (2012), comumente são explorados em áreas de mineração distantes das áreas de agricultura, inclusive em outros países, causando impactos ambientais no local e durante a produção e transporte.

Outro benefício importante é a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE). A concentração desses gases na atmosfera vem aumentando nas últimas décadas e pesquisas a correlacionam ao aumento da temperatura global, o que trará muitos impactos ambientais, sociais e econômicos ao planeta. A produção e uso do biogás pode promover a redução da emissão de gás metano de aterros sanitários, pois o biogás produzido passa a ser coletado com maior eficiência e pode ser aproveitado para geração de energia elétrica. Também pode promover a redução das emissões de gás metano de lagoas de armazenamento de efluentes, pois a parte do efluente que não tem contato com o ar na superfície acaba por ser digerido anaerobicamente, emitindo metano para a atmosfera. Ao mesmo tempo, sua utilização permitiria a substituição de combustíveis fósseis, como óleo diesel, gás natural e gás liquefeito de petróleo (GLP), por um combustível renovável tanto no setor de transportes quanto de geração de energia elétrica.

O biogás é uma fonte de energia bastante distribuída no território, diferente de outras fontes que estão bastante concentradas. De fato, a matéria prima para produção de biogás está distribuída tanto em regiões urbanas quanto industriais ou agrícolas. Segundo Bley (2015), essa característica permite que se produza energia próxima ao seu consumo e seja reduzida a demanda de energia elétrica e combustíveis de grandes usinas ou de locais distantes, o que aumenta a segurança, a qualidade e a eficiência energética, pois a energia (elétrica e combustível) passa a ser produzida de forma distribuída.

No entanto, essa característica pode reduzir a economia de escala, afetando a viabilidade e atratividade dos projetos em diversos casos, pois as plantas estão distribuídas no território, mas muitas são de pequena escala. A consequência disso é que, com o objetivo de garantir a viabilidade dos projetos, muitas vezes são utilizadas tecnologias de baixo custo para a produção e uso do biogás, reduzindo a eficiência, qualidade e segurança.

Dentre os impactos sociais da produção e uso do biogás Divya *et al.* (2015) citam a melhoria da qualidade de vida das pessoas no entorno dos sistemas pela redução dos odores e moscas no sistema de tratamento dos efluentes.

O uso do biogás para geração de energia e do digestato para fertilização do solo possibilita a redução dos custos com a compra desses insumos em propriedades rurais, indústrias, aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto ou qualquer outro tipo de planta de biodigestão. Outra possibilidade é que esses insumos (energia e fertilizante) sejam comercializados e possam gerar novas fontes de renda para as plantas de biogás. Como citado por Bley (2015), em casos em que a produção de biogás é o foco do negócio e não apenas o aproveitamento do resíduo da atividade produtiva, o biogás passa a ser um impulsionador de novos negócios. No caso do atendimento em escala doméstica, como de residências em regiões muito pobres e/ou isoladas, a biodigestão de resíduos da agricultura familiar e os seus produtos podem trazer benefícios como acesso à energia e à melhoria da qualidade de vida de mulheres e da igualdade de gênero.

Outra faceta dessa tecnologia na agricultura pode ser o incentivo aos jovens para permanecerem na área rural, uma vez que se configura em uma nova atividade produtiva e uma nova fonte de renda. Segundo Bley (2015), a produção de biogás pode incentivar a geração de empregos e o crescimento da economia da região onde é realizada, pois demanda serviços de engenharia, instalação e manutenção e insumos.

Além disso, a produção de biogás pode ser feita pelos próprios consumidores de energia, tornando-os autoprodutores e mais capazes de controlar esse insumo para suas atividades produtivas. No entanto, destaca-se a complexidade de um processo biológico como a biodigestão, que é influenciado por aspectos como temperatura, pH, homogeneização, clima características do substrato e outros. A demanda por filtragem do biogás para evitar a corrosão dos equipamentos é mais um fato que aumenta o custo dos projetos. Dessa forma Jende (2016), indica que há diversas barreiras e dificuldades para que o biogás seja aproveitado em todo o seu potencial no Brasil.

Por fim, segundo Coimbra-Araújo *et al.* (2014) o biogás não é apenas uma fonte de energia, mas um mobilizador de desenvolvimento regional, pois pode ser produzido com substratos provenientes de diversas atividades produtivas e locais, como a agropecuária, indústria, aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes.

2.4.1 Biogás como fonte de energia

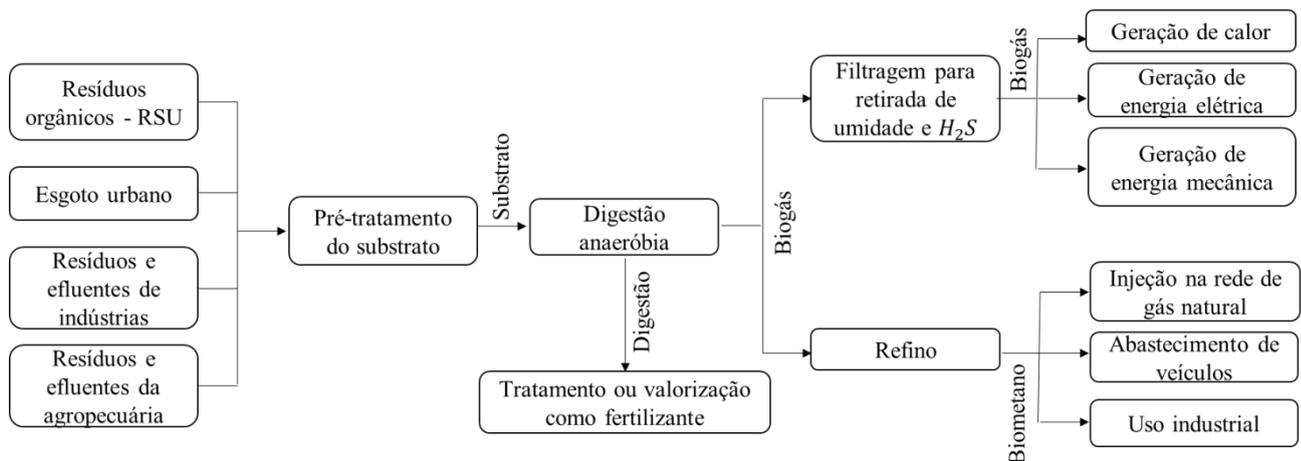
O biogás é produzido em processos de degradação anaeróbia de matéria orgânica, esse processo ocorre naturalmente com toda matéria orgânica que entra em decomposição, por exemplo, quando há resíduos acumulados encontrados em maior quantidade em lixões, aterros sanitários ou em lagoas de armazenamento de efluentes. Com isso utilizando tecnologias adequadas, como os biodigestores, a biodigestão pode ser aplicada com o objetivo de tratar efluentes ou resíduos, de produzir biogás e/ou de produzir biofertilizante (Coimbra-Araújo *et al.*, 2014). Dentre os resíduos, podem-se citar o esgoto urbano, a fração orgânica do resíduo sólido urbano, dejetos da produção de animais, abatedouros de animais, feculárias, usinas de açúcar e etanol, etc.

O biogás é composto majoritariamente por metano (CH_4), gás carbônico (CO_2) e outros gases presentes em baixas concentrações, como gás sulfídrico (H_2S), hidrogênio (H_2) e nitrogênio (N_2). Segundo Qian *et al.* (2017), os componentes do biogás podem ser divididos em duas categorias: componentes combustíveis e componentes não combustíveis. Os componentes combustíveis são principalmente CH_4 , óxido de carbono (CO) e H_2 . Os componentes não combustíveis são principalmente CO_2 e N_2 . A presença do metano garante ao biogás a capacidade de ser uma fonte de energia, permitindo seu uso para a geração de energia elétrica, produção de calor e na produção de biometano e de CO_2 .

O biometano pode ser considerado um gás similar ao gás natural quando sua composição atender à Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) N° 8 (2015), alterada pela Resolução ANP N° 685 (2017). Para isso, o biogás deve passar por um processo de separação dos gases (*upgrading*) que faz com que a concentração de metano passe de cerca de 60% (base molar) para, no mínimo, 96,5%. Essa Resolução foi regulamentada para o território nacional, com exceção da região Norte, abastecida pelo gás natural de Urucu, onde a concentração mínima de metano no biometano deve ser de 90 a 94% (base molar).

Mariani (2018) afirmou que o processo de produção de biogás envolve basicamente as seguintes etapas: pré-tratamento do substrato; digestão anaeróbia no biodigestor; armazenagem, tratamento e aproveitamento do digestato; tratamento, armazenamento e transporte de biogás; aplicação do biogás na geração de energia elétrica e/ou calor; e produção, armazenamento e transporte de biometano, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma de produção e uso do biogás.



Fonte: Mariani (2018).

2.4.2 Processos de produção de biogás

O uso da digestão anaeróbica no tratamento de resíduos orgânicos é atraente por muitas razões que envolvem aspectos econômicos e ambientais. Digestão anaeróbica é a coleção de processos pelos quais os microrganismos decompõem o material biodegradável na ausência de oxigênio (DADA e MBOHWA, 2017). A digestão anaeróbica é principalmente uma decomposição biológica mesofílica e hemofílica e estabilização de resíduos biodegradáveis em condições anaeróbicas controladas, como temperatura, pH, tempo de retenção, etc.

O processo anaeróbico para a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos consiste necessariamente em quatro estágios a nível bacteriano, sendo elas a Hidrólise, a Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese.

Segundo Barton *et al.* (2008), o estágio de hidrólise envolve a frenagem de grandes macromoléculas de proteínas, gorduras e polímeros de carboidratos (como amido e celulose) em aminoácidos, ácidos graxos de cadeia longa e açúcares, já na fase da acidogênese, Dada e Mbohwa (2017) afirmam que ocorre a fermentação das

pequenas moléculas orgânicas produzidas no estágio de hidrólise, para formar três, quatro e cinco ácidos graxos voláteis, como ácido láctico, ácido butírico, ácido propiônico, ácido valérico e álcoois baixos.

No estágio de acetogênese as bactérias consomem os produtos fermentados da fase acidogênica para produzir ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio (RAPPORT *et al.*, 2012). Seguido pelo processo de metanogênese que é o estágio final em que o metano é produzido como resultado do consumo de acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Existem vias bioquímicas usadas pelos metanogênios para produzir gás metano (BARTON *et al.*, 2008). As estequiometrias das reações químicas gerais são mostradas em (1), (2) e (3). O processo de digestão anaeróbica é resumido na Figura 9.

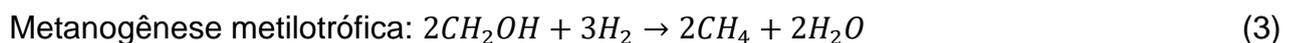
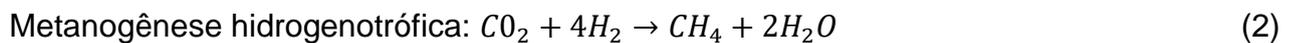
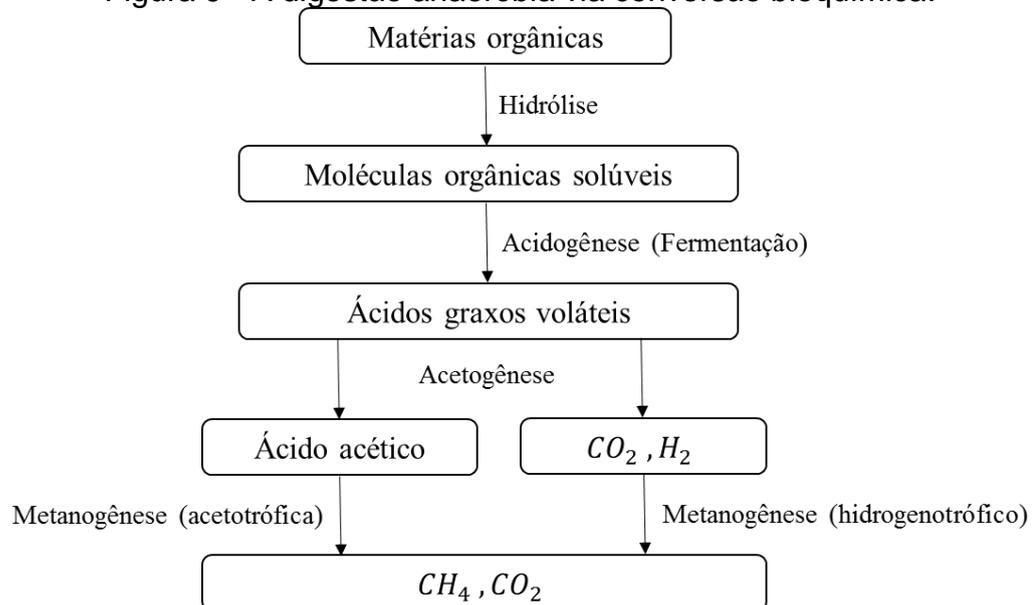


Figura 9 - A digestão anaeróbica via conversão bioquímica.



