

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

JULIANA GONÇALEZ JUSTI PEDOTT

AVALIAÇÃO DE RESULTADOS E CAUSAS DO INSUCESSO NA GERAÇÃO DE
CRÉDITOS DE CARBONO NOS ATERROS BANDEIRANTES E SÍTIO SÃO JOÃO

SÃO PAULO
2014

JULIANA GONÇALEZ JUSTI PEDOTT

**AVALIAÇÃO DE RESULTADOS E CAUSAS DO INSUCESSO NA GERAÇÃO DE
CRÉDITOS DE CARBONO NOS ATERROS BANDEIRANTES E SÍTIO SÃO JOÃO**

**Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Administração da
Universidade Nove de Julho (UNINOVE),
como requisito para a obtenção do grau de
mestre em Gestão Ambiental e
Sustentabilidade.**

**Orientador: Prof. Dr. Alexandre Oliveira
e Aguiar**

SÃO PAULO

2014

Pedott, Juliana Gonzalez Justi.

Avaliação de resultados e causas do insucesso na geração de créditos de carbono nos Aterros Bandeirantes e Sítio São João. /Juliana Gonzalez Justi Pedott. 2014.

169 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Oliveira e Aguiar.

JULIANA GONÇALEZ JUSTI PEDOTT

AVALIAÇÃO DE RESULTADOS E CAUSAS DO INSUCESSO NA GERAÇÃO DE
CRÉDITOS DE CARBONO NOS ATERROS BANDEIRANTES E SÍTIO SÃO JOÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Administração da Universidade Nove de Julho (UNINOVE), como requisito para a obtenção do grau de mestre em Gestão Ambiental e Sustentabilidade, pela Banca Examinadora, formada por:

Presidente: Prof. Dr. Alexandre de Oliveira e Aguiar

Membro: Profa. Dra. Wanda Maria Risso Günther

Membro: Prof. Dra. Cláudia Echevengúá Teixeira

São Paulo, 24 de março de 2014.

Dedico este trabalho ao meu marido Gabriel, à
minha mãe Nelly e aos meus pais de coração,
Alvaro e Maribel.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos ao meu orientador pela paciência, confiança, incentivo e horas de seus finais de semana. Tudo isso certamente contribuiu para o meu aprendizado e desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu marido, minha família e meus amigos que me apoiaram em todos os momentos e compreenderam minhas ausências enquanto me dedicava aos estudos.

A minha grande amiga do Mestrado e da vida Taísa Cecília de Lima Caires, por me acompanhar nesta empreitada e me apoiar em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

Aos meus colegas de trabalho, em especial Cintia Philippi Salles, por me incentivar a continuar os estudos, Giuliana Jorge Netto, Bruna Bianca Pasquini, Fernanda Gomes Correa e Luiza Chantre Azevedo, que me acalmaram em alguns momentos e, em outros, me incentivaram a continuar no desenvolvimento deste estudo.

Aos amigos Anderson Alves da Silva e Douglas Ramponi, Gerentes da Biogás e São João Energia Ambiental S.A, respectivamente, que colaboraram de maneira ímpar com a minha pesquisa.

RESUMO

Um dos gases com maior potencial de aquecimento global é o metano (CH_4), sendo 25 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono (CO_2). A emissão de metano ocorre em diversas atividades antrópicas, entre elas nos aterros sanitários. Com a ratificação do Protocolo de Kyoto e a implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) pela *United Nation Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), foram registrados nesta organização diversos projetos em aterros sanitários. Os projetos captam o metano que seria emitido à atmosfera e o direciona para a geração de energia elétrica ou queima em alta temperatura. Projetos de MDL deveriam ser economicamente rentáveis, tendo em vista a venda dos créditos de carbono e da energia gerada. O presente trabalho visa o estudo de caso dos dois maiores projetos de MDL em aterros sanitários do Brasil – Aterro Sanitário Bandeirantes e Aterro Sanitário São João que vem gerando menos créditos que o previsto. Foram analisadas variáveis que podem influenciar as diferenças entre o volume de biogás e créditos de carbono estimados no início dos projetos e o real captado. A metodologia utilizada foi o estudo de casos múltiplos a fim de realizar uma comparação entre a estimativa de produção de biogás e créditos de carbono e o real captado nos Projetos dos Aterros Bandeirantes e São João. As evidências para o estudo vieram de seis fontes distintas: documentos, registros em arquivos, entrevistas, observação direta, observação participante e artefatos físicos. Os resultados apontam que as diferenças entre as estimativas de produção e o real captado podem ser em decorrência de fatores, como pH, umidade, tipo de cobertura (solo e grama), metodologia de estimativa e o modelo de arranjo institucional dos projetos estudados. Conclui-se que os créditos de carbono e geração de energia elétrica nos Projetos dos Aterros Bandeirantes e São João foram superestimados por utilizarem uma metodologia que não previa diversos parâmetros que interferem diretamente na produção de biogás e sofrem as consequências financeiras pela não geração de energia elétrica e créditos de carbono. Sugere-se que o monitoramento de parâmetros que interferem diretamente na produção de biogás seja realizada em conjunto entre o operador do aterro e o proponente do projeto para facilitar a identificação de problemas e as devidas correções a fim de não prejudicar a produção e captação de biogás.

A pesquisa realizada pode ser aplicada em aterros novos e em operação, para dimensionar equipamentos/instrumentos das usinas de captação de biogás e geração de energia, além de informar quais as melhores práticas a serem realizadas no que tange o encerramento

dos aterros em operação, como o tipo de grama e cobertura da camada final. Também apresentou qual a melhor metodologia de cálculo de estimativa de produção de biogás é mais eficiente para os aterros brasileiros, considerando os parâmetros da metodologia ACM0001 – ver.15.

Palavras-chave: Aterro sanitário, biogás, créditos de carbono, mecanismo de desenvolvimento limpo.

ABSTRACT

One of the gases with higher global warming potential is the methane (CH₄) which is 25 times more harmful than carbon dioxide (CO₂). The methane emission occurs in various human activities including landfills. Following the ratification of the Kyoto Protocol and the implementation of the Clean Development Mechanism (CDM) by the United Nation Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), several projects in landfills were enrolled in this organization. The projects capture the methane that would be emitted to the atmosphere and direct it to power generation or to burning at high temperature. CDM projects should be economically profitable, considering the sale of carbon credits and energy generated. This work aims at studying the case of the two largest CDM projects in landfills in Brazil - Bandeirantes Landfill and Landfill São João, which generate less credits than foreseen variables that may have influenced the differences between the volume of biogas and carbon credits estimated are analyzed. The evolution of estimation methods is also studied. The study's methodology was a multiple case study in order to make a comparison between the estimated production of biogas and carbon credits and the actual captured in CDM Projects Landfill Bandeirantes and São João Support for the study came from six sources distinct: documents, files, interviews, direct observation, participant observation and physical artifacts. The results indicate that the differences between estimated and actual production can be captured as a result of various factors such as pH, humidity, type of coverage (soil and grass) and the model of institutional arrangement of the studied projects. The conclusion is that the CDM Projects from the Bandeirantes and São João Landfill were overestimated by using a methodology which did not include many parameters that directly interfere with the production of biogas and suffer the financial consequences by not generating electricity and carbon credits. It is suggested that the monitoring of parameters that directly interferes in the biogas production is held jointly by the landfill operator and project proponent in order to facilitate the identification of problems and corrections to do not impair the production and collection of biogas.

The research can be applied to new landfills and in operation for sizing equipment/instruments from the collection of biogas and power generation plants, besides informing about the best practices to be made regarding the closure of landfills in operation, as the type of grass and the cover on the top of the landfill. The research also showed that the

best methodology for calculating estimated biogas production is more efficient for Brazilian landfills, considering the parameters of the methodology ACM0001 - ver.15.

Key words: Landfill, landfill gas, carbon credits, clean development mechanism.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008..	10
Figura 2 - Fases de formação do biogás em aterros sanitários	22
Figura 3: Principais etapas de um Projeto de MDL em Aterros Sanitários	39
Figura 4: Etapas do MDL	40
Figura 5 – Exemplos de Potenciais causas da produção de biogás menor que o projetado no PDD..	54
Figura 6: Arranjo institucional dos Projetos Bandeirantes e São João.	55
Figura 7: <i>Stakeholders</i> envolvidos no Projeto de MDL do Aterro Bandeirantes	58
Figura 8: Trinca de aproximadamente 4 cm.....	69
Figura 9: Trinca de aproximadamente 9 cm.....	69
Figura 10: Lona instalada no talude.....	70
Figura 11: Lona instalada no platô.	70
Figura 12: Equipamentos utilizados na usina de captação de biogás	84
Figura 13: Conjunto de motogeradores instalado na UTE - Bandeirantes	85
Figura 14: <i>Layout</i> da UTE-Bandeirantes	86
Figura 15: Subestação de Perus.....	87
Figura 16: <i>Stakeholders</i> envolvidos no Projeto de MDL do Aterro São João.	88
Figura 17: <i>Flares</i> instalados no Projeto São João	101
Figura 18: Motogeradores instalados na UTE – São João	102
Figura 19: Subestação da UTE – São João	102
Figura 20: Potenciais causas da produção de biogás menor que o projetado no PDD	104
Figura 21: Principais fatores que afetam a produção de biogás em aterros sanitários	120
Figura 22: Estimativa de CERs pela ACM0001 e ACM0001 com inclusão de novos parâmetros.	127
Figura 23: Principais causas da produção de biogás menor que o projetado no PDD nos Projetos Bandeirantes e São João	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Evolução da coleta de RSU nas macrorregiões brasileiras.....	9
Tabela 2: Panorama Nacional do manejo de RSU.....	11
Tabela 3: Comparativo de resíduos coletados e destinados nos anos de 2000 e 2008	12
Tabela 4: Quantidade de RSU e rejeitos dispostos no solo em 2000 e 2008	14
Tabela 5: Composição do biogás de aterro	23
Tabela 6: Informação sobre comercialização dos CERs gerados no Projeto Bandeirantes	60
Tabela 7: Venda de CERs em leilão	61
Tabela 8: Quantidade de resíduos disposta desde a abertura até o encerramento do Aterro Sanitário Bandeirantes:	65
Tabela 9: Estimativas de produção de biogás e a captação real no Aterro Sanitário Bandeirantes	73
Tabela 10: Comercialização de CERs no projeto São João	89
Tabela 11: Análise Gravimétrica dos Resíduos dispostos no Aterro Sanitário São João	91
Tabela 12: Quantidade de resíduos disposta desde a abertura até o encerramento do Aterro Sanitário São João:.....	92
Tabela 13: Estimativas de produção de biogás e a captação real no Aterro Sanitário São João	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACM – *Approved Consolidated Methodology*
AM – *Approved Methodology*
AMLURB - Associação Municipal de Limpeza Urbana
AOV – Ácidos Orgânicos Voláteis
BLFGE – *Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project*
CDM – *Clean Development Mechanism*
CER – Certificados de Emissão Reduzidas
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CIMGC – Comissão Interministerial para as Mudanças Gerais do Clima
CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão
COMLURB – Companhia Municipal de Limpeza Urbana
COP – *Conference of Parts*
CQNUMC – Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas
DCP – Documento de Concepção do Projeto
EB – *Executive Board*
EEA – *European Environmental Agency*
EMATER - Empresas de Assistência Técnica e Extensão Rural
EOD – Entidade Operacional Designada
EPA – Environmental Protection Agency
ERPA - Emission Reduction Purchase Agreement
ET – Emission Trading
ETE – Estação de Tratamento de Efluentes
FEMA – Fundo Especial do Meio Ambiente
FGV – Fundação Getúlio Vargas
GEE – Gases de Efeito Estufa
HFC - Hidrofluorcarbono
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

IETA - International Emissions Trading Association
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
JI – Joint Implementation
LIMPURB – Departamento de Limpeza Urbana do Município de São Paulo
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MEG – Monoetilenoglicol
MMA – Ministério do Meio Ambiente
NEMA – National Electrical Manufacturers Association
OCDE - Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento
OMM - Organização Meteorológica Mundial
PDD – Project Design Document
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PFC – Perfluorcarbono
pH – Potencial Hidrogeniônico
PK – Protocolo de Kyoto
PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PVC – Policloreto de Vinila
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SGA – Sistema de Gestão Ambiental
SNIS – Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento
SSO – Saúde e Segurança Ocupacional
SVMA – Secretaria do Verde e Meio Ambiente do Município de São Paulo
UNFCCC – United Nation Framework Convention on Climate Change
UTE – Usina Termelétrica
VOC – Compostos Orgânicos Voláteis
WB – World Bank

LISTA DE SÍMBOLOS

°C - Grau Celsius
C:N - relação Carbono / Nitrogênio
CH₄ - Metano
cm - Centímetro
CO₂ - Gás Carbônico
Gg - Giga grama
H₂ - Hidrogênio
H₂S - Gás sulfídrico
kcal/m³ - Quilo caloria por metro cúbico
kg/m³ - Quilograma por metro cúbico
kWh - Quilowatt hora
m - metro
m/s - metro por segundo
m² - metro quadrado
m³ - metro cúbico
mm - milímetro
mm³ - milímetro cúbico
MW - mega watt
MWh - mega watt hora
N₂ - Nitrogênio
NH₃ - Amônia
Nm³ - Normal metro cúbico
Nm³/h - Normal metro cúbico por hora
Nm³/s - Normal metro cúbico por segundo
O₂ - Oxigênio
SF₆ - Hexafluoreto de Enxofre
t - tonelada
t/ano - tonelada por ano
t/dia - tonelada por dia
tCO₂ - tonelada de gás carbônico
tCO₂e - tonelada de gás carbônico equivalente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	3
1.1.	Objetivos.....	6
1.1.1.	Gerais	6
1.1.2.	Específicos.....	6
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1.	Cenário Atual dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	7
2.1.1.	Geração de Resíduos.....	8
2.1.2.	Coleta de Resíduos	9
2.1.3.	Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	10
2.1.4.	Destinação de Resíduos	12
2.1.5.	Locais de Disposição Final de Resíduos.....	15
2.1.6.	Política Nacional de Resíduos Sólidos	18
2.1.7.	Aterros Sanitários e Mudanças Climáticas	19
2.1.8.	Degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e formação do biogás	20
2.1.9.	Fases de formação do biogás de aterro	21
2.1.10.	Composição do biogás	23
2.1.11.	Volume de biogás gerado	24
2.1.12.	Fatores interferentes na geração do biogás	24
2.1.13.	Deslocamento de gases em aterros sanitários	26
2.1.14.	Potencial Energético	26
2.2.	Gases de Efeito Estufa (GEE).....	28
2.3.	Mudanças Climáticas	29
2.4.	Protocolo de Kyoto	32
2.5.	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).....	35
2.6.	MDL e Aterros Sanitários.....	37
2.7.	Processos de Validação e Verificação.....	38
2.8.	Comercialização de Créditos de Carbono	40
2.9.	Outros mercados	41
2.10.	Ferramentas de Cálculo para estimativa de vazão de biogás e CERs em aterros sanitários	43
2.11.	MDL como ferramenta de Gestão Ambiental	47
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E TÉCNICAS.....	49
4	RESULTADOS	56
4.1.	Aterro Sanitário Bandeirantes	56
4.1.1.	Histórico da Concessão à Biogás Energia Ambiental S.A.....	58
4.1.2.	Comercialização dos CERs gerados	59
4.1.3.	Matéria – prima.....	61
4.1.4.	Método.....	66

4.1.5.	Meio Ambiente	76
4.1.6.	Meio de Medição	78
4.1.7.	Mão de Obra	79
4.1.8.	Máquina (Equipamento)	81
4.2.	Aterro Sanitário São João.....	87
4.2.1.	Contrato de Concessão de Extração de biogás	88
4.2.2.	Comercialização dos CERs gerados	89
4.2.3.	Matéria – prima.....	90
4.2.4.	Método.....	93
4.2.5.	Meio Ambiente	97
4.2.6.	Meio de Medição	99
4.2.7.	Mão de Obra	100
4.2.8.	Máquina (Equipamento)	101
5	DISCUSSÃO	103
5.1.	Matéria Prima	105
5.2.	Método	107
5.1.1.	pH	108
5.1.2.	Cobertura	109
5.1.3.	Captação	114
5.1.4.	Estimativa	115
5.3.	Meio Ambiente	119
5.4.	Meio de Medição	122
5.5.	Mão de Obra	124
5.6.	Máquina (Equipamento)	125
5.7.	Propostas	126
5.8.	Limitações.....	129
6	CONCLUSÕES.....	130
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
	REFERÊNCIAS	135
	APÊNDICE 1 – Lista de Documentos.....	145
	APÊNDICE 2 – Quadro- resumo dos resultados	146

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos urbanos é considerada como o resultado das atividades diárias do homem que vive em sociedade e os fatores principais que regem sua origem são, principalmente, dois: o aumento considerável da população nos últimos 50 anos e a intensificação industrial (LIMA, 2004).

