

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

CAIO TAKASE

EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS EM ATERROS SANITÁRIOS

São Paulo
2022

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS EM ATERROS SANITÁRIOS**

Versão Original

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientadora: Carolina Afonso Pinto

São Paulo
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação

Takase, Caio
Emissões de gases de efeito estufa por destinação de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários / C.
Takase -- São Paulo, 2022.
82 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas e Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Biogás 2.Aterro Sanitário 3.Metano I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

Dedico à minha família, principalmente meu pai Douglas Riozo Takase, por tornar uma realidade minha formação, à Ciclus Ambiental S.A., empresa em que trabalho, por acreditar no meu potencial e a minha esposa Bruna Carolina Rodrigues Takase pela compreensão dos momentos dedicados ao estudo.

Caio Takase.

RESUMO

Takase, Caio. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM ATERRROS SANITÁRIOS. 2022. 91 p. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Aterros de resíduos têm sido alvos de grandes preocupações quanto ao meio ambiente, principalmente os mais antigos, pois a legislação, a tecnologia e os controles operacionais empregados na época não se comparam aos atuais. A decomposição dos resíduos depositados gera subprodutos gasosos e líquidos que demoram anos para se decompor e que devem ser tratados por apresentar riscos de impactos ambientais. Quanto ao efluente gasoso, uma mistura de gases chamado de biogás de aterro, quando emitido para a atmosfera, contribui para o aquecimento global, pois o principal constituinte do biogás, o gás metano, tem potencial de aquecimento global 25 vezes maior do que o dióxido de carbono. Mesmo com a aplicação de tecnologias de redução de emissão disponíveis no mercado e o potencial de geração de renda do processamento do biogás, os aterros sanitários ainda podem apresentar elevadas taxas de emissão de metano. O presente trabalho apresenta a eficiência de redução de emissão de gás metano para atmosfera de alguns aterros sanitários do Brasil e traz uma reflexão sobre a emissão de metano para aterros que não possuem sistema de coleta e tratamento de biogás.

Palavras-chave: Biogás, Aterro Sanitário, Metano, Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, Gás de Efeito Estufa.

ABSTRACT

Takase, Caio. GREENHOUSE GAS EMISSION FROM LANDFILLS URBAN SOLID WASTE DISPOSAL. 2022. 91 p. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Landfills have been of great concern regarding the environment, especially the older ones, which the technology and best practices were not the same as nowadays. The waste decomposition generates gaseous and liquids byproducts that take years to decompose that must be treated due to the risk for the Environment. Regarding the gaseous byproduct, called landfill gas, when released to the atmosphere, contributes to the global warming, because its main compound is methane, a greenhouse gas that is 25 times more potent to the greenhouse effect than the carbon dioxide. Even though there is available technology for reducing emission and the possibility of making profit from landfill gas processing, landfills can still have considerable greenhouse gas emissions. This paper presents the efficiency of methane emission reduction from some landfills in Brazil and brings thoughts on the emission from landfills that does not have a degassing and treatment plants.

Key-words: Landfill Gas, Landfill, Methane, Clean Development Mechanism, Greenhouse Gas.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos Resíduos Sólidos.....	4
Tabela 2 - Análise Gravimétrica do Resíduo Sólido Urbano da Cidade de São Paulo de 2005 a 2007.....	5
Tabela 3 – Série Histórica da Análise Gravimétrica do Resíduo Sólido Urbano da Cidade do Rio de Janeiro de 2010 a 2016.....	6
Tabela 4 – Característica dos principais constituintes do biogás.....	14
Tabela 5 – Os seis Gases de Efeito Estufa cobertos pelo CQNUMC e Protocolo de Quioto.....	18
Tabela 6 – Potencial de aquecimento global (GWP - <i>Global Warming Potentials</i>).....	19
Tabela 7 – 5 maiores Projetos de MDL que utilizam a metodologia ACM 001 registrados no Brasil em termos de Redução de Emissão.....	38
Tabela 8 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 0194.....	40
Tabela 9 – Previsões de Emissão de tCO ₂ eq e Reduções de Emissões do projeto 0194.....	42
Tabela 10 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 4211.....	44
Tabela 11 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 0373.....	47
Tabela 12 – Previsões de Emissão de tCO ₂ eq e Reduções de Emissões do projeto 0194.....	48
Tabela 13 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 0171.....	50
Tabela 14 – Previsões de Emissão de tCO ₂ eq e Reduções de Emissões do projeto 0171.....	51
Tabela 15 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 5947.....	54
Tabela 16 – Previsões de Emissão de tCO ₂ eq e Reduções de Emissões do projeto 5947.....	55
Tabela 17 – Compilação das eficiências dos projetos objetos de estudo.....	57
Tabela 18 – Eficiência do sistema de captação previsto para o cálculo da linha de base.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença entre Aterro Sanitário e Lixão.....	9
Figura 2 – Corte e vista superior de poço de biogás.....	12
Figura 3 – Biogás sendo queimado diretamente nos poços no Aterro Sanitário Bandeirantes.....	13
Figura 4 – Fases da biodegradação em aterros sanit. e geração do biogás de aterro sanitário.....	16
Figura 5 – Esquema simplificado do Efeito Estufa.....	17
Figura 6 – Etapas dos processos de captação de biogás.....	25
Figura 7 – Modelo conceitual de tratamento de biogás de aterro sanitário.....	26
Figura 8 – Foto de um <i>Flare</i> de chama aberta (esquerda) e de chama enclausurada (direita).....	28
Figura 9 – Foto motogeradores à biogás.....	30
Figura 10 – Usina de purificação de biogás.....	32
Figura 11 – Curvas de geração de gás metano por modelagem matemática.....	36
Figura 12 – Imagem via satélite do projeto 2548 e 9087.....	39
Figura 13 – Imagem via satélite do projeto 0194.....	43
Figura 14 – Imagem via satélite do projeto 4211.....	46
Figura 15 – Imagem via satélite do projeto 0171.....	53
Figura 16 – Imagem via satélite dos projetos 0373 e 5947.....	56

LISTA DE SIGLAS

- ABRELPE** – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AMLURB** – Autoridade Municipal de Limpeza Urbana da Cidade de São Paulo
- ANP** – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- BLFGE** – *Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project*
- CER** – *Certified Emission Reduction*
- CETESB** – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- CDM** – *Clean Development Mechanism*
- COP** – *Conference of the Parties / Conferência entre as Partes*
- COMLURB** – Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro
- CQNUMC** – Convênio-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
- CTVA** – Central de Tratamento e Valorização Ambiental
- DCP** – Documento de Concepção do Projeto
- DOE** – *Designated Operational Entity*
- EDUFER** – Editora da Universidade Federal do Espírito Santo
- EOD** - Entidade Operacional Designada
- GEE** – Gases de Efeito Estufa
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IPAAM** – Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas
- IPCC** – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- IPEA** – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
- IPT** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- LULUFC** – *Land Use, Land Use Change and Forestry*
- MCTI** – Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação
- MDL** – Mecanismo de Desenvolvimento Limplo
- MCT** – Ministério de Ciência e Tecnologia

PDD – *Project Design Document*

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PIMC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática

PRC – *Post Registration Changes*

PVC – Policloreto de Vinila

RCE – Redução Certificada de Emissão

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SigRH – Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo

SNIS – Secretaria Nacional de Saneamento e Sistema de Informação sobre Saneamento

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVO.....	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Resíduos Sólidos Urbanos.....	4
3.2	Aterro Sanitário	7
3.2.1	Conceito Aterro	7
3.2.2	Estruturas de um Aterro Sanitário	10
3.3	Biogás.....	13
3.3.1	Sobre o Biogás.....	13
3.3.2	A formação do biogás de aterro sanitário	15
3.4	Aquecimento Global	16
3.5	CQNUMC, Protocolo de Quioto e Crédito de Carbono.....	19
3.6	Tecnologias aplicadas para coleta e tratamento de biogás.....	24
3.6.1	Queima em <i>Flares</i>	27
3.6.2	Queima em motores de combustão interna.....	29
3.6.3	Biometano.....	30
4.	METODOLOGIA	33
4.1	Eficiência de redução de emissões em aterros sanitários	33
4.2	Projetos de MDL de biogás de aterro sanitário no Brasil	37
4.3	Seleção dos projetos para avaliação da eficiência.....	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	Projeto 0194 - <i>Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE)</i>	40
5.2	Projeto 4211 - <i>Manaus Landfill Gas Project</i>	43
4.6	Project 0373 - <i>São João Landfill Gas to Energy Project (SJ)</i>	46
5.3	Project 0171 - <i>Caieiras landfill gas emission reduction</i>	49
5.4	Project 5947 - <i>CTL landfill Gas Project</i>	53
5.5	Resultados obtidos.....	57
5.6	Fatores que podem influenciar na eficiência.....	57
5.7	Fatores que podem influenciar a eficiência negativamente	59
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
7.	ANEXOS.....	64
8.	REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO

A disposição de resíduos sólidos nem sempre foi vista como um problema que afeta o meio ambiente e a sociedade, mas nas últimas décadas, com o surgimento de vários casos envolvendo destinação de resíduos, a conscientização da população tem aumentado. Com o aumento da produção de produtos manufaturados, benefícios tecnológicos gerados nas duas revoluções industriais, aumento da população mundial e a globalização, o consumo excessivo de produtos (maior parte descartáveis) pela sociedade aumentou demasiadamente o volume dos resíduos gerados.

Atualmente, não se fala somente em destinação dos resíduos, mas sim em meios que reduzam o volume gerado e agreguem valores comerciais aos produtos retirados do descarte da sociedade, como a Compostagem e a Reciclagem. Contudo, esses métodos atingem volumes significativos de redução final de resíduos somente em países desenvolvidos ou com políticas ambientais que incentivam a preservação do meio ambiente.

Mesmo com o surgimento de novas tecnologias de destinação final de resíduos que surgem no mercado, promovendo a redução dos impactos ambientais e garantindo maior controle, existem dificuldades na seleção dos métodos. Segundo GABAÍ (2004), a incineração do resíduo, quando não operada adequadamente, gera subprodutos tóxicos e nocivos ao meio ambiente, como as Dioxinas e os Furanos. Outro ponto a ser analisado é o elevado custo para implantar uma unidade de incineração que comporte a demanda de uma metrópole, além dos custos de manutenções em geral e monitoramento do processo.

O método convencional mais viável para a destinação do Resíduo Sólido Urbano (RSU) no Brasil continua sendo os Aterros Sanitários. "No mundo inteiro, com algumas poucas exceções, os aterros sanitários representam a principal destinação final dos resíduos sólidos, apesar do imenso esforço em se reduzir, reutilizar e reciclar" (JUCÁ, 2002). Podem-se citar como alguns malefícios provenientes dos Aterros Sanitários a utilização de extensas áreas para operação e geração de efluentes líquidos e gasosos, que necessitam de tratamento, por serem prejudiciais ao meio ambiente. Apesar dos aspectos negativos dos aterros sanitários, este método continua sendo utilizado devido ao baixo custo (comparado a outros métodos de destinação final) e longevidade.

Os aterros sanitários atuam como reatores anaeróbios, tendo como produto da reação biológica de decomposição da matéria orgânica presente no resíduo sólido a formação de um efluente gasoso e um efluente líquido, chamados de biogás e chorume (também conhecido como percolado), respectivamente. O biogás proveniente de aterros sanitários possui como principais gases de sua composição, o gás metano (CH_4), na ordem de 30% a 65% e o dióxido de carbono (CO_2), na ordem de 30% a 45%, ambos classificados como Gases de Efeito Estufa (GEE). De acordo com o Relatório do PIMC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática (*IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change*) sobre as mudanças nos constituintes atmosféricos e no forçamento radiativo, o metano tem potencial de contribuir para o aquecimento global 25 vezes mais do que o dióxido de carbono (IPCC, 2018).

De acordo com o Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação, através do Sistema Nacional de Emissões (SIRENE), a emissão nacional referente a Tratamento de Resíduos em 2015 (último levantamento), correspondeu a aproximadamente 4% da emissão total (MCTI, 2021) do país. Além do aspecto negativo da emissão de GEE, o qual contribui diretamente no aquecimento global, se o biogás não for bem drenado de aterros, há riscos de explosão e incêndio, além de ser tóxico à saúde humana e poder gerar problemas estruturais no aterro sanitário.

O processo de redução de emissão de metano para a atmosfera consiste na transformação do gás metano em dióxido de carbono através do processo de combustão.

Atualmente a agência de proteção ao meio ambiente dos Estados Unidos (*USEPA – United States Environmental Protection Agency*), apresenta 3 tipos de projeto para uso energético do biogás de aterro sanitário: Geração de Energia Elétrica, uso direto como gás de médio poder calorífico (Btu) e Gás Natural Renovável (USEPA, 2021).

O presente trabalho apresenta uma avaliação sobre alguns aterros sanitários no Brasil, no que se refere à problemática de geração e emissão de biogás, bem como a eficiência em mitigar essa emissão.

2. OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo detalhar e comparar as técnicas de Tratamento e/ou Beneficiamento do Biogás de Aterro, bem como avaliar as respectivas eficiências de Redução de Emissão de Metano para a atmosfera.

.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A ABNT NBR 10.004/2004 denomina resíduos sólidos para: “resíduos no estado sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola de serviços e de varrição” (ABNT, 2004).

Segundo a ABNT NBR 10.004/2004, os resíduos sólidos são classificados como: resíduos de Classe I (perigosos), resíduos de Classe IIA (não perigosos e não inertes) e resíduos de Classe IIB (não perigosos e inertes) (Tabela 1).

Classe de Risco	Característica
Classe I - Perigosos	Apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, caracterizando-se por possuir uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
Classe IIA - Não Inertes	Podem ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilidade em água, porém, não se enquadram como resíduo Classe I ou IIB.
Classe IIB - Inertes	Não tem nenhum constituinte solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade de água.

Tabela 1 – Classificação dos Resíduos Sólidos.

Fonte: ABNT – NBR 10.004, 2004.

O Resíduo Sólido Urbano Domiciliar (RSU), ou seja, gerado pelo consumo de produtos manufaturados e sobras de alimentos da população em suas residências, geralmente acondicionado em sacolas plásticas e coletado pelas empresas de limpeza pública para destinação final é enquadrado como Classe IIA – Não Inertes, exceto quando há descarte de produtos

perigosos inapropriadamente. Os ensaios gravimétricos divulgados pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) e COMLURB (Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro) abaixo comprovam este enquadramento:

Materiais	2005	2006	2007
Matéria orgânica	62,9	55,5	57,0
Papel, papelão e jornal	8,2	14,7	13,4
Embalagem longa vida	1,3	1,1	1,2
Embalagem PET	0,6	0,4	0,5
Isopor	0,3	0,2	0,3
Plástico mole	9,8	6,4	10,0
Plástico duro	4,5	8,2	5,0
Metais Ferrosos	1,0	1,0	1,1
Pilhas e baterias	0,0	0,1	0,1
Vidros	1,3	1,1	1,4
Terra e pedra	1,2	3,7	2,1
Madeira	0,8	0,5	0,5
Trapos e panos	2,8	2,5	2,7
Diversos	1,2	1,2	2,2
Alumínio	0,4	0,4	0,4
Borracha	0,3	0,3	0,1
Espuma	0,0	0,0	0,0
Perdas no processo	3,4	2,7	2,0

Obs.: Todos os valores em porcentagem.

Tabela 2 - Análise Gravimétrica do Resíduo Sólido Urbano da Cidade de São Paulo de 2005 a 2007.

Fonte: CETESB, 2007.

Componentes (%)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Papel - Papelão	16,46	16,8	16,0	16,8	15,62	15,1	14,8
Plástico	19,11	19,3	19,1	19,0	21,01	17,8	20,2
Vidro	2,96	3,2	3,3	3,4	3,46	3,7	3,6
Matéria Orgânica Putrescível	55,02	52,7	53,3	52,8	52	53,6	53,2
Metal	1,4	1,7	1,6	1,6	1,65	1,7	1,7
Inerte	1,03	1,4	1,8	1,1	1,12	2,0	1,2
Folha	1,06	1,1	1,4	1,4	1	1,2	1,0
Madeira	0,36	0,4	0,3	0,5	0,42	0,5	0,5
Borracha	0,21	0,3	0,2	0,3	0,23	0,3	0,3
Pano - Trapo	1,57	2,1	1,8	1,9	2	2,4	2,1
Couro	0,14	0,2	0,2	0,3	0,43	0,3	0,3
Osso	0,06	0,0	0,0	0,0	0,02	0,1	0,1
Coco	0,4	0,6	0,8	0,5	0,65	0,7	0,6
Vela - Parafina	0,02	0,0	0,1	0,0	0,04	0,1	0,0
Eletroeletrônico	0,2	0,2	0,2	0,3	0,35	0,5	0,5
Total	100	100,0	100,0	100,0	100	100,0	100,0
Peso Esp. (Kg/m³)	111,15	109,09	133,0	134,9	142,51	143,3	162,8
Teor de Umidade	-	-	36,6	41,3	24,67	31,5	32,2

Tabela 3 – Série Histórica da Análise Gravimétrica do Resíduo Sólido Urbano da Cidade do Rio de Janeiro de 2010 a 2016.

Fonte: COMLURB, 2016.

É importante ressaltar que a composição e a quantidade dos Resíduos Sólidos Urbanos Domiciliares podem mudar em função de fatores socioeconômicos, demográficos, sazonais e culturais, sofrendo constante alteração ao longo do tempo.

Com relação à geração de resíduos sólidos urbanos no país, o *website* de acesso à informação do Senado Federal (Agência Senado), informa que, segundo dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020, a geração saiu de 66,7 milhões de toneladas em 2010 para 79,1 milhões em 2019, uma diferença de 12,4 milhões de toneladas. O mesmo estudo diz ainda que cada brasileiro produz, em média, 379,2 kg de lixo por ano, o que corresponde a mais de 1 kg por dia.

Com relação à maior cidade do país em termos de população, a AMLURB (2021) (Autoridade Municipal de Limpeza Urbana da Cidade de São Paulo), informa que a coleta

domiciliar comum se manteve estável nos últimos cinco anos, sendo registrada a coleta de aproximadamente 10.034 toneladas de Resíduos Sólidos Urbano Domiciliar por dia. Com base no último censo realizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) em 2010, a cidade de São Paulo possuía 11.253.503 habitantes, assim, considerando o volume médio de resíduos domiciliares coletado pela AMLURB diariamente nos últimos cinco anos, a população produz aproximadamente 1,12 kg/dia de resíduos.

A segunda maior cidade do país em termos de população, a cidade do Rio de Janeiro, apresenta um comportamento de geração de resíduos um pouco acima da cidade de São Paulo e o restante do país. “A COMLURB recolhe diariamente cerca de 8.800 toneladas de lixo domiciliar e de resíduos produzidos em toda a cidade, dos quais 40% são retirados das ruas. Sua produção de lixo é de 1,505 kg/hab./dia. Para atender à demanda na cidade do Rio de Janeiro, a Companhia dispõe de uma frota de 1.069 veículos e 298 equipamentos, sendo 364 da própria empresa e 705 terceirizados” (COMLURB, 2011).

Quanto à destinação do RSU, a ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), relata que em 2019 59,5% do RSU nacional teve disposição final adequada (Aterros Sanitários) e 40,5% inadequada (Aterros Controlados ou Lixões). (ABRELPE, 2021).

3.2 Aterro Sanitário

3.2.1 Conceito Aterro

Com a prévia descrição na introdução do trabalho, os aterros são um dos métodos de destinação final dos RSU, o mais convencional no cenário brasileiro. Os diferentes tipos de aterros são:

- Lixões: os resíduos são dispostos de forma inadequada, ou seja, são depositados sobre o solo não tendo assim nenhum tipo de tratamento, tampouco o resíduo é coberto, resultando na presença de vetores de doenças (roedores, insetos, aves), é, portanto, o mais prejudicial ao meio ambiente e ao ser humano.

