



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS IV – UNIDADE ACADÊMICA SOUSA
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE AGRÁRIAS E EXATAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

MARIA EDUARDA LEITE DA SILVA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS COMO
FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Sousa – PB
2025**

MARIA EDUARDA LEITE DA SILVA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS COMO
FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentada à da
Universidade Estadual da Paraíba,
como parte das exigências do
curso de Tecnologia em Sistemas
de Energias Renováveis, como
requisito parcial à obtenção do
título de Tecnóloga em Energias
Renováveis.

Área de concentração: Biogás

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Dantas de Carvalho

**Sousa – PB
2025**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586p Silva, Maria Eduarda Leite da.
Produção de biogás em aterros sanitários como fonte de energia elétrica [manuscrito] / Maria Eduarda Leite da Silva. - 2025.
49 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Energias renováveis) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Humanas e Agrárias, 2025.

"Orientação : Prof. Dr. João Paulo Dantas de Carvalho, Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Energias Renováveis - CCHA".

1. Resíduos sólidos. 2. Biogás. 3. Aterros sanitários. 4. MDL. I. Título

21. ed. CDD 631.8

MARIA EDUARDA LEITE DA SILVA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso à Universidade Estadual da Paraíba, como parte das exigências do curso Tecnologia em Sistemas de Energia Renováveis, como requisito parcial à obtenção do título de Tecnóloga em Energias Renováveis.

Área de concentração: Biogás

Aprovada em: 06/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **João Paulo Dantas de Carvalho** (**.185.134-**), em 16/06/2025 07:35:56 com chave afbff8864a9d11f09f432618257239a1.
- **Thomas Tadeu de Oliveira Pereira** (**.001.714-**), em 16/06/2025 09:53:55 com chave f63f64dc4ab011f0b51306adb0a3afce.
- **Edvaldo Pereira Santos Júnior** (**.389.174-**), em 16/06/2025 14:43:38 com chave 6f1fe0f24ad911f0894e06adb0a3afce.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QrCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final

Data da Emissão: 22/06/2025

Código de Autenticação: ae9bf4



Dedico este trabalho ao meu Senhor,
Jesus Cristo, que me chamou e me trouxe
ao proposito deste curso.

“Sem mim vocês não podem fazer coisa
alguma” João 15:5.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde, força e sabedoria ao longo desta jornada.

À minha família, meu alicerce, à minha mãe Edileide Leite e ao meu pai José Carlos, que sempre acreditaram no meu potencial, por todo o amor, incentivo e apoio incondicional. Vocês são minha maior inspiração.

Ao meu orientador, João Paulo, agradeço a paciência, disponibilidade e pelas valiosas contribuições que enriqueceram este trabalho. Seu acompanhamento foi fundamental para que este projeto se tornasse realidade.

Aos professores e colegas do curso, com quem compartilhei aprendizados, desafios e momentos inesquecíveis, deixo minha gratidão por cada troca e convivência. Em especial Beatriz e Danielly, que entraram nessa jornada acadêmica ao meu lado, e por sempre se fazerem presentes em minha vida.

Agradeço especialmente a minha amiga de infância Alice Fernandes, por ter me encorajado durante toda a minha vida, sem ela não teria tido a oportunidade de entrar neste curso, obrigado também por todos os conselhos e ensinamentos, você foi fundamental.

Ao meu namorado Thiago Lopes, por toda ajuda, pelas palavras de incentivo e por todo apoio físico e mental, agradeço por todo amor que tens me dado e por não medir esforços para me ver feliz.

Aos meus colegas de trabalho, Nalanda, Juliana, José e Gabriela, por sempre estarem comigo e me apoiarem sempre.

Este trabalho é o reflexo do apoio e da presença de cada um que fez parte dessa trajetória. A todos vocês, minha eterna gratidão.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	12
2.1.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	12
3 METODOLOGIA.....	13
4.1 RESIDUOS SÓLIDOS.....	14
4.2 ORIGEM DOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	14
4.2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	15
4.3 GERENCIAMENTO DOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	17
4.4 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL.....	18
4.5 LIXÃO.....	19
4.6 ATERRO CONTROLADO.....	22
4.7 ATERROS SANITÁRIOS.....	24
4.7.1 PROJETO.....	25
4.8 BIÓGAS.....	28
4.8.1 SISTEMA PARA EXTRAÇÃO E TRATAMENTO DO BIOGÁS NO ATERRO.....	36
4.8.2 SISTEMA DE QUEIMA EM FLARES.....	38
4.9 ALTERNATIVAS PARA USO DO BIOGÁS.....	39
4.10 O MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL).....	41
4.11 PROJETOS DE MDL EM ATERROS SANITÁRIOS.....	43
CONCLUSÃO.....	45
REFERÊNCIAS.....	46

RESUMO

A disposição final dos resíduos sólidos feitos de maneira indevida é um dos grandes problemas enfrentados no mundo, ao qual vem sendo implantados vários sistemas para o seu controle, uma alternativa sustentável para isto são os aterros sanitários, que é uma forma eficaz e ambientalmente correta. Nesse contexto, o presente trabalho estudou os aspectos técnicos, econômicos e ambientais que estão associados a captação do biogás e o seu aproveitamento a partir dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. Através de uma revisão bibliográfica ilustrou as etapas de concepção de um aterro sanitário, bem como a captação do biogás para posteriormente ser utilizado como fonte de energia. O estudo aponta para o mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) ao qual permite reduções nas emissões de gases do efeito estufa (GEE), tendo como principal objetivo a recuperação e preservação ambiental, possibilitando através dos aterros sanitários uma forma simples, econômica e ambientalmente correta de geração de energia e para a redução dos impactos ambientais gerados neste setor.

Palavras chaves: Resíduos sólidos, aterro sanitário, biogás, MDL.

ABSTRACT

The irregular disposal of solid waste is one of the major problems facing the world, which has been deployed several systems for its control, a sustainable alternative to this are the landfills, which is a more efficient and environmentally friendly. In this context, this paper studied the technical, economic and environmental factors that are associated with uptake and its utilization of biogas from municipal solid waste in landfills. Through a literature review this paper illustrated the design stages of a landfill, as well as the capture of biogas to be used later as an energy source. The study points to the clean development mechanism (CDM) which allows reductions in emissions of greenhouse gases (GHG), having as main objective the restoration and preservation of the environment, allowing landfills through a simple, economical and environmentally friendly power generation and also to reduce environmental impacts in this sector.

Keywords: solid waste landfill, biogas, CDM.

INTRODUÇÃO

A disposição final de resíduos sólidos é um dos maiores desafios ambientais que o Brasil enfrenta. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022, publicado pela ABRELPE, o Brasil gerou aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2022, o que equivale a uma média de 1,043 kg por habitante por dia.

Após serem postos nos aterros sanitários ocorre a decomposição desses resíduos por meio de dois processos. O primeiro sendo ele o aeróbio onde ocorre normalmente o período de deposição do lixo no solo, ocorrendo assim a redução do oxigênio presente nos resíduos dando assim origem ao processo de decomposição anaeróbia, onde os microrganismos entram em ação e transformam a matéria orgânica em gás metano, sendo denominado o biogás. Vale frisar que em aterros sanitários, devido a condições propícias, como a temperatura, ausência de ar, disponibilidade de ar, auxilia ao desenvolvimento destas bactérias, causando o surgimento do biogás (CETESB, 2011).

A principal característica negativa do gás metano é sua colaboração no efeito estufa. A emissão descontrolada proveniente da decomposição do lixo, acarreta inúmeros danos à saúde humana e a vegetação. O metano uma vez inalado pode causar danos no sistema nervoso central, parada cardíaca e até mesmo câncer, podendo também atingir outros órgãos do corpo. Os odores fortes desse gás também podem gerar desconforto a população que residem em locais próximos. Outro ponto negativo do gás metano é por ser altamente inflamável, acarretando explosões e incêndios que possam vir a acontecer a lugares próximos aos aterros (Oliveira; Santos, 2017).

Caso o resíduo sólido urbano não tenha um tratamento adequado, poderá acarretar sérios danos ao meio ambiente, entre eles a poluição do solo, alterando suas características físico-químicas que representará uma séria ameaça à saúde pública tornando este ambiente propício ao desenvolvimento de transmissores de doenças, além da contaminação às águas subterrâneas e do ar (Oliveira; Santos, 2017).

Uma das alternativas mais usadas para o tratamento desses resíduos

são os aterros sanitários, onde é a técnica mais econômica e segura para a saúde populacional (Oliveira; Lopes, 2018). São utilizados métodos de engenharia para armazenar os dejetos na menor área possível, onde solo é impermeabilizado com geomembrana de polietileno de alta densidade, para evitar a contaminação e os resíduos são condensados para obter um menor volume, sendo cobertos frequentemente com camadas de terra.

Com a busca para a redução deste impacto, a procura por outras fontes de energia acontecem a todo momento. A Organização das Nações Unidas (ONU), diante as questões ambientais, visa projetos para o aproveitamento energético do biogás, onde teve início nos anos 70, para a diminuição das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) assim favorecendo o meio ambiente. Desse modo houve o surgimento do Protocolo de Quioto e em decorrência o chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), com o objetivo de ajudar no processo de redução dos gases a fim de colaborar com o desenvolvimento sustentável. Após a confirmação da atividade, é lançado um Certificado de Emissões Reduzidas (CER) (Silva; Costa, 2021).

O aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica e como combustível se destaca de forma promissora, pois o aproveitamento desse recurso que muitas vezes é negligenciado por se tratar de uma alternativa nova no Brasil, a fim de contribuir para a redução das mudanças climáticas. O biogás além de ser uma fonte renovável e abundante, ele também pode ser considerado um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, recebendo Certificados de Emissões Reduzidas e consequentemente sendo vendidos como Créditos de Carbono (Coelho; Monteiro, 2020).