Fonte: Adaptado Barton *et al.* (2008).

A captura desse gás nos aterros sanitários pode trazer grandes vantagens ambientais e econômicas, pois além de reduzir as emissões dos gases de efeito estufa à atmosfera, pode ser aproveitado para a geração de energia, principalmente por se tratar de um gás de grande poder calorífico. No estado do Ceará, a usina Gás Natural Renovável Fortaleza (GNR Fortaleza) tem capacidade de purificar até 100 mil m³ de Biometano por dia, cerca de 3,5 milhões de m³ por ano, equivalente a 610.000 toneladas

de gás carbônico (CO₂) por ano que deixam de ser lançado na atmosfera (SAMPAIO, 2018).

Do ponto de vista ambiental, o metano, como um gás de efeito estufa, tem potencial significativo, pois é mais eficaz na absorção/reemissão de energia (radiação) do que o dióxido de carbono. Portanto, a diminuição da quantidade de metano na atmosfera é um fator significativo na redução dos gases que potencializam o aquecimento global (BOROWSKI *et al.*, 2020).

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) divulgado pelo MMA (2012), o objetivo do aproveitamento energético do biogás produzido pela degradação dos resíduos é convertê-lo em uma forma de energia útil, tais como: eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade.

2.4.3 Biometano

O biogás obtido a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente em efluentes (esgoto sanitário ou vinhaça, por exemplo), resíduos sólidos urbanos, resíduos ou culturas agrícolas vem sendo historicamente utilizado como fonte primária, para a geração de eletricidade, calor ou a cogeração. Por suas características físico-químicas, o biogás não é equivalente, para uso final, ao gás fóssil, restringindo a economicidade de sua aplicação, frente ao baixo desempenho termodinâmico e ambiental (VEIGA E MERCEDES, 2015).

Assim, nos últimos anos, processos cada vez mais sofisticados de purificação do biogás foram maciçamente implantados. Estes processos equiparam o conteúdo energético do biogás ao do gás natural, resultando no “biometano”, desta forma definido como um gás que apresenta alta concentração de metano e qualidade suficiente para viabilizar seu uso em automóveis, ou sua injeção em redes de distribuição de gás natural (KOORNNEEF *et al.*, 2013).

O processo de enriquecimento de biogás a biometano tem como objetivo principal o aumento da concentração de metano por meio da remoção de CO₂ e outros componentes (VEIGA e MERCEDES, 2015). Eze e Agbo (2010) argumentam a favor da economicidade da purificação do biogás e enumeram seus benefícios, fácil compressão, conseqüentemente, menor necessidade de armazenamento para uma ampla gama de

usos como combustível veicular, geração eficiente de eletricidade, matéria-prima para indústria química, células a combustível, e outros.

As tecnologias para purificação de biogás são as mesmas usadas para o tratamento do gás natural (Makaruk *et. al.*, 2010; Rasi *et. al.*, 2014), estão em uso e disponíveis comercialmente há mais de 20 anos. Sua escolha depende de diferentes fatores, tais como custos, composição e características do fluxo de gás, por exemplo, pureza, temperatura, pressão (KOORNNEEF, *et al.* 2013).

Segundo informações contidas em Probiogás (2016) as mais importantes medidas para a purificação do biogás são a separação de dióxido de carbono e sulfeto do biogás, bem como o processo de secagem, visando alcançar um teor de metano de mais de 95%. Em primeiro lugar, aplicam-se procedimentos físicos, baseados em adsorção e absorção, refrigeração e separação por membranas, tal como etapas de absorção química. Com base, ainda, no Probiogás (2016), são diversos os processos utilizados para a dessulfurização, para a separação do dióxido de carbono e para a secagem. A seguir estão discriminadas as etapas de purificação:

- Dessulfurização:

Alguns estudos realizados sobre a retirada de ácido sulfídrico falam em retirada via reator biológico, adição de cloreto de ferro, óxido de ferro, membrana separadora, carvão ativado, entre outros. O que irá diferenciar entre eles será além do método a eficiência de cada um e o quanto cada método irá conseguir reter o H_2S do sistema.

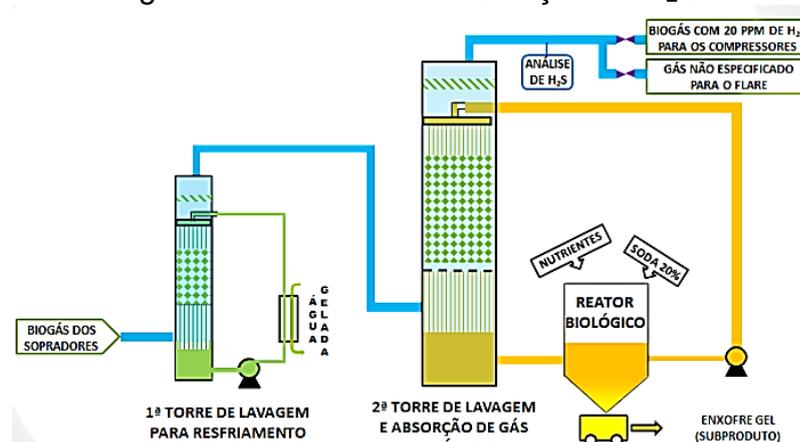
A dessulfurização é subdividida em grossa e fina. A denominada dessulfurização grossa evita que ocorram problemas em alguns dos componentes de instalação. A presença, na ordem de algumas centenas de ppm de sulfeto de hidrogênio, no biogás bruto, é considerável para gerar avarias no equipamento. Existe a possibilidade de a dessulfurização se efetivar na geração do biogás ou posteriormente a esta, fora do biodigestor. Para a extinção grossa de partículas de enxofre, pode-se destacar a dessulfurização biológica, no biodigestor, a limpeza bioquímica do biogás e a precipitação do sulfeto.

No processo de dessulfurização fina, o enxofre é excluído até um teor limite de sulfeto de hidrogênio de 5 mg/m^3 , atendendo, desta forma, o que consta nas leis alemãs para a utilização do biometano, como gás, na rede de gás natural e o seu uso como

combustível. Para o Biometano ser vendido a concentração de H_2S tem que estar abaixo de 0,01 ppm de acordo com a ANP 685 (2017).

A seguir é relatado o processo de dessulfurização por reator biológico, processo pelo qual ocorre no local do estado de caso, segundo Sampaio (2018), o biogás irá passar pela primeira torre de lavagem pra resfriar o biogás, após este estar mais frio, ele irá para a segunda torre, onde entrará em contato com a soda caustica 50% em contracorrente, após isso, o H_2S que está com a Soda entra em um reator biológico, que contém thiobactérias, bactérias que são capazes de oxidar o hidrosulfetos (HS^-), irão formar o enxofre elementar (S^0) e o gás segue para o sistema de compressão, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Processo de remoção de H_2S .



Fonte: Sampaio (2018).

- Secagem

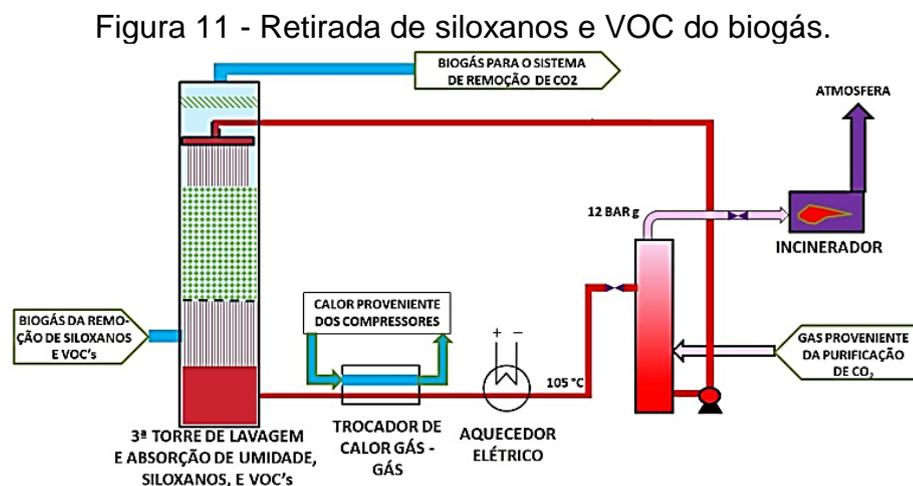
A secagem do biogás se faz necessária devido à possibilidade de corrosão em função do efeito de condensação de H_2O . Para a secagem de biogás podem ser aplicados os processos de secagem por condensação, de adsorção com sílica gel e carvão ativado, e de lavagem com glicóis como processo de absorção.

- Remoção de CO_2

Visando a concentração de metano, faz-se necessária a separação do CO_2 . Uma vez que o CO_2 é a mais importante substância coadjuvante do biogás, dependendo da sua composição, a sua separação é fundamental para que, desta forma, aumente a

concentração do CH_4 , obtendo-se, assim, as propriedades do gás que irão alimentar as redes de gás natural e o uso como combustível. São empregados, para este fim, os processos de adsorção (por variação de pressão), de absorção física e química, a separação por membranas, bem como processos criogênicos.

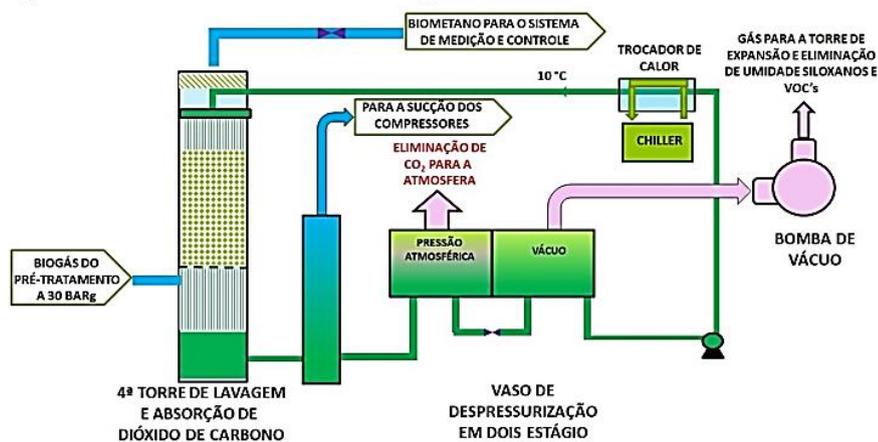
Sampaio (2018) afirma que o gás ao sair do sistema de compressão entrará na primeira torre que contém o solvente orgânico entrando em contracorrente. Este solvente estará quente para poder retirar siloxanos e compostos orgânicos voláteis (VOC). Após o biogás ter saído pela primeira torre, ele vai para a segunda torre onde encontrará o mesmo solvente também em contracorrente, só que agora frio, para poder retirar o gás carbônico, assim como é ilustrado na Figura 11.



Fonte: Sampaio (2018).

Após essa limpeza o biogás já está purificado tornando-o biometano. O solvente saturado em CO_2 irá para uma torre de despressurização onde o gás irá conseguir ser desprendido do solvente. O dióxido de carbono será então usado como gás de arraste, levando siloxanos e VOC para o incinerador, e o que não for usado será descartado na atmosfera, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Retirada de dióxido de carbono do biogás.



Fonte: Sampaio (2018).

2.4.4 Projetos de biogás implantados no Brasil

No Brasil até o ano de 2016, foram registrados 30 projetos com potencial de gerar juntos 286,04 MW de energia elétrica, sendo que o primeiro ocorreu em 2004, no aterro sanitário Nova Gerar, em Nova Iguaçu - RJ. Estão localizados principalmente na região sudeste (20 projetos) e são responsáveis por 72% do total do potencial estimado (206,2 MW). Para a geração de biometano, existe somente o projeto do antigo lixão de Gramacho, em Duque de Caxias/RJ (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

No Brasil, a primeira iniciativa de aproveitamento de biogás para produzir biometano ocorreu na década de 1970, na cidade do Rio de Janeiro, no antigo lixão do Caju, que foi operado de 1935 a 1977 (42 anos), acumulando cerca de 30 milhões de metros cúbicos de RSU em uma área de um milhão de metros quadrados. O sistema foi implantado pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Estado do Rio de Janeiro (COMLURB), que recuperou cerca de 20 milhões de metros cúbicos de biogás, injetando-o na rede de gás natural da Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro (CEG). Em 1980, passou a abastecer parte da frota da COMLURB (MUYLEAERT, 2000).

Posteriormente, somente em 2014, surgiram duas outras iniciativas para produzir biometano, também localizadas no Estado do Rio de Janeiro, provavelmente em decorrência da Política Estadual de Gás Natural Renovável (GNR), que obriga as concessionárias de distribuição de gás canalizado a adquirirem, de forma compulsória, todo o GNR produzido no Estado, até o limite de 10% do volume de gás natural convencional (LEI 6.361, 2012). A primeira a entrar em operação foi a Usina de Gás Verde Gramacho e, em seguida, a Usina de Tratamento de Biogás Dois Arcos, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Usinas de aproveitamento do biogás para geração de biometano implantadas no Brasil.