- Aterros controlados: a disposição dos resíduos é feita de maneira mais próxima aos padrões dos aterros sanitários, havendo a compactação e cobertura dos resíduos com material inerte ou argila ou silte, podem possuir drenagens de chorume e gás, porém não possuem impermeabilização de fundo ou lateral como geomenbranas (mantas poliméricas com espessura de 0,5 mm a 1,5 mm que podem ser de PEAD, PVC, entre outros). Geralmente não possuem licenciamento ambiental, Estudos de Impactos Ambientais preliminares ou quaisquer preparos anteriores à instalação, pois não foram concebidos como aterros sanitários.
- Aterros sanitários: São aqueles que têm um projeto de engenharia e possuem controle de impacto ambiental e monitoramento. Segundo a Norma Brasileira NBR 8.419 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1996), "aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, reduzindo 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 permitível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho e em intervalos menores se necessário".

É importante ressaltar que, dos diferentes tipos de disposição dos RSU pelo método de aterro citados acima, somente os Aterros Sanitários cumprem com os requisitos ambientais legais e são os únicos que possibilitam a drenagem e a captação de biogás de forma eficiente para posterior tratamento ou beneficiamento, diminuindo a emissão atmosférica.

A Figura 1 abaixo ilustra as diferenças entre aterros sanitários e lixões:

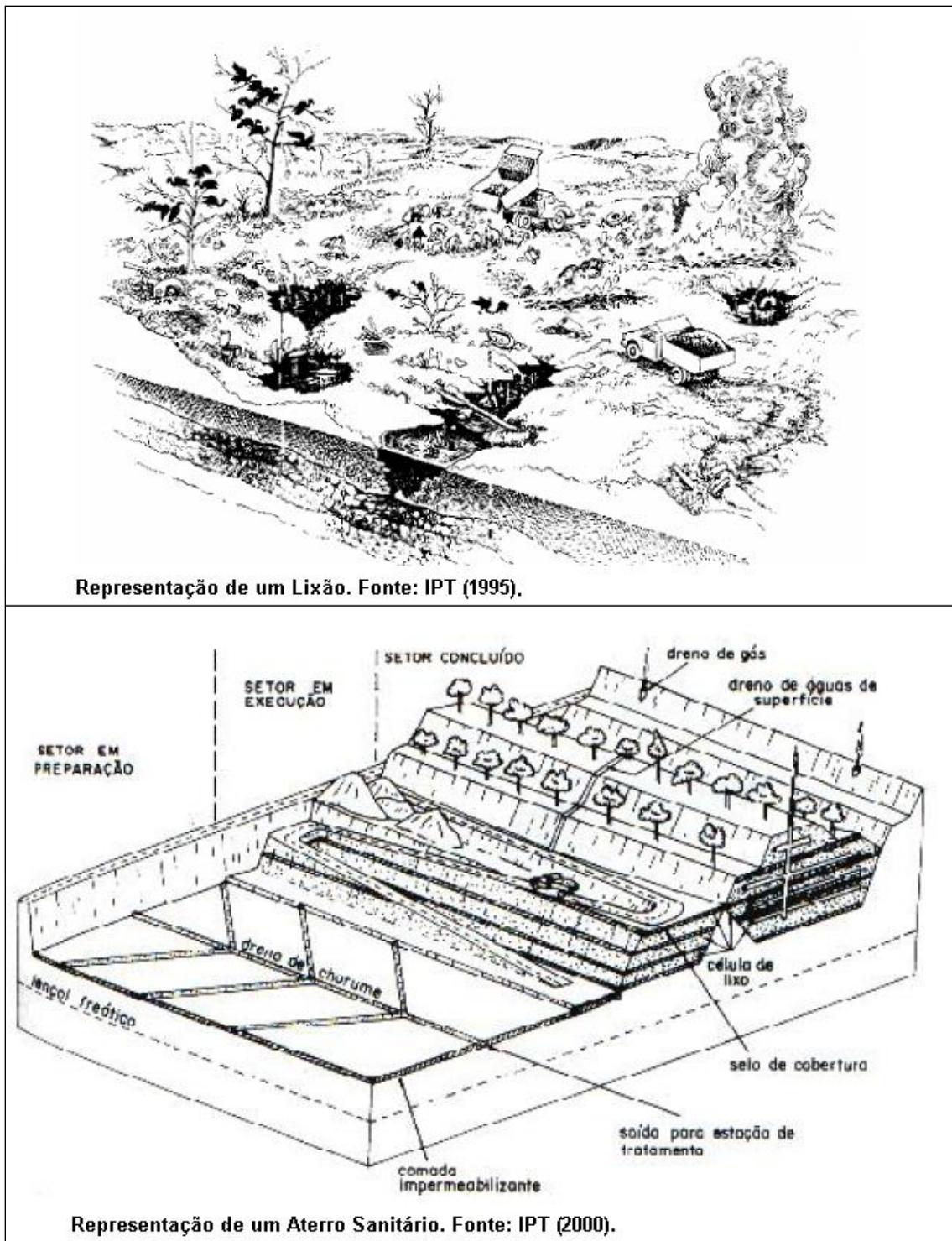


Figura 1 – Diferença entre Aterro Sanitário e Lixão.

Fonte: IPT, 2000.

Os aterros sanitários podem ainda ser classificados quanto ao tipo de técnica de operação:

- Aterros de superfície: os resíduos são dispostos em uma área plana sendo que, são dispostos em trincheiras ou rampas.
- Aterros de depressões: os resíduos são dispostos aproveitando as irregularidades geológicas da região, como: depressões, lagoas, mangues e ou pedreiras extintas.

3.2.2 Estruturas de um Aterro Sanitário

A técnica de disposição de resíduos em aterros sanitários consiste basicamente na deposição e compactação dos resíduos no solo, utilizando-se maquinários pesados, como tratores de esteira e rolos compactadores, dispondo-os em camadas cobertas diariamente com material argiloso ou outro material inerte, formando células, de modo a se ter uma alternância entre os resíduos e o material de cobertura. A altura total das células pode variar de 2 a 7 metros, e a espessura da camada de solo de cobertura varia de 15 a 30 cm. A composição mineral do solo usado como material de cobertura influencia diretamente na geração de chorume pela infiltração/lixiviação de água pluvial e na retenção do biogás dentro do maciço. É preferível o uso de materiais menos permeáveis, geralmente é utilizado solo de cobertura composto por 60% de silte, 20% de argila e 20% de areia fina. A compactação dos resíduos sólidos é realizada para reduzir seu volume e é feita diariamente no final de cada jornada (ENGECORPS, 1996). Segundo a NBR 8.419/1996, a qual expõe todos os procedimentos necessários a uma correta elaboração do projeto, um aterro sanitário deve conter necessariamente:

- Instalações de apoio;
- Sistema de drenagem de águas pluviais;
- Sistema de coleta e tratamento de líquidos percolados (chorume) e de drenagem de gases formados a partir da decomposição da matéria orgânica presente no lixo;
- Impermeabilização lateral e inferior, de modo a evitar a contaminação do solo e do lençol freático.

A impermeabilização lateral e inferior do aterro sanitário são exigências para que o chorume não percole até os corpos hídricos subterrâneos e no solo. Outra medida de segurança para não haver contaminação, além da impermeabilização por geomenbranas, é que o coeficiente de permeabilidade do solo onde o aterro sanitário é instalado deve ser maior ou igual a 10^{-7} cm/s. O chorume é drenado ou bombeado e destinado à lagoas de armazenamento temporário, onde pode ser tratado no próprio aterro sanitário ou em estações de tratamento de efluente. Se o gás e o chorume do aterro sanitário não forem devidamente drenados, poderá haver problemas de estabilidade no maciço do aterro podendo causar deslizamentos e desmoronamentos. Conforme a matéria orgânica é decomposta, com a consequente geração de biogás e de chorume, o volume anteriormente ocupado pelo resíduo diminui, acarretando movimentações na estrutura do aterro sanitário como deslocamentos horizontais/verticais. Segundo KAIMOTO (1996), “com o intuito de monitorar o comportamento físico e mecânico no maciço, são instalados instrumentos de aferição de recalque e de leituras piezométricas não só de chorume como de gás”.

Com relação a movimentação do biogás dentro do aterro sanitário, a CETESB (2006) menciona que “num determinado ponto do aterro, como consequência da produção de metano, cria-se uma sobrepressão (pressão positiva) que atinge e até ultrapassa 10 cm de coluna d’água ($0,01\text{kg/cm}^2$). Essa sobrepressão cria uma direção de movimentação dos gases no aterro, uma vez que o deslocamento dos gases se processa dos pontos de alta pressão para os pontos de baixa pressão. É esse fato que ocasiona a saída natural dos gases da massa de resíduos do aterro”. Portanto, para que o biogás seja drenado para o exterior do maciço do aterro sanitário, são construídos drenos verticais espaçados de forma uniforme, desde a base do aterro até o topo, de forma a conduzir o biogás para a atmosfera através de diferença de pressão (a pressão de gás dentro do maciço é maior que a pressão atmosférica, promovendo a movimentação). Esses drenos verticais são comumente chamados de poços de biogás nos aterros sanitários. Os poços de biogás têm também o papel de drenar o chorume para a base do aterro sanitário. Para aumento da eficiência de drenagem, os drenos verticais geralmente são interligados à drenos horizontais. A figura 2 abaixo ilustra uma seção típica de um aterro sanitário contendo um poço de biogás e a figura 3 apresenta a foto de biogás sendo queimado nos poços de biogás. Cabe informar que a queima de biogás em poços não é classificada como tratamento adequado, pois, não há controles de processo, monitoramento de emissões atmosféricas e pode ocasionar acidentes e/ou incêndios.

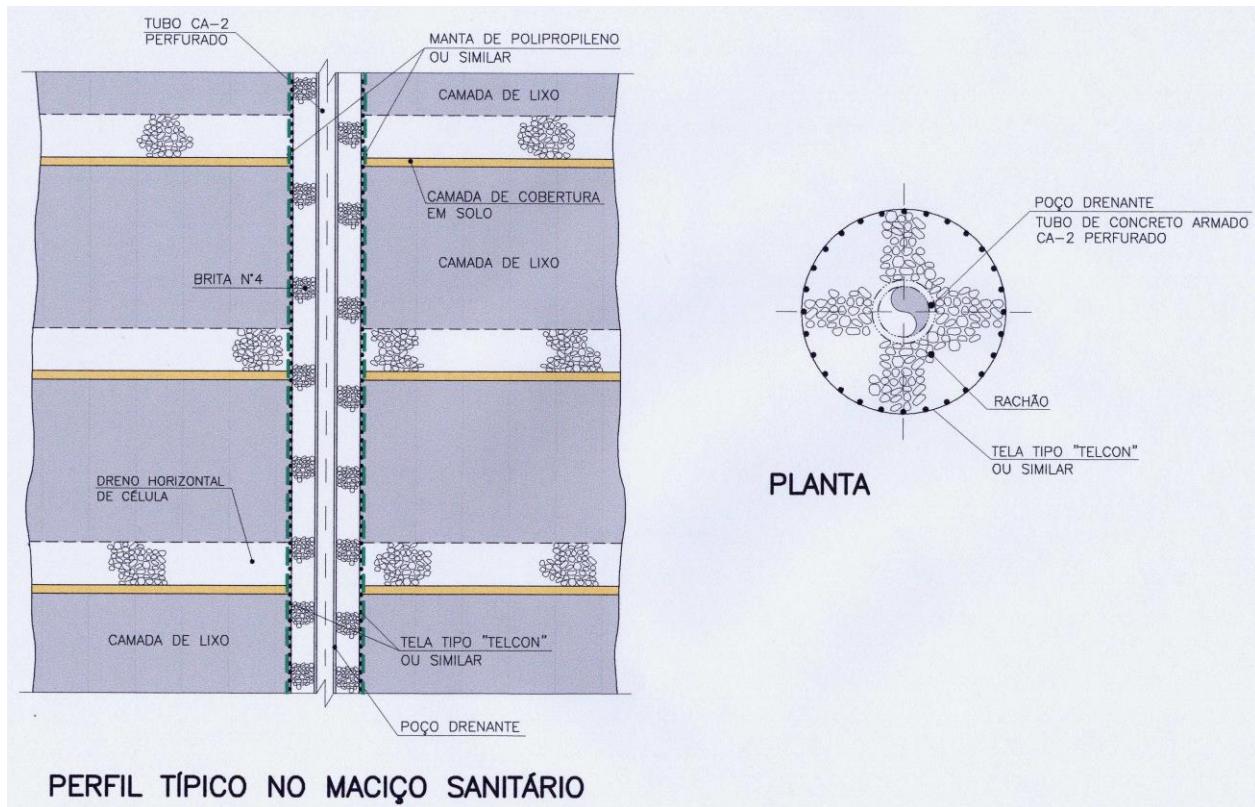


Figura 2 – Corte e vista superior de poço de biogás.

Fonte: Biogás Energia Ambiental S.A, 2007.



Figura 3 – Biogás sendo queimado diretamente nos poços no Aterro Sanitário Bandeirantes.

Fonte: Biogás Energia Ambiental S.A, 2007.

3.3 Biogás

3.3.1 Sobre o Biogás

Biogás é o nome dado para o gás gerado a partir da decomposição da matéria orgânica em meio anaeróbico (ausência de oxigênio). É um gás incolor, de forte odor, que varia em função da concentração de contaminantes como gás sulfídrico e compostos orgânicos voláteis e de baixa densidade (em torno de 0,78 kg/Nm³). É basicamente composto por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), nitrogênio (N₂) e de água (H₂O_(v)), sendo que a composição pode variar dependendo da quantidade de matéria orgânica e de outros compostos presentes durante o processo de formação. Segundo o *website* da CETESB (2021), no século XIX, Ulysse Gayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água, a 35°C, conseguindo obter 100 litros de biogás por m³ de matéria. Em 1884, Louis Pasteur, ao

apresentar à Academia das Ciências os trabalhos do seu aluno, considerou que esta fermentação podia constituir uma fonte de energia para aquecimento e iluminação, devido a presença de metano, o hidrocarboneto de menor cadeia (1 átomo de carbono), principal componente do gás natural e de elevado poder calorífico.

A composição do biogás proveniente de um reator anaeróbio projetado, utilizando somente matéria orgânica de uma unidade de frigorífico, por exemplo, é bem diferente do biogás gerado em um aterro sanitário. Como o RSU não é homogêneo, a concentração dos compostos do biogás resultado da decomposição da matéria biodegradável pode variar bastante. MACIEL (2009), *apud GANDOLA et. al. (1997)*, apresenta os principais parâmetros físico-químicos do biogás na tabela abaixo:

Gás	Composição típica	Massa específ. (kg/m ³)	Pod. calorífico (kJ/m ³)	Limite de explosividade	Solub. em água (g/L)	Propriedades gerais
CH ₄	45-60%	0,717	35.600	5-15%	0,0645	inodoro, incolor, não tóxico, inflamável
CO ₂	35-50%	1,977	-	-	1,6880	inodoro, incolor, asfixiante
N ₂	0-10%	1,250	-	-	0,0190	inodoro e incolor
O ₂	0-4%	1,429	-	-	0,0430	inodoro e incolor
CO	<0,1%	1,250	12.640	12,5-74%	0,0280	inodoro, incolor, tóxico e inflamável
H ₂	<0,1%	0,090	10.760	4-74%	0,0001	inodoro, incolor, não tóxico, inflamável
H ₂ S	<0,07%	1,539	N.I.	4,3-45,5%	3,8460	incolor, muito tóxico

Obs: Massa específica do ar atmosférico = 1,29 kg/m³; NI = Não Informado.

Tabela 4 – Característica dos principais constituintes do biogás.

Fonte: Maciel, 2009.

O biogás apresenta ainda outros compostos em sua composição, podendo chegar a até 350 constituintes traços em pequenas concentrações que chegam a representar até 1% da concentração total, sendo a grande maioria compostos orgânicos (MACIEL, 2009).

3.3.2 A formação do biogás de aterro sanitário

No caso dos aterros sanitários, a formação do biogás é realizada através de um complexo e duradouro processo biológico, que se inicia logo após a cobertura do resíduo, podendo se estender por décadas. De acordo com ALMEIDA (2016), a geração de biogás de aterro sanitário ocorre em cinco fases sequenciais, no qual partes do substrato podem estar em diferentes fases ao mesmo tempo, conforme apresentado abaixo:

Fase I - Fase de ajuste inicial: Esta fase inicia logo após a deposição e a cobertura do resíduo, onde o oxigênio atmosférico presente nos espaços vazios dos resíduos sólidos é consumido pelas bactérias aeróbias durante o processo de decomposição da matéria orgânica presente.

Fase II – Fase de Transição: Com a diminuição da concentração de oxigênio da fase anterior, o processo biológico anaeróbio começa a se desenvolver, dando origem a presença da população de bactérias metanogênicas, responsáveis pela formação do gás metano.

Fase III – Fase de formação ácida: Nesta fase ocorre crescimento da população bacteriana e aumento da atividade biológica, proporcionando a transformação enzimática de moléculas e compostos maiores em moléculas e compostos menores, adequados para uso das bactérias como insumo para produção de energia. Esta etapa é caracterizada pela formação de ácidos orgânicos e dióxido de carbono.

Fase IV – Fase Metanogênica: Com o aumento da atividade bacteriana na etapa anterior, gerando subprodutos ácidos, inicia-se o crescimento e consolidação da população de bactérias metanogênicas. É nesta etapa que ocorre a maior produção de gás metano no processo, representando 50-60% da concentração do biogás.

Fase V – Fase de Maturação: Esta fase é representada pela diminuição dos nutrientes para a atividade biológica, consequentemente, diminuição da população microbiana e na geração de biogás e metano. Compostos menos biodegradáveis e biorecalcitrantes ainda servem como insumo para a reação biológica. Apesar desta diminuição, a geração de biogás continua até que se esgote a matéria orgânica.

ALMEIDA (2016) *apud* TCHOBANOGLOUS (1993), apresenta as fases citadas acima em forma de figura:

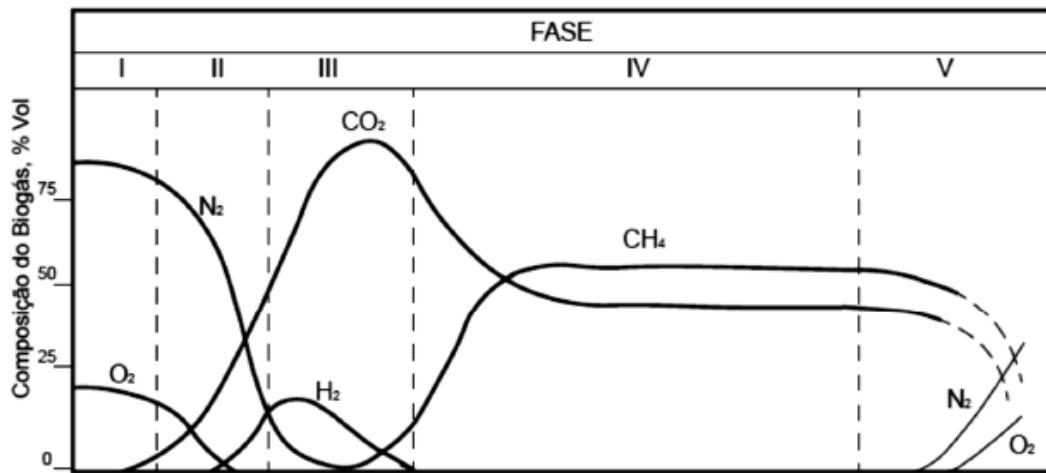


Figura 4 – Fases da biodegradação em aterros sanitários e geração do biogás de aterro sanitário.

Fonte: Almeida, 2016.

Fatores como, umidade, temperatura, pressão, presença de oxigênio, pH, concentração de sais e micronutrientes influenciam diretamente na formação do biogás, podendo catalisar ou inibir a reação biológica.