Para a realização da coleta do biogás produzido no aterro sanitário, é fundamental que seja realizado por etapas e medidas para a retirada do produto, sendo realizada em três fases: preparação, execução e conclusão. O chorume é captado e transportado para as estações de tratamento de efluente, o biogás é extraído e queimado. Em aterros sanitários existem dois tipos de sistema para a realizar a coleta do biogás, sendo eles, o passivo, que evita que os gases se dissipem na atmosfera e impede a emissão no solo. E temos o sistema ativo, onde é necessário utilizar componentes para que conseguir aproveitar o gás de forma energética, incluindo uma rede

coletora, drenos, compressor e um sistema de purificação do biogás (Gomes; Lima, 2020).

As novas tecnologias que buscam novas fontes de energias renováveis, o biogás ganha destaque mediante seus efeitos positivos, em termos econômicos, ambientais e sociais. Também servindo como ferramenta para a instrumentalização do MDL, incentivando projetos nessa modalidade (Silva; Pereira, 2021).

O presente estudo, apresenta alternativas para a redução na emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, e como a busca por novas fontes de energias limpas, como o biogás, para a geração de energia.

O estudo neste trabalho, mostra as vantagens e ganhos de inserir sistemas de geração de energia elétrica aplicando biogás como combustível.

2. OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo geral

- Analisar, por meio de revisão bibliográfica, a viabilidade da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em aterros sanitários.

2.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar métodos de aproveitamento, do processo e transporte do biogás originado em aterros sanitários.
- Destacar os benefícios e eficiência do biogás, para ajudar na redução na emissão de gases poluentes na atmosfera, e a diminuição do impacto ambiental, causada por ele.
- Avaliar a possível viabilidade econômica, técnica e ambiental da geração de energia elétrica por meio do biogás e utilizar indícios para estimar os efeitos ambientais de projetos de MDL em aterros sanitários.

METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de uma revisão bibliográfica, na qual buscou compreender e examinar a viabilidade da implantação de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás como fonte de energia limpa e renovável, e sendo uma alternativa para o tratamento do lixo, sendo ele os resíduos sólidos, em aterros sanitários.

Estudos realizados por meio de revisão de literatura, segundo Cervo e Bervian (2002, p. 65) “procuram explicar um problema a partir de referências teóricas publicadas em documentos. Podem ser realizados independentemente ou como parte da pesquisa descritiva ou experimental”. “[...] a pesquisa bibliográfica não é mera repetição do que já foi dito ou escrito sobre certo assunto, mas propicia o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, chegando a conclusões inovadoras” (Lakatos; Marconi, 2006, p. 185).

O levantamento bibliográfico abrangeu a produção científica a respeito do tema da viabilidade da implantação de um sistema de geração de energia a partir do biogás como alternativa apropriada para o tratamento do lixo. Buscou-se artigos desta área, mais especificamente os relacionados à área ambiental e artigos que fizerem referência ao tema escolhido. Os materiais foram classificados por meio dos seguintes aspectos: tese, dissertações, livros, artigos científicos.

Os periódicos selecionados foram todos os da área ambiental escolhidos com bases de dados eletrônicas nacionais, internacionais e institucionais tais como: BIREME, LILACS, SCIELO, IBGE publicados até o ano de 2024.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Resíduos Sólidos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 10004, define resíduos sólidos como resíduos nos estados sólidos ou semi-sólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluem-se os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos, instalações de controle de poluição e líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto, ou exijam soluções técnicas economicamente inviáveis.

3.2 Origem dos Resíduos

Definem-se as características dos resíduos de acordo com a sua composição. A importância de tal está relacionada à escolha da melhor tecnologia para o tratamento e o destino dos resíduos. De acordo com sua origem, define-se os tipos de resíduos sólidos. A classificação permite melhor a destinação final do lixo. (Resolução nº 005 / CONAMA, de 5 de agosto de 1993 – NBR 10.004 - BRASIL, 2004).

a) Resíduos Sólidos Domiciliares: São os resíduos gerados pelas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais. Apresenta elevado percentual de matéria orgânica (cerca de 60%).

b) Resíduos Sólidos Comerciais: Resíduos de estabelecimentos comerciais, as quais suas características dependem da atividade desenvolvida no estabelecimento, muitas vezes sendo eles os resíduos orgânicos.

c) Resíduos Sólidos Públicos: É constituído pelos resíduos sólidos resultantes das atividades de limpeza de vias e logradouros públicos, como, folhas, terra, areia, poeira e aqueles descartados incorretamente pela população, como entulho, papéis, restos de embalagens e alimentos.

d) Resíduos Especiais: São resíduos que em função de suas características peculiares, passam a merecer cuidados especiais em seu acondicionamento, transporte, manipulação e disposição final. Nesta classificação, estão inseridos os resíduos industriais e os de portos e terminais rodoviários.

e) Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde: Compreende os resíduos gerados nas instituições destinadas a saúde, provenientes de hospitais, centros cirúrgicos, ambulatoriais, postos médicos e odontológicos, clínicas, laboratórios e farmácias.

4.2.2 Classificação dos Resíduos Sólidos

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são classificados em dois grupos: Classe I perigosos e classe II não-perigosos. Este último ainda pode ser subdividido em classe II A que são os inertes e o classe II B que são os não- inertes:

a) Resíduos Classe I: denominados perigosos, são os resíduos sólidos que, devido às suas características, podem apresentar riscos à saúde pública. As características que conferem periculosidade a um resíduo são a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (ou contaminantes);

b) Resíduos Classe II: denominados não-perigosos, são os resíduos sólidos que não apresentam riscos ao ser humano e ao meio ambiente, sendo subdivididos em:

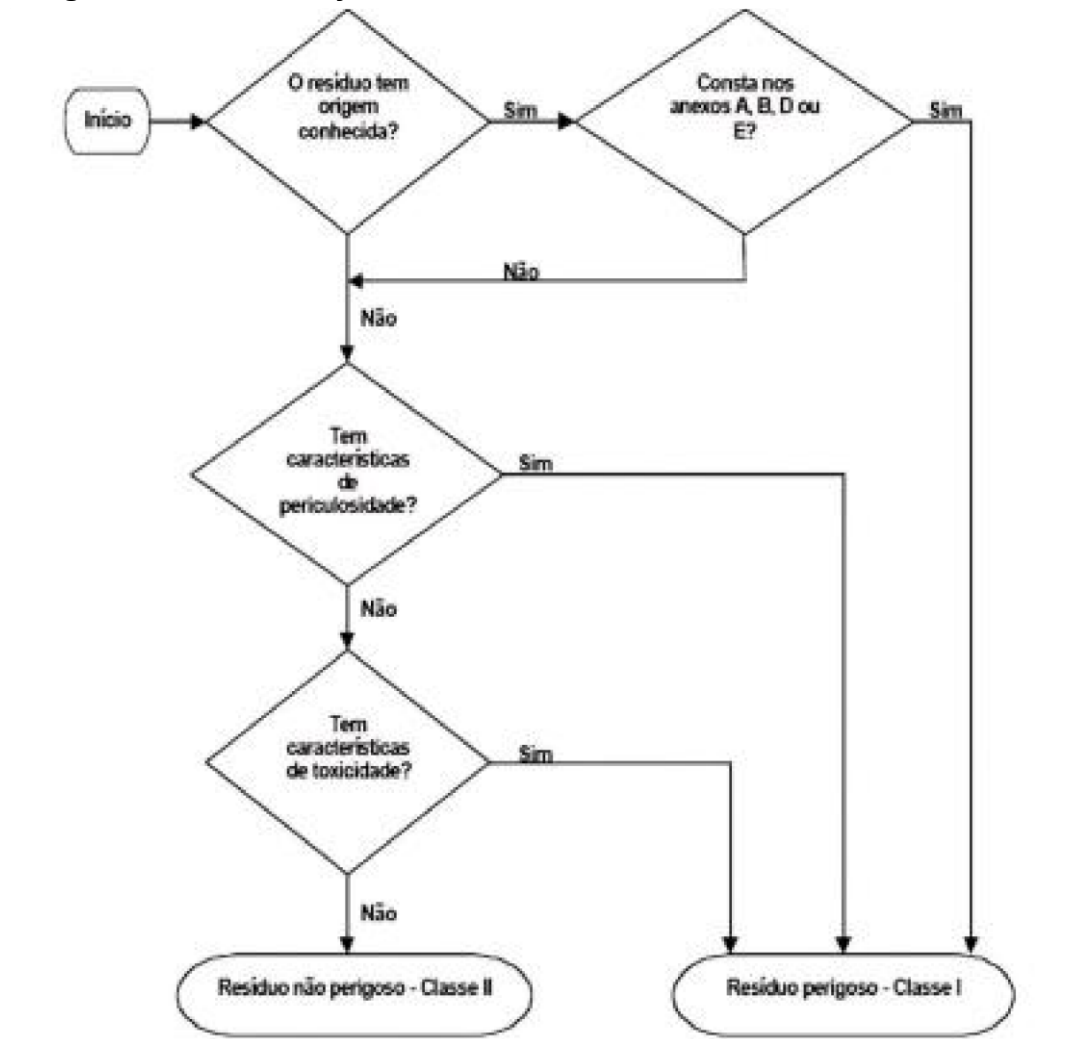
c) Resíduos Classe II A: denominados inertes, são os resíduos sólidos que, submetidos a testes de solubilização, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de águas, excetuando-se os padrões relativos ao aspecto, cor, turbidez e sabor;

d) Resíduos Classe II B: denominados não inertes, são os resíduos que não se enquadraram na Classe I ou na Classe

II A, podendo ter propriedades, tais como, combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilidade em água.

Essa classificação pode ser representada conforme o Fluxograma presente na Figura 1.