A intensificação das atividades humanas nas últimas décadas gerou um acelerado aumento na produção de resíduos, tornando-se um grave problema para as administrações públicas. O aumento desordenado da população e o crescimento sem planejamento de grandes núcleos urbanos dificultam as ações e o manejo dos resíduos, os quais, muitas vezes são depositados em locais não preparados para recebê-los, como lixões, e podem provocar graves problemas socioambientais (MMA, 2010).

De acordo com o IBGE (2010), divulgado na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2008, metade dos mais de cinco mil Municípios brasileiros destinam seus resíduos para lixões. Ainda conforme o mesmo estudo, tal situação se configura como um cenário de destinação reconhecidamente inadequado, que exige soluções urgentes e estruturais para o setor (IBGE, 2010). Uma das soluções mais latentes foi tomada por meio da aprovação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) em 02/08/2010, após mais de 20 anos em tramitação no Congresso Federal.

A urgência em reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) à atmosfera provocou a adoção de quadros regulamentares favoráveis para incentivar o setor público e privado a investirem em energias renováveis (MMA, 2010).

Neste contexto, foi assinado em 11 de dezembro de 1997 o Protocolo de Kyoto (PK). Sua principal meta era a de obter o compromisso dos países industrializados de redução de emissões de GEE em relação aos GEE emitidos no ano de 1990. Desta forma, o acordo previa que as Partes - países do Anexo 1 que foram membros da Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD) em 1992, incluindo os países com economia em transição, como Rússia, Estados Bálticos e do Centro e Leste Europeus e do Não Anexo I - países em desenvolvimento, sendo que alguns grupos de países em desenvolvimento são reconhecidos pela UNFCCC como sendo especialmente vulneráveis aos impactos adversos das mudanças climáticas, incluindo àqueles com pouca área costeira e/ou aos propensos a

desertificação e seca (UNFCCC, 2008) adotassem programas nacionais de redução de emissões, complementados com os chamados “mecanismos de flexibilização”: comércio de emissões (*ET- Emission Trading*), sistema de implementação conjunta (*JI – Joint Implementation*) e; mecanismo de desenvolvimento limpo (*CDM – Clean Development Mechanism*). Tais mecanismos permitem aos países interessados concretizar as metas de redução das emissões, mantendo os custos de suas ações em níveis toleráveis (JUSTI e MOLIETRNO, 2008).

Ainda conforme Justi e Moliterno (2008), cabe aos países que aderiram ao protocolo de Kyoto implementar um sistema nacional de contabilização das emissões de GEE, a fim de demonstrar o progresso alcançado no cumprimento de suas metas de redução de emissões. Cabe ainda, a esses países, buscar por transferência de tecnologias ambientalmente seguras e de propriedade pública.

Desta maneira, o Brasil tem destaque no cenário internacional como um dos principais atores ligados ao MDL, pois em termos do potencial de reduções de emissões associado aos projetos de MDL, o Brasil ocupa primeira posição em número de projetos e volume de Reduções Certificadas de Emissões (ou a sigla CER, em inglês) emitidos na América Latina e Caribe, sendo responsável pela redução de 366.263.000 tCO₂e em 2012, o que corresponde a 44% do total mundial para o primeiro período de obtenção de créditos, que podem ser de no máximo dez anos para projetos de período fixo ou de sete anos para projetos de período renovável. Os projetos são renováveis por no máximo três períodos de sete anos, totalizando 21 anos (UNEP, 2013).

Dos 205 Projetos brasileiros de MDL registrados na UNFCCC até 2012, em diversos setores no Brasil, 68 são provenientes de aterros sanitários. Destes, apenas sete foram registrados com intuito de geração de energia e outros 11 estão em validação, constituindo-se uma oportunidade promissora para promover a sustentabilidade social e ambiental do desenvolvimento municipal no país, por meio do estímulo a uma gestão mais apropriada dos resíduos sólidos urbanos (UNEP, 2013).

Para estimar a quantidade de créditos de carbono que pode ser gerado em um determinado local de disposição de resíduos, a metodologia de cálculo consolidada pela UNFCCC, a ACM0001, é a mais amplamente utilizada pelos projetos de MDL em aterros sanitários.

Os maiores Projetos de MDL em aterros sanitários no Brasil são o Aterro Sanitário Bandeirantes e Aterro Sanitário São João, objetos de estudo deste trabalho, ambos localizados no Município de São Paulo. Estes Projetos foram elaborados, assim como os acima mencionados, para gerar energia por meio do biogás oriundo da decomposição da matéria orgânica disposta nesses locais.

Conforme abordado por Pedott e Aguiar (2012), nos Projetos de MDL nos Aterros Sanitários Bandeirantes e São João há uma diferença considerável entre os valores iniciais estimados de biogás e o real captado, interferindo consideravelmente na geração de créditos de carbono.

Há, ainda, uma grande incerteza em relação aos cálculos das emissões de gases de efeito estufa, principalmente o gás metano gerado em aterros sanitários. A variedade de processos que ocorre na massa de resíduos somada à falta de monitoramento dos aterros faz com que os métodos de cálculo sejam geralmente fórmulas empíricas contendo poucos parâmetros de avaliação (BORBA, 2006).

Em projetos de aproveitamento do biogás de aterro, as estimativas iniciais, antes da instalação dos projetos, são fundamentais para o sucesso ambiental e econômico. Estas avaliações consistem, principalmente, em levantamentos do tipo de resíduo disposto, condições do aterro, condições climáticas e do sistema de drenagem e estruturação do aterro (JUSTI e MOLITERNO, 2008).

Desta maneira, pergunta-se: Por que os aterros estão produzindo menos biogás e gerando menos créditos do que o previsto? Quais são os fatores operacionais e de gestão que estão contribuindo para esta diferença? Como é possível aproximar o desempenho real com o previamente estimado nos projetos?

Sendo assim, na presente pesquisa foram analisados os dados de estimativa de produção de biogás e créditos de carbono nos considerados maiores projetos de MDL do Brasil, localizados nos Aterros Sanitários Bandeirantes e São João, ambos localizados na cidade de São Paulo, com a finalidade de comparar os parâmetros utilizados nas estimativas prévias e a captação real, além de verificar qual das metodologias disponíveis mais se aproxima deste real captado.

1.1. Objetivos

1.1.1. Gerais

A presente pesquisa teve a finalidade de explorar os fatores operacionais e de gestão que potencialmente estejam relacionados à produção e captação de biogás e geração de créditos de carbono nos aterros sanitários Bandeirantes e São João. Também foi objetivo da pesquisa a realização de um comparativo entre a estimativa de biogás no momento da elaboração do Documento de Concepção do Projeto (DCP) de dois aterros sanitários encerrados no Município de São Paulo e a captação real, tendo como base a metodologia ACM0001 consolidada pela UNFCCC.

1.1.2. Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são descritos abaixo:

- Mensurar a perda de receita, tanto pela não efetivação da venda de créditos de carbono, quanto pela não comercialização de energia elétrica;
- Comparar a evolução da 2ª versão da metodologia consolidada pela UNFCCC, a ACM0001, com sua 13ª versão;
- Verificar e apontar as possíveis causas das diferenças entre o estimado e o real captado de biogás em ambos os aterros: São João e Bandeirantes; e
- Simular o efeito de desvios operacionais estudados em cada caso para dimensionar o potencial impacto dos desvios.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A fundamentação teórica será construída tendo como base a revisão da literatura e contará com uma análise específica dos problemas atuais enfrentados por dois projetos de MDL em aterros sanitários, ambos localizados no Município de São Paulo – SP. Também será considerada a literatura específica sobre modelagem para estimativa de produção e captação de biogás/CERs em projetos de MDL em aterros sanitários e os distintos parâmetros solicitados no momento do cálculo de estimativa de biogás.

2.1. Cenário Atual dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

A palavra “resíduo” é derivada do latim *residuu*, e significa o que resta de algum produto ou substância. Posteriormente, com a classificação dos diversos tipos de resíduos, surgiram os adjetivos, como sólidos, líquidos e gasosos (CADAVID, 2004). Tal denominação foi extremamente importante para identificar e apontar o tratamento e destinação adequados para cada tipo de resíduo gerados nas diversas atividades, como, por exemplo, industrial, residencial etc.

Atualmente, um dos maiores problemas que a sociedade enfrenta é a geração excessiva de resíduos sólidos urbanos (RSU), que de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Capítulo I - Das Diretrizes aplicáveis aos Resíduos Sólidos - Art. 13º, inclui, entre outros:

- Resíduos Domiciliares: originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- Resíduos de Limpeza Urbana: originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.

O excesso de consumo, os restos da civilização, as sobras orgânicas das cozinhas, as embalagens que envolvem os produtos consumidos no dia-a-dia, o desperdício, garrafas, latas de refrigerante, papel e outros resultam em toneladas de resíduos gerados diariamente por milhões de pessoas que moram nas pequenas, médias e grandes cidades.

O aumento na geração de resíduos tem sido causado pelo modelo atual de desenvolvimento econômico, pelo crescimento acelerado da população e sua concentração em áreas urbanas, e pela mudança de padrão de consumo ocorrida nas últimas décadas (AZEVEDO, 2004).

A incorreta gestão dos resíduos pode ocasionar sérios malefícios à população, como, por exemplo, o acúmulo de lixo em diversos pontos da cidade; áreas degradadas por disposição inadequada de resíduos - os conhecidos lixões a céu aberto; além de contribuir para a proliferação de vetores prejudiciais à saúde humana (moscas, ratos e urubus) e causar poluição no ar, no solo e na água, entre outros.

O Panorama dos RSU no Brasil apresentada a seguir foi fundamentada com base nas informações contidas em fontes como: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), Sistema Nacional de Informação em Saneamento (SNIS), Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) e diferentes órgãos setoriais como a Versão Preliminar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, do Ministério de Minas e Energias (MME) e do Ministério do Meio Ambiente (MMA).

2.1.1.1. Geração de Resíduos

A geração dos resíduos sólidos urbanos é a primeira etapa da gestão dos mesmos. É também a etapa responsável por apresentar maior dificuldade de obtenção de dados relacionados, pois por questões como a disposição irregular, a coleta informal ou a insuficiência de sistema de coleta pública, não é possível saber a quantidade exata do resíduo gerado (ICLEI, 2012; MMA, 2012). A imprecisão nessas estimativas se deve a diferentes metodologias empregadas nos levantamentos realizados e às dificuldades inerentes a essa avaliação (EEA, 2008).

A quantidade de resíduos produzida por habitante e as características dos resíduos domésticos variam em função dos hábitos de consumo da população e apresentaram uma evolução no decorrer do tempo (AGUIAR, 1999).

Grande parte das pesquisas realizadas atualmente no setor, como ABRELPE e PNSB, não apontam esses dados, elas apenas informam volume de resíduos efetivamente coletados ou estimam valores de acordo com o consumo aparente de materiais potencialmente recicláveis e a participação deles na produção de embalagens, por exemplo.

A fim de evitar disparidade entre dados de fontes distintas, foram utilizados apenas os valores publicados nos relatórios da ABRELPE. Entretanto, cabe mencionar que há outras fontes, como a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.

De acordo com a Agência Ambiental Europeia (2008), apesar das grandes diferenças regionais, a produção de resíduos tem crescido em todas as regiões e Estados brasileiros. A geração média de resíduos sólidos urbanos é próxima de 1 kg por habitante/dia no país, padrão já similar ao de alguns países da União Europeia (EEA, 2008).

2.1.2. Coleta de Resíduos

A quantidade de resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008 foi de 183.481,50 t/dia (aproximadamente 66.970.747,50 t/ano) (IBGE, 2010), sendo 18,74% superior ao registrado no ano de 2000, quando eram coletadas 149.094,30 t/dia (IBGE, 2002).

Do ponto de vista da coleta regular dos resíduos sólidos, esta tem sido o principal foco da gestão de resíduos sólidos nos últimos anos. A taxa de cobertura vem crescendo continuamente, já alcançando em 2009 quase 90% do total de domicílios; na área urbana a coleta supera o índice de 98%; todavia a coleta em domicílios localizados em áreas rurais ainda não atinge aproximadamente 30% (MMA, 2011).

A evolução na coleta regular de RSU é visível. Ao comparar os dados de 2008 aos de 2000 da PNSB, verifica-se um aumento de aproximadamente 18%, considerando a média nacional de coleta (IBGE, 2010). Estes dados podem ser observados na Tabela 1:

Tabela 1: Evolução da coleta de RSU nas macrorregiões brasileiras

	2000	2008	%
Norte	10.991,40	14.637,30	24,91
Nordeste	37.507,40	47.203,80	20,54
Centro-Oeste	8.495,30	16.119,20	47,30
Sudeste	74.094,00	68.179,10	-8,68
Sul	18.006,20	37.342,10	51,78
Brasil	149.094,30	183.481,50	18,74

Fonte: Adaptado de PNSB- 2008 (IBGE, 2010).

Analisando a Tabela 1, percebe-se algumas discrepâncias nos resultados, como os apresentados pelas Regiões Sul e Centro-Oeste que, praticamente, dobraram seus volumes de RSU coletados em apenas oito anos, enquanto a Região Sudeste apresentou um resultado negativo. Este resultado negativo submete a uma dupla interpretação: redução na geração de resíduos ou diminuição da eficiência de coleta.