UF	Usinas de biometano	Município	Início da operação	Volume produzido (m ³ /dia)	Custo (milhões de R\$)	Uso
RJ	Verde Gramacho	Duque de Caxias	05/14	49.000	90	REDUC
RJ	Dois Arcos	São Pedro da Aldeia	08/14	8.000	Desconhecido	Supermercados Guanabara

*REDUC: Refinaria Duque de Caxias (Petrobras).

Fonte: PetroNotícias (2014); BRASIL ENERGIA (2015).

A Usina de Gás Verde Gramacho, operada pela Gás Verde S.A., iniciou suas atividades em maio de 2014, enviando diariamente cerca de 49 mil metros cúbicos de biometano à REDUC. O investimento para a implantação do sistema de purificação do biogás e transporte foi de R\$ 90 milhões. A usina aproveita o biogás gerado no Aterro Metropolitano de Gramacho, considerado o maior aterro de resíduos da América Latina, que funcionou de 1978 a 2012, acumulando 80 milhões de toneladas de RSU em uma área de um milhão de metros quadrados de manguezal (PETRONOTÍCIAS, 2014).

A Usina de Tratamento de Biogás Dois Arcos, operada pelas empresas OSAFI e Ecometano, produz em média oito mil metros cúbicos diários de biometano, que são enviados à Rede de Supermercados Guanabara, em Itaguaí (RJ). Há previsão de ampliação do sistema, que proporcionará a produção de 15 mil metros cúbicos (Brasil Energia, 2015), os quais serão injetados na rede da Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro (CEG-Rio) (ECODEBATE, 2015). Ela explora o biogás gerado no aterro sanitário Dois Arcos, que funciona desde 2008, e dispõe em média 700 ton/dia de RSU (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 2009).

Segundo Sampaio (2018), no estado do Ceará a usina Gás Natural Renovável Fortaleza (GNR Fortaleza) tem capacidade de purificar até 100 mil m³ de Biometano por dia, cerca de 3,5 milhões de m³ por ano, equivalente a 610.000 toneladas de gás carbônico (CO₂) por ano que deixam de ser lançado na atmosfera. Trata-se, portanto, de uma solução sustentável que contribui para minimizar os problemas ambientais e de saúde, provenientes da gestão ineficiente do lixo. Atualmente, é considerada a maior planta de purificação de Biogás do Brasil e é responsável por captar o biogás do ASMOC.

2.4.5 Aplicação de biogás em motores de combustão interna

O baixo valor de cetano, a velocidade da chama de propagação, temperatura de combustão adiabática e processo de reação química dos componentes combustíveis (CO, CH₄ e H₂) e a presença dos gases inertes (CO₂ e N₂) encontrados no biogás possuem diferenças na capacidade de calorífica e influencia na sua combustão, o que gera impacto sobre o desempenho global do biogás. Entretanto, fatores como a técnica de preparação e as fontes de matérias-primas, pode levar à alteração dos componentes do biogás, que é um grande desafio para a grande escala e uso eficiente de biogás em motores de combustão interna (QIAN *et al.*, 2017).

Segundo Qian *et al* (2017), o biogás apresenta característica de combustível de alta octanagem que pode ser utilizado no motor de ignição por centelha, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação das propriedades do GLP, do gás natural e do biogás.

Propriedade	GLP	Gás Natural	Biogás
Composição	C ₃ H ₈ -30% C ₄ H ₁₀ -70%	CH ₄ -85% C ₂ H ₆ -7% C ₃ H ₈ -2% N ₂ -1% CO ₂ -5%	CH ₄ -57% CO ₂ -41% CO-0,18% H ₂ -0,18% Vestígios de outros gases
<i>Valor de aquecimento inferior a 1 atm. e 15°C (MJ/kg)</i>	45,7	50	17
<i>Densidade em 1 atm. e 15 °C</i>	2,26	0,79	1,2
<i>Velocidade da chama (cm/s)</i>	44	34	25
<i>Estequiométrica A/F (kg de ar/ kg de combustível)</i>	15,5	17,3	5,8
<i>Limite de inflamabilidade inferior (% vol. em ar)</i>	2,15	5	7,5
<i>Limite de inflamabilidade superior (% vol. em ar)</i>	9,6	15	14
<i>Número de octana</i>			
<i>Pesquisas</i>	103-106	120	130
<i>Motor</i>	90-97	120	-
<i>Temperatura de autoignição (°C)</i>	406-450	540	650

Fonte: Yadav *et al* (2013).

De acordo com Azevedo (2000), o poder calorífico do biogás varia 17 - 34 MJ/kg (superior) a 15 - 34 MJ/kg (inferior). Se comparado a outros combustíveis a viabilidade da utilização do metano como combustível em automóveis é possível. O poder calorífico de alguns gases, incluindo o metano, é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores do poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS) de diferentes gases.

Gás	PCS e PCI (MJ/kg)
Metano	55,5 – 50,0
<i>Gás natural</i>	50,0 – 45,0
<i>Gasolina</i>	47,3 – 44,0
<i>Diesel leve</i>	44,8 – 42,5
<i>Diesel pesada</i>	43,8 – 41,4
<i>Gás refiado</i>	42,3 – 38,6
<i>Etanol</i>	29,7 – 26,9
<i>Carvão vegetal</i>	29,7 – n/d
<i>Metanol</i>	22,7 – 20,0

Fonte: Azevedo, 2000.

Muitos estudiosos têm tentado usar o biogás com diferentes componentes em motores de combustão interna. Whiston *et al.* (1992) calcularam a velocidade de combustão de CH₄/CO₂ com um modelo de combustão de duas zonas de um motor de ignição por centelha. Os resultados mostram que com o aumento da concentração de CO₂, a taxa de combustão reduziu em 50% quando foi usado 30% de CO₂ no combustível.

Anand *et al.* (2006) utilizaram redes neurais artificiais para calcular a eficiência e as emissões de NOx dos motores de ignição comandada sob diferentes relações de equivalência e relações de compressão com o CH₄/CO₂ com o biogás. Eles descobriram que com o aumento da concentração de CO₂ no biogás, as emissões de NOx pode ser eficazmente inibida.

Shigarkanthi *et al.* (2005) estudaram os efeitos da razão de equivalência e cargas sobre o motor cíclico variado, utilizando como combustível o biogás em um motor de ignição por centelha. Ao mesmo tempo, com base no modelo de duas zonas, eles desenvolveram um programa de cálculo de ciclo completo para calcular o impacto das mudanças de ciclo de emissões de CH.

Yadav *et al.* (2013) analisaram as emissões de biogás como combustível em motores de ignição. Os estudos mostraram que a composição e estrutura molecular do biogás tornou um combustível de baixa emissão de CO, CH e NOx. No entanto, as emissões de dióxido de carbono aumentaram, especialmente na condição de não purificação do biogás.

Hotta *et. al* (2019) exploraram o potencial do biogás bruto como combustível alternativo e autônomo do motor de ignição por faísca (SI) a gasolina. Na investigação um motor SI é operado com gasolina e biogás bruto a uma taxa de compressão de 10 sob condições de aceleração máxima e parcial. A análise mostrou que 18% de redução na potência de freio, 66% de aumento no consumo de combustível específico do freio e 12% de redução na eficiência térmica de interrupção quando o motor é abastecido com biogás bruto. Devido à não uniformidade na quantidade de ar e combustível fornecido ao motor em todos os ciclos, o coeficiente de variação da pressão efetiva média indicativa e pressão de pico é visto como sendo mais alto para o biogás. Os componentes de emissão, como CO e NOx, são significativamente reduzidos em 40% e 81,5%, respectivamente, enquanto as emissões de hidrocarboneto não queimado e CO₂ foram aumentadas em 6,8% e 40%, respectivamente.

Da Costa *et al.* (2020) apresentaram um estudo experimental de um motor monocilíndrico SI alimentado com dois bicombustíveis, biogás e bioetanol, para duas substituições de combustível líquido de 20 e 50% em energia. Os resultados mostram que o modo de combustível duplo acelerou a taxa de combustão quando comparado à operação de combustível único de biogás e aumentou a completude da combustão, levando a emissões reduzidas de CO e poluentes não queimados de hidrocarbonetos (HC), melhorando assim a eficiência da combustão. Em condições de carga total, o modo de combustível duplo suprimiu a ocorrência de batidas e aumentou o limite de carga para a fração de energia de biogás de 20% quando comparado à condição de combustível único de etanol. Além disso, óxidos de nitrogênio (NOx) as emissões diminuíram no modo de combustível duplo (comparado ao etanol) e as eficiências de conversão de combustível aumentaram consideravelmente.

Devido à alta relação entre o gás inerte, o valor de calor e a velocidade da chama propagação de biogás, leva à instabilidade da combustão da mistura de combustível quando abastecido com biogás. Em contraste, o hidrogênio (H₂) tem uma alta velocidade de propagação da chama, ou seja, uma certa proporção de H₂ adicionado ao biogás pode aumentar a velocidade de propagação da chama, o que é benéfico para a estabilidade de combustão.

Chen *et al.* (2012) utilizaram H₂/CO como combustível num motor de ignição por centelha e diluiu com CO₂ para estudar as características de combustão e de emissão de biogás. Eles encontraram que o aumento da concentração de H₂ pode melhorar a velocidade de propagação da chama, e a taxa de libertação de calor é mais

concentrado. Além disso, o valor de calor de volume do gás misto é reduzido, o que é útil para reduzir as emissões de NO_x e de temperatura. No uso da diluição de CO₂ com o aumento da razão de diluição, a pressão média é eficaz e eficiência térmica será diminuída. Além disso, a variação do ciclo de motor aumenta e o aumento da percentagem de H₂ pode ser utilizado para inibir a variação do ciclo.

Chung e Chun (2013) estudaram por simulação numérica o desempenho da combustão de H₂/biogás em um motor de ignição. O estudo concluiu que o valor de pico da velocidade de pressão e de libertação de calor aumentaram e o tempo de atraso do cilindro foi reduzido com o aumento do teor de H₂.

Porpatham *et al.* (2007) analisaram a influência de diferentes relações de equivalência sobre o desempenho do motor de ignição alimentados com biogás misturado com 5%, 10% e 15% de H₂. O estudo mostrou que, com o aumento do teor de H₂, a taxa de queima aumenta e ampliou-se os níveis de carga de baixa temperatura de combustão.

Park *et al.* (2011) estudaram as características de biogás misturado com hidrogénio em um motor de ignição por centelha de desempenho e de emissão. Eles descobriram que o gás inerte no biogás pode melhorar a eficiência térmica e reduzir as emissões de NO_x. Além de melhorar a estabilidade de combustão. O H₂ pode ampliar o intervalo de temperatura baixa e reduzem as emissões de CH, mas as emissões de NO_x são aumentadas. Além disso, a perda de transferência de calor aumenta com o aumento de H₂, o que diminui a eficiência térmica; a investigação mostra que quando a fração em volume de H₂ é entre 5 % e 10%, a eficiência térmica é mais elevada.

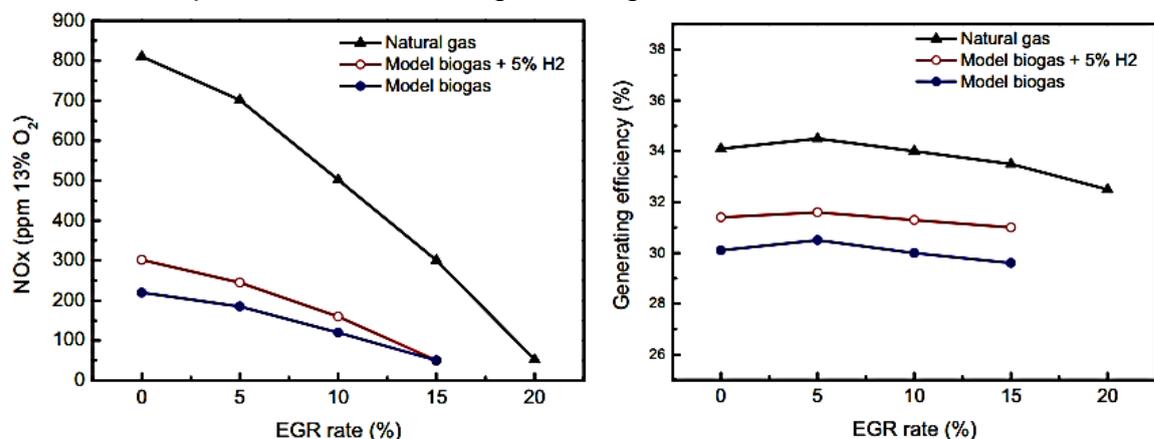
Park *et al.* (2012) estudaram os efeitos de Recirculação dos gases de escape (EGR) sobre a eficiência e as emissões de um motor de ignição utilizando biogás/hidrogénio como combustível. Verificou-se que o hidrogénio pode ser utilizado para melhorar a estabilidade da combustão do biogás, mas a temperatura alta da chama adiabática pode conduzir a maiores níveis de emissões de NO_x. O aumento da taxa de EGR irá aumentar a capacidade de calor do cilindro, o que diminui a temperatura final de compressão. Isto não só aumenta o tempo de atraso de ignição, mas também diminui a velocidade de propagação da chama e a temperatura de combustão. Portanto, com o aumento da taxa de EGR, a estabilidade da combustão é reduzida, a regulação da ignição do *Maximum Brake Torque* (MBT) é avançada, e as emissões de THC são maiores, enquanto os níveis de geração de NO_x foram reduzidas. Com o aumento da

EGR, embora a eficiência de combustão diminua ligeiramente, a eficiência térmica é aumentada devido à diminuição na perda de bomba e perda de transferência de calor.