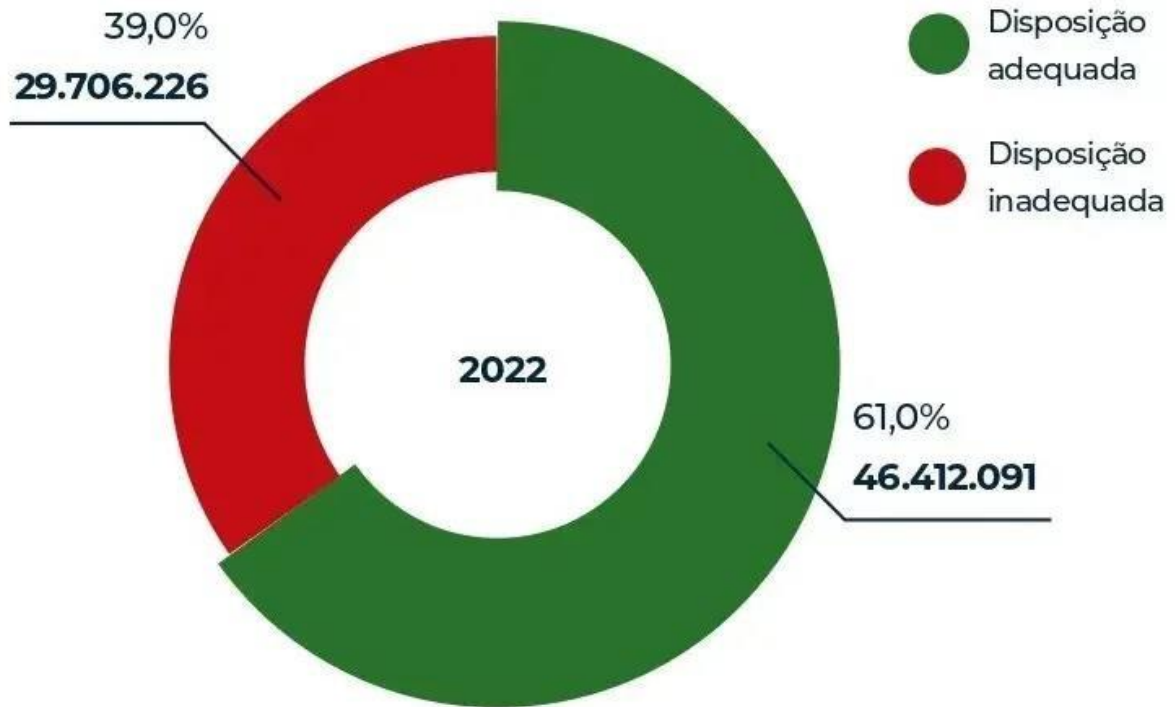
Figura 01: Classificação dos Resíduos Sólidos.



Fonte: ABNT, 2004.

Segundo a Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais (Abrelpe,2022) a disposição final do lixo no Brasil está representada na Figura 2 a seguir. Este gráfico evidencia a desproporção entre a disposição correta e incorreta do lixo.

Figura 02: Gráfico da destinação final do lixo no Brasil.



Fonte: ABRELPE (2022).

3.3 Gerenciamento Integral dos Resíduos Sólidos

O Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (GIRS) é um conjunto de ações e estratégias voltadas para o manejo adequado dos resíduos sólidos, desde a geração até a destinação final, com foco na sustentabilidade ambiental, social e econômica. Esse conceito está alinhado com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 no Brasil. Além do manejo seguro e efetivo fluxo de RSU, atingindo o mínimo de impactos sobre a saúde pública e meio ambiente. (Oliveira; Pasqual, 1998). Este fluxograma é representado na Figura 03.

Figura 03: Fluxo do sistema integrado de resíduos sólidos urbanos.



Fonte: OLIVEIRA; PASQUAL (1998).

São indicados programas de limpeza urbana, destacando condições que sejam alcançadas a máxima redução na produção de lixo, o máximo reaproveitamento e reciclagem de materiais e a disposição dos resíduos de forma mais adequada perante os aspectos sanitários e ambientais, compreendendo toda a população, auxiliando na redução de custos do sistema e contribuindo na proteção e melhoria do ambiente (Monteiro, 2001).

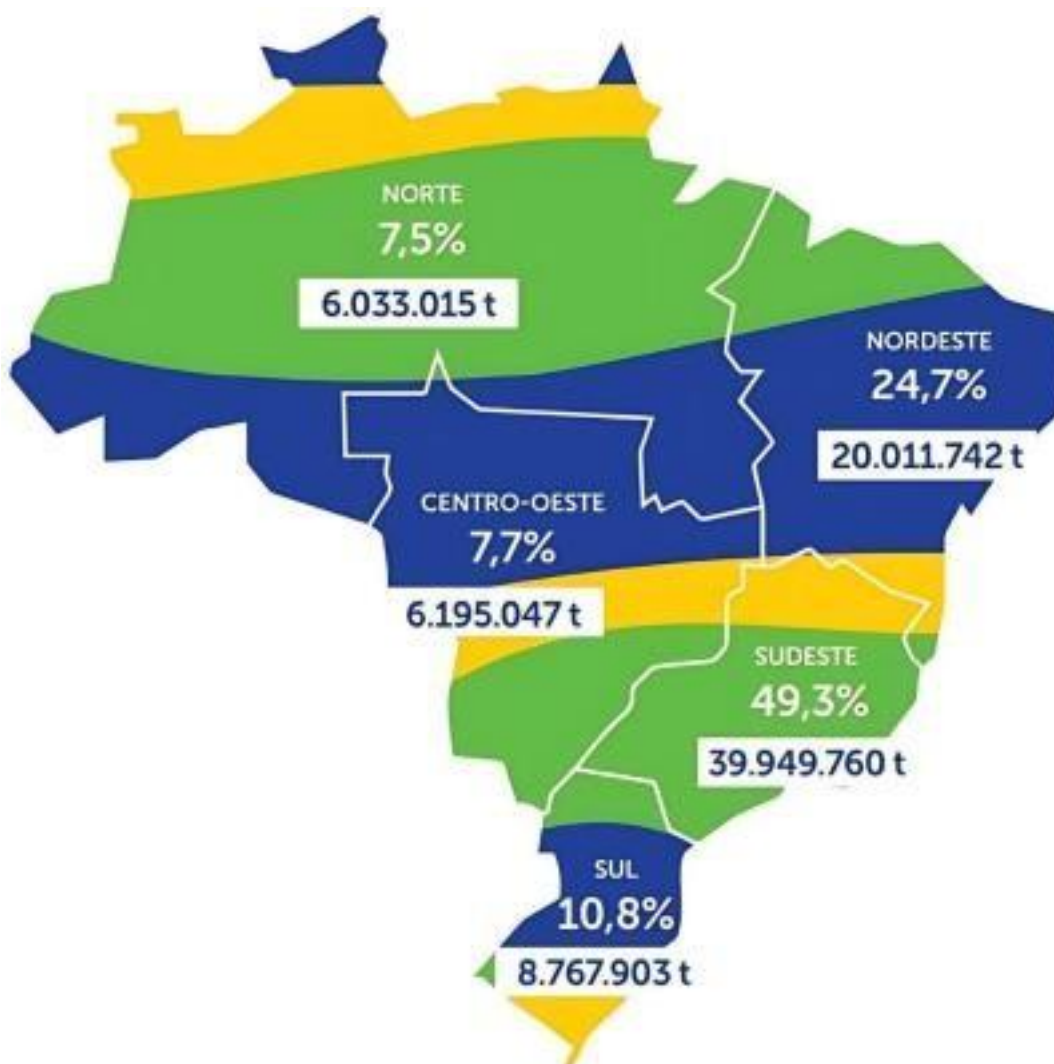
A coleta dos RSU e o seu transporte para áreas de tratamento e disposição final são medidas do serviço público, de grande valia para a população. Estes resíduos são conduzidos do local de geração até a disposição final, sendo que ocorre o acondicionamento dos resíduos pela participação da população. Dentre os tipos de serviços de coleta, estão: coleta domiciliar (regular ou convencional); coleta de feiras, praias, calçadas e demais logradouros públicos; coleta especial (coleta de entulhos e outros); coleta de resíduos de serviço de saúde e coleta seletiva (Oliveira; Pasqual, 1998).

Dentre os sistemas de disposição final estão: descarga a céu aberto ou lixão (forma inadequada de disposição sem nenhum sistema de tratamento e proteção ao meio ambiente); aterro controlado (disposição similar ao lixão, porém, os resíduos são cobertos por uma camada de terra, reduzindo odor e poluição visual, no entanto, não há impermeabilização na base e sistema de tratamento do chorume), e aterro sanitário (técnica adequada de disposição de resíduos sólidos com o uso de procedimentos que visem a minimização de impactos a saúde da população e do meio ambiente, possuindo controle e monitoramento ambiental).

3.4 Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Com base na variação desse índice, estima-se que a geração média de RSU per capita no Brasil tenha apresentado um crescimento discreto de menos de um ponto percentual, com cada habitante gerando, em média, 1,047 kg de RSU por dia em 2023. Ao multiplicar esse valor pela população estimada para o Brasil em 2023 (já aplicadas as correções feitas pelo IBGE em 2024), obtém-se uma geração anual estimada de aproximadamente 81 milhões de toneladas de RSU, o que equivale a mais de 221 mil toneladas de resíduos geradas todos os dias, ou cerca de 382 kg de RSU por habitante durante o ano (ABREMA, 2024). A geração regional de RSU em 2023 observada na Figura 04.

Figura 04: Participação regional na geração brasileira de RSU em 2023.

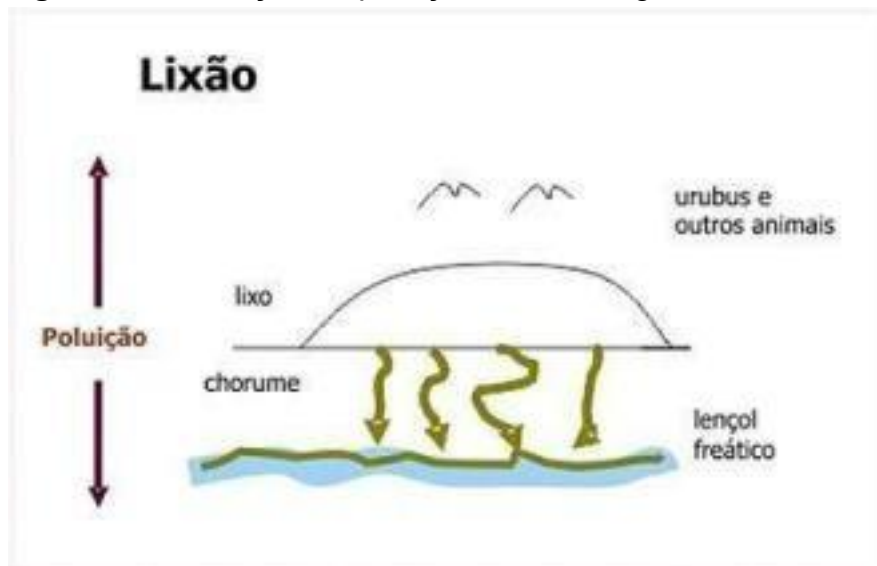


Fonte: ABREMA (2024).