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados também foi verificada levando em consideração a média das cinco macrorregiões brasileiras (ano base 2008), conforme pode ser observado na Figura 1.

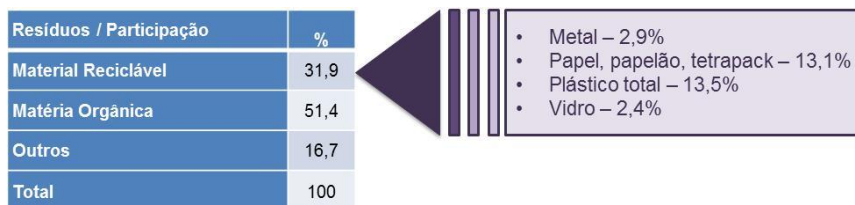


Figura 1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos – versão preliminar (MMA, 2011).

2.1.3. Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos

Geralmente, a gestão Municipal de resíduos sólidos no Brasil se preocupa com maior intensidade com os problemas de destinação de resíduos para aterros sanitários, limitando-se assim, ao planejamento imediato ou à reparação dos problemas já concretizados (TENÓRIO; ESPINOSA, 2004). Desta forma, cabe mencionar que a gestão dos resíduos sólidos envolve o planejamento das prováveis ações do gerenciamento, incumbindo diagnósticos da situação do gerenciamento de cada cidade, o levantamento das potencialidades, e a constituição das parcerias para o planejamento como, por exemplo, na forma de consórcios municipais (FRÉSCA, 2007).

Em consonância à Constituição Federal de 1988, art. 30, é responsabilidade do Poder Público Municipal a gestão dos resíduos, inserindo-se nestas tarefas, a coleta e destinação dos RSU. Desta forma, cabem ao Município a elaboração de Legislação Municipal, o gerenciamento e definição do sistema de saneamento básico. O Estado de São Paulo, por exemplo, aprovou em 2006 a lei nº 12.300 que instituiu a Política Estadual de Resíduos Sólidos.

De acordo com a PNSB-2008 (IBGE, 2010), o manejo RSU nos Municípios brasileiros é, em sua grande maioria, realizado por órgãos da administração pública direta, somando 61,2% do total. As empresas privadas que realizam o manejo sob o regime de concessão pública ou terceirização somam 34,5% e os 4,3% restantes representam as entidades

organizadas sob a forma de autarquias, empresas públicas, sociedades de economia mista e consórcios. A Tabela 2 aborda o Panorama da gestão de resíduos no Brasil, por região.

Tabela 2: Panorama Nacional do manejo de RSU

	Administração Direta	Empresa privada	Outras
Norte	86%	10%	4%
Nordeste	75%	21%	4%
Centro-Oeste	76%	21%	3%
Sudeste	63%	30%	7%
Sul	40%	57%	3%
Brasil	61%	35%	4%

Fonte: Adaptado de PNSB – 2008 (IBGE, 2010).

Observa-se que a Região Norte apresenta o maior número de Municípios com serviços de manejo dos resíduos sólidos gerenciados por entidades da administração direta do poder público, aproximadamente 85%. A Região Sul, por sua vez, possui a maior quantidade de entidades privadas atuando no setor, apontando que a terceirização é uma tendência na região (IBGE, 2010).

Cabe mencionar que os gastos referentes ao manejo de RSU (coleta, limpeza pública, destinação final e etc.) podem comprometer até 20% do orçamento municipal, podendo causar um grande problema nas administrações públicas (IBGE, 2010).

A gestão dos resíduos sólidos gerados no Brasil é de responsabilidade dos Municípios onde são gerados. O responsável pelos resíduos gerados no Município de São Paulo, por exemplo, é o Departamento de Limpeza Urbana do Município de São Paulo (LIMPURB), assim como em Salvador. Na cidade do Rio de Janeiro, por sua vez, é a Companhia de Limpeza Urbana (COMLURB).

A Associação Municipal de Limpeza Urbana (AMLURB) é o órgão gerenciador dos serviços de limpeza urbana prestados na cidade de São Paulo, como coleta de resíduos de saúde, domiciliar e seletiva, varrição de vias públicas, lavagem de monumentos e escadarias e remoção de entulho.

Na maior parte dos 645 Municípios do Estado de São Paulo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) também participa desta responsabilidade, pois é a responsável pela emitir a licença ambiental para a operação de aterros sanitários e, também,

pela concessão de instalação de novas unidades com os Municípios (JUSTI; MOLIETRNO, 2008).

Entretanto, o licenciamento ambiental municipal já é adotado por diversos Municípios do Estado de São Paulo: Americana, Araraquara, Atibaia, Barretos, Bertioga, Cajamar, Campinas, Capivari, Caraguatatuba, Catanduva, Franca, Guararema, Guarulhos, Hortolândia, Igaratá, Indaiatuba, Itaquaquecetuba, Mauá, Mogi das Cruzes, Mogi Mirim, Monte Mor, Olímpia, Piracicaba, Ribeirão Pires, Ribeirão Preto, Santana de Parnaíba, Santo André, São Bernardo, São Caetano do Sul, São Carlos, São Paulo, São Vicente, Sertãozinho, Sorocaba, Sumaré, Tatuí, Valinhos, Vinhedo e Votorantim, entre outros.

Dependendo do tipo do empreendimento e da complexidade, não é necessário acionar a CETESB para emissão da licença ambiental. Sendo assim, deve ser realizado um estudo ambiental prévio para confirmar a complexidade e a caracterização do local requerente da licença. Após confirmação a Prefeitura esta autorizada a emitir a licença ambiental. Desta forma, o processo de licenciamento torna-se muito mais ágil e rápido, além de não sobrecarregar as agências ambientais da CETESB (CETESB, 1999).

2.1.4. Destinação de Resíduos

A destinação final de RSU no Brasil se apresenta como um dos graves problemas da gestão ambiental. Segundo Jucá (2002), a geração de RSU aumentou consideravelmente a partir da década de 90, quando o PIB nacional teve um ganho significativo, elevando o consumo por parte da população brasileira como um todo. Ao mesmo tempo, porém, houve uma conscientização da população e relativa elevação no cuidado com a destinação final, indicado pela redução na quantidade de RSU dispostos em lixões.

Em 2008, foram enviados para a destinação final 188.814,90 t/dia de RSU, representando um aumento de 35% em relação à quantidade destinada em 2000, quando eram destinadas 140.080 t/dia (IBGE, 2010). A ilustração é dada na Tabela 3.

Tabela 3: Comparativo de resíduos coletados e destinados nos anos de 2000 e 2008

	Coletado (t/dia)	Destinado (t/dia)	Diferença (%)
2000 (a)	149.094	140.080	6
2008 (b)	183.482	188.815	-3

Fonte: (a) Adaptado de PNSB – 2000 (IBGE, 2002) e (b) PNSB - 2008 (IBGE, 2010).

Em uma análise generalista, a discrepância em relação à quantidade de RSU coletado e o destinado, algo em torno de 3%, provavelmente seja um reflexo da duplicidade de informações onde uma unidade de destinação encaminhou os rejeitos do tratamento para outro destino final, contabilizando, desta maneira, a quantidade de resíduos enviada a destinação final duas vezes (MMA e PNUD, 2010).

Após a realização da PNSB 2008 (IBGE, 2010), foi constatado que pouco mais de 90% dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil são destinados para aterros (sanitários e controlados) e lixões, sendo os 10% restantes destinados a compostagem, triagem e reciclagem, incineração. O Gráfico 1 apresenta a percentagem dos RSU por tipo/local de destinação final:

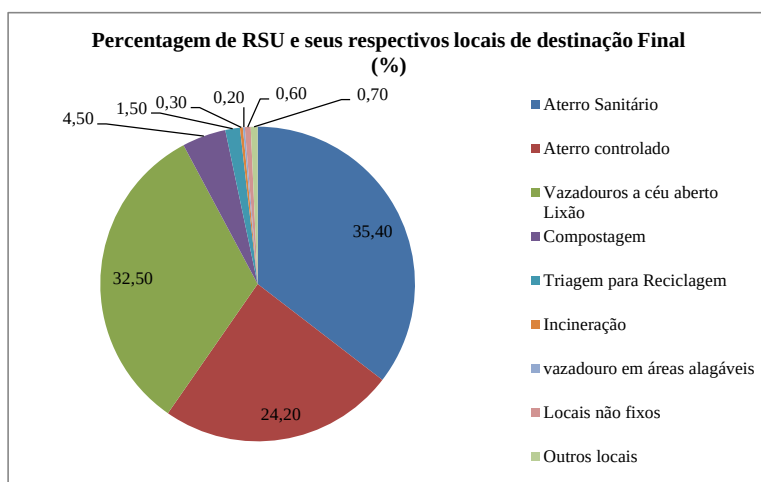


Gráfico 1: Percentagem dos RSU por tipo/local de destinação final

Fonte: Adaptado de PNSB - 2008, (IBGE, 2010).

A fração orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos é enviada para disposição final, juntamente com a fração de resíduos domiciliares, pois não é coletada separadamente. Essa maneira de destinação gera despesas que podem ser evitadas se a matéria orgânica for separada direto na fonte geradora (principalmente residências, restaurantes e feiras-livres) e enviada para um tratamento específico, como, por exemplo, a compostagem (MMA e PNUD, 2010).

Ao abordar apenas a disposição dos resíduos no solo, considerando aterros (controlado e sanitário) e lixões, percebe-se um aumento significativo, em torno de 120%, entre os anos de 2000 e 2008 na quantidade de resíduos e rejeitos dispostos em aterros sanitários e uma diminuição na quantidade encaminhada para lixões, por volta de 18% (IBGE, 2010)

O cenário apresentado em 2008 pela PNSB é bem diferente de 2000, onde eram dispostos em aterros controlados e lixões, de maneira inadequada, aproximadamente 60% dos RSU e rejeitos. Atualmente, 60% dos RSU e rejeitos são dispostos em aterros sanitários de maneira correta e ambientalmente segura. Entretanto, algo em torno de 74 mil toneladas de resíduos e rejeitos ainda são dispostos diariamente em aterros controlados e lixões (IBGE, 2010), conforme se observa na Tabela 4.

Tabela 4: Quantidade de RSU e rejeitos dispostos no solo em 2000 e 2008

	Lixão		Aterro Controlado		Aterro Sanitário	
	2000	2008	2000	2008	2000	2008
Norte	6.149	4.893	3.222	4.668	1.350	4.541
Nordeste	20.580	23.462	6.113	6.819	6.715	25.247
Centro-Oeste	2.590	3.938	4.135	4.914	3.099	3.387
Sul	4.646	1.433	4.699	3.485	5.882	15.293
Sudeste	11.521	3.636	15.686	16.767	32.568	61.577
Brasil	45.485	37.361	33.854	36.653	49.615	110.044

Fonte: Adaptado de Plano Nacional de Resíduos Sólidos – versão preliminar (MMA, 2011).

Nota-se que as cinco macrorregiões apresentaram aumento no total de resíduos e rejeitos dispostos em aterros sanitários. A Região Sul foi a que apresentou melhor desempenho em 2008, dispondo mais de 75% dos seus resíduos sólidos coletados em aterros sanitários.

Há ainda muito que se fazer para erradicar a disposição inadequada de resíduos, principalmente com a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece a implantação da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos em até 4 (quatro) anos após a data de publicação, ou seja, até 2014.

Desta forma, praticamente todo resíduo sólido urbano gerado no país é simplesmente disposto no solo, seja em aterros sanitários, aterros controlados ou vazadouros a céu aberto, o que resulta em inúmeros impactos ambientais negativos, além dos prejuízos sociais e econômicos. Entre esses impactos, pode-se citar:

- A ocupação de extensas áreas para servirem de aterros, que por sua vez estão cada vez mais escassas, especialmente nas grandes cidades e em regiões metropolitanas. Próximo

dessas áreas, geralmente, ocorre grande desvalorização imobiliária, além dos inconvenientes do constante tráfego de caminhões transportando lixo.

- O risco de contaminação do lençol freático e cursos d'água nas proximidades dos locais de disposição final de lixo, especialmente nos lixões e aterros que não possuem adequada impermeabilização de base.
- A maior proliferação de vetores de doenças, que podem ocasionar sérios problemas de saúde pública.
- O total desperdício dos recursos naturais e energéticos contidos nos materiais dispostos nos aterros e lixões.
- A liberação de maus odores, mais intensos e constantes em vazadouros a céu aberto;
- A contínua produção de biogás, gerado pela decomposição anaeróbica dos materiais orgânicos contidos no interior da massa de resíduos já aterrada. Por ser altamente combustível, o biogás necessita ser continuamente drenado para evitar explosões nesses locais. No Brasil, a maioria dos aterros utiliza o sistema de drenos abertos, onde é mantida acesa uma chama para queima imediata do biogás que vai sendo naturalmente drenado. Esse sistema apresenta uma baixa eficiência e estima-se que apenas 20% do biogás drenado seja efetivamente destruídos pela queima. O restante é simplesmente emitido para a atmosfera (ICLEI, 2010).

Apesar da escassa informação sobre a disposição final dos resíduos sólidos no Brasil, o país apresenta potencial para o desenvolvimento de projetos de captura do biogás para uso energético. Outro incentivo do uso energético do biogás de aterro é que tal atividade é considerada um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, e Certificados de Emissões Reduzidas podem ser adquiridos e, posteriormente, vendidos como Créditos de Carbono (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008).

2.1.5. Locais de Disposição Final de Resíduos

Há diversas formas de disposição final de resíduos. As três mais utilizadas no Brasil são os lixões, aterros controlados e aterros sanitários, conforme seguem descritas:

- **Lixão:** forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos a céu aberto, que se caracteriza pela simples descarga do resíduo sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (IPT, 1995). Também não há controle quanto aos tipos de

resíduos depositados e quanto à localização exata de disposição. Pode haver outros problemas associados a presença de animais, como ratos, porcos, moscas e urubus. Outro sério problema causado pelos lixões é a contaminação de solo e lençol freático, pela ação da infiltração de chorume no solo. A presença de catadores é outra característica marcante neste tipo de local para disposição de resíduos;

- **Aterro Controlado:** técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública, minimizando os impactos ambientais. Esse método utiliza princípios básicos de engenharia para confinar resíduos, cobrindo o resíduo disposto com camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho (ABNT-NBR 8419, 1992). Pode haver catadores e eventuais animais no interior destes locais de disposição;
- **Aterro Sanitário:** técnica de disposição de resíduos no solo após sua impermeabilização, sem causar danos à saúde pública e à segurança e minimizando os impactos ambientais. Esse método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão e cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, caso necessário. A ausência de catadores e animais é outro fator característico nos aterros sanitários (ABNT-NBR 8419, 1992). Em países em desenvolvimento os aterros sanitários se destacam como a técnica de disposição final de resíduos sólidos urbanos por apresentar menor custo e apresentar técnicas de engenharia que visam minimizar os impactos à saúde pública e ambientais (SILVA *et al.*, 2011).