3.4 Aquecimento Global

Para a compreensão do Aquecimento Global é necessário primeiro entender o fenômeno chamado Efeito Estufa. O Efeito Estufa é ocasionado pela presença de gases com potencial de reter a radiação infravermelha que sairia normalmente pela camada de ozônio, fazendo com que parte desta radiação reincida na superfície terrestre. É um fenômeno natural no planeta, sem o efeito estufa, a temperatura terrestre seria de aproximadamente -6 °C. Os gases que têm potencial de reter a radiação são chamados de Gases de Efeito Estufa (GEEs). A figura 5 abaixo demonstra o efeito deste fenômeno:

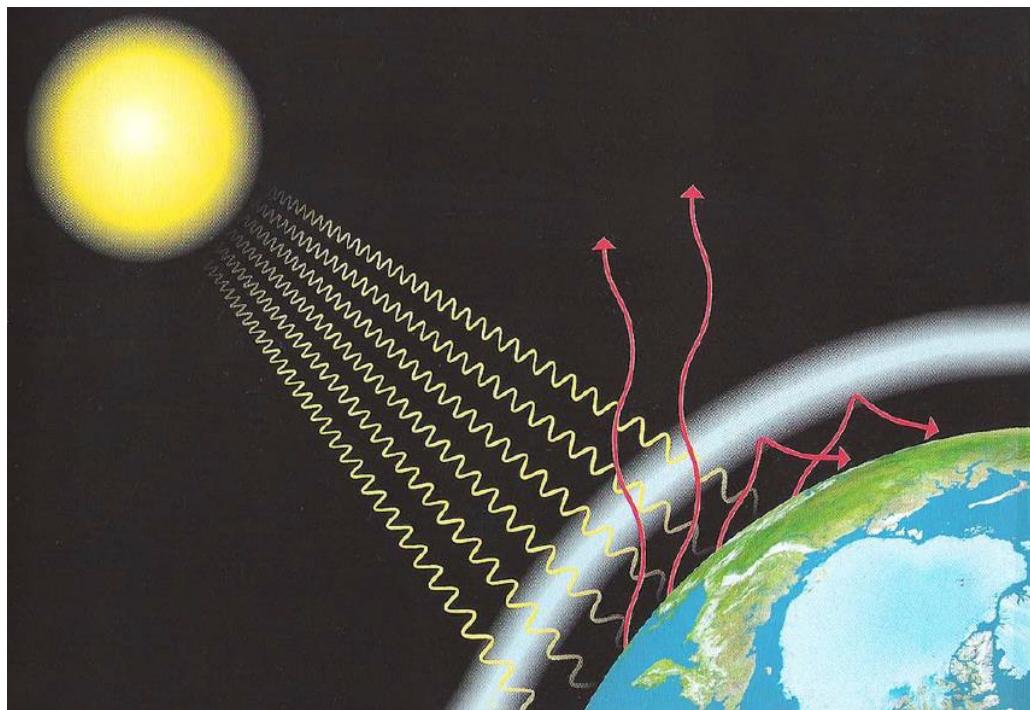


Figura 5 – Esquema simplificado do Efeito Estufa.

Fonte: Paris, 2007.

O aquecimento global, grande problema da atualidade, é explicado pelo fato da intensificação do Efeito Estufa pelo aumento da emissão de GEE antropogênico. Nos últimos 100 anos, registrou-se um aumento de cerca de um grau celsius na temperatura média da Terra. Este aumento pode ser de 1,5 a 5,8 °C nos próximos cem anos segundo PIMC (IPCC, 2001). Segundo Rocha (2003) "as ações decorrentes de atividades econômicas e industriais têm provocado alterações na biosfera, resultando na quase duplicação da concentração dos GEEs na atmosfera durante o período de 1750 a 1988".

Segundo a CQNUMC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*) (UNFCCC, 2009), são seis GEEs principais a serem mitigados para o combate do aquecimento global pelo antigo Protocolo de Quioto e atual Acordo de Paris:

Gás de Efeito Estufa	Fonte	Contribuição para emissão global em 2004
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Consumo de energia proveniente da queima de combustível fóssil	76,7%, sendo 56,6% devido ao uso de combustível fóssil
	Desflorestamento	
Metano (CH ₄)	Agricultura	14,3%
	Produção de Energia	
	Resíduos	
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Principalmente da agricultura	7,9%
Hidrofluorcarbonetos (HFC's)	Utilizados como substitutos aos compostos nocivos à Camada de Ozônio	1,1%
Perfluorcarbonetos (PFC's)	Utilizado em processos industriais e em equipamentos elétricos	
Hexafluoreto de Enxofre (SF ₆)		

Tabela 5 – Os seis Gases de Efeito Estufa cobertos pelo CQNUMC e Protocolo de Quioto.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2009

A CQNUMC, em conjunto com o PIMC (2007), apresenta também o Potencial de Aquecimento Global destes compostos:

Composto	Fórmula química	Potencial de Aquecimento Global (horizonte de 100 anos)
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	25
Óxido Nitroso	N ₂ O	298
HFC-23	CHF ₃	14.800
HFC-32	CH ₂ F ₂	675
HFC-41	CH ₃ F	92
HFC-43-10mee	CF ₃ CHFCHFCF ₂ CF ₃	1.640
HFC-125	C ₂ HF ₅	3.500
HFC-134	C ₂ H ₂ F ₄	1.100
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	1.430
HFC-143	C ₂ H ₃ F ₃	353
HFC-143a	CF ₃ CH ₃	4.470

HFC-152	CH2FCH2F	53
HFC-152a	C2H4F2	124
HFC-161	CH3CH2F	12
HFC-227ea	C3HF7	3.220
HFC-236cb	CH2FCF2CF3	1.340
HFC-236ea	CHF2CHFCF3	1.370
HFC-236fa	C3H2F6	9.810
HFC-245ca	C3H3F5	693
HFC-245fa	CHF2CH2CF3	1.030
HFC-365mfc	CH3CF2CH2CF3	794
Perfluorometano	CF4	7.390
Perfluoroetano	C2F6	12.200
Perfluoropropano	C3F8	8.830
Perfluorobutano	C4F10	8.860
Perfluorociclobutano	c-C4F8	10.300
Perfluoropentano	C5F12	9.160
Perfluorohexano	C6F14	9.300
Perfluorodecalin	C10F18	7.500
Perfluorociclopropano	c-C3F6	17.340
Hexafluoreto de enxofre	SF6	22.800
Trifluoreto de nitrogênio	NF3	17.200

Tabela 6 – Potencial de aquecimento global (GWP - *Global Warming Potentials*).

Fonte: IPCC, 2007

Conforme demonstrado pela CNUMC e PIMC nas tabelas 5 e 6, a emissão de gás metano é a segunda maior emissão de GEE antropogênico para a atmosfera e tem potencial de aquecimento global vinte e cinco vezes maior que o gás base (dióxido de carbono).

3.5 CNUMC, Protocolo de Quioto e Crédito de Carbono

A CNUMC foi fundada em maio de 1992, com abertura para assinatura das nações participantes no encontro mundial das Nações Unidas Rio-92, entre 3 a 14 de Junho de 1992, entrando em vigor somente em 1994. O objetivo da Convenção é estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa em um nível que evite interferências antropogênicas perigosas (induzidas pelo homem) no sistema climático. Este nível precisa ser alcançado dentro de um prazo suficiente para permitir que os ecossistemas se adaptem naturalmente às mudanças climáticas, para garantir

que a produção de alimentos não seja ameaçada e para permitir que o desenvolvimento econômico prossiga de maneira sustentável (UNFCCC, 2021).

O Protocolo de Quioto é um tratado internacional que foi estabelecido na COP 3 (Conferência entre as Partes número 3) da CNUMC assinado em 11 de dezembro de 1997, na província de Quioto, Japão, entrando em vigor somente em 2005 (UNFCCC, 2021). Este tratado tem como objetivo o combate ao aquecimento global pela redução de emissão de GEEs de países industrializados e em desenvolvimento. Foram estabelecidas metas de redução de emissão para 37 países industrializados e para a União Europeia (países do Anexo I), inicialmente a meta era de redução de 5% da emissão correspondente ao ano de 1990, ao longo de cinco anos, no período de 2008 a 2012 (UNFCCC, 2021). Após o término deste período, um novo tratado para dar continuidade ao Protocolo de Quioto foi assinado, durante a COP 21 (Conferência entre as Partes número 21 – *Conference of the Parties*), em 12 de dezembro de 2015, em Paris. O Acordo de Paris teve a participação de um número maior de nações (196 nações) e com meta de redução mais agressiva, com objetivo de limitar o aquecimento global em 2, de preferência 1,5, graus Celsius, em comparação com os níveis pré-industriais (UNFCCC, 2021). O gráfico 1 abaixo demonstra as emissões de GEE globais dos países do Anexo I apresentadas pela CNUMC:

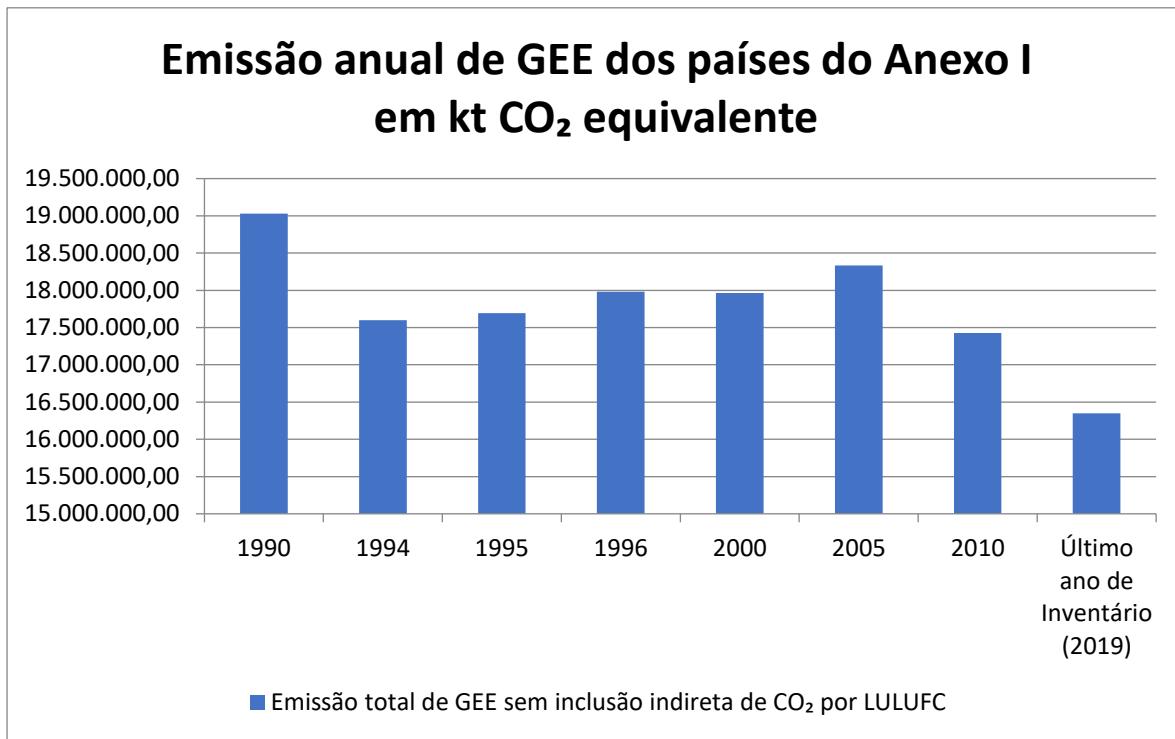


Gráfico 1 – Emissão anual de GEE dos países do Anexo I em kt CO₂ equivalente.

Obs: LULUFC (*Land Use, Land Use Change and Forestry* - Uso de solo, mudança de uso de solo e silvicultura).

Fonte: Adaptado UNFCCC (2021).

Um elemento importante do Protocolo de Quioto foi o estabelecimento de mecanismos de mercado flexíveis, baseados no comércio de permissões de emissão. De acordo com o Protocolo, os países do Anexo I devem cumprir suas metas principalmente por meio de medidas nacionais. No entanto, o Protocolo também oferece a eles uma alternativa para cumprimento de suas metas por meio de três mecanismos baseados no mercado:

- Comércio Internacional de Emissões
- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
- Implementação Conjunta

Dos mecanismos citados acima, somente o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo é aplicável a este trabalho. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (em inglês *Clean Development Mechanism – CDM*), definido no Artigo 12 do Protocolo, permite que um país com um

compromisso de redução ou limitação de emissões sob o Protocolo de Quioto (Países do Anexo B) implante um projeto de redução de emissões em países em desenvolvimento. Esses projetos geraram créditos comercializáveis de Redução Certificada de Emissão (RCEs) (em inglês *Certified Emission Reduction - CERs*), também conhecida como crédito de carbono, cada unidade equivalente a uma tonelada de CO₂, que podem ser contados para o cumprimento das metas de Quioto. O mecanismo é visto por muitos como pioneiro, é o primeiro investimento ambiental global e esquema de crédito deste tipo, fornecendo um instrumento de compensação de emissões padronizado, o RCE. O mecanismo estimula o desenvolvimento sustentável e a redução de emissões, ao mesmo tempo em que dá aos países industrializados alguma flexibilidade em como cumprir suas metas de redução ou limitação de emissões (UNFCCC, 2021). Segundo o IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2009), “a participação brasileira no mercado de carbono tem se limitado ao segmento de oferta de projetos via MDL, ocupando o terceiro lugar em número de projetos (13%). China e Índia respondem por 31% e 21% do total de projetos em 2008 (MCT, 2008)”.

No Brasil, os primeiros projetos de destruição eficiente de gás metano proveniente de aterros sanitários surgiram através do incentivo da geração de créditos de carbono propiciado pelo MDL. Antes do surgimento deste incentivo, os aterros sanitários realizavam a queima do biogás nos poços, ou simplesmente emitiam o biogás para a atmosfera, sem controle. Existe uma metodologia específica para a modalidade de projetos de MDL para biogás de aterro sanitário, a saber: ACM0001: *Large-scale Consolidated Methodology: Flaring or use of landfill gas* (Metodologia Consolidada de larga escala: queima ou uso de biogás de aterro sanitário). Esta metodologia descreve detalhadamente como é calculada a emissão do aterro sanitário (linha de base), a emissão relacionada à implantação do projeto de MDL e a Redução de Emissão resultante da implantação do projeto. De forma bem sintetizada, os cálculos são demonstrados abaixo:

Linha de Base:

$$BE_y = BE_{CH4,y} + BE_{EC,y} + BE_{HG,y} + BE_{NG,y}$$

Onde:

BE_y = Linha de base de emissão no ano y (t CO₂e/ano)

$BE_{CH4,y}$ = Linha de base da emissão de gás metano pela disposição de resíduo sólido urbano do aterro sanitário no ano y (t CO₂e/ano)

$BE_{EC,y}$ = Linha de base da emissão associada à geração de energia elétrica utilizando combustíveis fósseis no ano y (t CO₂/ano)

$BE_{HG,y}$ = Linha de base da emissão associada à geração de calor pelo uso de combustíveis fósseis no ano y (t CO₂/ano)

$BE_{NG,y}$ = Linha de base da emissão associada ao uso de gás natural no ano y (t CO₂/ano)

Emissão do Projeto:

$$PE_y = PE_{EC,y} + PE_{FC,y} + PE_{DT,y} + PE_{SP,y}$$

Onde:

PE_y = Emissão do projeto no ano y (t CO₂/ano)

$PE_{EC,y}$ = Emissão pelo consumo de energia elétrica utilizada pelo projeto no ano y (t CO₂/ano)

$PE_{FC,y}$ = Emissão pelo consumo de combustível fóssil pela atividade do projeto, com exceção de uso para geração de energia elétrica, no ano y (t CO₂/ano)

$PE_{DT,y}$ = Emissão pela distribuição de biogás comprimido/liquefeito utilizando-se caminhões, no ano y (t CO₂/ano)

$PE_{SP,y}$ = Emissão pelo fornecimento de biogás para consumidores através de uma rede de gasoduto dedicada, no ano y (t CO₂/ano)

Por fim, é determinada a **Redução de Emissão do projeto**:

$$ER_y = BE_y - PE_y$$

Onde:

ER_y = Redução de Emissão no ano y (t CO₂e/ano)

BE_y = Emissão de linha de base no ano y (t CO₂e/ano)

PE_y = Emissão do Projeto no ano (t CO₂/ano)

3.6 Tecnologias aplicadas para coleta e tratamento de biogás

Para que o gás metano presente no biogás de aterro sanitário não seja lançado para a atmosfera, se faz necessário:

- Extrair o biogás do interior do maciço do aterro sanitário;
- Conduzir o biogás extraído para uma central de processamento;
- Destruir o gás metano através de processo de combustão;

Os poços são responsáveis por drenar o biogás e proporcionar maior estabilidade ao aterro sanitário. São nestes pontos que são montadas as instalações necessárias para a extração do biogás. O biogás é captado nos poços pelo uso de estruturas comumente chamadas de cabeçotes, que são conectados a tubulações, geralmente poliméricas, que por sua vez são conectadas à coletores (centrais de interligação dos poços), e estes, conectados à tubulações de diâmetro maior que, geralmente, percorrem o perímetro do aterro sanitário até chegarem à central de processamento. Como o biogás possui elevada concentração de água no estado de vapor, a rede de captação de biogás precisa ter pontos de remoção de condensado, de forma a não comprometer o escoamento do biogás nos gasodutos, por acúmulo de líquido. Segundo o manual para aproveitamento do biogás do ICLEI (ICLEI, 2009), no ponto de saída dos drenos a temperatura do gás estará entre 40°C e 50°C. Pelo resfriamento ao longo da tubulação instalada sobre o aterro, será gerado condensado em grande quantidade (por exemplo, a redução da temperatura de 50° para 25°C gera cerca de 60g de condensado por m³).

A central de processamento de biogás é responsável pela geração do vácuo necessário para a extração do biogás dos poços, geralmente realizada por sopradores, quantificar e analisar o volume de gás extraído, através de medidores de vazão e analisadores de gases, usualmente gás metano e oxigênio (este por segurança) e, dependendo da destinação do biogás, realizar tratamento prévio necessário para a destinação final. Geralmente, as centrais de processamento de biogás possuem sistemas de automação industrial com registro de dados eletrônico dos principais parâmetros do processo e sistemas de segurança.

A figura abaixo apresenta as etapas da captação de biogás em aterros sanitários até a chegada da central de processamento de biogás.

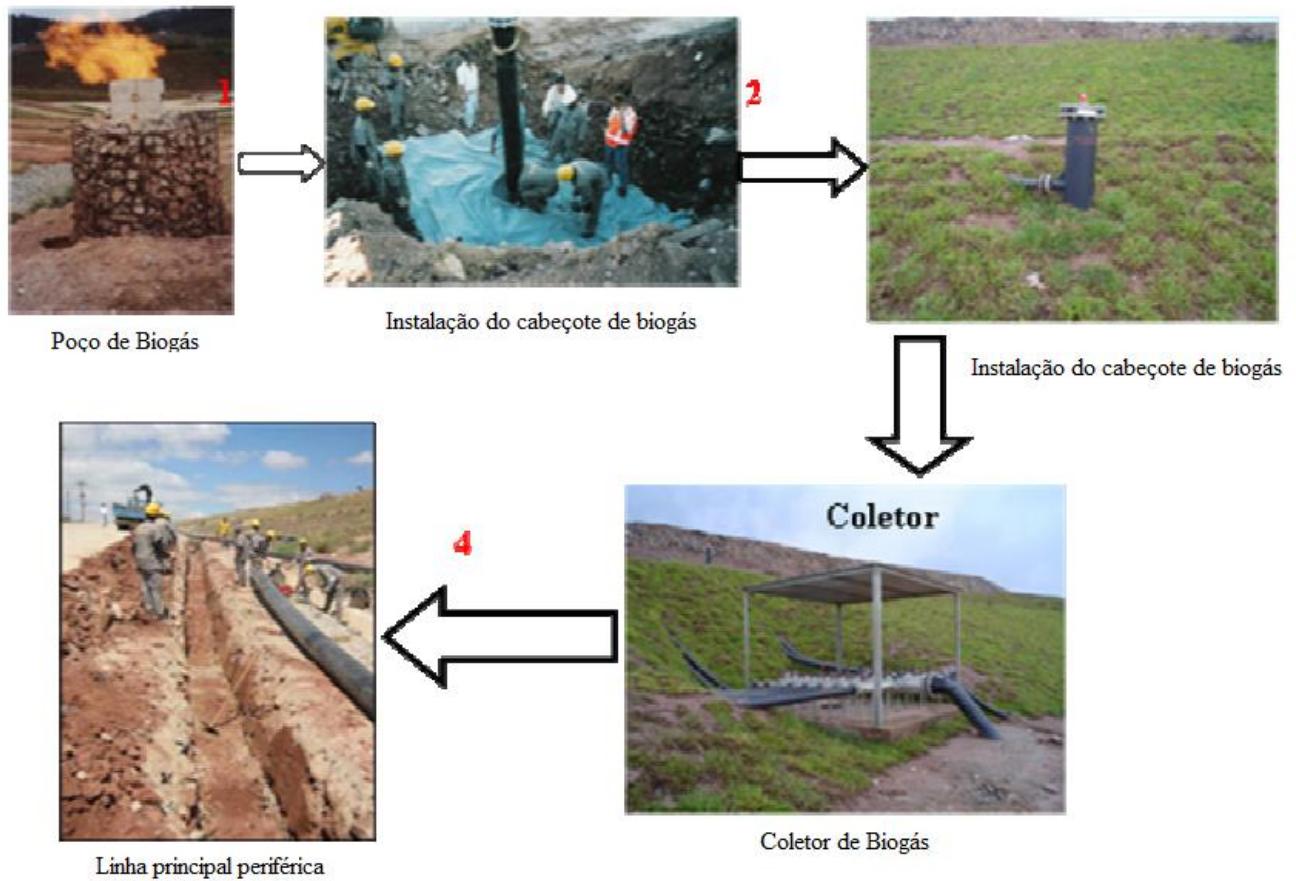


Figura 6 – Etapas dos processos de captação de biogás.