3.5 Lixão

Um lixão é uma área de disposição final de resíduos sólidos sem nenhuma preparação anterior do solo. Não tem nenhum sistema de tratamento de efluentes líquidos, como o chorume. Este penetra pela terra levando substâncias contaminantes para o solo e para o lençol freático. Animais tais como moscas, pássaros e ratos convivem com o lixo livremente no lixão a céu aberto, e pior ainda, crianças, adolescentes e adultos catam comida e materiais recicláveis para vender. No Lixão o lixo fica exposto sem nenhum procedimento que evite as consequências ambientais e sociais negativas (LIXO, 2010). A Figura 05 demonstra como o chorume produzido nos lixões interage com a litosfera,

Figura 05: Ilustração da poluição do solo originário do chorume.



Fonte: Lixo (2010).

Silva (2011) ressalta que em um lixão não há preparação do solo e nem um sistema de tratamento do chorume. A falta destes tratamentos permite riscos ambientais, sociais e econômicos. Como prejuízos ao meio ambiente do descarte inadequado dos resíduos no solo pode-se citar:

- a) Poluição visual: Ampla variedade de lixo descartado de maneira inadequada, ocasionando um impacto visual na população e contribuindo na perda do valor natural e econômico da área em que o resíduo é descartado.

- b) Poluição do solo: Através da decomposição do lixo, ocorre a geração do chorume, este altera as características físico-químicas do solo, tornando o indisponível para outros fins e consequentemente trazendo malefícios ao meio ambiente. Outra consequência negativa dos lixões é funcionar como criadouros de vetores de doenças (moscas, ratos, baratas).
- c) Poluição da água: Descendente do chorume que ao escorrer ou percolar pelo solo, acaba poluindo e modificando as características dos mananciais de água subterrâneos e superficiais.
- d) Poluição do ar: Através da decomposição dos resíduos, formam-se gases, como o dióxido de carbono, metano e ácido sulfídrico, ocasionando riscos, explosões, doenças respiratórias para a população vizinha e a queima da vegetação. Na figura 06, podemos ver a visão geral de um lixão a céu aberto.

Figura 06: Vista geral de um lixão.



Fonte: Paraíba lixo zero (2024).

Monteiro (2001) relata que o lixão é uma forma inadequada de dispor os resíduos sólidos urbanos, pois provoca inúmeros impactos ambientais negativos. Estes devem ser recuperados para que estes impactos sejam minimizados.

- a) Definir com precisão através de funcionários antigos, a extensão da área que recebeu o lixo;
- b) Delimitar a área, cercando-a completamente;
- c) Efetuar sondagens com o intuito de definir a espessura da camada de lixo ao longo da área degradada;
- d) Remover o lixo tal que sua espessura seja menor que um metro;
- e) Recuperar a área escavada com solo natural da região;
- f) Executar valetas ao longo de todo o perímetro da pilha de lixo;
- g) Executar um ou mais poços para a acumulação do chorume coletado pelas valetas;
- h) Construir poços verticais para a drenagem do gás;
- i) Espalhar uma camada de solo vegetal sobre a camada de argila;
- j) Promover o plantio de espécies nativas;
- k) Implantar poços de monitoramento a montante e a jusante do lixão recuperado.

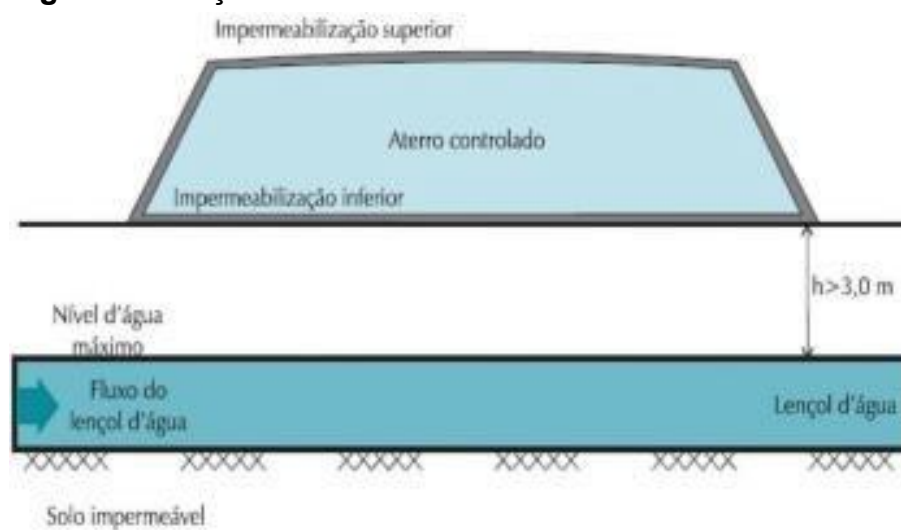
4.6 Aterro Controlado

Os aterros controlados são similares aos aterros sanitários no aspecto da realização da cobertura por uma camada inerte, usualmente terra ou entulho. Reis, Fadigas, Carvalho (2012) relataram que neste tipo de disposição não há impermeabilização da base do solo nem tratamento dos gases ou chorume. Esta técnica reduz os impactos, mas não resolve os problemas.

Como não possui um sistema de coleta de chorume, o líquido fica retido no interior do aterro. É de grande vantagem que o volume de água da chuva que infiltra no aterro seja o menor possível, devido a reduzir a quantidade de

chorume, sendo realizada uma técnica para obtenção dela utilizando material argiloso para a camada de cobertura provisória e uma camada de impermeabilização superior quando o aterro atingir a cota máxima permitida. Além de ser adequado que a área de implantação do aterro possua um lençol freático profundo com mais de três metros do nível do terreno (MONTEIRO, 2001). Representado na Figura 07.

Figura 07: Seção transversal de um aterro controlado.



Fonte: Monteiro (2001).

Quando se avalia este tratamento comparando com o lixão, é identificado avanços neste procedimento, porém, devido aos impactos ambientais e os custos de operação, sua qualidade é inferior ao aterro sanitário (Silva, 2010). A seguir na figura 08, mostra o funcionamento detalhado dos aterros controlados. Segundo a ABNT, NBR 8.849/1985, (BRASIL, 1985) neste tratamento são destinadas células para a deposição do lixo, sendo seladas e tapadas no preenchimento.

Figura 08: Funcionamento de um aterro controlado.



Fonte: Biboca Ambiental (2012).

4.7 Aterros sanitários

De acordo com a norma da ABNT NBR 8.419/1992, o aterro sanitário é definido como: Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

A Norma Técnica NBR 8419 (ABNT, 1984), traz algumas limitações para a construção e instalação de aterros sanitários, tais como:

- O aterro não deve ser construído em áreas sujeitas à inundação.
- Entre a superfície interior do aterro e o mais alto nível do lençol freático deve haver uma camada de espessura mínima de 1,5 m de solo insaturado.
- O nível do solo deve ser medido durante a época de maior precipitação pluviométrica da região.
- O solo deve ser de baixa permeabilidade (argiloso).
- O aterro deve ser localizado a uma distância mínima de 200 metros de
- Qualquer curso d'água.

- Deve ser de fácil acesso.
- A arborização deve ser adequada nas redondezas para evitar erosões, espalhamento da poeira e retenção dos odores.
- Devem ser construídos poços de monitoramento para avaliar se estão ocorrendo vazamentos e contaminação do lençol freático.
- O efluente da lagoa deve ser monitorado pelo menos quatro vezes ao ano.

O projeto de um aterro sanitário deve obrigatoriamente conter as seguintes etapas: memorial descritivo, memorial técnico, apresentação da estimativa de custos e do cronograma, plantas e desenho técnico (NBR 8419/84).

Segundo Elk (2007), todo aterro antes de ser implementado deve obter as licenças exigidas pelos órgãos ambientais, municipais, estaduais ou federais. Através do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o licenciamento deve ocorrer através das seguintes resoluções:

Resolução CONAMA 01/1986: define responsabilidades e critérios para a Avaliação de Impacto Ambiental e determina as atividades que necessitam do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do Relatório de Impacto do Meio Ambiente (RIMA).

Resolução CONAMA 237/1997: dispõe sobre o Licenciamento Ambiental, a regulamentação dos seus aspectos como estabelecidos pela Política Nacional do Meio Ambiente.

Resolução CONAMA 308/2002: instruem as diretrizes do Licenciamento Ambiental de sistemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte, devendo ser requerida as seguintes licenças:

Licença Prévia (LP): requerida com a apresentação do projeto básico, verificando a adequação da localização e a viabilidade do empreendimento.

Licença de Instalação (LI): após a aprovação dos estudos (EIA/RIMA) e o projeto executivo elaborado, é solicitado pelo empreendedor a licença de instalação da obra. Com a permissão da LI, o empreendedor pode dar início a obra do aterro sanitário.

Licença de Operação (LO): depois de ser concluída a obra é solicitada a licença para operar o aterro sanitário, esta será concedida desde que a obra tenha sido estabelecida de acordo com o projeto licenciado na LI.

4.7.1 Projeto

Conforme Elk (2007), o projeto de concepção de um aterro sanitário passa por diferentes etapas. A primeira aplica-se aos estudos preliminares, que se baseiam na caracterização do município e no desenvolvimento de um diagnóstico de um gerenciamento de resíduos sólidos no local. E a segunda etapa consiste na escolha da área para a implantação, levando em consideração aspectos técnicos, ambientais, operacionais e sociais, através de levantamentos geológicos, geotécnicos e climatológicos.

Para a operação do aterro deve ser procedida do estudo da área, elementos do projeto, monitoramento e operação e uso futuro da área, os quais são listados abaixo:

- **Estudo de área:**

O primeiro passo é uma pré-seleção de áreas disponíveis no município, e em seguida realiza um levantamento dos dados do meio físico e biótico. Para a escolha da área, são utilizados critérios técnicos, econômicas, sociais e políticas. Os técnicos são impostos pela Norma ABNT NBR 10.157 e através da legislação federal, estadual e municipal, abordando aspectos ambientais e as ocupações do solo.