Os aterros sanitários antigos não possuem uma estrutura adequada para a captação de gases, mesmo possuindo sistemas de drenagem de gases e chorume e cobertura final dos resíduos dispostos.

Conforme menciona MMA (2010), a “revitalização” de aterros controlados e lixões, bem como a construção de novos locais de disposição final de resíduos já devem considerar os diversos fatores que contribuem para a eficiência de captação e qualidade do biogás produzido no maciço dos aterros, como, por exemplo:

- sistema de drenagem de gás e chorume eficiente, evitando rompimento das tubulações;
- tubulações para a captação de biogás com o correto dimensionamento, evitando perda de carga até a usina de captação;

- boa compactação dos resíduos e cobertura com terra argilosa, a fim de evitar emissões fugitivas; e
- correto dimensionamento das áreas de influência entre os poços de captação.

O objetivo da construção de aterros sanitários nos moldes corretos viabiliza a implementação do aproveitamento energético do biogás para convertê-lo em alguma forma de energia útil, como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões e combustível veicular, ou abastecer gasodutos com gás de qualidade. Há diversas tecnologias disponíveis que podem ser usadas para maximizar o valor do biogás, produzindo estas formas de energia. As mais importantes são:

- **uso direto de um gás de médio BTU:** o uso mais simples e de maior custo-efetividade do biogás é como um combustível de médio BTU para caldeiras ou para uso em processos industriais, por exemplo: operações de secagem, operações em fornos, produção de cimento e asfalto. Nesses projetos, o gás é transportado por gasoduto diretamente para um consumidor próximo, para ser usado em equipamentos de combustão novos ou já existentes, em substituição ou como suplemento do combustível tradicionalmente usado. Somente é requerida uma baixa remoção de condensado e um tratamento de filtração, mas podem ser necessárias adaptações ao equipamento de combustão preexistente (TOLMASQUIM, 2008);
- **produção de energia:** para Tolmasquim (2003), o maior uso do biogás é como combustível para a produção de energia, com a venda da eletricidade para um consumidor próximo, de forma que se torna vantajosa por agregar valor ao biogás. A cogeração de eletricidade e energia térmica (vapor) com base no biogás pode ser uma alternativa ainda melhor. A eficiência energética isolada varia de 20% a 50% com o uso da cogeração (OLIVEIRA, 2004). Obtém-se eficiência mais alta pela disponibilização do vapor resultante do processo de geração, que pode ser usado localmente para aquecimento e refrigeração, para outras necessidades de processo, ou ainda transportado por tubo para uma indústria ou comércio nas proximidades, obtendo uma segunda fonte de rendimento para o projeto. Existem várias tecnologias disponíveis: motores de combustão interna, turbinas de combustão e turbinas com Sistema de Geração de Energia com utilização do vapor (ciclo combinado). Em um futuro bem próximo, outras tecnologias, como células combustíveis, tornar-se-ão comercialmente viáveis e poderão utilizar o biogás; e

– **venda de gás de qualidade através de gasodutos:** uma terceira opção de projeto é o beneficiamento do biogás para um produto de alto BTU (gás natural) para injeção em um gasoduto. Por causa do seu alto custo de capital, essa opção só terá custo-efetividade para aterros sanitários com substancial recuperação de gás, isto é, pelo menos 113 mil m³/dia (MUYLAERT *et al.*, 2000), ou seja, em aterros considerados como de grande porte como o Aterro Jardim Gramacho no estado do Rio de Janeiro. Essa aplicação requer um tratamento de gás para remover CO₂ e impurezas relativamente intensivas. Em adição, as companhias de gás requerem que as injeções de gás em seus sistemas de gasoduto atendam a exigentes padrões de qualidade, o que pode gerar controles adicionais. De qualquer forma, essa pode ser uma opção atrativa para proprietários de aterros sanitários, desde que seja possível utilizar todo o gás recuperado. A depuração do gás exigirá significativa compressão a fim de atender à pressão no gasoduto no ponto de conexão.

No Brasil, o aproveitamento do biogás proveniente de aterros sanitários ainda é incipiente, com apenas 42 MW de capacidade instalada e 20 MW em construção (POMPMEYER, 2009). Considerando a elevada concentração da população brasileira em grandes centros urbanos e a expressiva produção agropecuária e agroindustrial (e, portanto, de resíduos e efluentes domésticos, agropecuários e agroindustriais), é natural acreditar que o atual aproveitamento do biogás no Brasil encontra-se bastante aquém do seu potencial (ZANETTE, 2009).

2.1.6. Política Nacional de Resíduos Sólidos

As diversas questões que envolvem os ciclos dos RSU, como geração, coleta (tradicional e seletiva), tratamento e disposição final, vêm sendo amplamente debatidas, principalmente após a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos, em 12 de fevereiro de 2010, por meio da Lei Federal nº 12.305.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída com a finalidade de fortalecer os princípios da gestão integrada e sustentável de resíduos. Propõe medidas de incentivo à formação de consórcios públicos para a gestão regionalizada com vistas a ampliar a capacidade de gestão das administrações municipais, por meio de ganhos de escala e redução de custos no caso de compartilhamento de sistemas de coleta, tratamento e destinação de resíduos sólidos. Inova no país ao propor a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa de retorno de produtos, a prevenção, precaução,

redução, reutilização e reciclagem, metas de redução de disposição final de resíduos em aterros sanitários e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos em aterros sanitários. No aspecto de sustentabilidade socioambiental urbana, cria mecanismos de inserção de organizações de catadores nos sistemas municipais de coleta seletiva e possibilita o fortalecimento das redes de organizações de catadores e a criação de centrais de estocagem e comercialização regionais (JACOBI; BENSEN, 2011).

A PNRS tem como uma das principais diretrizes a regulamentação da destinação final dos resíduos sólidos produzidos, inclusive os urbanos, atuando como um marco regulatório por reunir princípios, objetivos e instrumentos sob os quais a integração entre os agentes públicos envolvidos, principalmente os Municípios, deverão seguir. Adicionalmente, o PNRS adota medidas restritivas como a proibição da coleta de materiais recicláveis em lixões ou aterros; do lançamento de resíduos em praias, rios e lagos; e das queimadas de lixo a céu aberto. A PNRS também apresenta o caminho para a reciclagem, reutilização e uso mais consciente dos materiais ao responsabilizar as empresas geradoras pela logística reversa de seus produtos descartáveis e também à própria sociedade civil pela geração do lixo (PNUD; MMA, 2010).

Como marco regulatório, a PNRS institui os princípios para a elaboração de planos municipais, regionais, estaduais e nacional de resíduos sólidos. A vanguarda das políticas públicas para o setor é a realização de ações que coordenem esforços entre os diferentes âmbitos de governo para a minimização da geração de resíduos, a logística reversa, a valorização dos resíduos por conta da geração de empregos de reciclagem dignos e reconhecidos, pelo correto tratamento dos materiais dispostos, evitando danos ao ambiente e à saúde, e finalmente pelo aproveitamento do inevitável subproduto do lixo, o biogás (IBGE, 2010).

Também é importante mencionar que a PNRS estabeleceu o ano de 2014 como prazo para que os lixões se adequem às normas ambientais e construtivas de aterros sanitários, fazendo com que os passivos ambientais já causados sejam minimizados.

2.1.7. Aterros Sanitários e Mudanças Climáticas

Os aterros sanitários, como grandes produtores de gás metano, contribuem com aproximadamente 20% da emissão antropogênica de metano (CZEPIEL *et al.*, 2003). Estima-

se que a produção de biogás nos locais de disposição de resíduos perdure por 40 anos após o encerramento de suas atividades, fazendo com que esses locais sejam importantes estruturas para estudar a produção de biogás nos períodos pré e pós-encerramento (QIN; EGOLFOPOULOS; TSOTSIS, 2001).

Na última década, a atenção para as emissões de metano proveniente dos aterros sanitários tem crescido significativamente (CZEPIEL *et al.*, 2003). Os esforços das nações e aterros sanitários individuais estão sendo acompanhados de perto pelas autoridades ambientais competentes, as quais têm a obrigação de quantificar as emissões de metano de aterros sanitários e, posteriormente, publicar as emissões reduzidas (OONK, 2010).

O metano proveniente da decomposição da matéria orgânica depositada nos aterros contribui consideravelmente para as emissões globais de metano. As estimativas das emissões globais de metano, proveniente dos aterros, oscilam entre 20 e 70 t/ano, enquanto que o total das emissões globais pelas fontes antropogênicas equivale a 360 t/ano, indicando que os aterros podem produzir cerca de 6 a 20% do total de metano (IPCC, 1996). O volume e a carga de emissão de metano num aterro são funções da quantidade total de matéria orgânica disposta, de seu conteúdo de umidade, das técnicas de compactação, da temperatura, do tipo de resíduo e do tamanho das partículas. Embora as taxas de emissão de metano decresçam após o encerramento do aterro, isto é, à medida que a fração orgânica decresce, um aterro continuará, tipicamente, a emitir metano durante 20 anos ou mais após seu encerramento (EPA, 1996).

Cassini (2003) apontou que os aterros sanitários são ambientes altamente favoráveis para o crescimento bacteriano por, além de receber resíduo com alta porcentagem de matéria orgânica (em torno de 50%), terem os resíduos cobertos diariamente e facilitando, desta forma, o crescimento de bactérias anaeróbias responsáveis pela formação do biogás.

Um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado como um reator biológico onde as principais entradas são os resíduos e a água e as principais saídas são os gases e o chorume (BORBA, 2006).

2.1.8. Degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e formação do biogás

De acordo com (CASTILHOS Jr, *et al.*, 2003) a conversão biológica da matéria orgânica em aterros sanitários é a principal responsável pela degradação dos resíduos,

resultando na geração de gás (biogás) e no carregamento de moléculas diversas pela água da chuva (lixiviado).

Cassini (2003) afirma que os aterros sanitários são ambientes favoráveis para o crescimento bacteriano, principalmente as bactérias anaeróbias responsáveis pela produção do biogás, principalmente por receber diariamente grande quantidade de matéria orgânica.

O biogás é produzido pela degradação da matéria orgânica em condições de anaerobiose, em processo de fermentação, em que a matéria orgânica é degradada a compostos mais simples, formando basicamente dois gases: metano e dióxido de carbono (COELHO, 2008).

Após a deposição de RSU, devido às atividades microbianas, ingredientes orgânicos biodegradáveis presentes neste tipo de resíduo estão gradualmente divididos, este processo pode ser dividido em cinco etapas (MACIEL; JUCÁ, 2011) e será descrito no próximo item.

A decomposição anaeróbia em um aterro pode ser dividida em fases, entretanto, não há um consenso entre os autores sobre esta divisão, que depende dos dados específicos utilizados e dos objetivos de cada estudo (AUGENSTEIN; PACEY, 1991). Estas fases representam a evolução do processo através do comportamento de parâmetros como a produção de gás e lixiviados ao longo do tempo.

2.1.9. Fases de formação do biogás de aterro

Alguns autores (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993) apontam que há cinco fases de formação do biogás em aterros sanitários e outros (MCBEAN, ROVERS e FARQUHIAR, 1995) defendem que as fases são apenas quatro e que a última fase é de maturação. Entretanto, todos concordam que cada uma dessas fases é dependente de numerosos fatores, incluindo o tipo de resíduo, teor de umidade, nutrientes, tipos de bactérias e nível de pH. As fases de formação são descritas sucintamente abaixo:

- Fase I – Inicial: A decomposição aeróbica da matéria orgânica ocorre imediatamente após a deposição do resíduo, enquanto há oxigênio presente na massa depositada. A principal fonte de microrganismos para as decomposições aeróbicas e anaeróbicas nesta fase é a terra utilizada na cobertura das camadas de resíduos do aterro (ENSINAS, 2003);

- Fase II – Transição: Ocorre a transição da condição aeróbica para a anaeróbica. A capacidade de campo é exercida e o receptor primário de elétrons passa de oxigênio para nitratos e sulfatos. Há a formação de produtos metabólicos intermediários, ácidos orgânicos voláteis (AOV) no chorume (SILVA, 2006);
- Fase III – Ácida: Ocorre a liberação e assimilação de nutrientes importantes, como nitrogênio e fósforo; queda do pH – causando mobilização em possível complexação de metais pesados; AOV – se tornam predominantes com a contínua hidrólise e fermentação dos resíduos orgânicos; e, aparecimento de hidrogênio – controlar a natureza dos metabólicos intermediários (SILVA, 2006);
- Fase IV – Metanogênica: Há o predomínio de microrganismos estritamente anaeróbicos e metanogênicos, que convertem o ácido acético em metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2). A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa dos ácidos seja reduzida consideravelmente (ENSINAS, 2003); e
- Fase V – Maturação: Ocorre uma relativa dormência da atividade biológica, quando comparada à intensa atividade anterior de estabilização dos constituintes mais biodegradáveis, os nutrientes podem se tornar limitantes, há aumento do potencial redox e o reaparecimento do oxigênio e de espécies bacterianas oxigenadas, além da redução, ou até extinção, da produção de biogás (SILVA, 2006).

A Figura 2 ilustra as fases mencionadas.

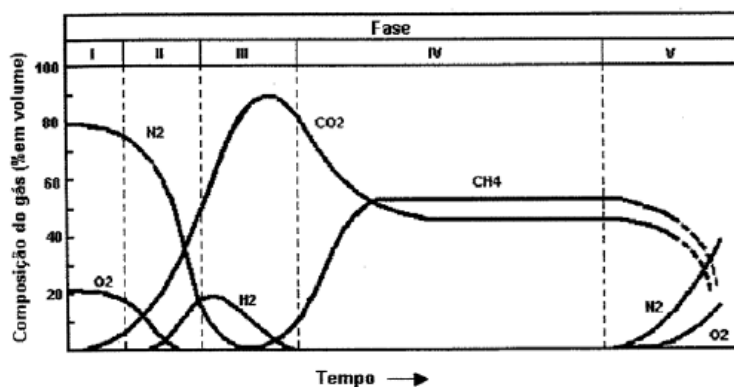


Figura 2 - Fases de formação do biogás em aterros sanitários

Fonte: TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993.

2.1.10. Composição do biogás

Os gases presentes na composição do biogás originado dos aterros sanitários incluem o metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), amônia (NH₃), hidrogênio (H₂), gás sulfídrico (H₂S), nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂). A simples queima do gás metano em *flares* ou seu aproveitamento para geração de energia contribuem significativamente para a minimização dos gases que aumentam o efeito estufa. Estes procedimentos podem gerar, ainda, créditos de carbono por meio do MDL, previsto pelo Protocolo de Kyoto (BORBA, 2006).

A qualidade do gás gerado nos aterros sanitários depende do sistema microbiológico, do substrato (resíduo) sendo decomposto e das variáveis específicas do aterro como acesso a oxigênio para o aterro e o teor de umidade (HAM; MORTON, 1999).