Para testar o uso de biogás em motores de ignição comandada, alguns estudiosos compararam a combustão e emissão de biogás com os dos combustíveis comerciais. Yadav *et al.* (2013) compararam os efeitos da gasolina, do biogás purificado e de biogás no desempenho do motor de ignição por aumentar a taxa de compressão e otimizar o ponto de ignição. Eles descobriram que proporções mais elevadas de CO_2 e de outros gases não-inflamáveis no biogás reduzia a eficiência do motor de gás. A potência máxima do motor diminuiu e o consumo de combustível aumentou.

Lee *et al.* (2010) analisaram a relação da combustão e as características de emissão de gás natural, do biogás e biogás/ H_2 sob diferentes valores EGR com tempos de ignição ideais com base nas eficiências máximas obtidos com um motor a gás. Como mostrado na Figura 13, as emissões de NO_x e a eficiência geralmente diminuiu com o aumento de EGR.

Figura 13 - Efeito do EGR nas emissões de NO_x e na eficiência de um motor de ignição por centelha com biogás/hidrogênio como combustível.



Fonte: Lee *et al.* (2010).

Quando alimentado com biogás, as emissões de NO_x foram diminuídas dramaticamente em comparação com o uso de gás natural. Com a adição de hidrogênio ao biogás, o gerador de emissões e eficiência de NO_x do motor aumentaram. Pode concluir que a combinação com a recirculação dos gases de escape e o ponto de ignição ótima. A utilização de hidrogênio/biogás misturas de combustível deve conduzir a melhorias significativas em termos de eficiência de geração e as emissões de NO_x do motor de biogás.

2.5 Estado da arte

Nadaleti (2017) analisou em sua tese intitulada “Aproveitamento de biogás, hidrogênio e gás de síntese no setor de transporte público e agroindustrial de arroz: estudo de potencial energético de resíduos e emissões de poluentes”, um estudo de caso com produção média de 273 Nm³/h de biometano produzido em aterro sanitário e realizou uma análise econômica, como resultado, para essa produção, houve um custo de 94,5% de economia em relação ao custo atual do diesel, entretanto o custo deve ser reduzido e que permitirá investimento na substituição da frota atual de diesel, ainda segundo Nadaleti (2017), os combustíveis metano e hidrogênio, extraídos do aterro sanitário, podem ser usados para alimentar veículos pesados.

Jo e Kin (2018) estimaram a quantidade de energia disponível no mercado interno de biometano, incluindo o biogás como combustível de transporte até 2035. A quantidade de energia disponível que poderia ser fornecida foi prevista através de quatro estágios: teórico, geográfico, técnico e potencial de mercado, considerando as condições geográficas, técnicas, econômicas. Eles afirmaram que a eficiência energética e o valor agregado do biometano são amplamente influenciados pelas condições do local e pelas infraestruturas. Assim, quanto do gás natural usado no transporte poderia ser substituído pelo biometano foi examinado estabelecendo limites para a quantidade de resíduos orgânicos gerados nas áreas urbanas. Como resultado, o potencial de mercado do biometano, incluindo gás oriundo de aterro sanitário, foi de aproximadamente 331×10⁶ Nm³/ano, correspondente a 25% do suprimento de gás natural para transporte, que pode ser substituído pelo biometano. Supondo que 2% do gás natural para transporte seja substituído pelo biometano, ele corresponde a 29×10⁶ Nm³/ano (aproximadamente 9% do potencial de mercado do biometano).

Di Trapani et. al. (2019) avaliaram a produção de metano do aterro sanitário Cozzo Vuturo (Secília-Itália), comparando os resultados das medições de campo da emissão de metano e as estimativas obtidas com a aplicação de diferentes modelos matemáticos. Uma análise energética/econômica também foi realizada com base nos mecanismos de incentivo do governo. A avaliação da viabilidade econômica foi realizada aplicando os modelos clássicos do Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno. Dois cenários diferentes foram simulados para a valorização do biogás, considerando motores de combustão interna ou microturbinas a gás. Os autores relatam que a avaliação experimental da emissão média de metano no aterro sanitário Cozzo Vuturo

resultou em $0,295 \text{ mg}_{\text{CH}_4} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e os dois cenários diferentes, o primeiro usando motores de combustão interna e o segundo usando microturbinas a gás, mostraram a viabilidade econômica da exploração de energia no aterro, liderando no melhor cenário um valor líquido de cerca de 50.000 € e um período de recuperação de 5 anos.

Mariani (2018) afirmou que o biogás, além de ser uma fonte renovável, está diretamente relacionado à melhoria do saneamento ambiental, por ser produzido a partir do tratamento de efluentes e resíduos. Neste trabalho Mariani (2018) realizou um diagnóstico do setor de biogás, identificando barreiras que impedem seu crescimento e analisou medidas para superá-las. Como resultado do estudo, foi possível constatar que o potencial de produção de biogás do Brasil está gradualmente se tornando uma realidade e, até 2015, havia 127 usinas de biogás produzindo eletricidade, energia mecânica para bombeamento de efluentes, calor e biometano. Ao mesmo tempo, o ambiente regulatório, tecnológico e político avançaram nos últimos anos, permitindo injetar biometano na rede e realizar mini e micro geração distribuída. Apesar disso, segundo Mariani (2018), ainda existem várias barreiras a serem superadas para a consolidação do setor de biogás no Brasil, e podem ser agrupadas em barreiras de conhecimento, tecnológicas, políticas e regulatórias e econômicas e financeiras. Os mecanismos para superação dessas barreiras foram propostos com base no diagnóstico realizado e nos mecanismos normalmente empregados para incentivar energias renováveis.

Figueiredo (2011) mostrou através da sua pesquisa que por meio de uma gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos é possível aproveitar o potencial energético do biogás e conseqüentemente diminuir o consumo de combustíveis fósseis, reduzindo assim o impacto ambiental e contribuindo para melhoria social e econômica. O presente trabalho também afirmou que aterros sanitários é a melhor maneira para disposição final do lixo. O autor afirmou que a captação de gases liberados através de dutos e queima em *flares* em que o metano, principal constituinte do biogás, é transformado em gás carbônico, com potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor. Porém ao queimar o biogás em *flares*, os aterros deixam de aproveitar seu potencial energético. Assim ao utilizar para geração de energia elétrica, o processo ganha autossuficiência energética e podem vender o restante de energia produzida para a rede elétrica local.

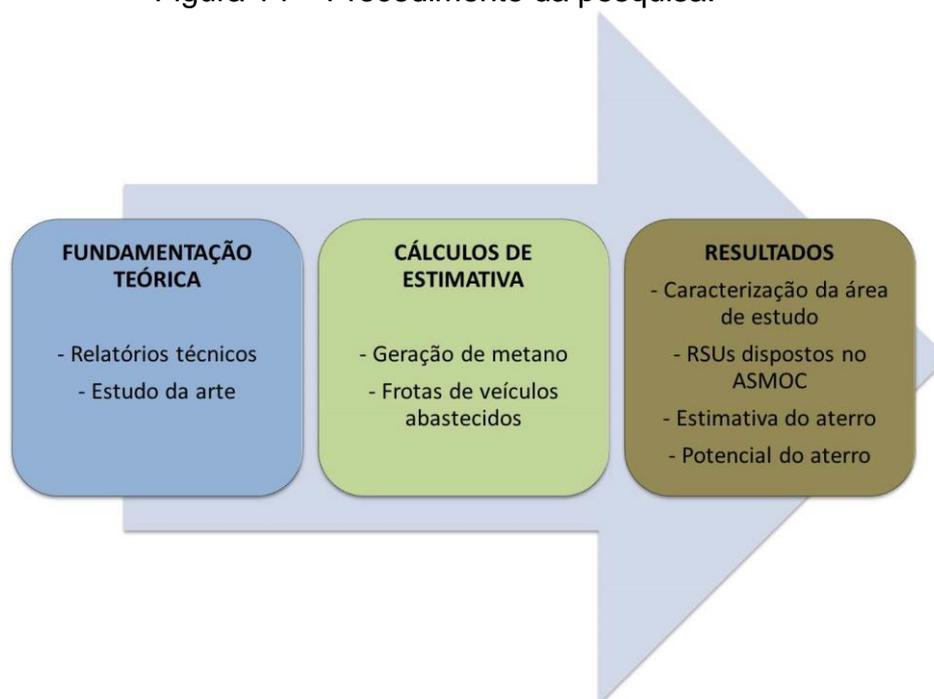
2.6 Considerações finais do capítulo

Neste Capítulo foram apresentados os fundamentos para a geração de energia pela fonte de biogás, para utilizá-lo como alternativa de tecnologia para integrar o tema de cidades inteligentes, bem como minimizar a problemática dos RSU, os fatores de influência ambiental dos lixões e a importância do uso dos aterros sanitários. A revisão bibliográfica e documental apresentada neste capítulo servirão de subsídio para o estudo desenvolvido neste trabalho, cuja metodologia será descrita no próximo capítulo.

3 METODOLOGIA

A primeira fase do trabalho foi a realização de uma revisão bibliográfica e documental, especialmente, junto às bibliotecas do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnológica do Ceará (IFCE), da Universidade Federal do Ceará (UFC) e da Universidade Estadual do Ceará (UECE), a modelagem do trabalho está representado na figura 14.

Figura 14 – Procedimento da pesquisa.



Fonte: Autor (2020).

Também foi utilizado arquivos para levantamento de dados e informações da Superintendência Estadual do Meio Ambiente/Ceará (SEMACE), da Empresa Municipal de Limpeza e Urbanização (EMLURB), e da Secretaria da Infra-estrutura (SEINFRA). Neste sentido, cabe destacar que:

- SEMACE - É o principal órgão responsável pelo licenciamento ambiental de empreendimentos potencialmente poluidores no Estado do Ceará e, portanto, coube a ela licenciar o ASMOC, objeto deste estudo.

- EMLURB - É responsável por parte do sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos da cidade de Fortaleza;
- SEINFRA - É responsável pela política de monitoramento de destinação de resíduos sólidos na Região Metropolitana de Fortaleza - RMF.

Quanto à natureza dos dados, fez-se uso dos principais relatórios técnicos dos referidos órgãos e tomou-se como referência o período compreendido entre os anos de 2018 a 2034, dados compilados das tabelas apresentadas por SEMACE, (2017) no panorama da Região Metropolitana de Fortaleza – A (RMF-A).

O período temporal de 2018 a 2034 foi escolhido mediante 2018 ser o ano de autorização e início da injeção do biometano, proveniente do ASMOC, na rede de gás natural da Cegás (VIEIRA, 2018). E 2034, por ser o ano de encerramento das atividades no ASMOC (VIANA, 2018).

A estimativa do potencial de biometano de ASMOC, de 2018 a 2034, foi realizada utilizando o método desenvolvido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), o no âmbito do convênio com a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA/SP) e o com o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), o *software* Biogás - geração e uso energético (Aterro versão 1.0).

3.1 Biogás - geração e uso energético (Aterro versão 1.0)

O *software* Biogás - geração e uso energético (Aterro versão 1.0) emprega um modelo matemático usado pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) para estimar a geração de metano nos aterros nos Estados Unidos. No modelo, a estimativa de geração de metano é feita para cada ano de deposição de resíduo no aterro, conforme a equação 4, disponível no Manual do *software* Biogás – Aterros 1.0 (CETESB; SMA/SP; MCT, 2006).

$$Q_{CH_4} = K \times R_x \times L_0 \times e^{-k(x-t)} \quad (4)$$

Onde:

Q_{CH_4} – é vazão de metano gerado no ano x pelo RSU depositado no ano T [m^3CH_4 /ano];

K - Constante de decaimento [1/ano];

R_x - Fluxo de resíduos no ano x [kg_{RSU}];

L_0 - Potencial de geração de metano [m^3 biogás/ kg_{RSD}];

t - Ano de deposição do resíduo no aterro [ano];

x - Ano atual [ano].

Conforme esse modelo, a geração de gás do lixo (GDL) é resultado da degradação anaeróbia dos RSU depositados no aterro, atingido um valor máximo no ano de fechamento deste (período no qual se cessa o recebimento de lixo) e decaindo ao longo dos anos subsequentes. Adotou-se a eficiência de coleta de biogás em 75%.