- **Elementos de projeto:**

O projeto de um aterro sanitário deve conter elementos para captação, armazenamento e tratamento dos lixiviados e biogás, além de sistemas de impermeabilização superior e inferior.

- **Sistemas de drenagem das águas superficiais:**

Tem a finalidade de impedir a entrada de água de escoamento superficial no aterro.

- **Sistemas de impermeabilização de fundo e de laterais:**

Tem por objetivo proteger e evitar a percolação do chorume para o subsolo e aquíferos existentes.

- **Sistema de drenagem dos lixiviados:**

O lixiviado, também chamado de chorume, é gerado de várias origens: umidade natural dos resíduos, o qual retém líquidos pela absorção capilar; através de fontes externas, como água da chuva, superficiais e de mananciais subterrâneos, de água de formação da matéria orgânica e das bactérias, dissolvendo matéria orgânica e formando o líquido. É importante a implantação de um sistema eficaz de drenagem para evitar a acumulação deles dentro do aterro sanitário.

- **Sistema de drenagem dos gases:**

É executado por uma rede de drenagem eficaz, que tem por objetivo impedir que os gases escapem pelos meios porosos do subsolo atingindo fossas, esgotos e edificações.

- **Cobertura intermediária e final:**

O sistema de cobertura diário (intermediário e final) tem por finalidade eliminar a proliferação de vetores, reduzir a formação de lixiviados, diminuir a exalação de odores e impedir a saída descontrolada do biogás.

- **Monitoramento:**

Para garantir a preservação do meio ambiente, a qualidade de vida da população, a segurança da obra e principalmente a conservação dos sistemas de drenagem de lixiviados, é necessário um sistema eficaz de monitoramento do aterro durante sua operação e após o término das atividades.

- **Operação e uso futuro da área:**

Após serem concluídas as obras de implantação e ser obtida a licença de operação, acontece o início do recebimento das cargas de resíduo no aterro, obedecendo a um plano operacional, devendo ser simples e contendo todas as atividades rotineiras de um aterro, representado na Figura 09.

Figura 09: Funcionamento de um aterro sanitário.



Fonte: Meio Ambiente Online (2012).

De acordo com Obladen et al. (2009), em sua obra chamada Guia para Elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos, estabelece algumas medidas para o monitoramento adequado do aterro, entre elas estão:

- A Qualidade do ar;
- A poluição sonora;
- A qualidade das águas:
- Superficiais;
- Subterrâneas.
- O controle do solo;
- A recuperação vegetal;
- A preservação da fauna terrestre;
- A preservação dos ecossistemas aquáticos;
- O controle do efluente tratado.

4.8 Biogás

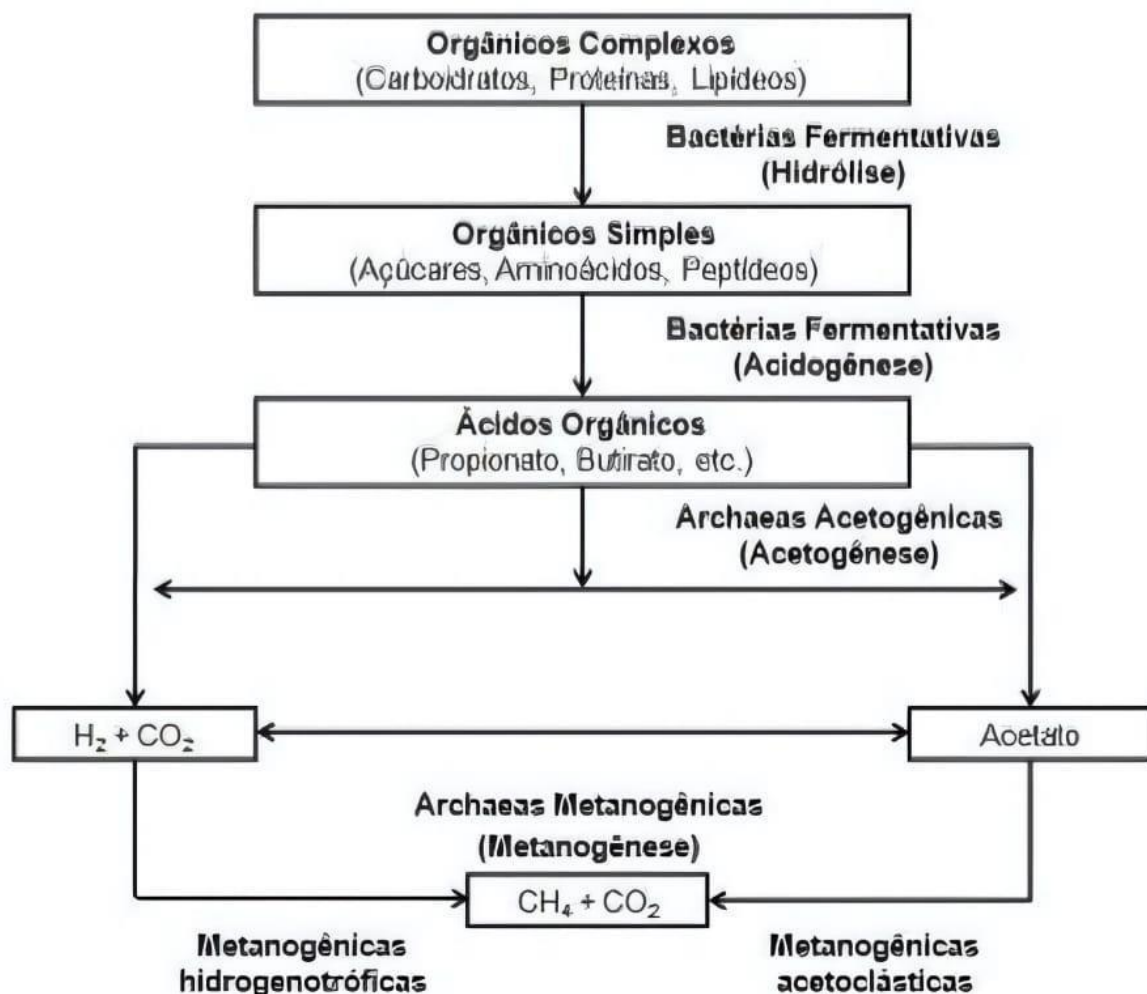
De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2008), o biogás é definido como sendo: Um tipo de mistura gasosa de dióxido de carbono e metano, semelhante ao gás natural, mas com menor poder calorífero,

produzido naturalmente em meio anaeróbico pela ação de bactérias em matérias orgânicas, que são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez. Pode ser produzido artificialmente com o uso de um equipamento chamado biodigestor anaeróbico e utilizando dejetos animais como fonte.

A digestão anaeróbia de compostos orgânicos é um processo que ocorre de forma natural, em que sistemas de tratamentos biológicos de resíduos passaram a ser apenas uma imitação do mesmo, porém com o incremento da tecnologia (Reichert, 2005).

Esse processo complexo pode ser dividido em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Chernicharo, 2007), conforme Figura 10.

Figura 10: Balanço da digestão anaeróbia da matéria orgânica.



Fonte: Chernicharo, 2007.

- **Hidrólise**

A hidrólise, primeira etapa da digestão anaeróbia, é realizada através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Consiste na quebra de matéria orgânica complexa (carboidratos, proteínas e lipídeos) em materiais solúveis mais simples (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos de cadeia longa), que possam ser assimilados pelos microrganismos (Faria, 2012; Salomon, 2007).

Existe a possibilidade de esta etapa ser mais lenta que as demais, limitando o processo global da digestão anaeróbia, sendo que os principais fatores associados são: tempo de retenção, temperatura, pH, tamanho e distribuição das partículas (Faria, 2012). Contudo, segundo Monnet (2003), essa etapa de degradação anaeróbia pode ser acelerada por meio da adição de compostos químicos, proporcionando um maior rendimento na produção de metano.

- **Acidogênese**

Na acidogênese, os compostos provenientes da etapa anterior são absorvidos e metabolizados pelas bactérias fermentativas acidogênicas, as quais excretam substâncias simples, como ácidos graxos voláteis de cadeia curta, alcoóis, ácido lático, compostos minerais (CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S , entre outros), além de novas células bacterianas (Abreu, 2007; Bohrz, 2010).

A maioria das bactérias desta etapa é considerada anaeróbia estrita, porém, segundo Bohrz (2010), aproximadamente 1% delas consiste em bactérias facultativas, as quais podem metabolizar a matéria orgânica por via oxidativa, usando o oxigênio molecular, eventualmente presente, como aceptor de elétrons, removendo resíduos de oxigênio dissolvido no sistema. Fato importante, pois permite eliminar qualquer efeito tóxico aos microrganismos estritamente anaeróbios que dão sequência a biodigestão.

- **Acetogênese**

As *archaeas* acetogênicas são as responsáveis pela transformação dos produtos gerados na etapa acidogênica em acetato, hidrogênio e dióxido

de carbono (substratos intermediários que serão metabolizados pelas archaeas metanogênicas). (Salomon, 2007).

- **Metanogênese**

A metanogênese, etapa final do processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos, é a responsável direta pela produção de metano e dióxido de carbono. Segundo Pinheiro (2006), as archaeas metanogênicas aproveitam um limitado número de substratos (ácido acético, metanol, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metilaminas e monóxido de carbono) e são divididas em dois grupos:

- Metanogênicas acetoclásticas: o acetato é utilizado como fonte de energia e carbono. Através da redução do ácido acético produzem gás carbônico e metano, sendo responsáveis por 60 a 70% de toda produção de metano (Mendonça, 2009).
- Metanogênicas hidrogenotróficas: utilizam o gás carbônico como fonte de carbono e são aceptoras de átomos de hidrogênio, sendo que este atua como fonte de energia (Louzada, 2006).