A concentração do biogás gerado em locais de disposição foi abordada por diversos autores, entretanto, a mais amplamente utilizada e aceita até os dias de hoje é a proposta por Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993), tendo em vista que sua composição depende principalmente da quantidade de matéria orgânica depositada no maciço do aterro. Entretanto, McBean, Rovers e Farquhar (1995) e Qian, Koerner e Gray (2002) defendem outros valores médios de concentração. Tais valores são descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Composição do biogás de aterro

Composição do biogás	Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993)	McBean, Rovers e Farquhar (1995)	Qian, Koerner e Gray (2002)
	Concentração (%)		
Metano	45 a 60	50 a 70	45 a 58
Dióxido de Carbono	40 a 60	30 a 50	35 a 45
Nitrogênio	2 a 5	0	<1 a 20
Oxigênio	0 a 1	0	< 1 a 5
Enxofre, Mercaptanas	0 a 1	0,1 a 2	0
Amônia	0,1 a 1	0	0
Hidrogênio	0 a 0,2	<5	< 1 a 5
Monóxido de Carbono	0 a 0,2	0	0
Outros Gases	0,1 a 0,6	0	< 1 a 3

Fonte: TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993, MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995; QIAN; KOERNER; GRAY, 2002.

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

Outros autores ainda apontam que os principais componentes do gás de aterro são CH₄ e CO₂, cada um sendo responsável por cerca de 50% do biogás total e o teor de outros gases, tais como O₂, N₂, H₂S, hidrocarbonetos aromáticos e é extremamente baixa. Segundo os autores, as emissões de CO₂ desta parte são as emissões de carbono a partir de biomassa, que não estão incluídos em suas emissões de GEE (EGGLESTON; BUENDIA; MIWA, 2006).

O biogás com baixa concentração de CH₄ pode ser prejudicial aos motogeradores instalados em projetos de geração de energia por meio de biogás oriundo de aterro sanitário, pois normalmente eles são calibrados para trabalharem com o biogás a uma concentração de metano em torno de 50%, podendo variar entre 45 a 55%. Concentrações diferentes podem alterar a eficiência dos motogeradores e, até mesmo, danificá-los (JUSTI; MOLITERNO, 2008).

2.1.11. Volume de biogás gerado

A produção de biogás em aterros sanitários não é constante, podendo variar consideravelmente durante todo o período de decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos dispostos no aterro (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002).

Os fluxos de biogás gerado e captado nos aterros sanitários dependem da quantidade e qualidade de resíduos dispostos no aterro (PATTHARATHANON; TOWPRAYOON; WANGYAO, 2012).

O volume de biogás gerado, com a degradação da matéria orgânica em condições normais, atinge o pico de produção nos primeiros dois anos e diminui de maneira lenta por até 25 anos ou mais para a produção alcançar níveis próximos à zero (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993).

2.1.12. Fatores interferentes na geração do biogás

A produção de metano a partir da degradação de resíduos sólidos urbanos é um processo de conversão biológica dinâmica utilizando microrganismos como intermediário e afetado por muitos fatores, os principais fatores que influenciam como segue:

- **composição física:** a diferenciação dos materiais que compõe o RSU (restos de comida, madeira, papel, papelão, tecidos, borracha, varrição, plásticos, vidros, metais, etc.), de maneira que a porcentagem de cada um deles interfere diretamente no potencial de geração

de CH₄, devido ao seu potencial de biodegradabilidade. Os restos de comida são os resíduos que possuem maior degradabilidade devido ao alto conteúdo de matéria orgânica (BARLOZ; HAM; SCHAEFER, 1989);

- **composição química:** a produção de biogás é acelerada com aumento de nutrientes de origem orgânica. Segundo Bidone *et al.* (1999), a relação de Carbono e Nitrogênio (C:N) considerada como ótima para a estabilização anaeróbia é de 30:1, os RSU apresentam uma relação de C:N de 50:1;
- **umidade:** O teor de umidade dos RSU depende de alguns fatores como o volume de água presente no próprio RSU, água das chuvas no aterro, medidas de águas superficiais e subterrâneas controle de escoamento. Água complementar adequada é propício à degradação. O movimento da água no interior dos RSU também pode transportar os microrganismos e nutrientes e ao mesmo tempo excluir esses produtos da degradação, acelerando, desta forma, a degradação. Entretanto, o teor de umidade excessiva causará um efeito de arrefecimento, bloqueando o fluxo de gás e resultando na redução da captação de gás. Estudos têm mostrado que o teor de umidade inicial dos RSU em torno 60% a 80% é o mais apropriado para a degradação (HAICHUN; LANLAN; QINGXIA, 2011);
- **pH:** o ótimo intervalo de pH para as bactérias é de 6,7 a 7,5. Com o intervalo ótimo de pH, pode se obter uma alta taxa de crescimento de arqueas metanogênicas. Fora deste intervalo (pH menor que 6 e maior que 8), a produção de CH₄ pode ser seriamente limitada. Segundo (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002) a maioria dos aterros de RSU tendem a apresentar ambientes ácidos; e
- **temperatura:** A geração de biogás também esta relacionada à atividade das arqueas metanogênicas. Há dois tipos de arqueas metanogênicas ativas durante o estágio metanogênico: uma é bactéria metanogênicas de temperatura média com uma temperatura ótima entre 30 ~ 35%; o outro tipo é as é bactéria metanogênica termófilas com a temperatura ótima entre 45 ~ 65% (XUYA; FANGYING; BO, 1999). Assim, a temperatura adequada para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas esta entre 30 e 65%. Uma temperatura muito baixa ou muito elevada fará com que haja a diminuição da produção de biogás.

Estes são os fatores mais importantes que podem afetar as emissões de GEE em locais de disposição, além deles, o pH e a caracterização do local também contribui na

produção de biogás (MORITA e SASAKI, 2012). Características de RSU afetam principalmente as emissões totais de GEE, enquanto que a umidade e a temperatura afetam principalmente degradação meia-vida bacteriana, isto é, afetam a taxa de produção de biogás.

2.1.13. Deslocamento de gases em aterros sanitários

A migração do biogás gerado no maciço dos aterros sanitários ocorre por dois mecanismos, a advecção e a difusão. É possível que a migração de gás também se deva aos gradientes de temperatura (QIN; EGOLFOPOULOS; TSOTSIS, 2001).

- **advecção:** é o transporte devido a gradientes de pressão que são formados pela produção de gás. Os gases são transportados tentando igualar estas diferenças de pressão. A advecção é resultado também de forças de empuxo porque o CH_4 é mais leve do que o CO_2 e o ar (TARAZONA, 2010); e
- **difusão:** é o transporte de substâncias induzidas pelos gradientes de concentração. A decomposição anaeróbia produz grandes concentrações de CH_4 e CO_2 . O fenômeno da difusão tende a fazer com que exista um equilíbrio de concentrações, desta forma fazendo com que o CH_4 e o CO_2 migrem de dentro do aterro para a atmosfera (TARAZONA, 2010).

A migração dos gases no aterro segue a trajetória de menor resistência. Um exemplo disso são os caminhos preferências, tais como: trincas, fissuras no solo de cobertura que facilitam a passagem do gás para a atmosfera. Porém, a facilidade com que o gás se movimenta verticalmente ou horizontalmente dentro do aterro depende de diversos fatores, tais como: tipo de aterro sanitário (vala, trincheira, área), do tipo de solos próximos ao aterro, do tipo de resíduo, da compactação dos resíduos, do tipo de cobertura final e diária utilizada, entre outros. Se o aterro tem um sistema de impermeabilização de fundo, como geomembrana, e a cobertura dos resíduos é feita com solos arenosos, o gás tenderá a migrar verticalmente.

2.1.14. Potencial Energético

O CH_4 presente no biogás é considerado como um dos principais gases causadores do efeito estufa. Desta forma, o biogás gerado nos locais de disposição deve ser captado e aproveitado energeticamente ou simplesmente queimado/incinerado em altas temperaturas (COSTA, 2002).

De acordo com a CETESB (1999), a geração de metano em depósitos de resíduos sólidos urbanos no Brasil é de 677 Gg, cuja densidade é de 0,7168 kg/m³, o que representa 945 milhões de metros cúbicos por ano. Como o metano representa 55% do volume do biogás, têm-se 1.718 milhões de metros cúbicos anuais desse gás, com recuperação típica de 90%, estariam disponíveis 1.546 mm³ de biogás para geração de energia elétrica. Multiplicando este valor pelo poder calorífico do biogás, 5.800 kcal/m³ (CETESB, 1999).

A conversão biológica dos resíduos sólidos para fins energéticos vem ganhando importância a cada dia, uma vez que os resíduos urbanos passaram a ser considerada uma fonte de energia alternativa (SOUZA *et al.*, 2011).

Costa (2002) considerou que a utilização do biogás para fins energéticos pode ser uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgotos domésticos e aterros sanitários, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos.

As primeiras experiências mais significativas no Brasil sobre a utilização de resíduos como fonte energética são relatos das décadas de 1970 e 1980 dos resultados obtidos pelo Projeto Biogás realizados pelas Empresas de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER). Esse projeto foi desenvolvido principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste e consistia no apoio técnico e na transferência de tecnologia para a construção de biodigestores em pequenas propriedades agrícolas (SEBRAE, 2008).

A simples queima do gás metano em *flares* ou seu aproveitamento para geração de energia contribuem significativamente para a minimização dos gases que aumentam o efeito estufa. Estes procedimentos podem gerar, ainda, créditos de carbono por meio do MDL, previsto pelo Protocolo de Kyoto (BORBA, 2006).

A conversão biológica dos resíduos sólidos para fins energéticos vem ganhando importância a cada dia, uma vez que os resíduos urbanos passaram a ser considerada uma fonte de energia alternativa (SOUZA *et al.*, 2011).

Desde 2004, foram iniciadas no Brasil atividades que contribuíram ativamente para a redução da emissão de GEE: a utilização energética do biogás gerado em aterros. Além de

contribuir para a redução das mudanças climáticas globais, essa atividade utiliza uma fonte de energia que está, a princípio, sendo desperdiçada para a atmosfera, sendo este o primeiro atrativo do uso do biogás que será, então, considerado uma energia alternativa, na categoria de biomassa (JUSTI; MOLINETRNO, 2008).

A operação dos aterros sanitários envolve inúmeras intervenções e atividades multidisciplinares, relacionadas à engenharia civil e sanitária e ao controle ambiental. Os critérios operacionais e de monitoramento, hoje adotados na maioria dos aterros sanitários, vieram acompanhados da tentativa da consolidação de instrumentos necessários ao controle ambiental das áreas de disposição final de RSU. Entretanto, o conhecimento dos aspectos operacionais mencionados e sua influência sobre o comportamento dos aterros sanitários têm sido pouco estudados e representam uma lacuna dentro do contexto da disposição de RSU, sendo que existem poucos trabalhos relacionados a este tema (CATAPRETA, 2008).

Pode-se considerar que a queima do biogás para geração de energia elétrica mais amigável ao meio ambiente, à medida que faz menor uso de recursos naturais, contribuindo para que este tipo de geração de energia ele se torne mais amigável ao meio ambiente, pois contribui para a redução das emissões de GEE, sem considerar o fator econômico, pois gera divisas ao Município e ao sistema por meio da comercialização da energia elétrica produzida e pela venda de créditos de carbono (SILVA *et al.*, 2011).

Com a disposição dos resíduos no aterro, inicia-se o processo de biodegradação e consequentemente a geração de gases, principalmente o gás metano e o dióxido de carbono, que são considerados gases causadores do efeito estufa. Os aterros sanitários são responsáveis por 10 a 20% das emissões de metano geradas pela atividade antropogênica. O CH₄ representa uma parcela significativa (50 a 60%) do biogás gerado em aterro sanitário (CANDIANI; SILVA, 2011).

2.2. Gases de Efeito Estufa (GEE)

O efeito estufa é um fenômeno natural e necessário, pelo qual parte do calor emitido pela superfície da Terra, em decorrência da incidência dos raios solares, fica retida nas camadas baixas da atmosfera, conservando uma faixa de temperatura adequada para manutenção da vida no planeta (ICLEI, 2010).

Os gases que existem naturalmente na atmosfera, em pequenas quantidades, são conhecidos como “gases de efeito estufa”. O vapor d'água, o dióxido de carbono (CO₂), o Metano (CH₄), o Óxido Nitroso (N₂O), os Hidrofluorcarbono (HFCs), os Perfluorcarbono (PFCs) e os Hexafluoreto de Enxofre (SF₆), os principais gases do efeito estufa, “prendem” a energia, da mesma forma que os vidros de um carro fechado, ou uma estufa (IPCC, 1996). Esta constatação foi feita, pela primeira vez, por Joseph Fourier, que, em 1824, publicou a Teoria sobre o Efeito Estufa em que afirmou que uma parte da energia solar, que é refletida pelos oceanos e superfície terrestre para o espaço, fica “aprisionada” na atmosfera devido ao vapor d' água e outros gases (CATAPRETA, 2008).

O Efeito Estufa é um processo natural na atmosfera, levando ao aumento da temperatura média do planeta. É causado pela presença adequada de determinados gases na atmosfera da terra, os quais são chamados de GEE, justamente por estarem associados a esse fenômeno. Assim, o Efeito Estufa Natural proporciona ao nosso planeta as condições ideais para o desenvolvimento da vida (CATAPRETA, 2008).

2.3. Mudanças Climáticas

A partir dos anos 1990, tornaram-se mais frequentes as catástrofes relacionadas às mudanças globais do clima, tais como: maremotos, furacões, enchentes e desmoronamentos de grandes áreas causando mortes, doenças e prejuízos, não somente para as comunidades locais, mas também para o governo e as atividades econômicas, que despenderam tempo e dinheiro para tentar remediar os imensos estragos (ICLEI, 2010).

Entretanto, quando essas catástrofes são noticiadas pelos meios de comunicação do país, nem sempre fica claro para o público quais as reais causas desses fenômenos e como eles poderiam ter sido evitados, ou como cada um pode contribuir, na prática, para evitar o agravamento do cenário atual (ICLEI, 2010).

Segundo Ayroza (2011), o crescimento e o desenvolvimento dos países têm sido baseados principalmente em atividades que emitem grandes quantidades de GEE, como a geração de energia pela queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural), desmatamentos e decomposição anaeróbica de matéria orgânica (pecuária e aterros sanitários). O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) define o termo mudança climática como qualquer alteração no clima ocorrido ao longo do tempo, sendo ela

originada de variabilidade natural ou decorrente das atividades humanas (IPCC, 2007). Tal definição pode ser confrontada com a definição da UNFCCC, a qual definiu que as mudanças climáticas são atribuídas direta ou indiretamente às atividades humanas, alterando a composição da atmosfera global e sendo adicional à variabilidade natural do clima observada ao longo de períodos comparáveis de tempo (MCT, 2010).

As mudanças globais do clima, por sua vez, são consequência do aquecimento global, pois com a elevação da temperatura média do planeta, ocorre também maior derretimento de geleiras em regiões polares e de grande altitude, ocasionando a dilatação dos oceanos, mudanças nos ciclos hidro geológicos e fenômenos atmosféricos adversos (ICLEI, 2010).