Fonte: Adaptado de Silva (2006).

Quanto a etapa de destruição do gás metano pelo processo de combustão, atualmente são considerados 3 principais destinos:

- Queima controlada em queimadores específicos para biogás (*Flares*);
- Uso como combustível para geração de energia elétrica;
- Transformação do biogás em biometano para posterior substituição do Gás Natural

O Documento de Concepção do Projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (DCP) (em inglês *Project Design Document - PDD*) pela CQNUMC do aterro sanitário CTR Santa Rosa, apresenta um típico modelo conceitual de usos e destinos do biogás de aterro sanitário:

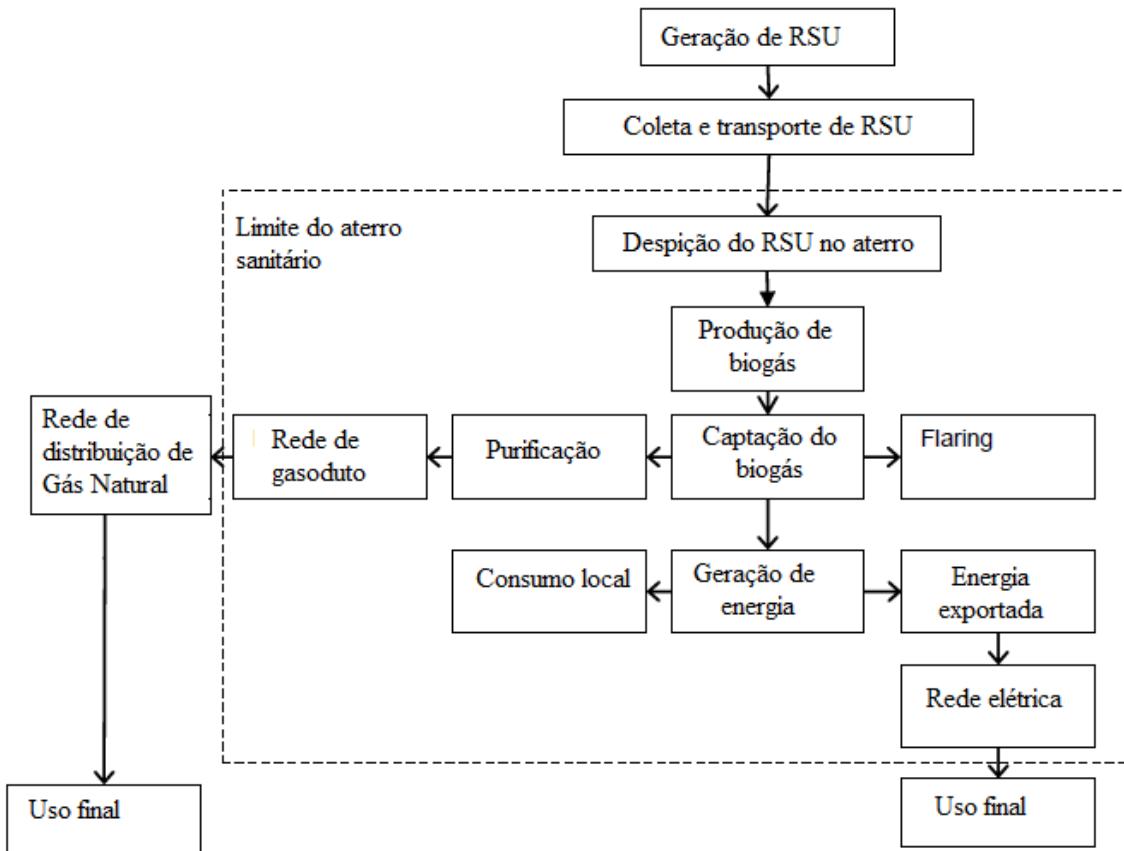


Figura 7 – Modelo conceitual de tratamento de biogás de aterro sanitário.

Fonte: UNFCCC (2012).

3.6.1 Queima em *Flares*

A forma de destruição de gás metano diretamente pelo processo de combustão apresentada pela metodologia do CQNUMC é feita através de um queimador específico, comumente chamados de *Flare*. Existem dois tipos de *Flares* cobertos por essa metodologia: de chama enclausurada e de chama aberta.

Os *Flares* de chama aberta são de construção mais simples que os de chama enclausurada, geralmente munidos por sistema de ignição, detecção de chama, monitoramento de vazão de alimentação e temperatura. Como a chama é aberta (exposta), este tipo de equipamento gera bastante irradiação de calor, por esse motivo, costumam apresentar elevada altura. A temperatura de queima deste equipamento não possui controle, somente monitoramento. Já os *Flares* de chama enclausurada, possuem os mesmos dispositivos que o *Flare* de chama aberta, entretanto, realizam a queima interna a uma câmara de combustão, revestida por isolamento térmico, além de realizar o controle de admissão de ar como comburente, de forma a controlar a temperatura de queima, a qual ocorre em torno dos 1.000°C. Outro dispositivo que os *Flares* enclausurados podem possuir é o sistema de amostragem do gás resultante da queima. Essa instalação permite monitorar a eficiência da destruição do gás metano.

Caso o aterro sanitário queira registrar o projeto de captação e queima do biogás, consequentemente gás metano, no CQNUMC como projeto de MDL, é possível gerar Reduções Certificadas de Emissão (RCEs), passíveis de comercialização (Crédito de Carbono).

A mais recente ferramenta para determinar emissões pela queima de gases contendo metano, publicada pela CQNUMC (UNFCCC, 2019) determina as respectivas eficiências máximas:

Chama aberta: Em casos de *Flares* de chama aberta, a eficiência em determinado minuto m ($\eta_{flare,m}$) é de 50% quando há detecção de chama, caso contrário, a eficiência é de 0%.

Chama enclausurada: Os *Flares* de chama enclausurada possuem 2 tipos de eficiência, conforme informado abaixo:

Padrão: a eficiência em determinado minuto m ($\eta_{flare,m}$) é de 90% caso a temperatura de queima e vazão de alimentação do equipamento esteja dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante e com detecção de chama, caso contrário, a eficiência em determinado minuto m ($\eta_{flare,m}$) é de 0%. E, em casos em que os *Flares* são enquadrados como *Flares* de baixa altura, segundo determina a metodologia, a eficiência em determinado minuto m ($\eta_{flare,m}$) é de 80% caso a temperatura de queima e vazão de alimentação do equipamento esteja dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante e com detecção de chama, caso contrário a eficiência em determinado minuto m ($\eta_{flare,m}$) é de 0%

Monitorada: a eficiência em determinado minuto m é calculada ($\eta_{flare,m} = \eta_{flare,calc, m}$), respeitando-se as seguintes condições: caso a temperatura de queima e vazão de alimentação do equipamento esteja dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante e com detecção de chama, caso contrário a eficiência em determinado minuto m ($\eta_{flare,m}$) é de 0%.



Figura 8 – Foto de um *Flare* de chama aberta (esquerda) e de chama enclausurada (direita).

Fonte: ENERGÊS (2020).

3.6.2 Queima em motores de combustão interna

Com pequenas adaptações nos motores à combustão e com o devido tratamento do biogás, é possível transformar o biogás em combustível para a queima em motores de combustão interna (ciclo Otto). Utilizando-se da energia mecânica dos motores promovida pelo processo de combustão e conectando-a a equipamentos geradores de energia elétrica, é possível gerar quantidades consideráveis de energia elétrica pela queima de biogás de aterro em motogeradores, em torno de 1,5-2 kWh por Nm³ de biogás a 50% de metano, dependendo muito do fabricante, rendimento da máquina, entre outros fatores. De acordo com a USEPA (2021), “motores de combustão interna são eficientes em converter biogás de aterro em energia elétrica, alcançando eficiência na faixa de 30% a 40%. É possível conseguir eficiências maiores ainda em aplicações de co-geração, onde a dissipação da energia térmica é recuperada do processo de arrefecimento do motor para gerar água quente ou da exaustão do motor para gerar vapor de baixa pressão”.

Segundo ICLEI (ICLEI, 2009), para possibilitar a queima em motores de ciclo Otto, são necessárias adaptações nos sistemas de alimentação, ignição e taxa de compressão. Quanto ao tratamento do biogás necessário para a transformação em combustível, a maioria dos motores de combustão interna requer pouco tratamento, geralmente, a desumidificação, filtragem de pequenas partículas e compressão. Alguns motores de combustão interna também requerem remoção de siloxanos e sulfeto de hidrogênio (H₂S) utilizando-se leitos de adsorção, lavadores biológicos e outras tecnologias após a etapa de desumidificação (USEPA, 2021).

Os principais parâmetros monitorados do processo de queima de metano em motogeradores para geração de energia elétrica são: concentração do gás metano, vazão de alimentação de cada motogerador e energia elétrica gerada.

Diferentemente de *Flares*, apesar de trabalhar com temperatura de queima inferior a um *Flare* enclausurado (aproximadamente 450°C) não há cálculo e/ou monitoramento para a determinação da eficiência de destruição do metano em motogeradores, a metodologia considera 100% de eficiência para este método. Além desta alta eficiência estabelecida em metodologia, há um ganho adicional na Redução de Emissão pela substituição da energia elétrica que seria gerada por outro método. Essa Redução adicional é calculada, aplicando-se o fator de emissão de GEE por

MWh, informado pelo MCTI e aplicado à quantidade de energia elétrica gerada pelo processo. Com relação ao aspecto econômico deste método, podem ser citados:

- A diminuição ou até mesmo isenção de gastos relacionados ao consumo de energia elétrica;
- Comercialização de energia elétrica excedente;
- Receita pela comercialização de créditos de carbono;

A destruição de metano pelo método de geração de energia elétrica em motores de combustão interna, não apresenta somente aspectos positivos. A queima do biogás em motores gera emissões de óxidos nitrosos (NO_x), entre 250 e 3000 ppm (Figueiredo, 2011).



Figura 9 – Foto motogeradores à biogás.

Fonte: TERMOVERDE (2021).

3.6.3 Biometano

Este terceiro método coberto por este trabalho também consiste em utilizar o biogás como combustível, mas mudando a composição base da mistura gasosa do biogás através de processos

industriais, removendo contaminantes e compostos de baixo poder calorífico, transformando o biogás em um produto similar ao Gás Natural, chamado de Biometano. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), reconhece o Biometano como combustível. Em 2017 foi publicada a Resolução 685, que estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Existe também a Resolução 8, mas trata-se de Biometano oriundo de resíduos agrossilvopastoris. O Anexo 1 deste trabalho demonstra a especificação do Biometano oriundo de aterros e estações de tratamento de esgoto. Com base nas tabelas 4 e Anexo 1, pode-se verificar que é preciso remover principalmente os compostos que representam maior concentração volumétrica do biogás como o dióxido de carbono e nitrogênio e alguns contaminantes como compostos de enxofre e siloxanos, prejudiciais para o processo de queima.

Com a regulamentação da ANP para o uso deste combustível, este produto passou a ser comercializado em substituição ao Gás Natural, para diversos usos, inclusive para Gás Natural Veicular.

Quanto ao processo de tratamento, também comumente chamado de purificação do biogás, é muito mais complexo do que o tratamento necessário para geração de energia em motores de combustão interna. EDUFEF (2019) lista 4 processos industriais que aproveitam as diferenças entre as moléculas mais aplicados na purificação do biogás: 1) solubilidade (lavadores à água); 2) tamanho (tecnologias de adsorção por variação de pressão; membranas); 3) características químicas (absorção química); e 4) ponto de condensação (criogenia).

Como o biometano passa a substituir o Gás Natural, a destinação final pode se tornar complexa. Caso haja uma rede de gás da concessionária de gás natural, é possível realizar uma instalação de ponto de transferência, injetando o biometano diretamente na rede. Caso não haja, é necessário realizar o transporte do biometano através de “gasodutos virtuais” até a destinação final, geralmente uma indústria ou diversos postos de abastecimento de combustível veicular. Segundo o *website* da ANP (2021), “após as etapas de purificação do biogás, resulta no biometano com elevado teor de metano em sua composição, que reúne características que o torna intercambiável com o gás natural em todas as suas aplicações ou passível de ser transportado na forma de gás

comprimido por meio de caminhão-feixe (gasoduto virtual) ou na forma de gás liquefeito, denominado biometano liquefeito - Bio-GNL”.

Quanto à eficiência de destruição do gás metano pelo processo de combustão do biometano como substituto do Gás Natural, a CQNUMC adota as mesmas premissas para geração de energia elétrica em motores de combustão interna, ou seja, 100% de eficiência. Há também uma geração extra de RCEs promovida pela substituição do combustível fóssil (Gás Natural) que seria utilizado na ausência do projeto. Diferentemente do processo de geração de energia elétrica, a emissão de GEE decorrente alto consumo elétrico é mais relevante e também, em caso de “gasodutos virtuais” é preciso quantificar as emissões pelo deslocamento das carretas. Com relação ao aspecto econômico deste método, podem ser citados:

- Comercialização de biometano;
- Receita pela comercialização de créditos de carbono;



Figura 10 – Usina de purificação de biogás.

Fonte: Gás Verde (2013).

4. METODOLOGIA

O capítulo 4 apresenta o critério e a metodologia utilizados neste trabalho para determinação da eficiência da redução de emissões atmosféricas em aterros sanitários, sob a ótica da CQNUMC.

4.1 Eficiência de redução de emissões em aterros sanitários

Conforme informado na revisão bibliográfica deste trabalho, os aterros sanitários apresentam consideráveis emissões de gás metano para a atmosfera e a mitigação de emissão deste gás é feita através do processo de captação e queima do biogás, por métodos aprovados. Também foi apresentada na revisão bibliográfica como é determinada a redução de emissão de GEE de um aterro sanitário com base na metodologia da CQNUMC, subtraindo-se a emissão do projeto da emissão de linha de base.

A emissão de linha de base de determinado projeto de MDL, também conhecida como previsão de redução de emissão, é apresentada pelo DPC - Documento de Concepção do Projeto, onde a principal emissão (metano) é determinada através de modelo matemático de primeira ordem que calcula a estimativa de geração anual de biogás. JUCÁ (2009) descreve os atuais tipos de modelagens matemáticas mais aplicadas para estimativas de geração de biogás de aterro sanitário: “os modelos de geração de biogás mais simples e difundidos atualmente na literatura, chamados de modelos de ordem zero e de primeira ordem, são baseados em formulações empíricas em que se considera: degradação constante ao longo do tempo (modelo de ordem zero) e cinética de primeira ordem (modelo de primeira ordem)”. Podemos citar como exemplo os seguintes autores de modelos matemáticos para geração de gás de aterro sanitário:

- PIMC (2006)
- US EPA (LandGEM) (2005)
- CETESB (2006)

Além destes modelos públicos e bem consolidados, empresas de consultorias em engenharia e pesquisadores também dispõem de modelos próprios, porém, não públicos.

A CQNUMC também possui modelo de geração de biogás de aterro sanitário própria, apresentado através da ferramenta metodológica número 4 que aborda emissões de unidades de disposição de resíduos sólidos (*TOOL 04 Methodological tool – Emissions from Solid Waste Disposal Sites*), que se encontra atualmente na revisão 8. A equação encontra-se a seguir:

$$\left. \begin{array}{l} BE_{CH4,SWDS,y} \\ PE_{CH4,SWDS,y} \\ LE_{CH4,SWDS,y} \end{array} \right\} = \varphi_y \times (1 - f_y) \times GWP_{CH4} \times (1 - OX) \times \frac{16}{12} \times F \times DOC_{f,y} \\ \times MCF_y \times \sum_{x=1}^y \sum_j (W_{j,x} \times DOC_j \times e^{-k_j \times (y-x)} \times (1 - e^{-k_j})) \quad \text{Equation (1)}$$

$$\left. \begin{array}{l} BE_{CH4,SWDS,m} \\ PE_{CH4,SWDS,m} \\ LE_{CH4,SWDS,m} \end{array} \right\} = \varphi_y \times (1 - f_y) \times GWP_{CH4} \times (1 - OX) \times \frac{16}{12} \times F \times DOC_{f,m} \\ \times MCF_y \times \sum_{i=1}^m \sum_j (W_{j,i} \times DOC_j \times e^{\frac{-k_j}{12}(m-1)} \times (1 - e^{\frac{-k_j}{12}})) \quad \text{Equation (2)}$$

Onde, para o modelo de geração anual:

$BE_{CH4,SWDS,y} / PE_{CH4,SWDS,y} / LE_{CH4,SWDS,y}$ = Emissões de metano de linha de base, vazamento ou projeto ocorrida no ano y, gerada em função da disposição de resíduos sólidos em aterro sanitário (tCO₂e/ano)

x = anos no período em que o aterro sanitário recebeu resíduos sólidos, sendo do primeiro ano (x = 1) ao ano y (x = y)

y = ano do período creditício para quais as emissões de metano são calculadas (y é um período consecutivo de 12 meses)

$DOC_{f,y}$ = Fração de carbono orgânico degradável que se decompõe em condição específica ocorrida no ano y (fração mássica).

$W_{j,x}$ = Quantidade de tipo de resíduo sólido j destinado ou evitado disposição em aterro sanitário no ano x (t)

Onde, para o modelo de geração mensal:

$BE_{CH4,SWDS,m} / PE_{CH4,SWDS,m} / LE_{CH4,SWDS,m}$ = Emissões de metano de linha de base, vazamento ou projeto ocorrida no mês m, gerada em função da disposição de resíduos sólidos em aterro sanitário (tCO₂e/mês)

i = meses no período em que o aterro sanitário recebeu resíduos sólidos, sendo do primeiro mês (i = 1) ao mês i (i = m)

m = mês do período creditício para quais as emissões de metano são calculadas

$DOC_{f,m}$ = Fração de carbono orgânico degradável que se decompõe em condição específica ocorrida no mês m (fração mássica).