A digestão anaeróbia pode ser afetada por diferentes fatores, os quais estão relacionados com o substrato, as características do biodigestor, bem como as condições de operação. Se um determinado fator provoca desequilíbrio no processo, este se deve principalmente a uma maior sensibilidade das archaeas metanogênicas, que deixam de produzir o metano, ocasionando o aumento na concentração dos ácidos orgânicos voláteis e de outros produtos intermediários, inibindo ainda mais a produção do biogás (Oliveira, 2009; Meystre, 2007). Dentre tais problemas, podemos citar:

- **Alterações no pH**

Afetam sensivelmente os microrganismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia, podendo revelar-se de formas variadas, modificando suas estruturas e, conseqüentemente, fazendo-os perder suas características originais, aumentando ou diminuindo sua toxicidade (Meystre, 2007; Salomon, 2007).

Portanto, é de fundamental importância buscar manter uma faixa adequada, a qual possibilite o desenvolvimento máximo da maior parte dos microrganismos envolvidos, uma vez que o pH está diretamente relacionado às concentrações de ácidos orgânicos voláteis no meio, resultando do equilíbrio entre populações de microrganismos e a alcalinidade total do sistema.

- **Nutrientes**

A presença de concentrações adequadas de macro e micronutrientes é fundamental para que os processos de tratamento de efluentes sejam operados com êxito (Bohrz, 2010).

A quantidade de nitrogênio e fósforo, nutrientes essenciais em todos os processos biológicos, em relação à matéria orgânica presente, depende da eficiência dos microrganismos em obterem energia para síntese a partir das reações bioquímicas de oxidação do substrato orgânico (Louzada, 2006).

- **Tempo de Retenção**

É o tempo necessário para que um substrato qualquer seja totalmente digerido no biodigestor, ou seja, é o tempo entre a entrada do efluente e a saída do afluente do digestor (Comastri Filho, 1981).

Seu valor depende da biomassa utilizada, do tipo de digestor, além de outros fatores, mas em geral pode variar de dias, em certos biodigestores rurais, a apenas algumas horas, em biodigestores industriais (Salomon, 2007).

- **Agitação do Sistema**

Sejam os sistemas de agitação feitos através de agitação mecânica, retorno de gás produzido, recirculação do lodo ou até pela liberação de gás na forma de pequenas bolhas, permitem um maior contato entre os microrganismos e a matéria orgânica, evitando a formação das chamadas “zonas mortas”, as quais são resultado da sedimentação do lodo e podem causar perda de parte da capacidade útil do reator. (Bohrz, 2010).

A aplicação de agitação no sistema de tratamento de resíduos garante melhor contato entre a biomassa ativa e a alimentação; uniformidade física,

química e biológica em todo o reator; bem como a dispersão rápida dos produtos metabólicos da digestão e de qualquer substância tóxica que entre no sistema, minimizando assim os efeitos inibidores da atividade microbiana; além de prevenir a formação de espuma (bolhas esbranquiçadas) e o desenvolvimento de gradientes de temperatura no interior do reator. (Monnet, 2003; Vitoratto, 2004).

- **Materiais Tóxicos**

Segundo Chernicharo (2007), a adequada degradação dos compostos orgânicos por qualquer processo biológico depende da manutenção de um ambiente favorável para os microrganismos.

Qualquer composto presente no substrato em concentrações suficientemente elevadas pode ser tóxico, entretanto, a toxidade de materiais pode ser evitada no processo, enquanto as concentrações se mantiverem toleráveis ao crescimento microbiano por formação de complexos insolúveis ou precipitação, adaptação dos microrganismos e utilização de compostos antagonicos. (Chernicharo, 2007; Chen et al., 2008).

- **Temperatura**

Dentre os fatores físicos que afetam o crescimento microbiano, a temperatura é um dos mais importantes na seleção das espécies, isso em virtude de os microrganismos não possuem meios de controlar sua temperatura interna, a qual é então determinada pela temperatura ambiente externa (Chernicharo, 1997).

A digestão anaeróbica ocorre em três principais faixas de temperatura, conhecidas como:

- Psicrófila (10–25 °C): Baixa taxa de produção de biogás, processos lentos.
- Mesófila (30–40 °C): Mais comum em plantas de biogás, com maior estabilidade e eficiência.
- Termófila (50–60 °C): Gera mais biogás em menos tempo, mas exige maior controle térmico e energético.

CHERNICHARO (1997), destaca como a temperatura afeta na produção do biogás, e como afeta a taxa de metanogênese, que aumenta com a temperatura até certo limite. A proporção de CH_4 , em temperaturas ideais, o teor de metano chega a 60–70%. A solubilidade de gases enquanto menor a temperaturas elevadas, facilita a liberação de CH_4 . A umidade do biogás, pois o gás gerado a temperaturas mais altas contém mais vapor de água.

Estimada como uma possível atividade no Brasil, atrai benefícios na redução da emissão de gases do efeito estufa. O uso energético do biogás gerado por aterros sanitários auxilia na redução de mudanças climáticas globais. Por utilizar uma fonte de energia que é desperdiçada na atmosfera, sendo essa a principal vantagem da utilização do biogás, considerada uma energia alternativa, outro ganho que o biogás vem a proporcionar é que a atividade é classificada como um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, sendo obtidos Certificados de Emissões Reduzidas e estes vendidos como Créditos de Carbono. Embora tenha insuficientes dados sobre a disposição final dos resíduos sólidos no país, ele apresenta potencial para aplicação de projetos do uso de biogás para geração de energia (Alves et al, 2008).

Considerado mais leve que o ar atmosférico, oposto a outros gases como o butano e o propano, o biogás apresenta baixos riscos de explosão na medida em que sua acumulação ao nível do solo torna-se mais complexo. Devido a sua baixa densidade, é necessário que se ocupe um volume significativo e que a sua liquefação seja possível a temperaturas abaixo de 0°C , certificando algumas desvantagens nos aspectos de transporte e utilização (Pierobon, 2007). A Figura 11, mostra a composição do biogás.

Figura 11: Composição do Biogás.

GASES	QUANTIDADE (%)
Metano	50 a 75
Dióxido de carbono	25 a 40
Nitrogênio	0,5 a 2,5
Oxigênio	0,1 a 1
Sulfeto de hidrogênio	0,1 a 0,5
Amoníaco	0,1 a 0,5
Monóxido de carbono	0 a 0,1
Hidrogênio	1 a 3

Fonte: Castanon (2005).

Pecora et al. (2008), relata que para a geração de gás de um aterro sanitário depende de muitos elementos, como, a umidade, composição do resíduo, entre outros. A taxa de geração e a formação dos principais componentes do biogás é variável durante um período. A taxa de decomposição em condições normais atinge um pico entre o primeiro e o segundo ano, diminuindo constantemente com o passar dos anos, tendo em vista que a geração do biogás se prolongue durante 20 anos, segundo estudos. Outro benefício que a queima do biogás proporciona é a redução de gases do efeito estufa, tendo em vista que o gás metano transforma-se em gás carbônico, possibilitando um aquecimento de cerca de 20 vezes menor.

Devido à ausência de ar nos aterros sanitários, temperatura adequada, disponibilidade de água e matéria orgânica estimula o favorecimento de um ambiente adequado para o desenvolvimento de bactérias anaeróbias, responsáveis pela formação do biogás (Oliveira; Gomes, 2008).

A geração de energia a partir do biogás de aterros sanitários exige investimento e planejamento em instalações essenciais de modo que o biogás deverá ser transportado através de tubos de coletas para a usina, utilizando exaustores e compressores para auxiliar. No gerador ocorre a

combustão do biogás para geração de eletricidade sendo destinada para a rede elétrica (Oliveira; Gomes, 2008).

No procedimento para gerar energia o biogás é submetido a combustão. Da combustão do metano, que é um dos principais gases que compõe o biogás, resultasse o gás carbônico, entre outros produtos. Após a queima do biogás, já é possível obter grandes vantagens ao meio ambiente, pois o gás carbônico é considerado menos poluente e tem menor intensificação do efeito estufa a comparado com o metano (Oliveira; Gomes 2008).

Segundo Ensinas et al. (2004), cada instalação de aproveitamento do biogás em aterros tem sua característica, dependendo da localização, do investimento financeiro, das necessidades energéticas do local e da legislação vigente, considerando avaliação prévia das alternativas de aproveitamento antes de se definir o projeto. Normalmente os aterros possuem sistema de coleta de biogás gerado pela decomposição do lixo. Há dois tipos de sistema de coleta: passivo e ativo. O sistema passivo tem a função de drenar os gases para a atmosfera evitando a emissão descontrolada na superfície e impedindo a migração dos gases para áreas vizinhas. Já o sistema ativo possui exaustores e compressores, e é utilizado em projetos de aproveitamento energético do biogás. O biogás pode ser substituído pelos gases de origem animal, como o GLP (popularmente conhecido como gás de cozinha) e o gás natural, e sendo utilizado na geração de energia elétrica, sendo esta necessária a utilização de geradores elétricos específicos (Santos, 2008).

De acordo com o Manual para Aproveitamento de Biogás (2009), por conter um alto teor de metano (CH_4), o biogás exerce diferentes aplicações energéticas. Sua principal aplicação é como combustível em motor de combustão interna a gás que movimenta um gerador de energia elétrica, porém, pode ser direcionado na produção de calor de processo, secagem de lodo em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), aquecimento de granjas, secagem de grãos em propriedades rurais, iluminação a gás, queima em caldeiras, tratamento de chorume, entre outros.

4.8.1 Sistema para Extração e Tratamento do Biogás no Aterro

O sistema de extração é constituído por drenos horizontais e verticais, sopradores, filtros para remoção do material particulado e tanques separadores de condensado mostrados na figura 12. Este pré-tratamento tem a função de proteger os sopradores, aumentando sua vida útil. Na grande maioria dos aterros sanitários já existe os drenos, podendo ser adaptados e interligados no sistema de captação, sendo impermeabilizada a parte superior dos drenos, instalando um cabeçote e por fim interligando ao sistema de coleta de acordo com o Centro Nacional de em Biomassa (CENBIO, 2009).

As tubulações dos drenos são interligadas a pontos de regularização de fluxo e estes são interligados a uma linha principal que encaminha o biogás para o sistema de queima em flares ou para o reaproveitamento energético. Através da pressão negativa gerada pelo soprador é que acontece a força motriz para a extração do biogás (CENBIO, 2009).