De acordo com os relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), órgão criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), o fenômeno das mudanças globais do clima vem se manifestando de diversas formas, com destaque para o aumento da temperatura, eventos climáticos extremos, alterações no regime de chuvas, retração das geleiras e a elevação do nível dos oceanos. O argumento é histórico, isto é, os especialistas afirmam que, desde a primeira Revolução Industrial, a temperatura média do planeta aumentou aproximadamente 0,6 °C e vem se acelerando recentemente (CORNETTA, 2011).

Adicionalmente, as medidas mitigadoras, preventivas e corretivas podem beneficiar a saúde pública como, por exemplo, a redução de doenças provocadas pelo excesso de poluição, segurança energética e economia em gastos públicos, até mesmo advindos da prevenção dos desastres ambientais (AYROZA, 2011).

Caso não haja estabilização das taxas de emissão de GEE, as consequências projetadas para pós 2030 na América Latina são: transformação da floresta tropical em savana, risco da perda da biodiversidade por extinção de espécies, diminuição da produtividade de grãos, resultando em risco à segurança alimentar e aumento de pessoas com restrição ao acesso à alimentação, mudança dos padrões de chuva, e o desaparecimento das áreas glaciais, que afetarão a disponibilidade de água para consumo humano, agricultura e geração de energia (IPCC, 2007).

Conforme menciona ICLEI (2010), diversas regiões do planeta já estão sofrendo sérios impactos e prejuízos ambientais, sociais e econômicos em decorrência das mudanças

globais do clima. Algumas previsões feitas pelos cientistas sobre as consequências das mudanças ambientais globais são:

- derretimento das geleiras nas regiões polares em locais de elevada altitude. Como consequência, o volume de água no oceano está aumentando rapidamente, e prevê-se que diversas regiões do planeta serão submersas já nas próximas décadas, tais como a cidade de Nova Iorque, inúmeras ilhas, os Países Baixos, entre outros. Além disso, estima-se que 279 espécies de animais já estão tendo que migrar para regiões mais próximas ao polo, em virtude do aumento do fluxo de gelo que praticamente dobrou na última década. Muitas dessas espécies não resistirão;
- alterações significativas nos ciclos hidrológicos do planeta, com substanciais mudanças nos regimes regionais de chuva e maior ocorrência e intensidade de fenômenos climáticos adversos, tais como enchentes, estiagens, maremotos e furacões, mesmo em locais onde esses fenômenos não ocorriam. A frequência de furacões de categoria 4 e 5 dobrou, nos últimos 30 anos. Como consequência, podemos citar grandes prejuízos para os setores públicos, privado e população local, além da ocorrência de enfermidades e mortes provocadas por essas catástrofes;
- maior ocorrência de incêndios florestais, significativa perda da biodiversidade e alterações nos ecossistemas naturais. O resultado é que muitas espécies animais e vegetais já estão ou em breve estarão em extinção.
- aumento da incidência de doenças tipicamente tropicais, como a malária, que já está ocorrendo nos Andes Colombianos, a 7.000 metros acima do nível do mar;

Segundo as previsões do IPCC (2010), se nada for feito para reverter esse quadro, as consequências podem ser ainda mais terríveis:

- as mortes causadas pelos efeitos do aquecimento dobrarão nos próximos 25 anos;
- o nível dos mares aumentará até 6 metros devido ao derretimento das geleiras;
- ondas de calor serão mais frequentes e mais intensas;
- incêndios em florestas ocorrerão com maior frequência;
- o Oceano Ártico não terá mais gelo em 2050; e
- mais de 1 milhão de espécies estarão extintas em 2050.

2.4. Protocolo de Kyoto

Devido à grande preocupação com a degradação do meio ambiente, em 1997, durante a Terceira Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas realizada na cidade japonesa de Kyoto foi criado o Protocolo de Kyoto.

O Protocolo de Kyoto foi proposto para impor aos países industrializados a exigência legal para que os signatários reduzissem suas emissões de GEE, em média, 5% abaixo dos níveis de 1990 entre os anos de 2008 e 2012 (BLEWETT, 2010).

O Protocolo à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC) foi aprovada na terceira sessão da Conferência das Partes (COP 3), em Kyoto, Japão, em 11 de dezembro de 1997. Nos termos do artigo 24, foi aberta à assinatura de 16 de março de 1998 a 15 de Março de 1999 na sede das Nações Unidas, em Nova York. Até essa data o Protocolo recebeu 84 assinaturas (UNFCCC, 2005). O Protocolo está sujeito à ratificação, aceitação, aprovação ou adesão por Partes da UNFCCC. Partes da UNFCCC que não assinaram o Protocolo podem aderir a ela em qualquer momento.

O Protocolo de Kyoto, que também é considerado como complemento à Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e desenvolvimento (ECO 92), realizada no Rio de Janeiro, em 1992 (VIDIGAL, 2008), entrou em vigor em 16 de Fevereiro de 2005 englobando as Partes incluídas no Anexo I que contabilizaram no total pelo menos 55% de emissões totais de dióxido de carbono em 1990 das Partes incluídas no Anexo I, tenham depositado seus instrumentos de ratificação, aceitação, aprovação ou adesão.

O Protocolo funciona sob o princípio de Responsabilidade Diferenciada, no qual se defende que todas as nações são responsáveis pelos efeitos adversos das mudanças climáticas. Desta maneira, o Protocolo se baseia em dois pilares: limites de emissões de GEE e mecanismos de flexibilização (BANDEIRA, 2011).

Para ser ratificado, o Protocolo de Kyoto necessitava de duas condições: (i) pelo menos 55 nações do total presente na CQNUMC, e (ii) que fosse ratificado por países do Anexo 1 cuja emissão combinada representasse 55% das emissões do Anexo1. Até março de 2004, a Austrália, Mônaco, Rússia e EUA não tinham se inserido ao Protocolo de Kyoto, tornando-o não legal. Entretanto, em fevereiro de 2005, com a adoção de 141 países, mesmo

ainda sem a adesão americana, o Protocolo de Kyoto foi ratificado com mais 61% das emissões planetárias (BANDEIRA, 2011).

Cabe mencionar que os países que compõem o Anexo I são os seguintes: Alemanha, Austrália, Áustria, Belarus, Bélgica, Bulgária, Canadá, Comunidade Europeia, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Federação Russa, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polônia, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, República Tcheca, Romênia, Suécia, Suíça, Turquia e Ucrânia.

Com o Protocolo de Kyoto assinado por diversos países, estabeleceu-se um novo paradigma para empresas que poluem o meio ambiente. Ou seja, a partir da assinatura do tratado as empresas, que no exercício de suas atividades operacionais, poluírem o meio ambiente devem, em contrapartida, como forma de minimizar a poluição produzida, possuir ação de neutralização dos danos nocivos ao meio ambiente (REZENDE *et al.*, 2006)

Com relação aos limites de emissões, o Protocolo de Kyoto determina que os países signatários do Anexo I terão limites máximos (cada nação com seu valor) de emissão de GEE, porém deveriam reduzir suas emissões combinadas de GEE em pelo menos 5,2% em relação aos níveis de 1990, no período compreendido entre 2008 e 2012 (Primeiro Período de Cumprimento) (BANDEIRA, 2011).

O Protocolo de Kyoto garante que os países podem, em cooperação, distribuir suas eficiências ambientais entre os demais, visando alcançar o objetivo global de redução de emissões; é neste ponto que se dá a negociação dos créditos de carbono, uma vez que a empresa ambientalmente eficiente reduz suas emissões acima do estipulado, vende a cota excedente para as empresas que não possuem tal eficiência e, da mesma forma que a anterior, necessitam reduzir suas emissões, sendo que o importante é o saldo final das emissões e reduções globais (RIBEIRO, RESENDE; DALMÁCIO, 2008).

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas foi um marco, pois reuniu países desenvolvidos e em desenvolvimento para discutir soluções e problemas relacionados ao efeito estufa e a degradação da natureza bem como seus impactos no desenvolvimento econômico das nações (BANDEIRA, 2011).

Ainda de acordo com Bandeira (2011), a maior das intenções da UNFCCC, com o Protocolo de Kyoto, foi instigar os países do Anexo I a investirem em tecnologias limpas para o seu desenvolvimento ou se utilizar de algum mecanismo de flexibilização disponível – investindo nos países em desenvolvimento.

Em 2005, o Protocolo de Kyoto passou a vigorar, lançando as bases para um mercado global de carbono, constituído por diferentes mercados regionais ou nacionais, bem como mecanismos de projetos redutores de emissões do tipo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), Implementação Conjunta (IC) ou Comercio de Emissões (CE). Os diferentes mercados divergem em vários aspectos, destacando-se tamanho, características de concepção, abrangências setoriais e geográficas, e natureza, podendo ser voluntários ou não (GUTIERREZ, 2011).

- **Implementação Conjunta:** permite que as Partes do Anexo I participem de projetos de redução de GEE em outras Partes do Anexo I. As reduções resultantes destes projetos podem ser divididas entre as Partes e utilizadas para atingir a metas de ambos as Partes;
- **Comércio de Emissões:** Permite que as Partes do Anexo I que reduzirem suas emissões de GEE além do estabelecido pela meta do Protocolo de Kyoto possam comercializar o excedente com outras Partes do Anexo 1; e
- **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo:** Permite que as Partes do Anexo I invistam em projetos de redução de emissão ou comprem as reduções de projetos desenvolvidos por países não listados no Anexo I. Essas partes podem utilizar essas reduções para atingirem suas metas. Desta forma, este é o único mecanismo de flexibilização do Protocolo de Kyoto que se aplica ao Brasil.

Os países em desenvolvimento também devem tomar iniciativas para reduzir suas emissões, embora o Protocolo não estabeleça metas fixas ou mecanismos de flexibilização voltados a estas Partes. Ainda assim, o Protocolo de Kyoto não tem força de lei e nem estabelece penalidades para as Partes que não cumprirem as diretrizes propostas (JUSTI; MOLIETRNO, 2008).

2.5. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

O MDL é um dos mecanismos de flexibilização do Protocolo de Kyoto, o qual incentiva o financiamento de projetos em países subdesenvolvidos, com o objetivo de auxiliar os países industrializados do não Anexo I a cumprir a meta de redução estipulada no Protocolo de Kyoto. O Brasil está classificado como um país credor, ou seja, país que deve receber dinheiro por projetos de MDL desenvolvidos em território nacional (COIMBRA *et al.*, 2012).

Outro ponto muito relevante do MDL é a possibilidade de transferências entre países de novas tecnologias, *know-how*, além dos recursos econômicos consequentes das vendas dos certificados. Desse modo, se torna crucial para o bom desenvolvimento da proposta do Protocolo que os governos e órgãos construam um ambiente favorável e incentivador. Afinal, se os projetos envolverem desenvolvimento tecnológico, podem reduzir custos e proporcionar maior eficiência para diversos setores na economia (BANDEIRA, 2011).

Está presente na concepção do MDL não apenas a consideração de problemas globais ligados à mudança climática, mas também a necessidade de desenvolvimento das questões locais, como: contribuição para a sustentabilidade ambiental; desenvolvimento de condições de trabalho e geração líquida de emprego; contribuição para a distribuição de renda; para a capacitação e desenvolvimento tecnológico; e para a integração regional e articulação com outros setores (CRUZ; PAULINO, 2010).

Foi acordado também que a participação em projetos de MDL é livre e voluntária, ou seja, é uma alternativa tanto para o poder público quanto para o setor privado, pois ambos têm permissão para desenvolver atividades mitigadoras do efeito estufa e gerarem créditos de carbono (BANDEIRA, 2011).

Conforme estabelecido pelo Protocolo de Kyoto (COP 3) e pelo Acordo de Marraqueche (COP 7), todo projeto MDL tem que ser adicional. Para verificar essa adicionalidade é necessária a construção de uma linha de base confiável, uma vez que isso é uma condição necessária à aprovação do projeto pelo “*Executive Board*” do MDL (ROVERE; COSTA; DUBEUX, 2005).

Complementando Rovere, Costa e Dubeux (2005), Lopes (2002) considera elegível no âmbito do desenvolvimento de mecanismo limpo, que o projeto colabore para o objetivo

principal da Convenção, observando alguns critérios fundamentais, pelo qual uma atividade de projeto deve, comprovadamente, resultar na redução de emissões de GEE e/ou remoção de CO₂, adicional ao que ocorreria na ausência da atividade de projeto de desenvolvimento limpo.

Além disto, a atividade de projeto deve contribuir para o desenvolvimento sustentável do país no qual venha a ser implantada. Deve, ainda, ser capaz de demonstrar benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo relacionado com a mitigação da mudança do clima. A quantidade relativa às reduções de emissão de GEE e/ou remoções de CO₂ atribuídas a uma atividade de projeto resultam em CERs, medidas em tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente, conhecidos como créditos de carbono (LOPES, 2002).

No caso de projetos de aumento da eficiência no uso de eletricidade e de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis para injeção na rede, deve-se estabelecer a proveniência da energia elétrica deslocada pelo projeto. Em outras palavras, deve-se determinar qual tipo de fonte primária (gás natural, óleo combustível, carvão mineral, hidroeletricidade ou nuclear) estaria gerando para a rede, no cenário de referência (ausência do projeto) a energia que virá a ser economizada ou substituída pelo projeto. O conteúdo em carbono desta geração evitada é que determinará a quantidade de reduções certificadas de emissões (RCEs) e a receita com a venda de créditos de carbono propiciada pelo projeto (ROVERE; COSTA; DUBEUX, 2005).

Ainda de acordo com Rovere, Costa e Dubeux, 2005, com base nos acordos definidos em Marraqueche o cenário de referência é aquele que representa razoavelmente as emissões antropogênicas, por fonte de GEE, que ocorreriam na ausência da atividade do projeto proposto. A linha de base também é definida como o cenário “*Business as Usual*”, que é o cenário esperado do setor considerando as práticas usuais e as opções economicamente viáveis. O propósito da linha de base é a de fornecer informações consistentes do que ocorreria na ausência do projeto em termos de emissão de GEE, assim como fornecer informações sobre a redução de emissões estimadas do projeto. Os acordos de Marraqueche estabeleceram três enfoques opcionais para definição de linhas de base:

- Emissões atuais existentes ou históricas;
- Emissões da tecnologia que representa o melhor curso atrativo, levando-se em conta as barreiras ao investimento;

- A média de emissões, do setor relacionado à atividade do projeto, referente aos últimos cinco anos, e cujo desempenho esteja entre os 20% melhores de sua categoria.

Para se beneficiar do MDL é necessário passar por um processo burocrático rigoroso. No documento de concepção de projeto (DCP) deve constar a linha de base utilizada, isto é, o cenário tendencial, que se refere a uma situação hipotética em que não há alteração na situação corrente (AYROZA, 2011).

2.6. MDL e Aterros Sanitários

A emissão de metano nos aterros sanitários é considerada uma das principais fontes de GEE no mundo. A redução dessas emissões está entre as medidas mais viáveis e de baixo custo para reduzir as emissões de GEE (OONK, 2010).