3.1.1 Constantes

Como mencionado anteriormente para realizar a estimativa da geração de metano é necessário o conhecimento de algumas constantes como: a constante de decaimento e do potencial de geração que são descritos a seguir conforme o local de estudo.

- **Constante de decaimento (K):**

O valor de K define o intervalo de tempo de geração de metano a partir da deposição de resíduos. Segundo Mendes e Sobrinho (2007) a constante de decaimento é função de fatores como disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e, principalmente, umidade. Os valores sugeridos para K podem variar de $0,01 \text{ ano}^{-1}$ a $0,09 \text{ ano}^{-1}$. Sendo assim, pode-se escolher um valor de K em função da precipitação, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Valores sugeridos para K.

Precipitação anual (mm)	Valores de k (1/ano)		
	Relativamente inerte	Decomposição moderada	Decomposição alta
250	0,01	0,02	0,03
250-500	0,01	0,03	0,05
500-1000	0,02	0,05	0,06
1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: Mundial (2004).

O Aterro Sanitário Municipal do Oeste de Caucaia que, conforme dados do Climate-date, tem uma precipitação média anual que corresponde a cerca de 1326 mm. Este valor atrelado à fatores como alta eficiência de coleta do biogás, e alta presença de matéria orgânica na composição gravimétrica do aterro, média de 35 % (SEMACE, 2017) prevê-se, portanto, um valor de $k=0,09 \text{ ano}^{-1}$ para a realização dos cálculos de estimativa.

- **Potencial de geração de metano (L_0):**

A variável L_0 apresenta valores que variam entre $0,001 \text{ m}^3_{\text{CH}_4\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{RSU}}$ para resíduos pouco orgânicos, e $0,312 \text{ m}^3_{\text{CH}_4\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{RSU}}$, para resíduos muito orgânicos (CETESB; SMA/SP; MCT, 2006).

O *software* Biogás, geração e uso energético – Aterro 1.0 sugere valores para L_0 levando em consideração a representatividade da matéria orgânica em relação ao histórico de disposição dos resíduos no aterro. Sendo assim de acordo com a composição gravimétrica a parcela de matéria orgânica corresponde a aproximadamente 35% dos resíduos aterrados. Portanto, o valor de L_0 escolhido foi $0,12 \text{ m}^3_{\text{CH}_4\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{RSU}}$.

3.2 Estimativa de frota de veículos abastecidos

A metodologia usada para calcular a quantidade de carros abastecidos pela produção do biometano do aterro sanitário escolhido foi tomando como base a norma ISO 11.439 (2000) - Cilindros para gases - Cilindros de alta

pressão para o armazenamento de gás natural como combustível a bordo de veículos automotores.

Esta norma estabelece os requisitos mínimos para cilindros leves, recarregáveis, para uso exclusivo no armazenamento a bordo de gás natural veicular a alta pressão, como combustível para veículos automotores, aos quais os cilindros devem ser fixados. As condições de serviço destes cilindros não abrangem as cargas externas que podem ocorrer em caso de colisões entre veículos, etc.

Considerou-se o cilindro de 15 m³ (opção mais instalada em automóveis) que equivale a cerca de 21 litros de gasolina ou 28 litros de etanol, com isso dividiu-se o biometano gerado no aterro pelo volume do cilindro de gás instalado, conforme Equação 5.

$$\text{Veículos abastecidos} = \frac{\text{Estimativa de vazão}}{\text{cilindro padrão de 15 m}^3} \quad (5)$$

3.3 Considerações finais do capítulo

Neste Capítulo foi apresentada a metodologia de cálculo do potencial de biometano de ASMOC. Foi apresentado também a metodologia para levantamento de dados, a partir de relatórios e documentos indicados na revisão da literatura. Os resultados dos cálculos, assim como a discussão dos mesmos, serão apresentados no próximo capítulo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, inicialmente são apresentados a concepção e as características do aterro, o histórico e estimativa futura dos resíduos sólidos urbanos (RSU) encontrados na literatura no ASMOC, além dos resultados obtidos na análise técnica do uso de biogás do aterro fazendo uso do *software* Biogás – Geração e Uso Energético (Aterros - versão 1.0).

4.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo do presente trabalho é o Aterro Sanitário Municipal oeste de Caucaia (ASMOC), ilustrado na Figura 15, o qual se encontra localizado na rodovia BR-020, município de Caucaia, estado Ceará - CE. Atualmente, o aterro atende as cidades de Fortaleza e Caucaia e foi projetado para a disposição final de resíduos sólidos de Classe II. O aterro tem uma área de 123 hectares, dos quais 78 hectares destinam-se ao recebimento dos RSU. A forma de disposição dos RSU ocorre pelo método da trincheira ou vala e pelo método da área (LINARD, 2010).

Figura 15 - Fotografia aérea do ASMOC.



Fonte: Google Earth (2020).

Segundo Linard (2010) o ASMOC foi construído pelo Governo do Estado do Ceará no ano de 1990, concebido inicialmente para receber os RSU

da cidade de Caucaia/CE, mas em 1998 por intermédio de um instrumento legal denominado Termo de Cessão de Uso, do Governo do Estado do Ceará, o ASMOC passou também a ser o local de deposição dos RSU de Fortaleza sob condição de que esta arcasse com todos os custos administrativos e operacionais daquele, isentando Caucaia de qualquer ônus.

Conforme o Relatório de Impacto Ambiental apresentado à Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE), o ASMOC passou pelo processo de ampliação e a área foi dimensionada para atender à demanda pelos próximos 16 anos e 8 meses, funcionando, assim, até 2034 (VIANA, 2018).

O já implementado projeto Gás Natural Renovável Fortaleza (GNR-Fortaleza), recebe o biometano enriquecido na Usina de tratamento do biogás, oriundo do ASMOC, que possui cerca de 150 drenos verticais e horizontais nas áreas do aterro para a captação dos gases oriundos do RSU, estes drenos poderão numa próxima etapa chegar a 200 unidades ao todo (Agência Brasil, 2011).

4.2 Caracterização dos RSUs dispostos no ASMOC

De acordo com o relatório da análise da composição gravimétrica dos resíduos do Aterro Sanitário Municipal do Oeste de Caucaia, divulgado pela SEMACE no plano regional de gestão integrada de resíduos sólidos (SEMACE, 2017) constatou-se que os componentes predominantes na composição são papel ou papelão, plástico, matéria orgânica e rejeitos. No entanto, a matéria orgânica é a que apresenta o maior percentual para os dois municípios que o ASMOC beneficia (Caucaia e Fortaleza), de aproximadamente, 32% e 35%, respectivamente, visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Tipologia Estimada de Resíduos Sólidos Urbanos do ASMOC (%).

Município/Material	Caucaia	Fortaleza	Total
<i>Metal ferroso</i>	0	1,5	1,5
<i>Metal não ferroso</i>	3,42	0,5	3,92
<i>Plástico duro</i>	9,39	3,1	12,49
<i>Plástico mole</i>	1,04	10,9	11,94

Município/Material	Caucaia	Fortaleza	Total
<i>Papel/papelão (A)</i>	14,77	8,0	22,77
<i>Vidro</i>	9,82	1,5	11,32
<i>Matéria orgânica (C)</i>	32,0	35,0	67,0
<i>Origem sanitária</i>	6,91	6,2	13,11
<i>Tetra pak</i>	1,05	1,2	2,25
<i>Panos/trapos (A)</i>	7,38	4	11,38
<i>Rejeito</i>	7,75	18,5	26,25

Fonte: SEMACE, Panorama tabelas RMF-A, 2017.

A composição gravimétrica traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra analisada. O conhecimento dessa característica possibilita o aproveitamento das frações recicláveis para comercialização e da matéria orgânica para a produção de composto. Além disso, essa variável é uma informação básica para várias atividades, como monitoramento de aterros sanitários, implementação da coleta seletiva e análise de viabilidade de usinas de compostagem e reciclagem (SANTOS, 2016).

Santos (2016) afirma que o conhecimento detalhado sobre os RSU é vantajoso não só para o pessoal responsável pelo aterro sanitário, mas para o planejamento do sistema de gerenciamento como um todo. Monteiro et. al. (2001) afirmam que este conhecimento pode auxiliar na estimativa das quantidades a coletar em cada região da cidade, no dimensionamento de veículos de coleta e estações de transferência, na implementação de programas de coleta seletiva, reciclagem e compostagem, na fabricação de inibidores de cheiro etc.

4.3 Histórico e estimativa de aterramento de resíduos no ASMOC

O ASMOC entrou em funcionamento desde 1990. Na Tabela 10 estão descritos os valores totais dos resíduos recebidos pelo aterro até o ano 2009.

Tabela 10 - Histórico de aterramento de resíduos no ASMOC.

Ano	Resíduos sólidos totais (ton/ano)
1992	40.000
1993	40.000
1994	40.000
1995	40.000
1996	40.000
1997	40.000
1998	1.065,169
1999	1.012,934
2000	1.113,743
2001	1.055,160
2002	1.004,630
2003	864.737
2004	730.067
2005	944.083
2006	1.062,288
2007	1.188,843
2008	1.186,655
2009	1.436,782

Fonte: ACFOR, EMLURB, ECOFOR (2010).

O aumento notório da quantidade de RSU dispostos no Aterro observado a partir do ano de 1998 deve-se ao fato de que, até 1997, o ASMOC recebia somente o lixo do município de Caucaia e, nos anos posteriores, recepcionou também os resíduos da cidade de Fortaleza/CE.

Segundo o Panorama Tabelas RMF-A divulgado pela SEMACE, (2017) no plano regional de gestão integrada de resíduos sólidos, divulgou-se uma estimativa de RSU média entre 2018 a 2034 dos municípios de Caucaia e Fortaleza (Tabela 11), onde essa estimativa foi realizada com base nas informações de geração per capita do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2016).

Tabela 11 - Estimativa de RSU Médio (2018 a 2037).

Ano	Resíduos sólidos totais (ton/ano)
2018	1.423.494,00
2019	1.444.777,20
2020	1.466.398,80
2021	1.488.366,00
2022	1.510.689,60
2023	1.533.369,60
2024	1.556.409,60
2025	1.579.820,40
2026	1.603.612,80
2027	1.627.786,80
2028	1.652.353,20
2029	1.677.315,60
2030	1.702.681,20
2031	1.728.460,80
2032	1.754.658,00
2033	1.781.287,20
2034	1.808.344,80

Fonte: SEMACE, Panorama tabelas RMF-A (2017).

Apresentando um fluxo médio de RSU no período de 2018 a 2034 no total de 1.608.225 ton/ano, valor importante para o cálculo da produção de metano.

4.4 Potencial presente e futuro do ASMOC

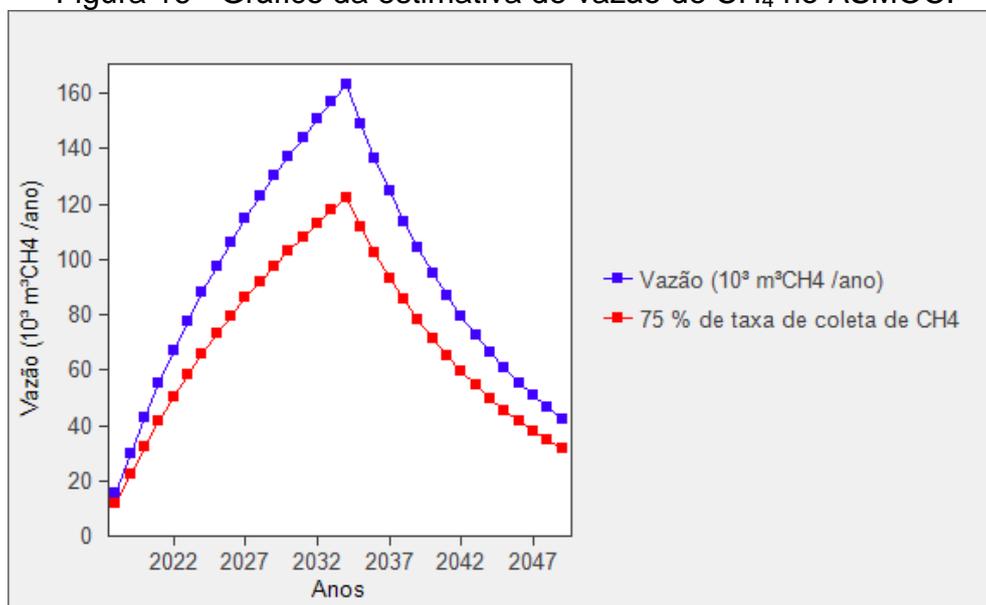
Para calcular a produção de biometano, utilizou-se, conforme relatado no capítulo anterior, o modelo da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) sendo para tanto usados os volumes de resíduos aterrados, desde o ano em implementou o projeto Gás Natural Renovável Fortaleza (GNR Fortaleza) até o final da licença de operação do aterro, que compreende ao período entre os anos de 2018 e 2034; o potencial de geração de metano (L_0) igual a $0,12 \text{ m}^3_{\text{CH}_4\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{RSU}}$ sugerido pelo *software* em razão do percentual de matéria orgânica presente nos resíduos aterrados; e a constante de

decaimento (K) igual a $0,09 \text{ ano}^{-1}$, levando em consideração a precipitação anual do município de Caucaia/CE, no qual está instalado o aterro.