Figura 12: Dreno típico de aterro, que pode ser adaptado no sistema de captação do biogás.



Fonte: Seger eco (2020).

Para a verificação da vazão do biogás na linha de entrada diretamente, usasse uma válvula borboleta, para a indireta um inversor de frequência acoplado ao motor do soprador, sendo acionado por um transmissor de pressão que é instalado na linha de sucção. Desta forma, o inversor de frequência regula o ponto de operação do motor do soprador em função da pressão, mantendo sempre a vazão constante (CENBIO, 2009).

Normalmente é instalado na mesma linha um termômetro, que tem por função indicar a temperatura do gás no interior da tubulação. Após o biogás ser extraído, ocorre as etapas de tratamento dele. A primeira é a passagem do biogás por um filtro com o intuito de remover o material particulado que é arrastado junto com o gás. No montante e jusante deste filtro são instalados medidores de pressão (vacuômetros) com a finalidade de monitorar o aumento da perda de carga e permitir identificar o momento da troca do elemento filtrante (CENBIO, 2009).

Depois de passar pelo filtro, o biogás é encaminhado para um tanque separador de líquidos, chamado de desumidificador. O sistema de

desumidificação mais usado é chamado de *demisters*, que tem a função de evacuar as gotículas de líquidos contidos no biogás, evitando a contribuição para os sopradores do sistema de extração de gases. Após ser livre de partículas sólidas e de gotículas líquidas, o biogás passa pelo soprador que tem a função de succionar o biogás no interior do aterro, e é guiado para a queima controlada no flare ou para sistemas de aproveitamento energético.

No sistema de captação pode ser utilizado tubulações individuais de captação para cada poço ou grupo de poços de drenagem de gás ligados a pontos de regularização de fluxo (PRs) ou manifolds que são distribuídos pelo aterro. Os pontos de regularização são ligados aos coletores principais. Através de uma válvula instalada na saída de cada manifold controla-se o fluxo de cada conjunto, constituído por no máximo 10 poços. Os pontos de amostragem devem ser instalados em cada tubulação ligando os poços aos PRs, determinando assim as velocidades, temperaturas e umidade do gás com a utilização de um anemômetro portátil. Para mencionar a quantidade da composição do gás gerado em termos de concentração de metano (CH_4), oxigênio (O_2) e ácido sulfídrico (H_2S), é utilizado um fotoionizador, sendo que para a tomada de amostras de gás é necessário usar válvulas de amostragem em cada tubulação sendo que estas são ligadas aos pontos de regularização de fluxo. (CENBIO, 2009).

Cada m^3 de gás contém aproximadamente 60 a 100 ml de condensado, devido que o gás extraído do aterro é 100% saturado. A temperatura do gás estará entre 40°C e 50°C no ponto de saída dos drenos. Para o resfriamento ao longo da tubulação é gerado um condensado em grande quantidade. O líquido vai ser direcionado para os pontos mais baixos do sistema devido à tubulação que será instalada com caimento de no mínimo 3% e para impedir o entupimento dos tubos, é necessário implantar drenos com sifões, permitindo que o condensado reinfiltre no depósito de lixo. (CENBIO, 2009).

4.8.2 Sistema de queima em flares

Qualquer que seja a utilização energética escolhida para o biogás, é recomendado que seja instalado um flare eclausurado, em especial para projetos destinados a obtenção de créditos de carbono, devido que caso haja falha no sistema de geração de energia, é evitado a emissão de metano para

a atmosfera e consequentemente a perda de créditos de carbono. (Combustec Queimadores, 2013).

Os flares enclausurados, são construídos em aço carbônico e isolados com fibra cerâmica, possuem queimadores internos que são fixados a um coletor inferior, interligados com o duto do biogás. Este duto apresenta uma bifurcação que envia o gás para os sistemas de geração de energia. Sendo



representadas na Figura 13.

Figura 13: Flare eclausurado.

Fonte: Combustec Queimadores (2013).

4.9 Alternativas para uso do biogás

Com o intuito de viabilizar o aproveitamento de biogás em aterros sanitários, existem várias alternativas, as quais podemos citar abaixo:

Geração de energia elétrica

- **Motores Ciclo Otto:** Utiliza-se o biogás como combustível para a geração de energia. É considerado o equipamento mais utilizado para a queima de biogás por possuir um maior rendimento elétrico e um menor custo comparado as outras tecnologias.
- **Microturbina a gás:** Neste processo move-se a turbina através do gás gerando energia. Nas microturbinas o ar é aspirado e forçado para seu interior em alta velocidade e pressão, sendo misturado ao combustível para ser queimado na câmara de combustão. Através dos gases quentes resultantes da combustão são expandidos na turbina e o calor dos gases da exaustão é aproveitado para o aquecimento do ar de combustão.

Geração de energia térmica

- **Ciclo a vapor Rankine:** O gás é queimado como forma de combustível de caldeiras para geração de vapor, movimentando turbinas e gerando energia. O calor da combustão de biogás é utilizado em uma caldeira para gerar vapor, que pode ser usado para processos industriais, aquecimento direto ou geração de energia elétrica por meio do acionamento da turbina a vapor acoplada a um gerador.
- **Evaporador de chorume:** O chorume oriundo da decomposição anaeróbia dos resíduos, é considerado poluidor de alto nível, É necessário um evaporador, a fim de tratar o chorume, permitindo uma redução de até 70% do volume lixiviado, no equipamento o chorume é aquecido a altas temperaturas. Utilizando o biogás como

combustível e evaporando a parte líquida e o vapor quente passando pelo processo de purificação ou sendo utilizado na geração de energia térmica.

- **Produção de Combustível Veicular:** é necessário que o biogás passe por um processo de remoção de alguns de seus componentes, sendo alguns: umidade, ácido sulfídrico (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) e partículas.
- **Iluminação a gás:** Neste modelo de sistema a iluminação ocorre com a queima direta de biogás. É necessário que os postes de iluminação não sejam instalados próximos aos dutos de biogás em um aterro sanitário, pelo fato que o biogás é considerado altamente explosivo, havendo riscos.

4.10 O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

O MDL é considerado um instrumento jurídico-econômico que reduz a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera através de fontes de emissão ou sumidouros. Originário da mobilização da comunidade internacional, o MDL por meio da Organização das Nações Unidas (ONU), busca soluções para a questão socioambiental causada pelo fenômeno mundial de mudanças climáticas. (NETO, 2009).

Segundo o Artigo 12 do Protocolo de Kyoto ficam estabelecidos os procedimentos e condições a serem seguidos, qualificando projetos a fim de gerar reduções certificadas de emissão. O Protocolo de Kyoto no artigo 12.2 fica definido: O objetivo do mecanismo de desenvolvimento limpo deve ser assistir às Partes não incluídas no Anexo I para que atinjam o desenvolvimento sustentável e contribuam para o objetivo final da Convenção, e assistir às Partes incluídas no Anexo I para que cumpram seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões, assumidos no art.3º.

E o artigo 12.3 relata que: (a) As Partes não incluídas no Anexo I beneficiar serão de atividades de projetos que resultem em reduções certificadas de emissões; e (b) As Partes incluídas no Anexo I podem utilizar as reduções certificadas de emissões, resultantes de tais atividades de

projetos, para contribuir com o cumprimento de parte de seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões, assumidos no Artigo 3, como determinado pela Conferência das Partes na qualidade de reunião das partes deste Protocolo.

O principal objetivo do MDL é incentivar os países em desenvolvimento para que implantem projetos e tecnologias com o intuito da recuperação e preservação ambiental, auxiliando os países desenvolvidos a cumprir metas de redução de emissão estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto, atingindo o desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento, utilizando de recursos dos países desenvolvidos. Assim os países poluidores utilizam uma menor quantidade de recursos, se comparado ao custo de implantação destes projetos no próprio local de emissão. (Figueiredo, 2011).

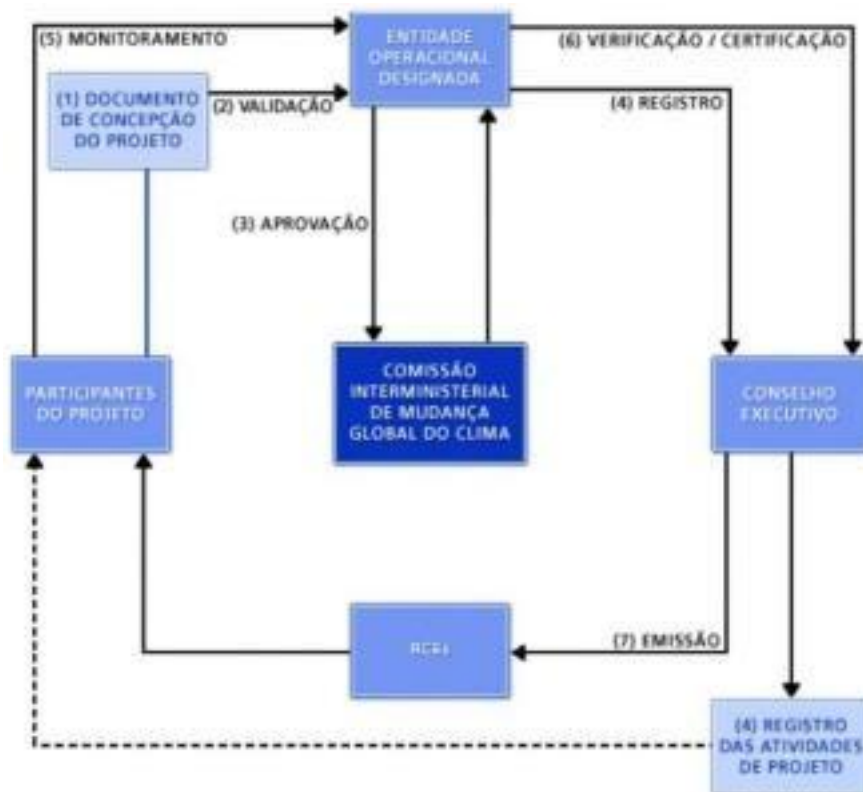
De acordo com Neto (2009), para que um projeto tenha a obtenção de reduções certificadas de emissões (RCE), suas atividades devem proceder a seis fases. A primeira fase corresponde a concepção do projeto, a segunda é a fase de aprovação e validação do projeto, a terceira é o registro do projeto, a quarta fase consiste no monitoramento da implementação do projeto, a quinta compreende a verificação e a certificação dos créditos de carbono, encerrando com a última fase que é a emissão das RCE. que são necessários:

- **O Documento de Concepção do Projeto (DCP):** É avaliado pelo órgão delegado certificador para a validação do projeto. Este documento deve conter a descrição das atividades do projeto, a qualificação das pessoas participantes, a metodologia de cálculo da quantificação do cenário de referência e a metodologia da quantificação das reduções de emissões de GEE.
- **Validação:** É a fase de avaliação do projeto por uma Entidade Operacional Designada (EOD), para verificar se houve ou não a satisfação dos requisitos do MDL, e se houve a aprovação pela AND (Autoridade Nacional Designada) e a sua contribuição para o desenvolvimento sustentável.