O Brasil possui um relevante potencial gerador de créditos de carbono no setor de aplicação de aterros sanitários, dadas as iniciativas já em andamento, constituindo-se em uma oportunidade promissora para promover a sustentabilidade social e ambiental do desenvolvimento municipal no país, por meio do apoio a uma gestão mais apropriada dos resíduos sólidos urbanos (CRUZ; PAULINO, 2010).

No Brasil, os projetos de MDL em aterros sanitários foram iniciados em junho de 2004 com a aprovação do projeto da Nova Gerar, na Baixada Fluminense do Rio de Janeiro, e do Projeto Vega em Salvador capital da Bahia, ambos com o objetivo de gerar energia por meio do aproveitamento de biogás proveniente dos aterros sanitários (UNEP, 2013). Por meio destes projetos, a recuperação de lixões e a implantação de sistema de geração de energia elétrica em aterros sanitários podem ser viabilizadas economicamente pela venda dos créditos de carbono decorrentes da redução da emissão de carbono para a atmosfera (CRUZ; PAULINO, 2010).

Conforme informações obtidas no site da UNEP (2013), em todo o mundo há 289 Projetos de MDL em aterros sanitários que utilizam a metodologia consolidada pela UNFCCC – ACM0001. Deste total, 158 estão registrados, 4 deles foram rejeitados, 22 possuem sua validação encerrada, 48 ainda encontram-se em fase de validação, 3 solicitaram registro, 38 apresentam solicitação de revisão, 38 apresentam substituição na validação, 8 deles possuem a substituição de validação encerrada e, apenas 1 projeto foi retirado por seu proponente.

Cabe mencionar que os Projetos de MDL brasileiros já emitiram um montante de 26.480.000 tCO₂eq, desde 23 de dezembro de 2003, com a primeira verificação de CERs no Projeto Bandeirantes (UNEP, 2013).

A potência instalada para geração de energia em todos os Projetos deste tipo é de 728,6 MWh, sendo que os Projetos Bandeirantes e São João, localizados no Município de São Paulo, Brasil, e o Projeto Ciudad Juarez no México são considerados os maiores produtores, com capacidade de 22, 20 e 20,8 MWh respectivamente.

Não se sabe ao certo o valor arrecadado (em Euros e/ou Dólar) pelos Projetos de MDL com a comercialização dos CERs e com a venda de energia gerada nos Projetos, pois cada projeto é responsável pela comercialização de CERs e a venda de energia. Além disso, os valores não são fixos para todos e são acordados entre vendedores e compradores. Há também a venda em leilões, normalmente com o preço mínimo baseado em bolsas que comercializam os créditos em mercados futuros, como a ECX e a Bolsa de Chicago.

Atualmente há 68 Projetos de MDL provenientes de aterros sanitários no Brasil (UNEP, 2013). Entretanto, grande parte deles apenas queima o biogás em altas temperaturas, tendo em vista o alto custo de construção/operação/manutenção das plantas e o baixo preço do crédito de carbono no momento da comercialização.

2.7. Processos de Validação e Verificação

Todos os projetos de MDL, para que possam comercializar créditos de carbono de acordo com os mecanismos de flexibilização propostos pela UNFCCC, passam, obrigatoriamente pelos processos de Validação e Verificação ou Monitoramento.

Cada uma das etapas possui, ainda, subetapas as quais ocorrem em uma sequência cronológica. A Figura 3 ilustra as principais etapas que envolvem os projetos de MDL.

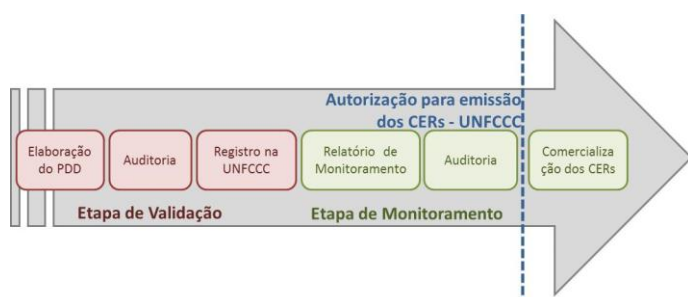


Figura 3: Principais etapas de um Projeto de MDL em Aterros Sanitários

Fonte: Pedott; Aguiar, 2012.

Validação

No contexto do Protocolo de Kyoto, os projetos de MDL obrigatoriamente, num primeiro momento, passam por um processo de validação, a fim de que o Projeto seja registrado na UNFCCC como geradores de créditos de carbono e, num segundo momento, ocorrem as verificações periódicas para checar e garantir a veracidade das informações fornecidas pelos Proponentes dos Projetos. O terceiro momento ocorre quando a UNFCCC, por meio de seu Conselho Executivo, autoriza a emissão dos créditos de carbono (UNFCCC, 2008). Para se beneficiar do MDL é necessário passar por um processo burocrático rigoroso. No *Project Design Document* (PDD) - Documento de Concepção do Projeto em inglês, deve constar a linha de base utilizada, isto é, o cenário tendencial, que se refere a uma situação hipotética em que não há alteração na situação corrente (AYROZA, 2011).

De acordo com Justi e Moliterno (2008), na fase de validação, o *Project Design Document* (PDD) deve conter informações detalhadas de todos os aspectos técnicos e econômicos, além de todas as características do projeto. O PDD será, então, validado por meio de uma auditoria realizada por um organismo competente, denominada Entidade Operacional Designada (EOD), credenciada pela UNFCCC. Uma vez aprovado o PDD pela EOD, ele será enviado para aprovação e registro do Conselho Executivo da UNFCCC (UNFCCC, 2008). A EOD pode ser uma entidade de origem nacional ou estrangeira.

Neste documento, também deve constar a estimativa de produção de biogás, geração de créditos de carbono e energia elétrica, além da análise financeira do projeto a fim de verificar a viabilidade econômica do Projeto.

Cabe mencionar que, após a análise financeira, se o projeto for economicamente viável sem a venda de créditos de carbono, não poderá se tornar um Projeto de MDL, pois infringe uma das regras do MDL.

Verificação

Na fase de verificação ou monitoramento do projeto de MDL, o Proponente do Projeto (PP) se responsabiliza por elaborar relatórios de monitoramento do projeto, a fim de que os créditos de carbono gerados sejam efetivamente certificados e emitidos. Tal verificação também é conduzida por uma EOD, que não deve ser a mesma da fase de validação a fim de evitar conflitos de interesse. Um relatório de verificação elaborado pela EOD é então enviado ao Conselho executivo da UNFCCC que, tem a função de analisar e autorizar o repasse dos CERS gerados ao PP para que os mesmos sejam comercializados (JUSTI; MOLIETRNO, 2008). A Figura 4 ilustra as principais etapas do Ciclo do MDL.

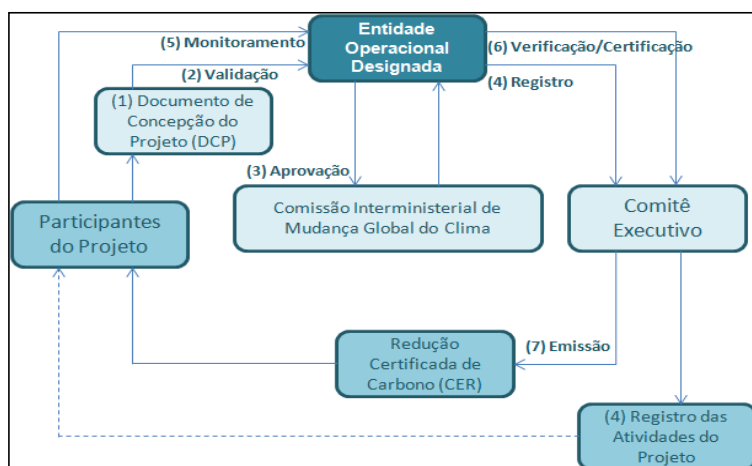


Figura 4: Etapas do MDL

Fonte: Adaptado de Mercado Brasileiro de Emissões, 2005 (BM&F-BOVESPA, 2005).

2.8. Comercialização de Créditos de Carbono

No Brasil, a Resolução nº 1/2003, da Comissão Interministerial de Mudanças Gerais no Clima (CIMGC) reproduz os princípios do MDL definidos no Protocolo de Kyoto, conceituando, inclusive, a CER como uma unidade emitida em conformidade com o

Artigo 12 do Protocolo, igual a uma tonelada métrica equivalente de dióxido de carbono (tCO₂e). Os procedimentos para encaminhamento de projetos à CIMGC também estão definidos na Resolução nº 1/2003. Uma vez aprovado e implantado o projeto, a empresa estará apta para comercializar os CERs. Os compradores destes CER, normalmente são empresas emissoras de GEE, sediadas em países desenvolvidos. Como exemplo, na suposição de uma empresa sediada em um país desenvolvido com uma cota de emissão de 100 (cem) toneladas de carbono/ano, mas que efetivamente emite 120 (cento e vinte) t/ano, para que equilibre a sua meta, ela teria duas alternativas: financiar projetos em países em desenvolvimento ou elaborar um projeto em seu próprio processo produtivo que resulte na redução das emissões potenciais. Assim, o diferencial obtido será o crédito gerado como “crédito de carbono”.

Segundo Vela e Ferreira (2005), O Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio em convênio com a Bolsa de Mercadorias & Futuros (BM&F) lançou no dia 6 de dezembro de 2004, o Mercado Brasileiro de Redução e Emissões (MBRE). Em parceria com a Fundação Getúlio Vargas do Rio de Janeiro (FGV-Rio), a BM&F colocou em operação em Setembro de 2005 um mercado eletrônico de títulos de redução de lançamentos atmosféricos de carbono, na Bolsa de Valores do Rio. Este mercado funciona da seguinte forma:

- A BM&F-BOVESPA, como agente operador, registra os projetos certificados e que comprovadamente exercem uma considerável redução de GEE;
- Após devidamente cadastrados, a BM&F passa a comercializar o CER. Segundo Lozano (2006), a vantagem da negociação por meio da BM&F é que o mercado de CER está se iniciando e, por esta razão, os preços no Brasil são mais atrativos se comparado ao mercado europeu. Além disso, dentre os desafios da BM&F, esta a possibilidade da redução no prazo de registro do projeto para 30 dias.

2.9. Outros mercados

Segundo o relatório do Banco Mundial (WORLD BANK, 2006), elaborado pela *International Emissions Trading Association* (IETA), existem várias fragmentações no mercado de carbono, abrangendo as diversas formas de ativos baseados em projetos em diferentes níveis de interconexão. Razão pela qual alguns analistas usualmente o comparam

com os atuais mercados de moedas estrangeiras do que com o tradicional e padronizado mercado global de *commodity*. O mercado de carbono se mostra complexo e muda rapidamente, pois são influenciados pelas políticas de regulamentação que direcionam a sua criação e são desenvolvidos em diferentes graus em diferentes partes do mundo, assim como em nações e regiões, seguindo as políticas que os envolvem.

O mercado de carbono pode ser segmentado em diferentes números e formas: o principal deles, *compliance* ou *non-compliance*, e mandatórios ou mercados voluntários. Os compradores estão amplamente envolvidos nas transações de carbono em razão da exigência de redução na emissão de carbonos, seja nacional ou em outro nível. Os mercados são segmentados também pelo tamanho das transações.

Principais mercados, segundo o relatório do Banco Mundial (WORLD BANK, 2006):

- European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS) – Regulamentação europeia;
- Chicago Climate Exchange (CCX) – Bolsa americana de adesão voluntária;
- European Climate Exchange (ECX) – Bolsa europeia de adesão voluntária;
- New South Wales (NSW) – Mercado criado na Austrália;
- Keidanren Voluntary Action Plan in Japan – Criado por empresas no Japão, além do mercado criado pelo Banco de Desenvolvimento do Japão;
- Mercado Brasileiro de Reduções de Emissões (MBRE) – BM&F/BOVESPA – Brasil
- Negociação bilateral.

Alguns destes mercados foram criados com o objetivo de atender compromissos de redução de emissões negociados no Protocolo de Kyoto, em que se insere o MDL, enquanto que outros são de natureza voluntária, como, por exemplo, o *Chicago Climate Exchange* (CCX). A proliferação recente de iniciativas nacionais ou regionais no sentido de criação de mercados de carbono atesta a elevada prioridade política dada a este instrumento, como reconhecimento das suas vantagens de eficiência econômica e de instrumento indutor à inovação tecnológica (GUTIERREZ, 2011).

2.10. Ferramentas de Cálculo para estimativa de vazão de biogás e CERs em aterros sanitários

Os aterros sanitários, conforme a NBR 8.419 (ABNT, 1992) é uma técnica de disposição de RSU no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, conforme a necessidade. Esta técnica é considerada como a maneira mais correta de se dispor resíduos sem tratamento prévio no solo.

Com a aprovação da PNRS, a partir do ano de 2014, todos os locais de disposição de resíduos deverão se adequar às normas estabelecidas e adotar as boas práticas de funcionamento, fazendo com que os impactos causados por lixões sejam minimizados e estes locais de disposição sejam ajustados da melhor maneira possível a se transformarem em aterros controlados. Desta forma, faz-se necessário seguir os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 8.419 (ABNT, 1992).

Com a transformação dos lixões e, também com a criação de novos locais de disposição, é importante ter o conhecimento da quantidade de CH₄ que será emitido à atmosfera, tendo em vista os problemas futuros com o aquecimento global.

A execução dos projetos de captação de biogás, com e sem geração de energia, não seria possível sem as metodologias propostas por organismos conceituados para estimar a quantidade de biogás produzido nos aterros sanitários. Elas são capazes de estimar, por exemplo, o pico da produção de biogás e por quanto tempo o Projeto será viável (PEDOTT; AGUIAR, 2012).

Para se estimar a quantidade de biogás a ser produzido em locais de disposição, há diversas modelagens disponíveis: EPA (LandGem), IPCC, Moduelo, Scholl Canyon (World Bank), UNFCCC, entre outras. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens e podem oferecer usos mais específicos como a realização de inventários, como, por exemplo, a utilizada pelo IPCC. Entretanto, a comparação de estimativa de produção de biogás nos Aterros Bandeirantes e São João utilizando tais modelagens não é objeto de estudo do presente trabalho.

Dentre as metodologias acima citadas, apenas a ACM0001 – *Flaring or use of landfill gas* (queima ou uso do gás de aterro), da UNFCCC, permite estimar a quantidade de biogás e créditos de carbono durante um determinado período de tempo. Essa metodologia consolidada de linha de base e monitoramento é baseada em elementos das seguintes metodologias linhas de base e monitoramento aprovadas, também conhecidas como *Approved Methodologies* (AM) – sigla em inglês para metodologias aprovadas:

- AM0002: Redução de Emissões de GEE por meio de captação e queima do gás de Aterro, onde a linha de base é estabelecida por um Contrato de Concessão Pública (aprovada com base na proposta NM0004-versão: Projeto Salvador da Bahia de biogás, cujo documento de concepção do projeto e estudo de base, planos de monitoramento e verificação foram desenvolvidos pelo ICF Consulting (versão 03, junho de 2003));
- AM0003: Análise financeira simplificada para projetos de captação de biogás (Aprovada com base na proposta NM0005: Nova Gerar LFG para projeto de energia, cujo DCP e estudo de base, planos de monitorização e verificação foram desenvolvidos pela EcoSecurities Ltd. (versão 14, julho de 2003) para o Unidade de Financiamento de Carbono do Banco Mundial);
- AM0010: Captação de biogás de aterro sanitário e projetos de geração de energia elétrica, onde a captação do biogás não é obrigatória por lei (Aprovada com base na proposta NM0010-versão: Projeto Durban gás de aterro para geração de energia elétrica, cujo documento de concepção do projeto e estudo de base, planos de monitorização e verificação foram desenvolvidos por Fundo Protótipo de Carbono do Banco Mundial (Abril de 2003));
- AM0011: Recuperação de gás de aterro com geração de eletricidade e sem a captura ou destruição de metano no cenário de referência (Aprovada com base na proposta NM0021: CERUPT metodologia para recuperação de biogás, cujo documento de concepção e planos de estudo, monitoramento e verificação de linha de base do projeto foram desenvolvidas por Onyx (julho 2003).