Outros valores importantes para a elaboração da estimativa da vazão de metano é a identificação da Linha de Base que corresponde ao cenário que reúne as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) que ocorreriam anteriormente à implantação do projeto. Segundo Linard (2010), como no ASMOC não há o procedimento de combustão controlada do GDL (este é queimado parcialmente), aquela se caracterizaria como emissão parcial de gás para a atmosfera, sendo uma fração queimada com certa periodicidade em drenos, nos cálculos utilizou-se 20% da Linha de Base de queima, 75% de eficiência de coleta de biogás e a eficiência da queima de biogás certa de 95% (valores sugeridos pelo *software*).

Na Figura 16 é apresentada a estimativa da produção de metano de 2018 a 2050. Utilizou-se esse intervalo de tempo, porque após 2050 a produção de metano já é inexpressiva não sendo viável para realizar o aproveitamento energético.

Figura 16 - Gráfico da estimativa de vazão de CH_4 no ASMOC.



Fonte: Autor (2020)

Observa-se na Figura acima que nos primeiros anos da instalação da usina ocorre o aumento do nível de geração de metano, porque a unidade tem recebido, a cada ano, uma maior quantidade de RSU sendo assim mais

eficiente e rápido o processo de digestão anaeróbica e conseqüentemente, verifica-se que há uma maior produção de gás metano.

Tendo em vista que a produção de metano é diretamente proporcional a quantidade de resíduos aterrados, em 2034, tem o pico máximo de produção de CH₄. Nesse ano, espera-se que o aterro receba a maior quantidade de resíduos sólidos, totalizando cerca de 1.808.344,80 ton/ano, conforme estimativa disponibiliza pela SEMACE, (2017) no Panorama tabelas RMF-A.

A partir do ano de 2035 os valores da vazão decrescem por não haver o aterramento de novas quantidades de resíduos na unidade, pois o aterro só tem licença para operar até 2034. No entanto, é válido ressaltar, que a licença de funcionamento do aterro pode ser prolongada a depender dos trâmites processuais legais.

De acordo com Azevedo (2000), o poder calorífico do biogás varia 17-34 MJ/kg (superior) a 15 - 34 MJ/kg (inferior). Se comparado a outros combustíveis a viabilidade da utilização do metano como combustível em automóveis é possível, permitindo a minimização dos impactos ambientais e assegura uma redução significativa na emissão dos gases de efeito estufa.

No entanto, para a aplicação do biogás em motores de combustão interna, é necessário que o mesmo seja purificado, a fim de atingir as especificações do gás natural, e, finalmente, ser utilizado em veículos adaptados para esse combustível (NADALETTI *et al.*, 2015).

Na Tabela 12 são apresentados os valores estimados de produção de metano, em m³/ano, que pode ser gerada entre os anos de 2018 e 2050 pelo ASMOC e a quantidade de veículos que podem ser abastecidos nesse período.

Tabela 12 - Estimativa da produção de CH₄ no ASMOC e quantidade de veículos abastecidos entre os anos de 2018 e 2050.

Ano	Estimativa de vazão (10³ m³/ano)	Veículos abastecidos (10³/ano)
2018	15,37	1,02
2019	29,65	1,98
2020	42,94	2,86
2021	55,32	3,69
2022	66,87	4,46
2023	77,68	5,18
2024	87,8	5,85
2025	97,31	6,49

Ano	Estimativa de vazão (10³ m³/ano)	Veículos abastecidos (10³/ano)
2026	106,25	7,08
2027	114,68	7,65
2028	122,66	8,18
2029	130,22	8,68
2030	137,4	9,16
2031	144,24	9,62
2032	150,78	10,05
2033	157,04	10,47
2034	163,05	10,84
2035	149,02	9,93
2036	136,19	9,08
2037	124,47	8,30
2038	113,76	7,58
2039	103,97	6,93
2040	95,02	6,33
2041	86,84	5,79
2042	79,37	5,29
2043	72,53	4,84
2044	66,29	4,42
2045	60,59	4,04
2046	55,37	3,69
2047	50,61	3,37
2048	46,25	3,08
2049	42,27	2,82
2050	38,63	2,58
Total	3020,440	201,662

Fonte: Autor (2020).

Diante disso, pode-se argumentar que o Aterro Sanitário Municipal do Oeste de Caucaia produzirá em 2034 aproximadamente 163.050 m³ de metano. Desse modo, considerando o cilindro de 15 m³ (opção mais instalada em automóveis) que equivale a cerca de 21 litros de gasolina ou 28 litros de etanol, calcula-se que, nesse ano, o suficiente para abastecer mais de 10 mil automóveis e ao usar o biogás no lugar dos combustíveis fósseis haverá diminuição de emissão de gases nocivos ao meio ambiente, no estado do Ceará a usina Gás Natural Renovável Fortaleza (GNR Fortaleza) tem capacidade de purificar até 100 mil m³ de Biometano por dia, cerca de 3,5 milhões de m³ por ano, equivalente a 610.000 toneladas de gás carbônico (CO₂) por ano que deixam de ser lançado na atmosfera (SAMPAIO, 2015).

De acordo com este estudo, o ASMOC no período de 2018 a 2050 gerará cerca de 3.020.440 m³ de biogás, o que poderá fornecer combustível a frota estimada em 201.662 veículos. Assim, pode-se afirmar que o grande volume de RSU gerados nas cidades de Fortaleza e Caucaia/CE, o que normalmente seria um problema virou a solução para o abastecimento da frota de veículos.

Segundo Vieira (2018) a usina de produção de Gás Natural Renovável de Fortaleza (GNR Fortaleza) em 2018 foi autorizada pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) a injetar toda sua capacidade de produção de gás na rede da companhia de Gás do Ceará (Cegás). Esta autorização está diretamente relacionada à qualidade do biometano gerado e às características específicas como, poder calorífico superior, %molar mínima de metano, Índice de Wobbe e quando necessário, a odorização do biometano

Além, de ser uma alternativa energética, a produção do gás através do RSU ainda é extremamente benéfica para o meio ambiente. A GNR Fortaleza é segunda usina de biometano que tem essa autorização e será a primeira a injetar diretamente na rede de distribuição.

É importante destacar que esse estudo mostrou que, dos 184 municípios que compõem o estado do Ceará, apenas oito utilizam aterros sanitários, localizados em Caucaia, Maracanaú, Eusébio, Lavra da Mangabeira e Brejo Santo. Destes aterros sanitários somente o ASMOC transforma o biogás em Biometano e lança na rede da Cegás. Sendo assim, pode-se dizer que nos últimos anos houve pouco avanço em relação à criação de aterros sanitários no Estado e que o número de aterros existentes no Ceará, no entanto, é insignificante em relação ao que determina a legislação em vigor.

Então o nosso estudo sugere que sejam construídos 11 aterros sanitários em parceria de empresas público-privada, localizado em um município na sede da referida macrorregião de planejamento, conforme sugestão da figura 17.

Figura 17 – Consolidação das divisas intermunicipais: projeto atlas geográfico



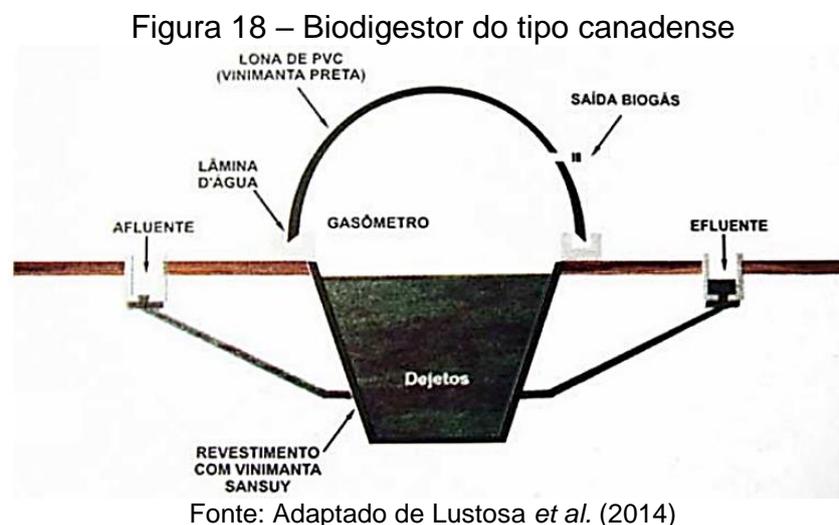
*Mapa mostra regiões do Ceará. Os citados em azul já foram definidos ou estão em processo de definição.

Fonte: Assembleia Legislativa do Ceará/Divulgação

Diante desse cenário, ao implementar uma planta de biogás, retira-se um passivo ambiental e consegue-se transformar em algo útil. Assim o projeto de geração de biogás do ASMOC pode servir de vitrine de tecnologias de cidades inteligentes para os governantes se inspirarem e entenderem as soluções de melhoria de gestão dos próprios resíduos sólidos urbanos. A cidade inteligente é uma cidade eficiente, tecnologicamente avançada, verde e socialmente inclusiva (VANOLO, 2014). Ou seja, cidades inteligentes possuem um foco tecnológico específico na vanguarda da geração de soluções para desafios ecológicos, sociais, econômicos e de gerenciamento (YIGITCANLAR, 2016).

Além de tecnologia aplicada no ASMOC pode-se dar como sugestão também para cada sub-região a construção de biodigestores, que é uma tecnologia moderna e mais simples. Os biodigestores do tipo canadense possuem uma câmara de digestão escavada no solo e um gasômetro inflável feito de material plástico. É um biodigestor do tipo horizontal, com uma caixa de entrada em alvenaria, como pode ser observado na figura 18. A medida que há

produção de biogás, a cúpula plástica maleável infla e o biogás é acumulado, podendo ser ainda enviado a um gasômetro separado a fim de que se obtenha um maior controle operacional (JUNQUEIRA, 2014).



Do biodigestor o biogás seria enviado para gasômetro separado e seguindo, posteriormente, para um posto de gás natural/biometano para abastecer veículos. A exemplo da injeção na rede de gás natural da Cegás mantendo o mesmo princípio de injeção de biometano na rede de gás natural.

Assim aplicando essas tecnologias o estado do Ceará passará por um processo de mudança no qual a exploração de recursos, direção do investimento público, desenvolvimento tecnológico e mudança institucional são consistentes com necessidades presentes e futuras (IMPERATIVES, 1987). Denotando a relação entre economia, aspectos de sustentabilidade social e ambiental a partir de uma combinação de indicadores de cada um desses componentes (AHVENNIEMI *et al.*, 2017).

4.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos cálculos do potencial de biometano para o projeto do ASMOC, baseado nas especificações descritas no capítulo anterior. Os cálculos de estimativa de CH₄ no ASMOC nos sugere que entre 2018 a 2050 será gerado cerca de 3.020.440

m³ de biogás, resultando num possível fornecimento de combustível para uma frota estimada em 201.662 veículos

Estes resultados validam a hipótese da importância do gerenciamento e aproveitamento do grande volume de RSU gerados nas cidades, o que remete a um aproveitamento inteligente de metano com uma redução significativa do uso de combustíveis não renováveis. Convertendo um tema problemático em uma solução ambientalmente sustentável.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que a composição gravimétrica dos resíduos do Aterro Sanitário Municipal do Oeste de Caucaia (ASMOC) constatou que os componentes predominantes são papel ou papelão, plástico, matéria orgânica e rejeitos. No entanto, a matéria orgânica apresenta em maior quantidade.

Segundo a estimativa, no período de 2018 a 2034 o fluxo médio de RSU serão despejados mais de 1 milhão de toneladas por ano no ASMOC, valor que corresponde aos lixos coletados nas cidades de Fortaleza e Caucaia – CE, e por mais que as cidades estivessem dentro do conceito de cidades inteligentes, ainda assim gerariam resíduos sólidos.

A viabilidade na utilização dos gases de aterro para substituir os combustíveis derivados do petróleo permite a minimização dos impactos ambientais e assegura uma redução significativa na emissão dos gases de efeito estufa.

Espera-se em 2034 a máxima produção de CH_4 , nesse ano, o aterro receberá a maior quantidade de resíduos sólidos, atingido um valor máximo no ano de fechamento deste (período no qual se cessa o recebimento de lixo) e decaindo ao longo dos anos subsequentes.

Em 2034, a produção de biometano no aterro é de aproximadamente 163.050 m^3 de metano. Calcula-se que, nesse ano, o suficiente para abastecer mais de 10 mil automóveis.

O Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia gera cerca de 3.020.440 m^3 de biogás, o que poderia fornecer combustível a frota estimada em 201.362 veículos, em uma perspectiva socioeconômica, um aterro permite o uso de biogás para o setor automobilístico, reduzindo os custos de combustível, e diminuir a difusão de doenças do sistema respiratório humano.

A planta de geração de biogás do ASMOC pode servir de vitrine de tecnologias de cidades inteligentes para os governantes se inspirarem e entenderem as soluções de melhoria de gestão dos próprios resíduos sólidos urbanos.

REFERÊNCIAS

ACFOR - AUTARQUIA DE REGULAÇÃO, FISCALIZAÇÃO E CONROLE DOS SERVIÇOS PÚBLICOS DE SANEAMENTO AMBIENTAL, EMLURB - EMPRESA MUNICIPAL DE LIMPEZA E URBANIZAÇÃO & ECOFOR.

Resíduos sólidos dispostos no ASMOC. Disponível em:

http://www.fortaleza.ce.gov.br/acfor/index.php?option=com_content&task=view&id=106&Itemid=68 >. Acesso em: 9 de fev de 2020.

Agência Brasil. Publicado por Edwirges Nogueira, de 11 de Abril de 2016.

Aterro sanitário no Ceará começa a produzir biogás gerado pelo lixo, 2016.

Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-04/aterro-sanitario-no-ceara-comeca-produzir-biogas-gerado-pelo-lixo> Acesso em: 14 de jun de 2020.

AHVENNIEMI, H.; HUOVILA, A.; PINTO-SEPPÄ, I.; AIRAKSINEN, M. What are the differences between sustainable and smart cities?. **Cities**, v. 60, p. 234-245, 2017.

ANAND, G. ; GOPINATH, S.; RAVI, M.R.; KAR, I.N.; SUBRAHMANYAM, J.P. Artificial neural networks for prediction of efficiency and NOx emission of a spark ignition engine. **SAE Technical Paper**, n. 2006-01-1113, 2006.

ANGELIDOU, M. Smart cities: A conjuncture of four forces. **Cities**, v. 47, p. 95-106, 2015.

Arce-Alejandro, R.; Villegas-Alcaraz, J. F.; Gómez-Castro, F. I.; Juárez-Trujillo, L.; Sánchez-Ramírez, E.; Carrera-Rodríguez, M.; Morales-Rodríguez, R. Performance of a gasoline engine powered by a mixture of ethanol and n-butanol. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 8, p. 1929-1937, 2018.

Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos.

Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019. Disponível em:

<http://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 13 de jan de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

AZEVEDO, Márcia Helena. Características, produção e utilização do biogás produzido a partir de resíduos orgânicos. **Porto Alegre**, 2000.

BARTON, J. R.; ISSAIAS, I.; STENTIFORD, Edward I. Carbon—Making the right choice for waste management in developing countries. **Waste management**, v. 28, n. 4, p. 690-698, 2008.

BATISTA, Marcela Moraes; FARINIUK, Tharsila Maynardes Dallabona. Mechanisms of the Smart City: A Case Study of Smart City Búzios, plaNext – next generation planning, Brazil, v. 4, p. 27-40, 2017.

BLEY, Cícero. **Biogás: a energia invisível**. CIBiogás-ER, 2015.

BORJA, Rafael; GAMA, Kiev. Middleware para cidades inteligentes baseado em um barramento de serviços. In: **Anais do X Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação**. p. 584-590, 2014.

BOROWSKI, M.; ŻYCKOWSKI, P.; ŁUCZAK, R.; KARCH, M.; CHENG, J. Tests to Ensure the Minimum Methane Concentration for Gas Engines to Limit Atmospheric Emissions. **Energies**, v. 13, p. 44, 2020.

BRASIL ENERGIA, ABNT deve definir neste mês norma para biometano. 2015. <http://sbera.org.br/pt/2015/07/abnt-deve-definir-neste-mes-norma-para-biometano/>. Acesso em: 10 de dez de 2019.

BRASIL, Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-

2010/2010/lei/112305.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2012.305%2C%20DE%202%20DE%20AGOSTO%20DE%202010.&text=Institui%20a%20Pol%C3%A Dtica%20Nacional%20de,1998%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid %C3%AAncias.&text=Art.&text=%C2%A7%20o%20Esta%20Lei,s%C3%A3o %20regulados%20por%20legisla%C3%A7%C3%A3o%20espec%C3%. Acesso em: 2 de dez de 2019.

BRASIL, Ministério Do Meio Ambiente - MMA. Plano nacional de resíduos sólidos. Brasília, 2012. Disponível em:

https://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf. Acesso em: 19 de dez de 2019.

BRASIL. Decreto nº 6.017, de 6 de abril de 2007. Regulamenta a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, que dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 18 jan. 2007. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Decreto/D6017.htm. Acesso em: 2 de dez de 2019.

BRASIL. Lei Nº 11.107, de 6 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 7 de abr. 2005. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11107.htm. Acesso em: 2 de dez de 2019.

BRASIL. Resolução ANP Nº 685, de 29 de junho de 2017. 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. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 30 de jun. 2017. Disponível em:

<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2017/junho&item=ranp-685—2017>. Acesso em: 2 de dez de 2019.

BRASIL. Resolução ANP Nº 8, de 30 de janeiro de 2015. Dispõe sobre aplicação do Biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos

agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações residenciais e comerciais. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 2 fev. 2015. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2015/janeiro&item=ranp-8—2015>. Acesso em: 2 de dez de 2019.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério das Cidades. Probiogás. Biometano como combustível veicular. Brasília. 2016. Disponível em: https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/giz_biogas_como_combustivel_digital_simples.pdf. Acesso em: 15 de jan de 2020.

CARAGLIU, Andrea; DEL BO, Chiara; NIJKAMP, Peter. Smart cities in Europe. **Journal of urban technology**, v. 18, n. 2, p. 65-82, 2011.

CARRILLO, Francisco Javier et al. **Knowledge and the city: Concepts, applications and trends of knowledge-based urban development**. Routledge, 2014.

CARVALHO, Luís; CAMPOS, João Bruno. Developing the PlanIT Valley: a view on the governance and societal embedding of u-eco city pilots. **International Journal of Knowledge-Based Development**, v. 4, n. 2, p. 109-125, 2013.

CARVALHO, M. F. et al. Procedimento simplificado para obtenção de parâmetros de geração de metano em regiões tropicais. In: **XIV COBRAMSEG-Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica**. 2008.

CEARÁ, Lei Nº 16.032, de 20 de junho de 2016. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos no âmbito do Estado do Ceará. **Diário Oficial [do] Estado do Ceará**, Fortaleza. 22 jun. 2016. Disponível em <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=325201>. Acesso em: 14 de dez de 2019.

CHEN, Lei; SHIGA, Seiichi; ARAKI, Mikiya. Combustion characteristics of an SI engine fueled with H₂-CO blended fuel and diluted by CO₂. **International journal of hydrogen energy**, v. 37, n. 19, p. 14632-14639, 2012.

- CHOURABI, Hafedh et al. Understanding smart cities: An integrative framework. In: **2012 45th Hawaii international conference on system sciences**. p. 2289-2297, 2012.
- CHUNG, Kyungsun; CHUN, Kwang-Min. Combustion characteristics and generating efficiency using biogas with added hydrogen. **SAE Technical Paper**, n. 2013-01-2506, 2013.
- COIMBRA-ARAÚJO, Carlos H. et al. Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 826-839, 2014.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Manual para o software Biogás – Aterros 1.0, SMA-SP; MCT, (2006). Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/softwares/>. Acesso em: 13 de fev de 2020.
- CONVENTZ, Sven et al. When the Oryx takes off: Doha a new rising knowledge hub in the Gulf-Region?. **International Journal of Knowledge-Based Development**, v. 6, n. 1, p. 65-82, 2015.
- COSTA, Letícia Magalhães da; SILVA, Martim Francisco de Oliveira. A indústria química e o setor de fertilizantes. 2012.
- CRISTIANO, Djema Maria et al. H₂S adsorption on nanostructured iron oxide at room temperature for biogas purification: Application of renewable energy. **Renewable Energy**, 2020.
- DA COSTA, Roberto Berlim Rodrigues et al. Experimental investigation on the potential of biogas/ethanol dual-fuel spark-ignition engine for power generation: Combustion, performance and pollutant emission analysis. **Applied Energy**, v. 261, p. 114438, 2020.
- DA SILVA, Karine Trajano. Projeto de um aterro sanitário de pequeno porte. Rio de Janeiro, 2016.

DADA, Opeoluwa; MBOHWA, Charles. Biogas upgrade to biomethane from landfill wastes: a review. **Procedia Manufacturing**, v. 7, p 333-338, 2017.

DADA, Opeoluwa; MBOHWA, Charles. Biogas upgrade to biomethane from landfill wastes: a review. **Procedia Manufacturing**. p. 23-25. 2017.

DE JONG, Martin et al. Sustainable–smart–resilient–low carbon–eco–knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. **Journal of Cleaner production**, v. 109, p. 25-38, 2015.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE-Empresa. Balanço energético nacional 2019: ano base 2018. **Rio de Janeiro**, 2019.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. Biogas from waste and renewable resources: an introduction. John Wiley & Sons, 2011.

DHINGRA, Mani; CHATTOPADHYAY, Subrata. Advancing smartness of traditional settlements-case analysis of Indian and Arab old cities. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 5, n. 2, p. 549-563, 2016.

DI TRAPANI, Daniele et al. Assessing methane emission and economic viability of energy exploitation in a typical Sicilian municipal solid waste landfill. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, n. 10, p. 3173-3184, 2019.

DINESHA, Pijakala; KUMAR, Shiva; ROSEN, Marc A. Combustion, performance, and emissions of a compression ignition engine using Pongamia biodiesel and bioethanol. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 8, p. 8069-8079, 2019.

DIVYA, D.; GOPINATH, L. R.; CHRISTY, P. Merlin. A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 42, p. 690-699, 2015.

ECODEBATE. RJ recebe o primeiro ônibus movido a biometano gerado a partir de lixo. EcoDebate, Rio de Janeiro. 2015. Disponível em:

<http://www.ecodebate.com.br/2015/03/13/rjrecebe-o-primeiro-onibus-movido-a-biometano-gerado-a-partir-delixo/>. Acesso em: 19 de dez de 2019.

EICHELBERGER, S.; PETERS, M.; PIKKEMAAT, B.; CHAN, Chung-Shing. Entrepreneurial ecosystems in smart cities for tourism development: From stakeholder perceptions to regional tourism policy implications. **Journal of Hospitality and Tourism Management**, v. 45, p. 319-329, 2020.

ELK, Ana Ghislane Henriques Pereira Van. Redução de emissões na disposição final. Mecanismos de Desenvolvimento Limpo Aplicado a Resíduos Sólidos. **Coordenação de Karin Segala. Rio de Janeiro: IBAM**, v. 3, p. 40, 2007.

EZE, J. I.; AGBO, K. E. Maximizing the potentials of biogas through upgrading. **Am. J. Sci. Ind. Res**, v. 1, n. 3, p. 604-609, 2010.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Verdi de. Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica-Estudo de caso. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. Análise de pré-viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de um sistema de aproveitamento energético de biogás em um aterro sanitário existente no estado de Minas Gerais. Relatório 1. Belo Horizonte: 2009. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/fean/parte_1.pdf. Acesso em: 15 de dez de 2019.

GONÇALVES, Pólita. A reciclagem integradora dos aspectos ambientais, sociais e econômicos. **DP&A**, 2003.

HABITAT, U. N. Habitat III Issue Paper 22—Informal Settlements. **New York: UN Habitat**, 2015.

HOJDA, Alexandre; FARINIUK, Tharsila Maynardes Dallabon; SIMÃO, Marcela de Moraes Batista. Building a smart city with trust: the case of '156 central' of Curitiba-Brazil. **Economía Sociedad y Territorio**, 2019.

HOTTA, Santosh Kumar; SAHOO, Niranjana; MOHANTY, Kaustubha. Comparative assessment of a spark ignition engine fueled with gasoline and raw biogas. **Renewable energy**, v. 134, p. 1307-1319, 2019.

ISMAGILOVA, Elvira; HUGHES, Laurie; DWIVEDI, Yogesh K.; RAMAN, K. Ravi. Smart cities: Advances in research—An information systems perspective. **International Journal of Information Management**, v. 47, p. 88-100, 2019.

IMPERATIVES, Strategic. Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future. **Accessed Feb**, v. 10, 1987.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11.439**. Gas Cylinders: High Pressure Cylinders for the On-board Storage of Natural Gas as a Fuel for Automotive Vehicles. ISO, 2000.

IYER, Rajesh C. et al. Experimental investigations on the influence of compression ratio and piston crown geometry on the performance of biogas fuelled small spark ignition engine. **Renewable Energy**, v. 146, p. 997-1009, 2020.

JENDE O. Barreiras e Propostas de Soluções para o Mercado de Biogás no Brasil. Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. 2016. Disponível em:
https://www.giz.de/en/downloads/giz_barreiras_digital_simples.pdf. Acesso em: 24 de jan de 2020.