$W_{j,i}$ = Quantidade de tipo de resíduo sólido j destinado ou evitado disposição em aterro sanitário no mês i (t)

Por fim, para ambos modelos:

φ_y = Fator de correção do modelo para contabilizar incertezas para o ano y

f_y = Porcentagem de metano que é captado no aterro sanitário, queimado em *flares*, usado como combustível ou de maneira a evitar a emissão de metano para a atmosfera no ano y

GWP_{CH4} = Fator de aquecimento global do gás metano

F = Concentração de metano no biogás (fração volumétrica)

MFC_y = Fração de correção de metano para o ano y

DOC_j = Fração de carbono orgânico degradável no resíduo j (fração mássica)

k = taxa de decaimento para o resíduo j (1/ano)

j = tipo de resíduo depositado no resíduo sólido urbano

É importante ressaltar que se trata de formulações empíricas elaboradas em condições diversas e que existem diferentes autores com diferentes variáveis com objetivo de gerar uma estimativa de produção de biogás, portanto, pode apresentar diferenças na prática. O comportamento típico de uma curva de geração de biogás de aterro é de constante ascendência do volume de gás gerado em função do recebimento de matéria orgânica proveniente do resíduo sólido pelo aterro sanitário

ao longo do tempo, com pico de geração próximo ao ano de encerramento da operação do aterro sanitário e em seguida declínio no volume ao longo de anos, até que o volume de gás gerado atinja valores desprezíveis. Rossini (2018) apresenta o comportamento típico de geração de biogás determinado por modelagem matemática e diferenças entre alguns modelos para o aterro sanitário de Itapeva em um cenário de quinze anos de recebimento de RSU:

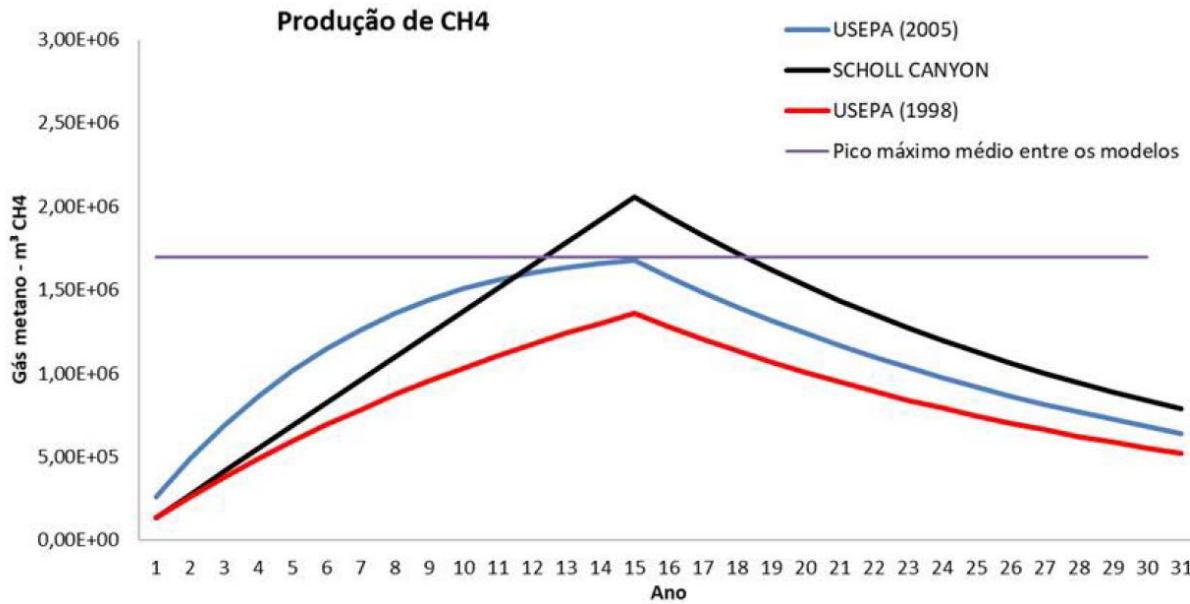


Figura 11 – Curvas de geração de gás metano por modelagem matemática.

Fonte: Rossini (2018).

Dentro do âmbito de projeto de MDL pela CQNUMC, para a quantificação de redução de emissão e consequente certificação (RCE), após determinado período de operação, o participante do projeto realiza a verificação de monitoramento. Nesta etapa é elaborado um documento chamado Relatório de Monitoramento (*Monitoring Report*), contendo informações sobre os parâmetros monitorados pelo projeto, bem como o cálculo de reduções de emissões. Em seguida, este documento é submetido a uma empresa certificada pela CQNUMC, denominada de EOD - Entidade Operacional Designada (DOE – *Designated Operational Entity*), que realiza auditoria no projeto, avaliando as evidências do monitoramento apresentadas pelo relatório e se o cálculo foi realizado de forma correta, bem como o cumprimento das regras estabelecidas pela metodologia em que o projeto está registrado. Após a aprovação da EOD, a CQNUMC realiza

uma segunda auditoria, avaliando o relatório da EOD e o próprio Relatório de Monitoramento, para então emitir a certificação dos créditos (RCEs). A partir desta etapa pode-se afirmar que a Redução de Emissão ocorreu, sob a ótica da CQNUMC, pois a Redução foi certificada (UNFCCC, 2021).

4.2 Projetos de MDL de biogás de aterro sanitário no Brasil

No presente trabalho, realizou-se um levantamento dos projetos de MDL que fazem uso da metodologia ACM 001 no Brasil através da ferramenta de busca do *website* da CQNUMC, onde foram localizados 47 projetos existentes. A metodologia ACM 001 foi elaborada para consolidar as regras dos projetos relacionados ao uso de biogás, ocasionando a substituição das antigas metodologias AM002, AM003, AM0010 e AM0011, desta forma, há projetos descontinuados, registrados com uso destas metodologias antigas (UNFCCC, 2021), que não foram considerados neste trabalho, por não utilizarem a metodologia ACM 001.

Além disto, a ferramenta possibilita buscar apenas projetos de MDL, sendo que também existem programas (PoA – *Programme of Activity*) de MDL (UNFCCC, 2021). Foram localizados dois PoAs que utilizam a metodologia ACM001 e dentro do território nacional, a saber: PoA 10531: *Latam Landfill PoA*, registrado em 26 de março de 2021 e PoA 6573: *Caixa Econômica Federal Solid Waste Management and Carbon Finance Project*, este com 2 projetos registrados, CTR Santa Rosa, localizado em Seropédica/RJ, registrado em 5 de outubro de 2012 e CTR São Gonçalo, localizado em São Gonçalo/RJ, registrado em 31 de março de 2016.

Este trabalho aborda somente projetos (sem a abordagem dos programas) e registrados sob a metodologia ACM 001. O Anexo 2 apresenta os 47 projetos no país encontrados através do critério acima.

4.3 Seleção dos projetos para avaliação da eficiência

Para determinação da eficiência de destruição de gás metano proveniente da destinação de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários foram selecionados os cinco maiores projetos de MDL da CQNUMC apresentados no Anexo 2 em termos de previsão de Redução de Emissão. Estes projetos podem ser vistos na Tabela 7 abaixo:

Data de Registro	Título	Local de implantação	Outros participantes	Metodologia	Reduções *	Referência
20/02/2006	Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE)	Brasil	Suíça, Holanda, Alemanha	ACM0001 ver. 2	1070649	164
08/07/2011	Manaus Landfill Gas Project	Brasil	Canadá, Noruega, Reino Unido da Grã Bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 11	1031574	4211
Retirado	Gramacho Landfill Gas Project	Brasil		ACM0001 ver. 9	852367	2548
02/07/2006	São João Landfill Gas to Energy Project (SJ)	Brasil	Suíça, Alemanha	ACM0001 ver. 18	816940	373
09/03/2006	Caieiras landfill gas emission reduction	Brasil	Suíça, Japão, Noruega	ACM0001 ver. 2	770932	171

* Reduções de Emissões estimadas em toneladas de CO₂ equivalente por ano (conforme declarado pelo participante do projeto).

Tabela 7 – 5 maiores Projetos de MDL que utilizam a metodologia ACM 001 registrados no Brasil em termos de Redução de Emissão.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

É possível observar que o projeto de número 2548 (*Gramacho Landfill Gas Project*) foi retirado de registro e verificando este projeto no *website* da CQNUMC, constatou-se que não houve emissão de RCEs no único período creditício registrado, correspondente ao período de 01/09/2009 a 30/06/2016 (UNFCCC, 2021). No próprio Anexo 2, há um outro projeto relacionado ao aterro sanitário Gramacho, projeto número 9087. Ambos DCPs informam que os projetos são relacionados ao Aterro Sanitário Gramacho, pois estão localizados no município de Duque de Caixas, no estado do Rio de Janeiro e também apresentam as coordenadas geográficas do empreendimento. Apesar do título do projeto constar como aterro sanitário, o próprio DCP informa que inicialmente o Gramacho era um lixão a céu aberto, sendo reformulado em 1993,

tornando-se um aterro controlado. Este mesmo DCP informa que o recebimento de RSU ocorreu por 34 anos (entre 1978 a 2012), totalizando 63.284.073 toneladas. Apesar de não constar como retirado, também foi observado que não houve emissão de RCE no único período creditício registrado para o projeto 9087, correspondente ao período de 01/01/2013 a 31/12/2019 e que não é mais possível renovar o período creditício deste projeto (UNFCCC, 2021). O projeto 2548 previa redução de 5.966.573 tCO₂eq entre 2009 e 2016, já o projeto 9087 previa redução de 2.196.254 tCO₂eq entre 2013 e 2019. Tendo em vista que não houve emissão de RCE, sob a ótica da CQNUMC, a eficiência de Redução de Emissão deste projeto é zero (ou imensurável) até o momento, portanto, será removido da seleção do objeto de estudo. A figura 12 abaixo apresenta a imagem via satélite do aterro de Gramacho obtida através do software *Google Earth*.



Figura 12 – Imagem via satélite do projeto 2548 e 9087.

Fonte: Google (2021).

Como o projeto 2548 foi retirado da lista, o sucessor com base no critério de maiores projetos de MDL da CQNUMC apresentados no Anexo 2 em termos de previsão de Redução de Emissão passa a ser o projeto 5947 (*CTL Landfill Gas Project*).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Projeto 0194 - *Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE)*

Com o critério de elaboração do Anexo 2, ou seja, projetos de MDL, dentro do território nacional e que utilizam a metodologia ACM001, pode-se verificar que o Projeto 0194 - *Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE)* foi o primeiro projeto registrado na CQNUMC, neste critério. Este aterro sanitário encontra-se atualmente encerrado e fica localizado na Cidade de São Paulo. Conforme apresentado no DCP do segundo período creditício, a operação de recebimento e destinação de RSU no aterro sanitário Bandeirantes iniciou em 1979, sendo encerrada em 2007, totalizando 37.226.856 toneladas de resíduos depositados (UNFCCC, 2021). Este projeto apresenta três períodos creditícios registrados com diferentes versões da metodologia ACM001 e diferentes frequências de certificação de RCEs, conforme demonstra a tabela abaixo:

Períodos creditícios	Versão da metodologia	Número de verificações
1º Período	versão 2	17
2º Período	versão 11	2
3º Período	versão 18	-

Tabela 8 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 0194.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

De acordo com os DCPs dos diferentes períodos creditícios deste projeto, a destruição de gás metano, consequentemente redução de emissão de gás de efeito estufa para a atmosfera, é feita através de queima em *flares* e geração de energia elétrica pela queima em motores de combustão interna.

Com base no exposto na Tabela 8, como não há verificação de monitoramento para o terceiro período creditício, consequentemente certificação de redução de emissão pela CQNUMC, este período não será utilizado para a determinação da eficiência. As previsões de emissão do projeto, que são informadas nos DCPs dos períodos creditícios, são anuais, já as reduções de emissões efetivamente realizadas são apresentadas por verificação, portanto, como as verificações são realizadas a critério do participante do projeto, em alguns casos não é possível ter a informação de redução de emissão de forma anual. Deste modo, a partir da 18^a verificação os valores de previsão de emissão foram somados de acordo com as verificações realizadas. Por este mesmo motivo, em 2010 faltam 9 dias correspondentes ao período de 23/12/2010 a 31/12/2010, que foram acrescidos ao período de 2011 a 2012 e neste mesmo período faltam 123 dias, correspondentes ao período de 01/09/2012 a 31/12/2012, que foram acrescidos no período de 2013 a 2017. Por fim, ficaram faltando 9 dias correspondentes ao período de 23/12/2017 a 31/12/2017, pois este período se enquadra dentro do terceiro período creditício, que ainda não foram realizadas verificações de Redução de Emissão.

A tabela 9 abaixo apresenta as previsões de emissões para o projeto para o primeiro e segundo período creditício e as respectivas reduções de emissões realizadas e os comentários realizados no parágrafo anterior:

Ano	Previsão de Redução de Emissão (tCO ₂ eq) de acordo com DCP	Reduções de Emissões Realizadas	Comentários sobre as Reduções de Emissão Realizadas
2004	748.624	518.041	
2005	1.086.919	578.349	
2006	1.364.960	612.195	
2007	1.236.153	726.764	
2008	1.120.186	588.130	
2009	1.015.780	373.889	
2010	931.316	304.232	* somente até 22/12/2010
2011	669.477	413.233	* Incluído período de 23/12/2010 até 31/12/2010
2012			*Até 31/08/2012
2013	1.075.328	842.000	* Incluído período de 01/09/2012 até 31/12/2012

2014
2015
2016
2017

* somente até 22/12/2017

Tabela 9 – Previsões de Emissão de tCO₂eq e Reduções de Emissões do projeto 0194.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

De forma a minimizar os impactos na determinação da eficiência em redução de GEE em função da realocação dos dias citados no parágrafo anterior, a eficiência é apresentada de 2 formas:

- Global: Considerando os valores totais de redução de emissão previstos no DCP em comparação ao resultado realizado, certificado pelo CQNUMC entre os anos de 2004 e 2017, obtendo-se o valor de 53,6%.
- Anual: Excluindo-se o período de 2011 a 2017, pois contemplam dias indevidos ou indispõem de dias, obtendo-se média de 49,7%, conforme apresentado pelo Gráfico 2, abaixo.

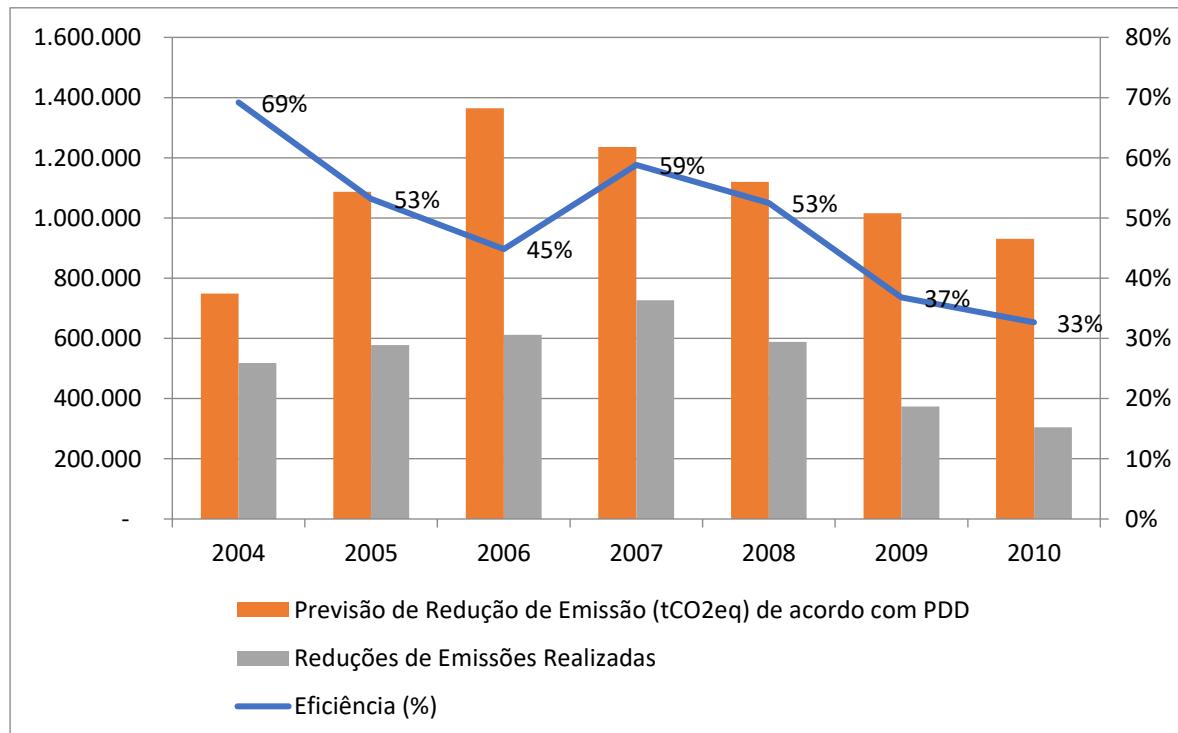


Gráfico 2 – Eficiência Anual (até 2010) projeto 0194.

Fonte: Adaptado UNFCCC (2021).

Importante ressaltar que o projeto de MDL foi implantado somente em 2004 (apesar do registro a partir de 2003), três anos antes do encerramento da operação do aterro sanitário, iniciada 1978, portanto, 25 anos de crescente emissão de metano para a atmosfera até a implantação do projeto. A figura 13 abaixo apresenta a imagem via satélite do aterro sanitário Bandeirantes obtida através do software *Google Earth*.



Figura 13 – Imagem via satélite do projeto 0194.

Fonte: Google (2021).

5.2 Projeto 4211 - *Manaus Landfill Gas Project*

A segunda previsão de redução de emissão de acordo com a Tabela 7 é do aterro sanitário de Manaus. Este projeto foi registrado em 8 de julho de 2011 e possui dois períodos creditícios, sendo o primeiro correspondente ao período de 08/07/2011 a 07/11/2018 e o segundo de 08/07/2018 a 07/07/2025. O DCP do segundo período creditício demonstra que o aterro sanitário

iniciou a operação em 1986 e não possui previsão de encerramento até o final do período (2025). Segundo o RIMA (Relatório de Impacto Ambiental) – Projeto de Implantação de um aterro sanitário para resíduos sólidos no município de Manaus, disponibilizado pelo IPAAM (Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas) e publicado em 2009, o aterro sanitário de Manaus foi implantado com o intuito de regularizar a destinação de RSU que era realizada no antigo lixão de Manaus, localizado na mesma região do empreendimento. O novo aterro sanitário de Manaus foi implantado em 2009 e foi projetado para receber e destinar resíduos sólidos urbanos por aproximadamente 15 anos (IPAAM, 2009). Segundo o DCP do segundo período creditício do projeto, a área (antigo lixão e atual aterro sanitário de Manaus) espera receber 31.800.212 toneladas de resíduos entre 1986 até 2025 (UNFCCC, 2021). Com relação à técnica de destruição de gás metano, o aterro sanitário de Manaus também utiliza *flares* e queima em motores à combustão interna para a geração de energia elétrica, entretanto, este último método foi implantado somente em 2019, conforme consta no DCP do segundo período creditício. A tabela 10 abaixo compila os intervalos dos períodos creditícios, versões da metodologia e número de verificações:

Períodos creditícios		Versão da metodologia	Número de verificações
1º Período	08/07/2011 - 07/11/2018	versão 11	12
2º Período	08/07/2018 - 07/07/2025	versão 18	4

Tabela 10 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 4211.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

As verificações de monitoramento deste projeto dispõem de cálculos mensais em planilhas eletrônicas compatíveis com o software *MS Excel*, portanto, diferentemente do projeto 0194, foi possível realizar uma comparação direta entre a emissão prevista informada nos DCPs e a redução de emissão efetivamente realizada (certificada) anualmente de 2011 a 2020, disponibilizadas no Relatórios de Monitoramento. O gráfico abaixo apresenta os dados obtidos para o projeto:

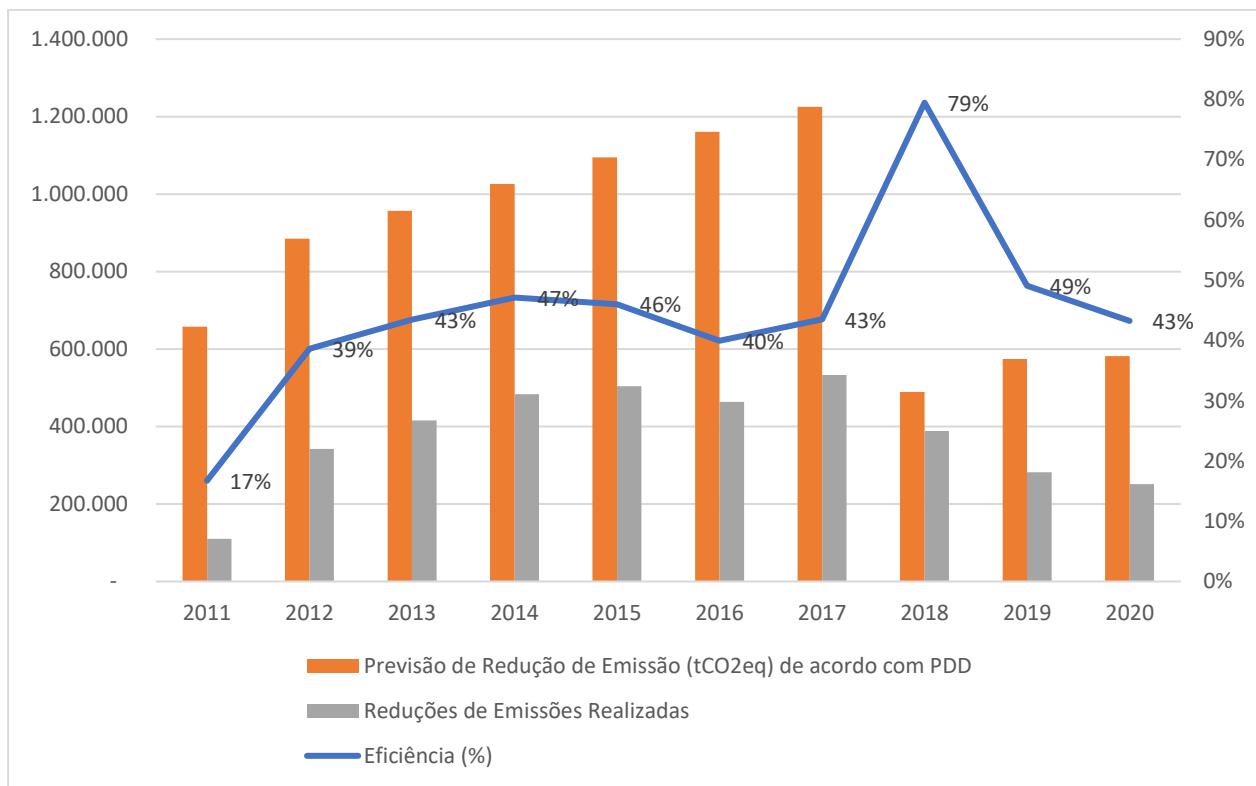


Gráfico 3 – Eficiência Anual projeto 4211.