- **Registro do Projeto:** É o ato formal de aceitação do proposto como um projeto válido de MDL.
- **Monitoramento da Implementação do Projeto:** É necessário monitorar todos os dados do DCP em execução pelos participantes do projeto, sendo emitidos relatórios periódicos a EOD sobre os dados monitorados.
- **Verificação e Certificação dos Créditos de Carbono:** A EOD faz a verificação in loco, comprovando o cumprimento das metas de redução de emissões de GEE que o projeto propôs em realizar. Em seguida é certificado por escrito o cumprimento das metas de redução de GEE a determinado período constante no DCP.

Na Figura 14, podemos observar o ciclo de como funciona o MDL.

Figura 14: Ciclo de um Projeto de MDL.



Fonte: LIMIRO (2011).

4.11 Projetos de MDL em Aterros Sanitários

Limiro (2008), destaca que vinte e sete são o total de projetos de aterros sanitários em processo de validação/aprovação, o que representa apenas 10% de todas as atividades de projeto de MDL desenvolvidas. Apesar desse percentual ser insignificante, esses 27 projetos colaborarão com a redução anual de emissão de gases de efeito estufa em 24%. Os aterros sanitários podem ganhar duplamente com as atividades de projeto de MDL, como:

- Mediante a incineração do metano contido no biogás, se faz necessário inutilizar os drenos tradicionais, precisando ser trabalhada sua capacidade de carga máxima.
- Através da energia gerada com a queima do biogás, se faz necessário instalar uma subestação elétrica no local, com o intuito de que a companhia de eletricidade possa instalar seus equipamentos para a conexão com o sistema de distribuição.

De acordo com Abreu (2009), o Brasil é um dos países com maior experiência com projetos de transformação de biogás em energia. A maioria desses projetos estão sendo colocados em funcionamento nos últimos anos ou estão sendo implantados, incluindo projetos desenvolvidos sob o MDL. Os parâmetros para novas metodologias de projetos de gás de aterro, levaram em conta a definição de linha de base e monitoramento de três aterros sanitários brasileiros, nos termos do MDL, resultando nos desenvolvimentos desses projetos não apenas no Brasil como em outras regiões.

A geração de energia através da captação do biogás originário dos aterros sanitários apresenta-se de maneira eficiente e vantajosa, pois reúne em uma mesma solução uma forma de despoluir com o cumprimento das determinações da ONU e com o MDL estabelecido no Protocolo de Kyoto, gerando ganhos financeiros com a venda de créditos de carbono, além dos benefícios ambientais com a redução do efeito estufa. (MONTILHA, 2005).

Conforme o Manual para Aproveitamento de Biogás em Aterros Sanitários (2009), para escolher a melhor alternativa a ser implantada em um aterro é necessário analisar a viabilidade econômica, entretanto nem sempre é a melhor em termos ambientais.

Limiro (2008), destaca que em relação ao desenvolvimento sustentável, a implantação do projeto de MDL nos aterros sanitários contribui em três aspectos, sejam eles, ambiental, social e econômico. No ambiental ressalta que a coleta e a combustão do biogás auxiliarão na redução das emissões de gases de efeito estufa, no social diminuiram os volumes de resíduos sólidos e consequentemente precisará de muitos catadores gerando vagas de emprego, e no âmbito econômico a atividade de projeto de MDL, terá maiores arrecadações devido a atração de investimento estrangeiro, tendo destaque as vendas de RCEs.

5. CONCLUSÕES

Conforme mostrado neste trabalho, por meio da gestão eficiente e correta dos resíduos sólidos urbanos é vantajoso o aproveitamento do potencial energético do biogás.

O trabalho conclui que os aterros sanitários são alternativas benéficas para a disposição final do lixo, tendo em vista que são captados os gases, e que posteriormente são transformados de metano para gás carbônico, reduzindo dessa forma a emissão de gases do efeito estufa e levando em consideração a geração de energia considerada uma fonte alternativa, renovável e de fácil acesso.

Por meio deste estudo mostrou-se de maneira apropriada a implantação de um sistema de geração de energia a partir do biogás, sendo Totalmente eficaz a alternativa apropriada para os resíduos sólidos urbanos, bem como a eficiência do biogás na redução de gases poluentes da atmosfera e consequentemente a diminuição do impacto ambiental causada.

Através deste estudo fica a motivação para projetos ambientais que visem as reduções climáticas globais e consequentemente gerem projetos de mecanismo limpo, sendo posteriormente vendidos como créditos de carbono, gerando ganhos econômicos, sociais e principalmente ambientais.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8.849:** Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1985.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8.419:** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004:** Resíduos Sólidos. Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022.** São Paulo: Abrelpe, 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- ABREU, F. de. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica da Geração de Energia Através do Biogás de Lixo em Aterros Sanitários.** 2009. Dissertação (Mestrado em Fenômenos de Transporte) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- ALVES, L.; COLARES, R.; UTURBEY, W. **As atratividades ambientais e econômicas do uso do biogás produzido pelo aterro sanitário de Belo Horizonte para geração de energia elétrica.** 2008. Belo Horizonte: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos: 2008.
- BRITTO, M. C. S. **Taxa de Emissão de Biogás e Parâmetros de Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Metropolitano Centro.** 2006. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.
- BOHRZ, G. I. **Geração de metano em lagoa anaeróbia: um estudo de caso em abatedouro de bovinos.** 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2010.
- CRUZ, S. R. S. **Mercado de carbono em aterros sanitários como instrumento para a inovação em serviços públicos.** 2012. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2012.
- CETESB - **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.** São Paulo: CETESB, 2011.
- CENBIO – **Centro Nacional de Referência em Biomassa.** Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.usp.br/aunantigo/unid?u=cenbio>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. R. **Potencial energético do biogás no Brasil.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 9, n. 1, p. 30–40, 2020.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v. 5, 1997. 245 p.

- ELK, A. G. H. P. van. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo Aplicado a Resíduos Sólidos. Redução de Emissões na Disposição Final.** Rio de Janeiro: 2007.
- FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – estudo de caso.** 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.
- FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica – Estudo de Caso.** 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- GOMES, L. A.; LIMA, R. S. **Sistemas de captação de biogás em aterros sanitários: avaliação e perspectivas energéticas.** Revista Engenharia & Meio Ambiente, v. 17, n. 1, p. 65–74, 2020.
- LIMIRO, D. **Créditos de Carbono - Protocolo de Kyoto e Projetos de MDL.** Goiânia: Juruá Editora, 2008.
- LOUZADA, A. G. **Avaliação da atividade metanogênica específica de lodos com condicionamento hidrolítico provenientes do sistema UASB + BFs.** 2006. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2006.
- MME - Ministério de Minas e Energia. **Levantamento do potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento de dejetos animais no Brasil.** Brasília: 2008.
- MONTEIRO, J. H. et. al. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro: IBAM, 2001.
- NETO, A. L. **Contrato de créditos de carbono - Análise crítica das mudanças climáticas.** Maringá: Juruá Editora, 2009.
- OBLADEN, N. L.; OBLADEN, N. T. R.; BARROS, K. R. de. **Guia para elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos.** Volume III. 2009.
- OLIVEIRA, S. de; PASQUAL, A. **Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em Médias e Pequenas Comunidades.** São Paulo: UNESP, 1998.
- OLIVEIRA, P. H.; SANTOS, M. A. **Resíduos sólidos e seus impactos ambientais.** São Paulo: Atlas, 2017.
- OLIVEIRA, M. A.; LOPES, R. M. **Gestão de resíduos sólidos: fundamentos e aplicações.** São Paulo: Atlas, 2018.
- PODER360. **Brasil tem 41,5% do lixo descartado de forma inadequada em 2023. 21 mar. 2024.** Disponível em: <https://www.poder360.com.br/podersistentavel/brasil-tem-415-do-lixo-descartado-de-forma-inadequada-em2023/>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- MCT- Ministério da Ciência e Tecnologia. **Protocolo de Kyoto.** Brasília: 1997.
- REIS, L. B. dos; FADIGAS, E. A. F. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável.** 2. ed. São Paulo: Manole 2012.

REICHERT, G. A. **Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão.** In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, 2005. 16 p.

MONNET, F. **An introduction to anaerobic digestion of organic wastes. Remade Scotland:** 2003. 48 p.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.** 2007. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2007.

SANTOS, A. F. da S. **Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano.** 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2009. SILVA, N. L. da S. **Aterro sanitário para resíduos sólidos urbanos – RSU - . Matriz para seleção da área de implantação.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.

SILVA, W. R. da. **BIOGÁS: Potencialidade dos aterros sanitários do estado do Paraná.** 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2010.

SILVA, T. H.; COSTA, M. A. **Créditos de carbono e desenvolvimento sustentável: análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil.** Revista de Meio Ambiente e Sustentabilidade, v. 10, n. 1, p. 22–34, 2021.

SILVA, A. R.; PEREIRA, L. M. **Biogás e desenvolvimento sustentável: perspectivas para o MDL no Brasil.** Revista de Políticas Ambientais, v. 11, n. 2, p. 55–63, 2021