JO, Ji Hye; KIM, Woong. Market potential of biomethane as alternative transportation fuel in South Korea. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 2, p. 864-876, 2018.

JUNQUEIRA, SLCD. Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado. **Rio de Janeiro: Universidade do Rio Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica DEM/POLI/UFRJ**, 2014.

KIANI, Mostafa Kiani Deh et al. The effect of inlet temperature and spark timing on thermo-mechanical, chemical and the total exergy of an SI engine using

bioethanol-gasoline blends. **Energy Conversion and Management**, v. 165, p. 344-353, 2018.

KOORNNEEF, Joris et al. Global potential for biomethane production with carbon capture, transport and storage up to 2050. **Energy Procedia**, v. 37, p. 6043-6052, 2013.

LEE, Jung Hoon; HANCOCK, Marguerite Gong; HU, Mei-Chih. Towards an effective framework for building smart cities: Lessons from Seoul and San Francisco. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 89, p. 80-99, 2014.

LEE, Kyungtaek et al. Generating efficiency and NOx emissions of a gas engine generator fueled with a biogas–hydrogen blend and using an exhaust gas recirculation system. **International journal of hydrogen energy**, v. 35, n. 11, p. 5723-5730, 2010.

LINARD, André de Freitas Gomes. Análise do aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário metropolitano oeste em Caucaia sob a perspectiva do mecanismo de desenvolvimento limpo. 100 f. Dissertação (Mestrado), Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

LUSTOSA, Gleidson Neres; MEDEIROS, Ícaro Hendrix Borges de. Proposta de um biodigestor anaeróbico modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos. Monografia (bacharelado em engenharia civil) – **Universidade de Brasília, departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília**, 2014.

MAKARUK, Aleksander; MILTNER, Martin; HARASEK, Michael. Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute. **Separation and Purification Technology**, v. 74, n. 1, p. 83-92, 2010.

MARIANI, Leidiane. Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, São Paulo. 2018.

MARSAL-LLACUNA, Maria-Lluïsa; COLOMER-LLINÀS, Joan; MELÉNDEZ-FRIGOLA, Joaquim. Lessons in urban monitoring taken from sustainable and livable cities to better address the Smart Cities initiative. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 90, p. 611-622, 2015.

MBOOWA, D.; QUERESHI, S.; BHATTACHARJEE, C.; TONNY, K.; DUTTA, S. Qualitative determination of energy potential and methane generation from municipal solid waste (MSW) in Dhanbad (India). **Energy**, v. 123, p. 386, 391, 2017.

MENDES, Luiz Gustavo Galhardo; SOBRINHO, Pedro Magalhães. Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. **Revista Biociências**, v. 13, 2007.

MONTEIRO, J. H. P. et. al. Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Administração Municipal - IBAM, 628.4, CDD, 15ª ed., 2001.

MUNDIAL, Banco. Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean. **World Bank–ESMAP (Energy Sector Management Assistance Programme) Prepared by: Conestoga-Rovers & Associates**, v. 651, 2004.

MUYLAERT, M. S. et al. Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta- Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo-MDL-do Protocolo de Quioto-Estudos de Caso. **Rio de Janeiro, Editora da COPPE**, 2000.

NADALETI, Willian César. Aproveitamento de biogás, hidrogênio e gás de síntese no setor de transporte público e agroindustrial de arroz: estudo de potencial energético de resíduos e emissões de poluentes = Biogas, hydrogen and syngas utilization in the public transport sector and rice agroindustry: study of energy potential of waste and pollutant emissions. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2017.

NADALETI, Willian César; PRZYBYLA, Grzegorz. SI engine assessment using biogas, natural gas and syngas with different content of hydrogen for application

in Brazilian rice industries: Efficiency and pollutant emissions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 21, p. 10141-10154, 2018.

NADALETTI, W. C. et al. Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 41, p. 277-283, 2015.

NAIME, Roberto. Destinação final em aterro sanitário. 2012. Disponível em <https://www.ecodebate.com.br/2012/05/03/destinacao-final-em-aterro-sanitario-artigo-de-roberto-naime/>. Acesso em: 5 de fev de 2020.

NASCIMENTO, Júlio César Fialho do. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2007.

NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa et al. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Eng. sanit. ambient**, p. 143-155, 2019.

NASHAWI, Ibrahim Sami; MALALLAH, Adel; AL-BISHARAH, Mohammed. Forecasting world crude oil production using multicyclic Hubbert model. **Energy & Fuels**, v. 24, n. 3, p. 1788-1800, 2010.

NEIROTTI, Paolo et al. Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts. **Cities**, v. 38, p. 25-36, 2014.

ORNELAS-FERREIRA, B.; LOBATO, L.C.S.; COLTURATO, L.F.D.; TORRES, E.O; POMBO, L.M.; PUJATTI, F.J.P; ARAÚJO, J.C.; CHERNICHARO, C.A.L. Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro – Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1976-1983, 2020.

PANCHOLI, Surabhi et al. Public space design of knowledge and innovation spaces: learnings from Kelvin Grove Urban Village. **A conceptual approach for place making in knowledge and innovation spaces**, p. 65, 2015.

PARK, Cheolwoong et al. Effects of EGR on performance of engines with spark gap projection and fueled by biogas–hydrogen blends. **International journal of hydrogen energy**, v. 37, n. 19, p. 14640-14648, 2012.

PARK, Cheolwoong et al. Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen. **International Journal of hydrogen energy**, v. 36, n. 16, p. 10080-10088, 2011.

PEREIRA, Wilson Inacio; CHWIF, Leonardo. Applying the smart city philosophy in Brazil for improving urban traffic condition by agent-based simulation. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 14, n. 3, p. 381-387, 2017.

PETRONOTÍCIAS. (2014) Gás extraído de aterro sanitário passa a ser consumido pela Reduc. PetroNotícias, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.petronoticias.com.br/archives/52304>. Acesso em: 10 de dez de 2019.

PORPATHAM, E.; RAMESH, A.; NAGALINGAM, B. Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 12, p. 2057-2065, 2007.

PRASAD, D., ALIZADEH, T. What makes Indian Cities Smart? - A Policy Analysis of Smart Cities Mission. **Telematics and Informatics**, 101466, 2020.

QIAN, Yong et al. Review of the state-of-the-art of biogas combustion mechanisms and applications in internal combustion engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 50-58, 2017.

QU, Sijia; GUAN, Dongjie; MA, Zhanyun; YI, Xiaotao. A study on the optimal path of methane emissions reductions in a municipal solid waste landfill treatment based on the IPCC-SD model. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 252-266, 2019.

RAPPORT, Joshua L. et al. Anaerobic digestion technologies for the treatment of municipal solid waste. **International Journal of Environment and Waste Management**, v. 9, n. 1-2, p. 100-122, 2012.

RASI, Saija; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, Jukka. Upgrading landfill gas using a high pressure water absorption process. **Fuel**, v. 115, p. 539-543, 2014.

RIO DE JANEIRO, Lei Nº 6.361, de 18 de dezembro de 2012. Institui a Política Estadual de Gás Natural Renovável do Estado do Rio de Janeiro. **Diário Oficial [do] Estado do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro. 19 dez. 2012. Disponível em <https://gov-rj.jusbrasil.com.br/legislacao/1033645/lei-6361-12>. Acesso em: 10 de dez de 2019.

RODRIGUES, Lucas Costa et al. Cartografia do saneamento básico do Rio Grande do Norte. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 34, 2018.

RODRÍGUEZ-BOLÍVAR, Manuel Pedro. **Transforming city governments for successful smart cities**. Springer, 2015.

SALES, Carlos Humberto Nascimento et al. Diagnóstico da degradação ambiental na área do lixão de um município no sertão central do ceará. **Encontro de Extensão, Docência e Iniciação Científica (EEDIC)**, v. 5, n. 1, 2019.

SAMPAIO, Fernanda Silvia de Oliveira. Avaliação de unidade de processamento e produção do biometano a partir do biogás de aterro de resíduos sólidos. 2018. 32 f. Monografia (Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SANTOS, Gemelle Oliveira. Resíduos sólidos e Aterros sanitários: em busca de um novo olhar. p.80, 2016.

SANTOS, Gemelle Oliveira; MOTA Francisco Suetônio Bastos. Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Fortaleza/CE Dispostos no Aterro Sanitário de Caucaia/CE. **Revista Tecnológica Fortaleza**, v. 31, n. 1, p. 39-50, 2010.

SANTOS, Genivaldo Barbosa dos et al. Recuperação de áreas degradadas com fundamentação em aterros sanitários. **Revista de trabalhos acadêmicos - Universo Salvador**, v. 1, n. 3, 2018.

SCARLAT, Nicolae; DALLEMAND, Jean-François; FAHL, Fernando. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable energy**, v. 129, p. 457-472, 2018.

SEMACE (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO CEARÁ) E GAIA ENGENHARIA AMBIENTAL LTDA. Panorama Dos Resíduos Sólidos Do Ceará Contrato Nº 38/2012/CONPAM, 2015. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2018/12/Panorama-Vol-III.pdf>. Acesso em: 9 de jan de 2020.

SEMACE (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO CEARÁ), Planos regionais de gestão integrada de resíduos sólidos, Panorama Tabelas RMF A (2017) <<https://www.sema.ce.gov.br/planos-regionais-de-gestao-integrada-de-residuos-solidos/banco-de-dados-dos-planos-regionais-de-gestao-integrada-de-residuos-solidos-prgirs/rmf-a-regiao-metropolitana-de-fortaleza-a/>> Acesso em: 10 de fev de 2020.

SHIGARKANTHI, Vinod M.; PORPATHAM, E.; RAMESH, A. Experimental Investigation and Modeling of Cycle by Cycle Variations in a Gas Fuelled SI Engine. **SAE Technical Paper**, n. 2005-01-3480, 2005.

SOARES, Rayme Vasconcellos; LOPES, Jerisnaldo Matos. Resíduos sólidos urbanos: viabilidade técnica do processo produtivo do biometano. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 6, n. 12, p. 209-216, 2019.

SOHOO, I.; RITZKOWSKI, M.; HEERENKLAGE, J.; KUCHTA, K. Biochemical methane potential assessment of municipal solid waste generated in Asian cities: A case study of Karachi, Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, 2021.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos avançados**, v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012.

VANOLO, Alberto. Smartmentality: The smart city as disciplinary strategy. **Urban studies**, v. 51, n. 5, p. 883-898, 2014.

VEIGA, Ana Paula Beber; MERCEDES, Sonia Seger. Biometano de Gás de Aterros no Brasil: Potencial e Perspectivas. **Universidade de São Paulo-USP**, v. 10, 2015.

VIANA Theyse, Diário do Nordeste. Instituto denuncia poluição do Rio Ceará por Aterro Sanitário, 2018. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/metro/instituto-denuncia-poluicao-do-rio-ceara-por-aterro-sanitario-1.1921911>. Acesso em: 11 de fev de 2020.

VIEIRA Julliane, Cetesb. Usina recebe autorização para injetar na rede toda capacidade de biogás produzido, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/2018/05/30/usina-recebe-autorizacao-para-injetar-na-rede-toda-capacidade-de-biogas-produzido/>. Acesso em: 20 de jun de 2020.

VILACA, NMCAA et al. Smart city–caso de implantação em búzios–rj. **Revista Sodebras**, v. 9, n. 98, 2014.

VITA, A. et al. Methanol synthesis from biogas: A thermodynamic analysis. **Renewable Energy**, v. 118, p. 673-684, 2018.

WEISS, Marcos Cesar; BERNARDES, Roberto Carlos; CONSONI, Flavia Luciane. Cidades inteligentes: casos e perspectivas para as cidades brasileiras. **Revista Tecnológica da Fatec Americana**, v. 5, n. 1, p. 01-13, 2017.

WEISS, Marcos Cesar; CONSONI, Flávia Luciane. A internetilização das cidades brasileiras e a utopia das cidades inteligentes: uma análise do distanciamento entre o mundo real e o mundo virtual em terra brasilis. **International Journal of Knowledge Engineering and Management (IJKEM)**, v. 6, n. 15, p. 23-50, 2017.

WHISTON, P. J. et al. Turbulent burning velocity of a simulated biogas combustion in a spark ignition engine. **SAE Technical Paper**, n. 922166, 1992.

YADAV, S. D.; KUMAR, Bimlesh; THIPSE, S. S. Characteristics of biogas operated automotive SI engine to reduce exhaust emission for green development. **SAE Technical Paper**, n. 2013-26-0012, 2013.

YIGITCANLAR, Tan. Australian local governments' practice and prospects with online planning. **URISA Journal**, v. 18, n. 2, p. 7-17, 2006.

YIGITCANLAR, Tan. **Technology and the city: Systems, applications and implications**. Routledge, 2016.

YÜCENUR, G. Nilay et al. An integrated solution with SWARA&COPRAS methods in renewable energy production: City selection for biogas facility. **Renewable Energy**, v. 145, p. 2587-2597, 2020.