Fonte: Adaptado UNFCCC (2021).

Conforme pode ser observado no Gráfico 3, comparando-se a efetiva redução de emissão com a redução de emissão prevista no DCP, a eficiência média é de 45%. É possível verificar também que em 2015 houve uma eficiência excepcional em comparação com os demais anos. Além disso, houve uma representativa redução na expectativa de redução emissão no DCP a partir de 2018, ano em que foi renovado o projeto (inclusão do segundo período creditício). Apesar de haver diferenças nos métodos de determinação de previsão de emissão nas diferentes versões da metodologia, consequentemente diferentes resultados/previsões, a grande diferença entre as previsões dos dois períodos é devido à quantidade de recebimento de RSU informada. O primeiro período creditício previa 43.812.284 toneladas de resíduos entre os anos de 1986 a 2021 e no segundo período creditício foi utilizada a previsão de 31.800.212 toneladas entre os anos de 1986 a 2025. Essa diferença entre as previsões de quantidade de RSU apresentada por DCP se iniciou em 2009.

Igualmente ao projeto do aterro sanitário Bandeirantes, o tratamento da emissão atmosférica do aterro sanitário de Manaus não foi concebido com o projeto do aterro, foi implantado somente anos após o início da operação de recebimento e destinação de RSU, neste caso, 25 anos após. A figura 14 abaixo apresenta a imagem via satélite do aterro sanitário de Manaus obtida através do software *Google Earth*.



Figura 14 – Imagem via satélite do projeto 4211.

Fonte: Google (2021).

4.6 Project 0373 - São João Landfill Gas to Energy Project (SJ)

O terceiro colocado com maior previsão de redução de emissão de acordo com a Tabela 7, com exceção do Gramacho, é o aterro sanitário São João, também localizado na cidade de São Paulo, igualmente ao aterro sanitário Bandeirantes. Este projeto foi registrado em 2 de julho de 2006 e possui dois períodos creditícios, sendo o primeiro correspondente ao período de 22 de maio de 2007 a 21 de maio de 2014 e o segundo de 22 de maio de 2014 a 21 de maio de 2021. O DCP do

segundo período creditício demonstra que o aterro sanitário iniciou a operação de recebimento e destinação de RSU em 1992 com encerramento em 2009, sendo destinadas 28.542.489 toneladas de resíduos (UNFCCC, 2021). De acordo com os DCPs dos dois períodos creditícios deste projeto, a destruição de gás metano, também é realizada através de queima em *flares* e geração de energia elétrica pela queima em motores de combustão interna. A tabela 11 abaixo compila os intervalos dos períodos creditícios, versões da metodologia e número de verificações:

Períodos creditícios	Versão da metodologia	Número de verificações
1º Período 22/05/2007 - 21/05/2014	versão 18	18
2º Período 22/05/2014 - 21/05/2021	versão 19	0

Tabela 11 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 0373.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

Apesar de o primeiro período creditício constar como versão 18 no *website* da CQNUMC, os Relatórios de Monitoramento de todas as verificações existentes, correspondentes ao período de 22 de maio de 2007 a 15 de maio de 2012, constam como versão 2 da metodologia. Isso é explicado no próprio *website* da CQNUMC, informando que houve uma alteração do projeto inicial (PRC - *Post Registration Changes*) aprovada em 12 de novembro de 2019. Esta pode ser uma das razões para a falta de certificações do final do primeiro período creditício e ausência de verificações para o segundo período.

A tabela 12 a seguir apresenta as emissões calculadas para o projeto referente ao primeiro período creditício e as respectivas reduções de emissões alcançadas, com exceção de 2012, que não foi verificado por completo (somente até 15 de maio de 2012):

Ano	Previsão de Redução de Emissão (tCO ₂ eq) de acordo com DCP	Reduções de Emissões Realizadas	Comentários sobre as Reduções de Emissão Realizadas
2006	682.287	-	Projeto ainda não havia sido implantado
2007	1.062.469	368.069	Reduções a partir de 01/06/2007
2008	960.678	653.981	
2009	869.033	590.359	
2010	786.523	484.303	
2011	712.237	289.214	
2012	645.356	85.355	Somente até 15/05/2012

Tabela 12 – Previsões de Emissão de tCO₂eq e Reduções de Emissões do projeto 0194.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

Conforme demonstrado na tabela acima, foram previstas reduções de emissões para o ano de 2006, mas o projeto não havia sido implantado ainda. O primeiro relatório de monitoramento informa que a unidade de captação e queima de biogás começou a operar no dia 1 de junho de 2007, conforme licença ambiental (UNFCCC, 2021). Pode-se observar também através do último relatório de monitoramento que o último ano do período creditício não está completamente verificado. As reduções de emissões de 2012 estão certificadas somente até 15 de maio de 2012. Como base nessas duas observações, excluindo-se do cálculo os anos de 2006, 2007 e 2012, a eficiência média do projeto é de 55%. O gráfico abaixo apresenta os dados obtidos para o projeto:

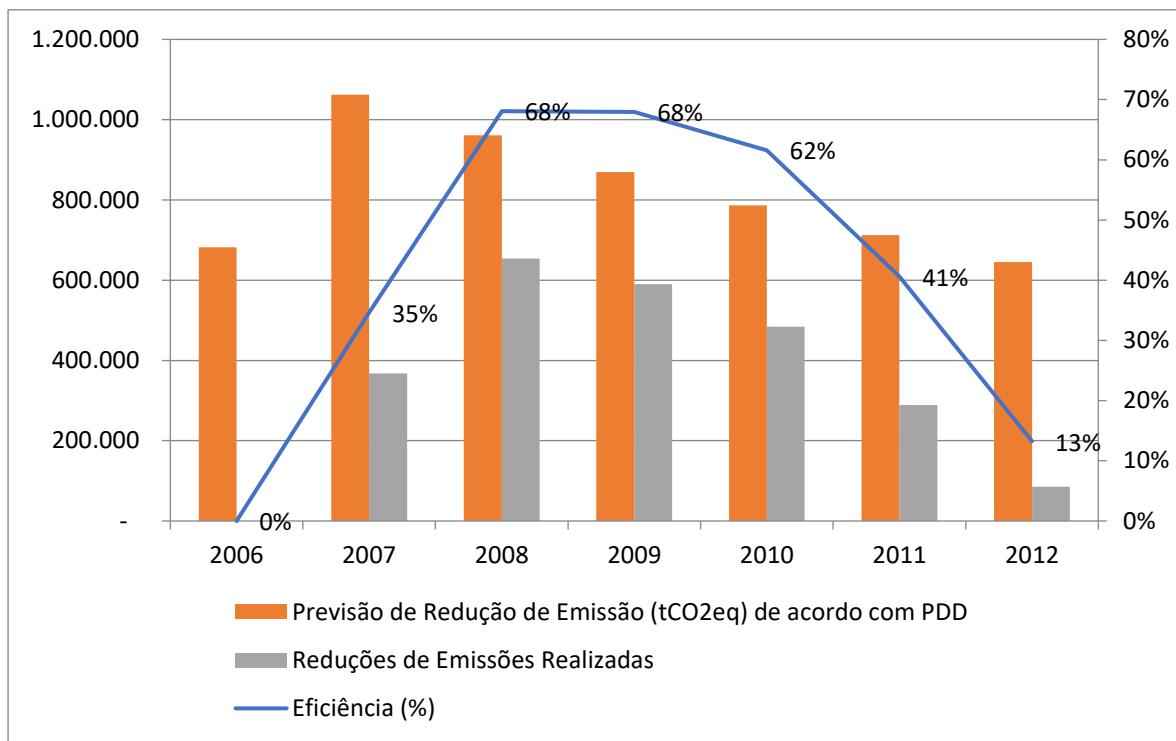


Gráfico 4 – Eficiência Anual projeto 0373.

Fonte: Adaptado UNFCCC (2021).

Igualmente aos dois projetos anteriores, o tratamento da emissão atmosférica do aterro sanitário São João foi implantado somente anos após o início da operação de recebimento e destinação de RSU, neste caso, 17 anos após.

5.3 Project 0171 - *Caieiras landfill gas emission reduction*

O quarto colocado com maior previsão de redução de emissão de acordo com a Tabela 7, com exceção do aterro sanitário de Gramacho é do aterro sanitário de Caieiras, também localizado no estado de São Paulo, mas em um município adjacente à cidade de São Paulo, chamado Caieiras. Este aterro sanitário foi concebido com o intuito de substituir o aterro sanitário Bandeirantes, que encerrou a operação de recebimento e destinação de RSU em março de 2007 (UNFCCC, 2021). De acordo com os DCPs do projeto, este aterro iniciou as atividades em 2002 e prevê recebimento até 2030, entretanto, segundo o RIMA (Relatório de Impacto Ambiental) – Ampliação da Central de Tratamento e Valorização Ambiental – CTVA Caieiras, disponibilizado pela prefeitura de São Paulo através do portal SigRH (Sistema Integrado de Gerenciamento de

Recursos Hídricos do Estado de São Paulo), está previsto ampliação do aterro sanitário, possibilitando recebimento de resíduos até 2036 (SIGRH, 2021). Segundo o terceiro e último DCP do projeto, este aterro espera receber em 27 anos (entre 2002 e 2029), 83.512.908 toneladas de RSU. O projeto foi registrado na CQNUMC em 09 de março de 2006 e também conta com a técnica de destruição de gás metano através de *flares* e queima em motores à combustão interna para geração de energia elétrica, igualmente aos projetos anteriores. A tabela 13 abaixo compila os intervalos dos períodos creditícios, versões da metodologia e número de verificações:

Períodos creditícios	Versão da metodologia	Número de verificações
1º Período	versão 02	7
2º Período	versão 13	13
3º Período	versão 19	2

Tabela 13 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 0171.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

Este projeto também apresenta particularidades que precisam ser avaliadas para o cálculo da eficiência. Apesar do registro e possibilidade de certificar reduções de emissões em 2006, houve atraso na implantação da unidade de captação e queima de biogás, sendo somente inaugurada em fevereiro de 2007, conforme demonstra o primeiro Relatório de Monitoramento publicado. Desta forma, a eficiência de mitigação de emissão de GEE para 2006 é 0%. Pelo mesmo motivo, a eficiência de 2007 foi afetada, pois não contempla o mês de janeiro de 2007. Também há divergências nos anos de 2012 e 2013. Há um relatório de monitoramento publicado referente ao período de 1 de outubro de 2012 a 30 de março de 2013, mas não foi aprovado pelo CQNUMC até o momento, portanto, não é possível considerar as reduções informadas como efetivamente realizadas. Quanto as previsões de reduções de 2013, cabe informar que este ano está contido entre os dois primeiros períodos creditícios, sendo que o primeiro contempla 2013 até 31 de março e o segundo a partir de 1 de setembro, desta forma, o período de 1 de abril a 31 de agosto não está contemplado para reduções de emissões pelo CQNUMC. Ainda sobre o ano de 2013, o primeiro relatório de monitoramento do segundo período creditício, correspondente ao período de 13 de dezembro de 2013 a 12 de junho de 2014 informa que as reduções de emissões referente a

2013 não foram reivindicadas, portanto, a eficiência de 2013 é 0%. A tabela 14 e o gráfico 5 abaixo apresentam as emissões calculadas para o projeto para e as respectivas reduções de emissões alcançadas, os comentários realizados no parágrafo anterior e as eficiências anuais:

Ano	Previsão de Redução de Emissão (tCO ₂ eq) de acordo com DCP	Reduções de Emissões Realizadas	Comentários
2006	79.926	-	* A previsão anual iniciou a partir de 31/03/2006 * Não houve certificação nesse ano devido a atrasos na implantação do projeto
2007	251.988	136.718	Sem certificação para janeiro de 2007
2008	516.038	362.420	
2009	671.818	506.544	
2010	903.827	589.338	
2011	1.161.016	673.140	
2012	1.382.469	677.550	Certificação somente até 30/09/2012
2013	434.309	-	* Este ano está contido em 2 períodos creditícios, sendo o primeiro até 31/03/2013 e o segundo a partir de 01/09/2013 * Não houve certificação neste ano
2014	1.018.120	613.227	
2015	1.092.640	532.153	
2016	1.163.119	780.321	
2017	1.230.221	1.103.350	
2018	1.294.507	964.723	
2019	1.356.453	1.359.360	
2020	1.387.586	1.050.419	

Tabela 14 – Previsões de Emissão de tCO₂eq e Reduções de Emissões do projeto 0171.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

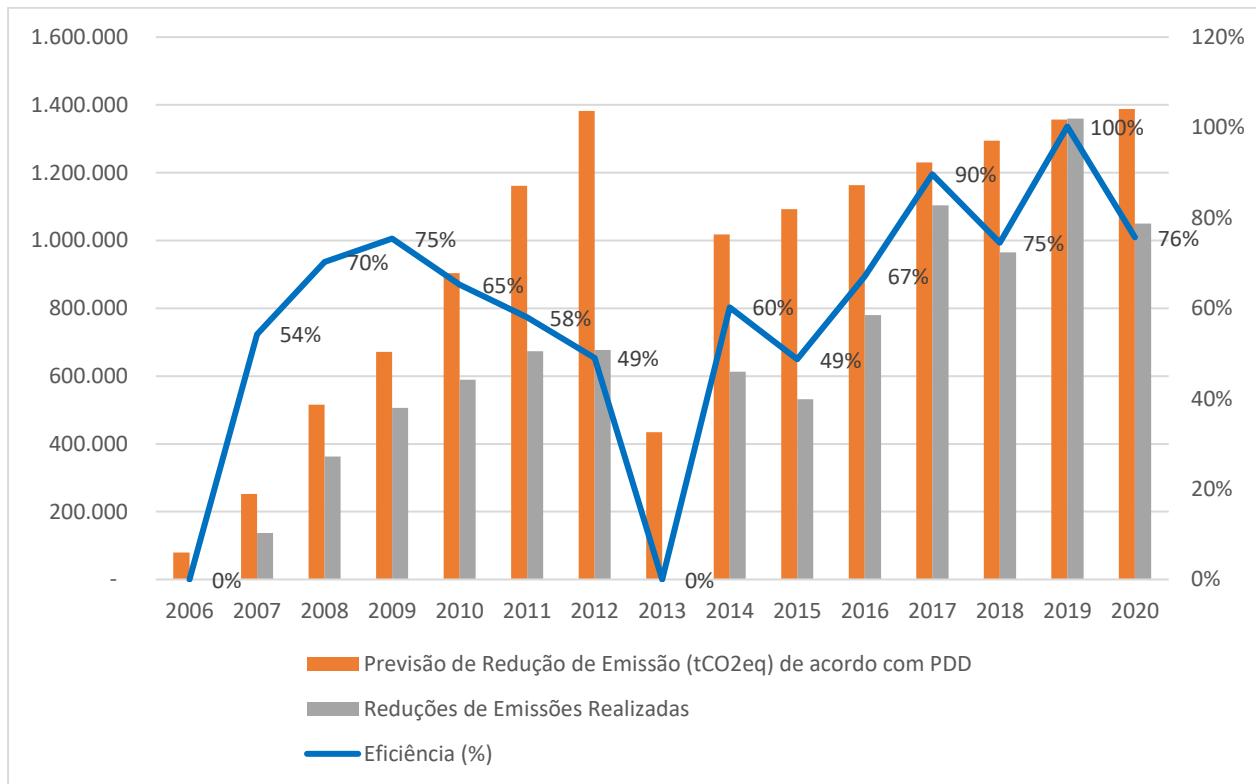


Gráfico 5 – Eficiência Anual projeto 0171.

Fonte: Adaptado UNFCCC (2021).

Com base nos comentários do parágrafo anterior, a tabela 15 e o gráfico 5, excluindo-se os anos em que a eficiência sofreu influência pela falta de certificação (2006, 2007, 2012 e 2013), a eficiência média do projeto é de 71%, muito superior aos projetos avaliados nos capítulos anteriores. Outro ponto de destaque é que este projeto alcançou os melhores resultados de eficiência até o momento, 90% e 100% em 2017 e 2019, respectivamente, sendo que em um dos dois semestres de cada um desses anos, a quantidade de redução de emissão foi levemente superior a previsão (3% e 8%, respectivamente). Neste caso a metodologia exige explicações do motivo do resultado. Nessas duas ocasiões (01/01/2017-30/06/2017 e 01/07/2019-31/12/2019) os relatórios de monitoramento explicam que a diferença está relacionada às incertezas do modelo matemático e que também houve pesado investimento no sistema de captação de biogás.

Diferentemente dos projetos anteriores e pelo fato de ser um empreendimento novo em comparação aos aterros sanitários apresentados até agora, o tratamento da emissão atmosférica do aterro sanitário de Caieiras foi implantado pouco tempo após o início da operação de recebimento

e destinação de RSU, neste caso, somente 5 anos após. A figura 15 abaixo apresenta a imagem via satélite do aterro sanitário de Caieiras obtida através do software *Google Earth*.



Figura 15 – Imagem via satélite do projeto 0171.

Fonte: Google (2021).

5.4 Project 5947 - CTL landfill Gas Project

O quinto e último projeto com maior previsão de redução de emissão conforme tabela 7 a ser avaliado por este trabalho também fica em São Paulo, na capital. Este projeto possui similaridade com o aterro Caieiras, pois foi concebido com o intuito de substituir um aterro sanitário encerrado, o aterro sanitário São João. Segundo consta no DCP do projeto, a sigla CTL refere-se à “Central de Tratamento de Resíduos Leste”, região onde o aterro sanitário São João está instalado (UNFCCC, 2021). Da mesma forma que os projetos anteriores, os DCPs deste projeto também apresentam as quantidades de RSU recebidos e previstos, indicando o início da operação em 2010 e com previsão de recebimento até 2027, totalizando 38.233.859 toneladas. Quanto ao projeto de MDL deste aterro sanitário, o registro ocorreu em 8 de maio de 2013 e possui 2

períodos creditícios, contando com a destruição de gás metano, utilizando-se de *flares*, queima em motores à combustão interna para geração de energia elétrica e, diferentemente dos demais projetos, purificação do biogás, entretanto, contemplado somente a partir de 2020. Mesmo considerando purificação de biogás a partir de 2020, esse método não foi utilizado conforme demonstram os relatórios de monitoramento, que apresentam os métodos utilizados para destruição de metano. Há uma particularidade quanto à geração de energia elétrica neste projeto, apesar de prever instalação de motogeradores no projeto, como o aterro sanitário CTL foi instalado praticamente adjacente ao aterro sanitário São João e como havia previsão de redução de geração de biogás no São João, foi realizado um contrato entre as empresas que operam ambos aterros para fornecimento de biogás do CTL para a usina termelétrica instalada no São João, conforme informação do DCP do segundo período creditício (UNFCCC, 2021). O mesmo DCP informa que é previsto o envio de aproximadamente 80% do biogás captado. A tabela 15 abaixo compila os intervalos dos períodos creditícios, versões da metodologia e número de verificações:

Períodos creditícios		Versão da metodologia	Número de verificações
1º Período	01/04/2013 - 31/03/2020	versão 17	7
2º Período	01/04/2020 – 31/03/2027	versão 19	1

Tabela 15 – Períodos creditícios, versões de metodologia e número de certificações (verificações) do projeto 5947.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

A tabela 16 e o gráfico 6 abaixo apresentam as emissões calculadas para o projeto e as respectivas reduções de emissões alcançadas, comentários e as eficiências anuais:

Ano	Previsão de Redução de Emissão (tCO ₂ eq) de acordo com DCP	Reduções de Emissões Realizadas	Comentários
2013	384.920	317.650	A previsão iniciou a partir de 01/04/2013
2014	661.358	293.345	
2015	743.260	698.719	
2016	799.183	913.463	
2017	822.808	720.979	
2018	887.683	669.534	
2019	938.621	652.251	
2020	977.913	679.357	

Tabela 16 – Previsões de Emissão de tCO₂eq e Reduções de Emissões do projeto 5947.

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021.

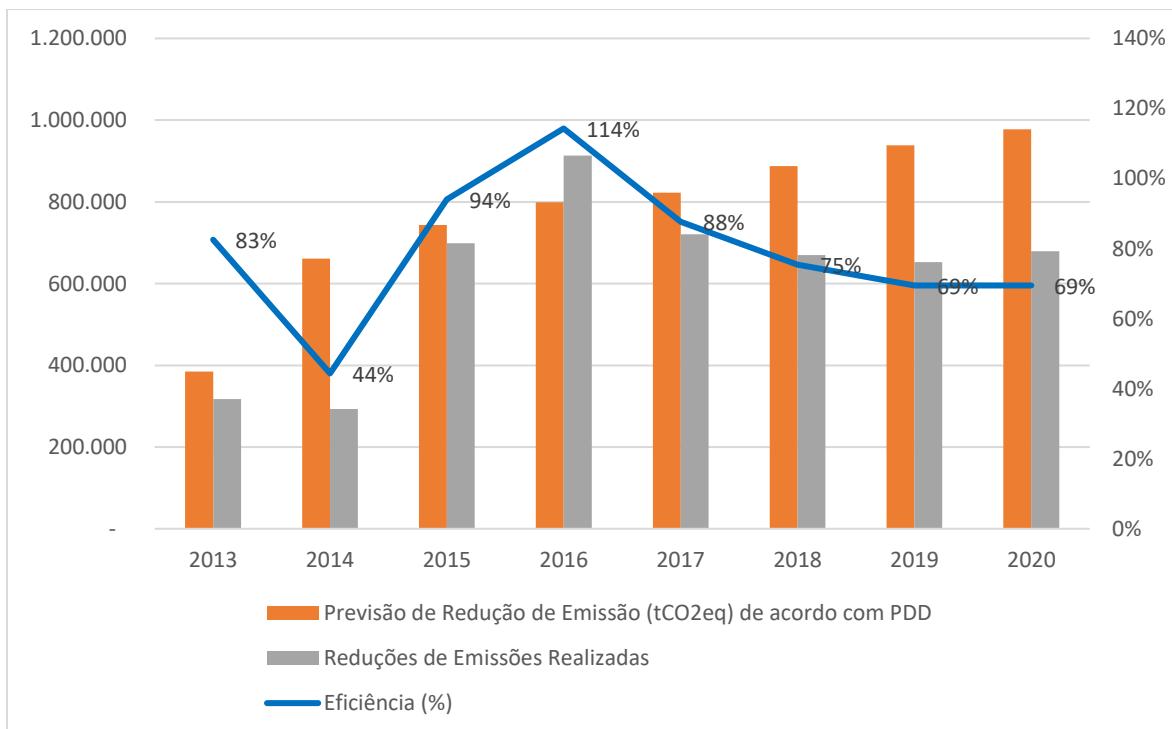


Gráfico 6 – Eficiência Anual projeto 5947.

Fonte: Adaptado UNFCCC (2021)

Dos objetos estudados claramente o projeto de MDL 5947 apresenta as melhores taxas de eficiência, atingindo eficiência média de 80%. Quanto às particularidades para cálculo de eficiência, não há ressalvas quanto as previsões de redução de emissão em comparação com as

reduções de emissão efetivamente realizadas, com exceção que o ano de 2013 é contabilizado, tanto para a previsão de redução quanto a efetiva redução a partir de 1 de abril, conforme comentário da tabela 17. Quanto a eficiência excepcional ocorrida em 2016, conforme determina a metodologia, é explicado o motivo através do relatório de monitoramento. O quarto relatório de monitoramento, correspondente ao período de 15 de setembro de 2014 a 27 de abril de 2017 explica os motivos, todos relacionados às premissas e variáveis utilizados para o cálculo da emissão de linha de base. Primeiramente, para o modelo matemático foi considerado que 35,78% do RSU era proveniente de matéria orgânica, sendo que o valor real era de 55,43%, afetando diretamente no real volume de biogás gerado. Este mesmo relatório aponta que foi previsto 70% de eficiência para o sistema de captação de biogás, sendo apurado no relatório 85%. Por fim, a concentração de gás metano prevista era de 50%, sendo que o valor medido através de analisadores de gás metano foi de 58%. A figura 16 abaixo apresenta a imagem via satélite dos aterros sanitários São João (parte superior) e CLT (parte inferior) obtida através do software *Google Earth*.



Figura 16 – Imagem via satélite dos projetos 0373 e 5947.

Fonte: Google (2021).

5.5 Resultados obtidos

Inicialmente foram avaliadas as eficiências médias dos cinco projetos avaliados no item 4 deste trabalho conforme tabela abaixo:

Identificação	Nome	Eficiência média (%)
0194	Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE)	52%
4211	Manaus Landfill Gas Project	45%
373	São João Landfill Gas to Energy Project (SJ)	55%
0171	Caieiras landfill gas emission reduction	71%
5947	<i>CTL Landfill Gas Project</i>	80%
-	Eficiência média	61%

Tabela 17 – Compilação das eficiências dos projetos objetos de estudo.

Fonte: O autor (2021).

Nos próximos itens serão apontados fatores que podem influenciar tanto positivamente, quanto negativamente a eficiência dos projetos.

5.6 Fatores que podem influenciar na eficiência

- **Modelagem matemática:** conforme informado no item 4 deste trabalho, a estimativa de emissão de gás metano pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente no RSU é feita por modelagem matemática e no caso de projetos de MDL, através da ferramenta metodológica número 04 emissões por unidades de disposição de resíduo sólido (*TOOL 04 Methodological tool – Emissions from Solid Waste Disposal Sites*), que está atualmente na versão 8. Por se tratar de cálculos empíricos, pode haver consideráveis diferenças entre a estimativa e a prática, ainda mais em versões mais antigas da metodologia, assumindo-se que as revisões são emitidas de forma a serem mais precisas. SANTOS (2015) informa que, considerando um período creditício de sete anos de um típico projeto de MDL de biogás de aterro sanitário no Brasil a diferença entre a emissão prevista e a redução de emissão efetivamente realizada pode chegar até 25%, embora que

há outras variáveis que podem influenciar esta diferença. Além das incertezas relacionadas à modelagem matemática é preciso considerar também que os dados a serem utilizados para o cálculo precisam ser o mais correto possível, caso contrário a estimativa se torna menos precisa. Conforme expostos nos itens 5.2 e 5.4 deste trabalho, a previsão errônea de recebimento de RSU para o aterro sanitário de Manaus no primeiro período creditício gerou uma previsão de geração de biogás muito mais alta indevidamente, fazendo com que a eficiência para esse período fosse reduzida, já o aterro sanitário CLT utilizou para o modelo matemático baixo teor de matéria orgânica presente no RSU, consequentemente, menor produção de biogás e maior eficiência de destruição de gás metano.

- **Premissas para determinação da linha de base:** a previsão de emissão de determinado aterro sanitário leva em consideração outros parâmetros além da modelagem matemática. O principal fator que influencia diretamente neste cálculo é a eficiência prevista para o sistema de captação. Esse e outros parâmetros são apresentados nos DCPs dos projetos. A tabela abaixo apresenta os valores adotados para os projetos estudados neste trabalho:

ID do projeto	Período creditício	Eficiência do sistema de captação previsto para o cálculo da linha de base
0194	1º período	80%
0194	2º período	85%
0194	3º período	50%
4211	1º período	80%
4211	2º período	80%
0373	1º período	80%
0373	2º período	50%
0171	1º período	80%
0171	2º período	92,80%
0171	3º período	92,80%
5947	1º período	85%
5947	2º período	85%

Tabela 18 – Eficiência do sistema de captação previsto para o cálculo da linha de base.

Fonte: O autor (2021).

Premissas de eficiência de captação maiores refletem em previsões de reduções maiores, consequentemente, possibilidade de diferenças maiores entre previsão e realização. Há outros fatores que influenciam as previsões de reduções como, desconto da linha de base pela queima em poços de biogás na ausência do projeto (20%) e fator de oxidação do metano na camada superior do aterro sanitário (10%), mas essas duas variáveis estão isoladas, pois quando consideradas, são utilizadas tanto na previsão de redução de emissão quanto no cálculo da redução (RCE).

5.7 Fatores que podem influenciar a eficiência negativamente

- **Impactos relacionados ao mercado de carbono:** apesar da possibilidade de obtenção de renda a partir da comercialização de energia elétrica gerada pela combustão de biogás em motogeradores e/ou a comercialização de biogás (bruto ou purificado) para terceiros, o crédito de carbono é uma receita importante para o mercado de biogás de aterro sanitário. Como o preço do crédito de carbono não é pré-definido e está relacionado a um complexo mercado que é influenciado pela atividade industrial e compromissos de redução de emissão dos países que aderiram ao Protocolo de Quioto e Acordo de Paris (demanda) e quantidade de RCEs disponível no mercado (oferta), o preço da tonelada de CO₂ equivalente sofre constantes alterações. O relatório de 2019 sobre o Estado e Tendências do Preço do Carbono publicado pelo Banco Mundial apresenta um gráfico com a flutuação do preço do RCE nos últimos anos:

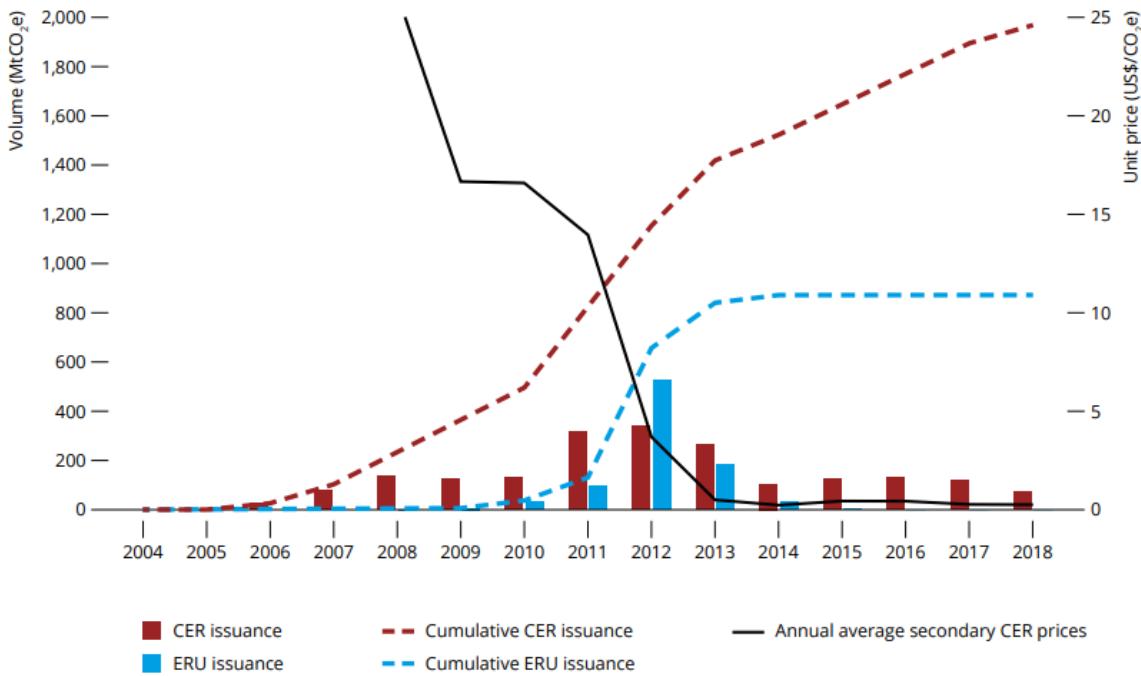


Gráfico 7: Histórico de emissões e preço de RCEs.

Fonte: Banco Mundial (2019).

As Unidades de Reduções de Emissões (*ERU – Emission Reduction Units*) não se aplicam a este trabalho, pois não fazem parte do MDL e sim da Implementação Conjunta (*Implementation Joint*), outro mecanismo do Protocolo de Quioto. O Gráfico 7 demonstra que o valor do RCE teve o maior valor de mercado registrado no início do Protocolo e que atualmente está com o menor valor registrado, na ordem de centavos de dólar por RCE.

Como há um custo operacional considerável, se o preço do RCE estiver muito baixo, os participantes dos projetos podem deixar de investir na captação de biogás, reduzindo a eficiência do sistema de captação ou simplesmente deixar de certificar as reduções. Se o preço do RCE estiver em um patamar que traga benefícios financeiros, o oposto é esperado. Além disso, esse fator pode ser determinante para instalação de novos projetos, tendo em vista o alto valor de investimento de uma unidade de captação e queima de biogás.

- **Indisponibilidades e similares:** fatores como falhas de equipamentos, manutenções, instalações e/ou ampliações que necessitam de paradas da unidade, acidentes, problemas de fornecimento de energia elétrica e limitações temporárias de processamento de gás podem influenciar diretamente na eficiência.
- **Disponibilidade de poços de biogás:** a disponibilidade dos poços de biogás dificilmente será de 100% em aterros que estão em operação, pois a área destinada para recebimento fica temporariamente indisponível para captação de biogás, pois o RSU não possui cobertura, os poços estão sendo alteados e há tráfego de veículos pesados. Geralmente, a disponibilidade dos poços de biogás só atinge 100% quando o aterro está expandindo em área, iniciando uma nova célula de base ou quando o aterro é encerrado. A disponibilidade afeta diretamente a eficiência de destruição de gás metano, quando não é de 100%.
- **Emissão fugitiva e material de cobertura:** mesmo que determinado aterro sanitário possua bom sistema de drenagem de biogás, com poços bem construídos e boa densidade de poços, o material utilizado para cobertura e vedação do resíduo tem importante influência no desempenho do sistema de captação. Se não apresentar boa vedação e boa drenagem pluvial (para evitar erosão), a pressão exercida pelo biogás gerado dentro do aterro sanitário pode fazer com que parte permeie o material de cobertura ao invés de percorrer a drenagem até os poços. BORBA (2018), encontrou emissões fugitivas através de medições diretas no aterro sanitário de Seropédica na ordem de $77,6 \text{ gm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e SILVA et. al. (2013) quantificaram $0,00126 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ no Aterro Sanitário Bandeirantes e $0,01222 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ no aterro sanitário de Caieiras, representando fuga total de metano no Bandeirantes na ordem de 16% e Caieiras de 35%. Aterros sanitários de depressões estão menos suscetíveis a emissões fugitivas em comparação a aterros sanitários de superfície, que possuem maior superfície de contato com a atmosfera. A qualidade do material de cobertura ou escassez dele também pode apresentar outro impacto negativo: a restrição de aplicação de vácuo. Conforme informado no capítulo 3.6 deste trabalho, é aplicado vácuo nos poços de biogás para condução do gás até a unidade de captação e queima. Se a vedação do entorno dos cabeçotes e drenagens de biogás não estiver adequada ou for de qualidade ruim (permeável), ar é succionado para dentro da

rede de captação, sendo necessária redução da aplicação de vácuo para alcançar níveis de concentração adequada para segurança (controle da concentração de comburente) e para o processamento do biogás, pois alguns processos possuem limites de concentração de metano, oxigênio e nitrogênio.

- **Desvios de monitoramento do MDL e eficiência padrão (*default*):** desvios do atendimento às regras do MDL podem diminuir a eficiência da redução de emissão de projetos. Fatores como, falta de calibração de analisadores e instrumentos, falta de licenciamento ambiental, perda de dados eletrônicos de monitoramento e operação de equipamentos fora da faixa de trabalho determinada pelos fabricantes são exemplos de não-atendimento às regras, ocasionando reduções de eficiência. Outra possibilidade de redução de eficiência, conforme demonstrado no item 3.6.1 deste trabalho, é a utilização de eficiências padrão para *flares*, nestes casos a eficiência de queima é reduzida em 10%, conforme determina a metodologia.
- **Dimensionamento inadequado:** fatores como rede de tubulação para captação de biogás subdimensionada, ocasionando elevada perda de carga ou falta de capacidade de processamento de gás podem afetar negativamente a eficiência.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de representar pouca contribuição de emissão de GEE para atmosfera em comparação com outras fontes em nível nacional (4%), conforme citado na introdução deste trabalho, é possível reduzir estas emissões. Cada possibilidade de redução de emissão de GEE é muito importante para o combate às mudanças climáticas, tendo em vista que não é possível reduzir consideravelmente ou zerar algumas emissões rapidamente com o atual estado industrial em que a sociedade se encontra, como por exemplo, a queima de combustível fóssil para geração de energia elétrica ou deslocamento. A criação da CQNUMC e o protocolo de Quioto possibilitaram a abertura de um mercado ambiental de biogás de aterro sanitário, com a comercialização de créditos de carbono e uso do biogás como combustível, proporcionando o devido tratamento deste efluente gasoso. Além disto, projetos de MDL relacionados ao biogás de aterro sanitário contribuem para a difusão de tecnologia limpa e estímulos a geração de

energia elétrica por meios alternativos e limpos. Outro benefício trazido por estes projetos é o desenvolvimento socioeconômico promovido na região onde são implantados, ocasionado pela geração de empregos e desenvolvimento na infraestrutura local.

Em contrapartida aos aspectos positivos dos projetos de biogás de aterros sanitários, conforme apontado no item 3.4 deste trabalho, 40,5% da destinação nacional de RSU é feita de forma inadequada (Aterros Controlados ou Lixões), que não possui sistema de captação e queima de biogás, portanto, com eficiência zero de redução emissão. Outro ponto a ser considerado é que, segundo o relatório Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos publicado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, através da Secretaria Nacional de Saneamento e Sistema de Informação sobre Saneamento (SNIS), em 2019 foram identificados 580 aterros sanitários registrados (SNIS, 2019) no país, sendo que neste trabalho foram identificados somente 47 projetos de MDL registrados, conforme informado no anexo 2. Embora que, para uma comparação mais assertiva, se faz necessário realizar um levantamento da quantidade de RSU nacional que está sendo destinada para aterros sanitários que possuem projeto de MDL, além de considerar também se estes projetos foram efetivamente implantados e estão em operação, como por exemplo o caso do Gramacho, que foi registrado, porém, sem emissões de RCEs. Por fim, não menos importante, é preciso considerar também, que mesmo com projeto de MDL, as taxas de eficiência de destruição de metano são da ordem de 60%, conforme demonstrado por esse trabalho.

7. ANEXOS

7.1 Anexo 1 - Tabela de especificação do Biometano oriundo de aterros e estações de tratamento de esgoto.

Característica	Unidade	Limite (1)			Método					
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO	NF		
Poder Calorífico Superior	kJ/m ³	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000		15213	3588	6976			
	kWh/m ³	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94							
Índice de Wobbe	kJ/m ³	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500		15213		6976			
Metano, mín.	% mol.	90	90		14903	1945	6974			
Etano (2)	% mol.	anotar	anotar		14903	1945	6974			
Propano (2)	% mol.	anotar	anotar		14903	1945	6974			
Butanos e mais pesados (2)	% mol.	anotar	anotar		14903	1945	6974			
Oxigênio, máx.	% mol.	0,8	0,8		14903	1945	6974			
CO ₂ , máx.	% mol.	3	3		14903	1945	6974			
CO ₂ + O ₂ +N ₂ , máx.	% mol	10			14903	1945	6974			
Enxofre Total, máx.(3,4)	mg/m ³	70			15631	5504	6326-3 6326-5 19739			
Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx.	mg/m ³	10			15631	D4084 ? 07	6326-3 19739			

					D4323 ? 15 5504 6228		
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx. (5)	°C	-39	-39	-45	15765	5454	6327 10101-2 10101-3 11541
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos (6, 7)	°C	15	15	0	16338		23874
Teor de siloxanos, máx.	mgSi/m ³	0,3	0,3		16560 16561		
Clorados, máx.	mg (Cl/m ³)	5	5				1911
Fluorados, máx.	mg (F/m ³)	5	5			15713	X43-304

(1) Os limites especificados são valores referidos a 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1atm) em base seca, exceto os pontos de orvalho de hidrocarbonetos e de água.

(2) A determinação somente deve ser realizada quando houver adição de gás natural, GLP ou propano.

(3) A odoração do Biometano quando necessária deverá atender à norma ABNT NBR 15616 e NBR 15614.

(4) É o somatório dos compostos de enxofre presentes no Biometano, devendo a periodicidade ser definida, conforme a análise de risco.

(5) Caso a determinação seja em teor de água, a mesma deve ser convertida para ponto de orvalho em (°C), conforme correlação da ISO 18453. Quando os pontos de recebimento e de entrega estiverem em regiões distintas, observar o valor mais crítico dessa característica na especificação.

(6) O ponto de orvalho de hidrocarbonetos só precisa ser analisado quando houver adição de propano ou GLP, devendo a medição para fins do certificado de qualidade ser feita em linha após o enriquecimento do gás. O ponto cricondentherm da mistura deve ser calculado por meio de equação de estado com base nas composições obtidas nas cromatografias convencional e estendida, reportando o valor encontrado como

ponto de orvalho de hidrocarbonetos. Caso a presença de hexanos e mais pesados não tenha sido detectada na cromatografia convencional, fica dispensada a necessidade de se realizar a cromatografia estendida.

(7) Fica dispensada a análise do ponto de orvalho de hidrocarbonetos para o caso do enriquecimento com gás natural.

Fonte: ANP, 2017

7.2 Anexo 2 - Projetos de MDL que utilizam a metodologia ACM 001 registrados no Brasil.

Data de Registro	Título	Local de implantação	Outros participantes	Metodologia	Reduções *	Referência
20/02/2006	Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE)	Brasil	Suíça, Holanda, Alemanha	ACM0001 ver. 2	1070649	164
09/03/2006	Caieiras landfill gas emission reduction	Brasil	Suíça, Japão, Noruega	ACM0001 ver. 2	770932	171
02/07/2006	São João Landfill Gas to Energy Project (SJ)	Brasil	Suíça, Alemanha	ACM0001 ver. 18	816940	373
15/12/2006	Anaconda Landfill Gas Project	Brasil	Suíça	ACM0001 ver. 3	120423	226
31/12/2006	Central de Resíduos do Recreio Landfill Gas Project (CRRLGP)	Brasil	Suíça, Japão, Reino Unido da Grã-bretanha, Irlanda do Norte Canadá, Japão, Reino Unido da Grã-bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 15	107881	648
08/04/2007	Canabrava Landfill Gas Project	Brasil	União da Grã-bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 4	202867	893

30/04/2007	Aurá Landfill Gas Project	Brasil	Noruega, Reino Unido da Grã- bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 4	320151	888
27/05/2007	Quitaúna Landfill Gas Project (QLGP)	Brasil		ACM0001 ver. 4	95030	912
17/08/2007	ESTRE Itapevi Landfill Gas Project (EILGP)	Brasil	Suíça, Reino Unido da Grã- bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 4	90575	911
14/10/2007	URBAM/A RAUNA - Landfill Gas Project (UALGP)	Brasil	Suíça	ACM0001 ver. 5	116909	1247
15/10/2007	Embralixo/A raúna - Bragança Landfill Gas Project	Brasil	Suíça, Reino Unido da Grã- bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 5	66399	1179
30/01/2008	PROBIOGA S-JP – João Pessoa Landfill Gas Project	Brasil	Suíça, Reino Unido da Grã- bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 5	211150	1165
12/02/2008	ESTRE Pedreira Landfill Gás Project (EPLGP) Terrestre	Brasil	Suíça	ACM0001 ver. 5	186315	1134
06/05/2008	Ambiental Landfill Gás Project CTRVV	Brasil	Suíça	ACM0001 ver. 5	100222	1133
28/05/2008	Landfill emission	Brasil	Suíça	ACM0001 ver. 5	94454	1491

		reduction project					
29/05/2008	Alto-Tietê landfill gas capture project	Brasil	Reino Unido da Grã-bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 5	480595	1636	
12/07/2008	Feira de Santana Landfill Gas Project Proactiva	Brasil		ACM0001 ver. 6	42572	1626	
13/08/2008	Tijuquinhas Landfill Gas Capture and Flaring project SANTECH	Brasil	Suíça, Espanha, França	ACM0001 ver. 5	131194	1506	
19/02/2009	Saneamento & Tecnologia Ambiental Ltda. – SANTEC Resíduos landfill gas emission reduction Project Activity Gramacho	Brasil		ACM0001 ver. 6	39478	1908	
Retirado	Landfill Gas Project Natal	Brasil		ACM0001 ver. 9	852367	2548	
Retirado	Landfill Gas Recovery Project	Brasil		ACM0001 ver. 11	99091	3812	
04/06/2011	Exploitation of the biogas from Controlled Landfill in Solid Waste	Brasil	Suíça	ACM0001 ver. 11	134160	3464	

	Management Central – CTRS / BR.040					
08/07/2011	Manaus Landfill Gas Project	Brasil	Canadá, Noruega, Reino Unido da Grã- bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 11	1031574	4211
11/08/2011	Itaoca Landfill Gas Project	Brasil	Espanha	ACM0001 ver. 11	25887	4657
29/09/2011	CTR Candeias Landfill Gas Project	Brasil	Suíça, Alemanha, Suécia, Noruega, Espanha	ACM0001 ver. 11	155112	3958
08/05/2012	CTL Landfill Gas Project CGR	Brasil	Suíça, Noruega	ACM0001 ver. 17	737221	5947
18/07/2012	Guatapara Landfill Project	Brasil		ACM0001 ver. 11	211924	6553
04/09/2012	Uberlândia landfills I and II	Brasil	Suíça, Reino Unido da Grã- bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 12	99124	7110
17/10/2012	Natal Landfill Gas to Energy Project Projeto de Gás de Aterro	Brasil		ACM0001 ver. 12	161335	7637
23/10/2012	TECIPAR – PROGAT ENGEPE & BEGREEN CDM Project at	Brasil	Suíça	ACM0001 ver. 18	35992	7799
09/11/2012		Brasil		ACM0001 ver. 12	106154	8011

	UTGR – Jambeiro Landfill Constroeste Landfill Gas to Energy Project Proactiva CGA Iperó	Brasil		ACM0001 ver. 12	156203	8603
11/12/2011	Landfill Gas to Energy Project Gramacho Landfill Gas Project ESTRE	Brasil	Suíça	ACM0001 ver. 12	114937	8751
26/12/2012	Piratininga Landfill Gas Project ITVR Sao Leopoldo landfill gas project	Brasil		ACM0001 ver. 13	313751	9087
26/12/2012	CTR Rosario Landfill Gas Project CGR CATANDU VA LANDFILL GAS PROJECT CPTR Marituba landfill gas project	Brasil	Noruega	ACM0001 ver. 13	68899	8213
27/12/2012	Brasil			ACM0001 ver. 13	33141	9290
26/02/2013	Brasil			ACM0001 ver. 19	63981	8242
08/03/2013	CATANDU VA LANDFILL GAS PROJECT CPTR Marituba landfill gas project	Brasil		ACM0001 ver. 13	70210	8205
21/06/2013	Brasil					9298
24/06/2013	CTDR Bob Ambiental landfill gas project	Brasil		ACM0001 ver. 13	110633	
24/06/2013	Rio Grande landfill gas project	Brasil		ACM0001 ver. 13	77851	9295
28/06/2013	CTR da Caturrita	Brasil		ACM0001 ver. 13	11436	9300
				ACM0001 ver. 13	31957	9302

	landfill gas project MACAÚBA S					
31/07/2013	LANDFILL GAS PROJECT CTR Maceio Landfill Gas Project	Brasil		ACM0001 ver. 13	377528	9063
24/08/2013		Brasil		ACM0001 ver. 13	116336	9228
22/05/2014	Canhanduba Landfill Project	Brasil	Reino Unido da Grã- bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 13	78269	9943
13/04/2016	Dois Arcos Landfill Gas Project Activity Oeste de Caucaia	Brasil		ACM0001 ver. 15	60283	10257
22/04/2016	Landfill Project Activity	Brasil	Reino Unido da Grã- bretanha, Irlanda do Norte	ACM0001 ver. 15	523569	10261

* Reduções de Emissões estimada em toneladas de CO₂ equivalente por ano (conforme declarado pelo participante do projeto).

Fonte: Adaptado UNFCCC, 2021

8. REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8.419 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos urbanos - Procedimento.** 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004 - Resíduos Sólidos - Classificação.** 2004.

ABELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – Panorama 2020.** 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 25/08/2021.

ALMEIDA, G. H. T. D. **Monitoramento pelo biogás produzido pela biodegradação de resíduos sólidos urbanos confinados em lisímetros.** Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, 2016. 148p.

AMLURB - Autoridade Municipal de Limpeza Urbana da Cidade de São Paulo (2021). **Quantitativos – Resíduos Coletados no Município.** Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/subprefeituras/amlurb/index.php?p=185375>. Acesso em: 25/08/2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Biometano.** Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano>. Acesso em: 10/09/2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Resolução N° 685, de 29 de Julho de 2017.** 2017.

BORBA P. F. S.; MARTINS E. M.; CORREA S. M.; RITTER E. - **Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, n. 1, p. 101-111.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Biogás - Definição.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>. Acesso em: 30/08/2021.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2007). **Noticentro – Gestão de Resíduos Sólidos na Cidade de São Paulo.** Disponível em: https://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/10/pref_saopaulo.pdf. Acesso em: 30/08/2021.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Softwares - Programa para Cálculo de Geração de Biogás e Opções de Uso Energético.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/softwares/>. Acesso em: 28/09/2021.

COMLURB – Companhia Municipal de Limpeza Urbana (2011). **A empresa – Perfil.** Disponível em: http://comlurb.rio.rj.gov.br/emp_perfil.asp. Acesso em: 26/07/11.

COMLURB – Companhia Municipal de Limpeza Urbana. **Caracterização dos Resíduos Sólidos Domiciliares da Cidade do Rio de Janeiro.** 2016. 85p.

EDUFES – Editora da Universidade Federal do Espírito Santo. **Oportunidades Enterradas – Geração Elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos.** 2019. 320p.

ENERGÊS – A linguagem da energia. **O que é Flare de Biogás.** 2020 Disponível em: <https://energes.com.br/o-que-e-flare-para-biogas/>. Acesso em: 10/09/2021.

ENGECORPS – Corpo de Engenheiros Consultores. **Rel.: 064-SSO-NODB173. Estado da Arte dos Aterros Sanitários – Parte II,** abril. 233p, 1996.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Basic Information about Landfill Gas.** Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>. Acesso em: 18/08/2021.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Emissions Estimation Tools - LandGEM.** Disponível em: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/emissions-estimation-tools>. Acesso em: 28/09/2021.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **LFG Energy Project Development Handbook,** 2021. 143p. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/pdh_full.pdf. Acesso em: 09/09/2021.

FIGUEIREDO, N. J. V. – **Utilização de biogás de aterro para geração de energia elétrica – Estudo de caso.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. 2011. 148p.

GABAÍ, I. Incineração e dioxinas. **Marechal Deodoro – CINAL**, 1994. 7p. (VINIL ALERTA - grupo técnico).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama da Cidade de São Paulo.** 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>. Acesso em: 25/08/2021.

ICLEI – Brasil – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários.** ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009. 80p.

IPAAM – Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas. **Aterro Sanitário para Resíduos Sólidos município de Manaus – RIMA – Relatório de Impacto Ambiental - Projeto de Implantação de um aterro sanitário para resíduos sólidos no município de Manaus.** 2009. Disponível em: <http://www.ipaam.am.gov.br/epia-rima-aterro-sanitario/>. Acesso em: 12/10/2021.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental n° 3 - Brasil e o Mercado de Carbono.** 2009. 136p. SBS – Quadra 1 – Bloco J – Ed. BNDES, Térreo 70076-900 – Brasília – DF

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **CHAPTER 2 - Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.** 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf>. Acesso em: 25/08/2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Forth Assessment Report.** PARRY, M.; CANZIANI, O.; PALUTIK J.; LINDEN P; HANSON C. (Ed.). Cambridge University Press, 2007. 976p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2001: the scientific basis.** HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C.A. (Ed.). Cambridge University Press, 2001. 881p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 5: Waste.** 2006. EGGLESTON H.S., BUENDIA L., MIWA K., NGARA T. and TANABE K. (Ed.). Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japão.

IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo S.A. - **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado.** Compromisso Empresarial para Reciclagem CEMPRE, Publicação IPT 2622, 2 ed. São Paulo, 2000. 370p.

INTERNATIONAL BANK FOR RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT / WORLD BANK GROUP. **State and Trends of Carbon Pricing 2019.** Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/191801559846379845/pdf/State-and-Trends-of-Carbon-Pricing-2019.pdf> Acesso em: 18/10/2021.

JUCÁ, T. J. **Destinação Final dos Resíduos Sólidos no Brasil: Situação Atual e Perspectivas.** In: SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 10, 2002, Braga. Anais. Pernambuco: Universidade Federal de Pernambuco, 2002. 18p.

KAIMOTO, A.L.; LEITE, E.F.; COELHO, G.E. **Considerações sobre aproveitamento do Biogás em Aterro Sanitário.** 1^a ed. São Paulo: Cepollina, 2005. 8p.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos / Felipe Jucá Maciel.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2009. 32p.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa, 4a. Edição.** Tabela 22, p.84. MCTIC, 2017. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 25/08/2021.

PARIS, A. G. **Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa Listados no Protocolo de Quioto pelo aproveitamento do gás gerado em aterros sanitários utilizando células a combustível de óxido sólido.** Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Autarquia associada à Universidade de São Paulo, 2007. 144p.

ROCHA, T. M. **Aquecimento Global e o Mercado de Carbono: Uma Aplicação do Modelo Cert.** Tese (Doutorado Ciências, Área de Concentração: Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. 214 p.

ROSSINI, M. H. **Análise da potencialidade de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário na cidade de Itapeva/SP.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado – Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus Experimental de Itapeva, Itapeva, 2018. 82 p.

SANTOS M.M.O; VAN ELK A.G.P; ROMANEL C. **A correction in the CDM methodological tool for estimating methane emissions from solid waste disposal sites.** Journal of Environmental Management Volume 164, 2015. 222 p.

Senado Federal – Agência Senado. **Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação coordenada entre governos e cooperativas de catadores.** 2021. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2021/06/aumento-da-producao-de-lixo-no-brasil-requer-acao-coordenada-entre-governos-e-cooperativas-de-catadores>. Acesso em: 25/08/2021.

SIGRH – Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo - **RIMA (Relatório de Impacto Ambiental) – Ampliação da Central de Tratamento e Valorização Ambiental – CTVA Caieiras.** Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/events/CBH-AT/4333/volivrimactvacaieiras.pdf>. Acesso em: 16/10/2021.

SILVA, T. N; FREITAS F. S. N.; CANDIANI G. - **Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte.** 2013. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 18, n. 2, p. 95-104.

SILVA, T. N. **Diagnóstico da Produção de Biogás em um Aterro Sanitário: Estudo de Caso no Aterro Bandeirantes.** Dissertação de Mestrado – Universidade do Vale do Itajaí, 2006. 139 p.

SNIS – Sistema de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos.** 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico-SNIS-RS-2019-Capitulo-11.pdf>. Acesso em: 20/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **AM0002: Greenhouse gas emission reductions through landfill gas capture and flaring where the baseline is established by a public concession contract --- Version 3.0.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/IT3SW95L6VIB0SO2NYFO4D77CFBTG9>. Acesso em: 03/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **AM0003: Simplified financial analysis for landfill gas capture projects --- Version 4.0.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/UA6E403CCC53CLPKTE82HC58HOT95P>. Acesso em: 03/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **AM0010: Landfill gas capture and electricity generation projects where landfill gas capture is not mandated by law --- Version 1.0.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/Y8RY70J75E8D78IL19OV09ZDNNA712>. Acesso em: 03/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **AM0011: Landfill gas recovery with electricity generation and no capture or destruction of methane in the baseline scenario --- Version 3.0.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/FX0ME3E0UWV7JBAW8829TJ31FLYSTU>. Acesso em: 03/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **CDM Programmes of Activities.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/ProgrammeOfActivities/index.html>. Acesso em: 03/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **CPA 6573-P1-0001-CP1 : CPA-1: Landfill gas recovery, energy generation and biogas distribution from CTR Santa Rosa.** Disponível em: https://cdm.unfccc.int/ProgrammeOfActivities/cpa_db/XQMN648JU5LVRAC2OBFE3H1PW0KG79/view. Acesso em: 07/09/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Emissions from Solid Waste Disposal Sites (version 8).** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v8.0.pdf>. Acesso em: 28/09/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Fact Sheet: The need for mitigation.** 2009. Disponível em: https://unfccc.int/files/press/backgrounder/application/pdf/press_factsh_mitigation.pdf. Acesso em: 06/09/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Greenhouse Gas Inventory Data - Detailed data by Party.** Disponível em: https://di.unfccc.int/detailed_data_by_party. Acesso em: 16/09/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Project 0164 : Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE).** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1134130255.56/view?cp=1>. Acesso em: 10/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Project 0171 : Caieiras landfill gas emission reduction.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1134509951.62/view?cp=1>. Acesso em: 14/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Project 0373 : São João Landfill Gas to Energy Project (SJ).** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1145141778.29/view?cp=1>. Acesso em: 12/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Project 2548 : Gramacho Landfill Gas Project.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1240997957.64/view>. Acesso em: 08/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Project 4211 : Manaus Landfill Gas Project.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1291802325.34/view?cp=1>. Acesso em: 12/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Project 5947 : CTL Landfill Gas Project.** Disponível em: https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/LRQA_Ltd1332768548.38/view?cp=1. Acesso em: 16/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Project 9087 : Gramacho Landfill Gas Project.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1356155404.95/view>. Acesso em: 10/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Project Search.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>. Acesso em: 03/10/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **UNFCCC Archival Holdings.** Disponível em: <https://unfccc.int/about-us/unfccc-archives/unfccc-archival-holdings>. Acesso em: 15/09/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **What is the United Nations Framework Convention on Climate Change?.** Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>. Acesso em: 15/09/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **The Clean Development Mechanism.** Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>. Acesso em: 16/09/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **The Paris Agreement.** Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 16/09/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane (version 3).** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-06-v3.0.pdf>. Acesso em: 09/09/2021.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Verify and Certify ERs of a CDM project activity.** Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/pac/howto/CDMProjectActivity/VerifyCertify/index.html>. Acesso em: 17/10/2021.

TERMOVERDE. Unidade de Valorização Sustentável. Disponível em: <https://www.termoverde.com.br/>. Acesso em: 10/09/2021.