A ACM0001 esta atualmente em sua 15ª revisão, entretanto, no momento da realização dos cálculos estimativos dos aterros sanitários estudados, a metodologia ACM0001 estava na 13ª revisão.

A primeira versão da ACM0001 é datada de 03 de setembro de 2004. Esta metodologia aprovada e consolidada já apresentou diversos nomes, os quais foram alterados de acordo com a sua evolução. A revisão 02 da ACM0001 foi a mais amplamente utilizada, inclusive os aterros objetos de estudo desta dissertação também a utilizaram. Seu nome enquanto versão 02 era *Consolidated Methodology For Landfill Gas Project Activities – version 02* (UNFCCC 2013).

A ACM0001 pode ser aplicada em atividades de projetos os quais:

- instalam novos sistemas de captação de biogás em locais de disposição de resíduos sólidos novos ou já existentes; ou
- realize investimentos em sistema de captação de biogás existente para aumentar a taxa de recuperação ou altere a utilização do biogás captado, desde que:
 - O biogás captado fosse ventilado ou queimado e não utilizado antes da implementação da atividade do projeto; e
 - No caso de um sistema de captação de biogás ativo existente para o qual a quantidade de gás de aterro não pode ser recolhida separadamente do sistema de projeto após a implementação da atividade de projeto e sua eficiência não é afetada pelo novo sistema do projeto: dados históricos sobre a quantidade de biogás captado e queimado devem estar disponível.
- queima do biogás e/ou utilização do biogás captado em qualquer (combinação) das seguintes maneiras:
 - geração de energia elétrica;
 - geração de calor em caldeira, aquecedor de ar ou forno (queima de cerâmica/tijolo) ou forno de fusão de vidro (Para reivindicar a redução das emissões de outros equipamentos de geração de calor (incluindo outros produtos em fornos), os participantes do projeto podem apresentar uma revisão da ACM0001- rev.13); e/ou
 - abastecimento de biogás aos consumidores finais por meio de uma rede de distribuição de gás natural. Cabe mencionar que no Brasil, o primeiro projeto deste tipo será o Projeto Gramacho, localizado no Aterro Jardim Gramacho no Rio de Janeiro, inaugurado, em sua totalidade, no dia 05 de junho de 2013;

- não reduza a quantidade de resíduos orgânicos reciclados na ausência da atividade de projecto;

A metodologia ACM0001 somente pode ser utilizada se a aplicação do procedimento para identificar o cenário de referência confirma que o cenário mais plausível é:

- liberação de biogás a partir dos locais de disposição de resíduos sólidos; e
- no caso do biogás ser usado na atividade de projeto de geração de energia elétrica e / ou geração de calor em uma caldeira, aquecedor de ar, forno de fusão de vidro ou cerâmica/tijolo;
 - para a geração de energia elétrica: que a eletricidade seja gerada na rede ou em usinas de energia de combustível fóssil cativos; e/ou
 - para a geração de calor: que o calor seja gerado com a utilização de combustíveis fósseis em equipamentos localizados dentro dos limites do projeto.

Esta metodologia não é aplicável em:

- combinada a outras metodologias aprovadas. Por exemplo, a ACM0001 não pode ser usada para reivindicar a redução das emissões para o deslocamento de combustíveis fósseis em um forno ou forno de fusão de vidro, onde o objetivo da atividade de projeto de MDL é a implementação de medidas de eficiência energética em um forno ou forno de fusão de vidro;
- se a gestão do local de disposição dos resíduos sólidos da atividade do projeto é deliberadamente alterada durante a obtenção de crédito, a fim de aumentar a geração de metano em comparação com a situação anterior à implementação da atividade de projeto (UNFCCC, 2013).

De acordo com a metodologia aprovada e consolidada pela UNFCCC, a ACM0001, a quantidade de metano produzido em um ano específico 'y' do período de obtenção de créditos em um aterro sanitário e é expressa como a quantidade de emissão de CO₂ equivalente (CO₂eq).

Antes de elaborar um projeto de MDL em aterros sanitários é necessário avaliar o potencial do local de disposição de reasíduos referente à recuperação de metano (PATTHARATHANOON; TOWPRAYOON; WANGYAO, 2012).

2.11. MDL como ferramenta de Gestão Ambiental

O MDL pode ser considerado uma ferramenta de Gestão Ambiental (SGA), tendo em vista que, assim como o Sistema de Gestão Ambiental proposta pela NBR ISO 14.001, também exige uma série de controles por parte do Proponente do Projeto.

O Proponente do Projeto, no momento da elaboração do DCP elabora, como parte integrante do DCP, o Plano de Monitoramento. O cumprimento de todos os requisitos estabelecidos no Plano de Monitoramento é fundamental no momento de verificação dos CERs emitidos.

O Plano de Monitoramento, documento complementar do DCP, apresenta todas as informações pertinentes aos equipamentos e instrumentos instalados no Projeto como, por exemplo, a frequência de calibração dos instrumentos e datas de instalação de e manutenção dos equipamentos. Desta forma, um SGA auxilia nos controles necessários.

Outros controles também são verificados nos Projetos de MDL, como o cumprimento de condicionantes da licença ambiental, o consumo de energia e a eventual utilização de combustível fóssil pelo projeto (diesel consumido pelos geradores utilizados para dar “start” nas usinas após um eventual desligamento).

A fim de cumprir as exigências operacionais do próprio DCP e do licenciamento ambiental, uma série de atividades, recursos e processos administrativos são necessários, por exemplo:

- monitoramentos periódicos;
- calibração de instrumentos;
- capacitação de mão de obra;
- controle de documentos e registros;
- planos de manutenção preventiva;
- planos de emergência;
- recursos financeiros para manter tudo funcionando;

- procedimentos Operacionais; e
- atribuição de Responsabilidades.

Dessa forma, pode-se caracterizar que existem sistemas de gestão ambiental, mesmo que não certificado, nos projetos de MDL em aterros sanitários.

Cabe mencionar que, de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, o sistema de gestão ambiental é definido por “a parte de um sistema da gestão de uma organização utilizada para desenvolver e implementar sua política ambiental e para gerenciar seus aspectos ambientais. Nota 1 – Um sistema da gestão é um conjunto de elementos inter-relacionados utilizados para estabelecer a política e os objetivos e para atingir esses objetivos. Nota 2 – Um sistema da gestão inclui estrutura organizacional, atividades de planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos, processos e recursos”.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E TÉCNICAS

O procedimento metodológico escolhido para esta dissertação foi o estudo de casos múltiplos com a finalidade de realizar uma comparação entre a estimativa de emissão de biogás e créditos de carbono e o real captado de biogás e de CERs emitidos nos Projetos de MDL localizados nos Aterros Bandeirantes e Sítio São João.

A escolha de ambos os projetos foi intencional, tendo em vista o conhecimento prévio dos projetos, suas localizações na maior cidade da América Latina, fácil acesso às pessoas que obtém informações importantes e, principalmente, por serem os maiores aterros sanitários do Brasil e por serem os únicos a gerarem energia por meio de biogás.

De acordo com Yin (2004), os estudos de caso múltiplos são uma estratégia para análise dos dados, pois para a construção da explanação, que é um tipo mais complexo de adequação ao padrão buscam-se efetivamente relações de causa e efeito entre os dados, exigindo a utilização de casos múltiplos para comparação de resultados.

A literatura acadêmica também tem iluminado os benefícios de um estilo de abordagem de estudo de caso. Em primeiro lugar, estudos de caso permitem verificar a caixa de causalidade e para localizar os fatores intermediários que ficam entre uma causa estrutural e seu suposto efeito. Idealmente, pode-se então "ver" como as variáveis X e Y interagem. Embora muitas vezes seja difícil trazer à tona as diferenças entre os efeitos causais reais e ilegítimos, a ligação entre X e Y pode muitas vezes ser facilmente identificada (GERRING, 2007).

Segundo Yin (2004), as evidências para o estudo de caso podem vir de seis fontes distintas:

a) **Documentos:** Diversos documentos, como os PDDs, relatórios de monitoramento e procedimentos internos, referentes aos projetos de MDL dos aterros Bandeirantes e São João foram avaliados, os quais são de domínio público, tendo em vista que estão disponíveis no site da UNFCCC em www.unfccc.int. Também foram avaliados os relatórios de monitoramento das auditorias de créditos de carbono realizadas em ambos os projetos, bem como os documentos de concepção dos projetos (validação e revalidação). Também foram avaliados

documentos fornecidos pelas empresas responsáveis pelos projetos, como, por exemplo, laudos de análises realizadas e relatórios internos;

b) **Registros em arquivos:** Os documentos disponibilizados pelas proponentes dos projetos foram analisados, como Diários das Equipes de Manutenção, Monitoramento e Operação, bem como os procedimentos internos e tabelas/planilhas de controle para verificação de metodologia de coleta e registro de dados, visando a identificação de possíveis falhas no processo;

c) **Entrevistas:** Duas entrevistas com responsáveis técnicos e/ou operacionais de cada um dos projetos foram realizadas, sendo os principais entrevistados os gerentes da Biogás Energia Ambiental S.A. e da São João Energia Ambiental S.A, além de informações prestadas por telefone, e-mail e *Skype*. Tais entrevistas foram fundamentais para a compreensão do projeto e coleta de informações. As entrevistas foram úteis para verificar informações técnicas tentar identificar eventuais falhas nos sistemas de captação de biogás e geração de energia e créditos de carbono.

As entrevistas foram realizadas de forma a seguir um roteiro semi-estruturado, com abordagem inicial na atual produção de biogás nos aterros, a interferência da baixa produção de biogás na geração e comercialização de energia e quais as principais medidas tomadas pelos proponentes dos projetos para minimizar as perdas financeiras.

Os principais tópicos abordados durante as entrevistas em ambos os aterros foram:

- razões pelas quais a captação de biogás esta abaixo do estimado nos PDDs;
- interferências diretas na produção (campo) e captação (sistema de captação e usina) de biogás;
- arranjo institucional e o encerramento dos locais de disposição estudados;
- monitoramento e medição dos parâmetros das usinas de captação de biogás e geração de energia elétrica;
- dados de composição gravimétrica dos resíduos, pluviometria, quantidade de resíduos dispostos; entre outros.

d) **Observação direta:** Duas visitas técnicas em cada um dos Projetos de MDL foram realizadas. Entendeu-se que devido à complexidade dos projetos será necessária a verificação

de todas as etapas que envolvem a produção e captação de biogás, sendo necessário observar as estruturas utilizadas em campo como, por exemplo, coletores, poços de captação e cobertura final do aterro, por exemplo e na usina a fim de investigar possíveis falhas no sistema como um todo;

e) **Observação participante:** É importante e relevante mencionar a participação da autora da pesquisa, por ter experiência profissional com projetos de MDL em aterros sanitários e resíduos sólidos por aproximadamente sete anos, a observação participante será realizada de maneira direta, isto é, serão observados os pontos considerados mais críticos em ambos os projetos, ou seja, a produção em campo e os gargalos da captação de biogás.

A observação participante, conforme Yin (1993), pode ser considerada um tipo especial de observação, na qual o observador deixa de ser um membro passivo e pode assumir vários papéis na situação do caso em estudo e pode participar e influenciar nos eventos em estudo.

A observação participante, ainda conforme Yin (1993), é um método que tem largo uso nas pesquisas antropológicas sobre diferentes grupos culturais e pode prover certas oportunidades para a coleta de dados que podem dar ao investigador acesso a eventos ou informações que não seriam acessados por outros métodos. Entretanto, tal abordagem também é utilizada em estudos de casos realizados em organizações, como o caso dos aterros sanitários os quais foram realizados a pesquisa.

A participação da pesquisadora autora no Projeto Bandeirantes pode ser considerada mais relevante e completa que no Projeto São João, embora os Projetos sejam semelhantes. A pesquisadora também teve a oportunidade de participar de diversas etapas e testes neste projeto, como verificação de emissão fugitiva nos taludes, perfuração de novos poços verticais para captação de biogás e a cobertura do platô com manta de polietileno de alta densidade. Desta forma, pode-se verificar a rotina das equipes de manutenção de campo, monitoramento do biogás em campo e de operação das usinas de captação de biogás e geração de energia.

No Projeto Bandeirantes, a autora deste trabalho participou ativamente da elaboração de todos os Relatórios de Monitoramento, bem como na elaboração do PDD para a

revalidação, em 2012. Também no Projeto Bandeirantes, a pesquisadora autora também foi responsável por implementar a NBR ISO 14.001:2004, em 2009.

No Projeto São João, por sua vez, houve participação da autora na elaboração dos Relatórios de Monitoramento, entretanto, não houve participação ativa nas rotinas realizadas pelas equipes de manutenção, monitoramento e operação das usinas de captação e geração de energia, embora tivesse conhecimento dos eventuais problemas e falhas para elaborar os relatórios a serem enviados à UNFCCC;

f) **Artefatos físicos:** Documentos de registro de funcionamento dos equipamentos e instrumentos envolvidos nos processo de captação do biogás gerado no aterro foram avaliados, identificando os principais deles para a extração do biogás e a geração de energia elétrica.

Com isto, foram utilizados como fonte de dados secundários os documentos e os registros em arquivos e como dados primários a entrevista e a observação direta, buscando identificar os sistemas de controle ambiental adotados, os resultados obtidos e a caracterização das etapas do processo.

A pesquisa foi desenvolvida com base nos dados e informações fornecidas pelas empresas Biogás Energia Ambiental S.A. e São João Energia Ambiental S.A., responsáveis, respectivamente, pela implantação e operação do projeto de redução de emissões nos Aterros Sanitários Bandeirantes e São João.

A fim de discutir os resultados obtidos e as potenciais causas das eventuais diferenças encontradas nos cálculos, foi utilizado o diagrama tipo espinha de peixe, proposto por Ishikawa (1993). As variáveis a serem analisadas são:

- matéria – prima: foi verificada a composição gravimétrica dos resíduos dispostos nos aterros objeto do estudo de caso, com base em análise fornecida pela LIMPURB/SVMA e também informado pelos proponentes dos projetos. Os valores obtidos foram comparados com o valor *default*, utilizado pela metodologia ACM0001;
- método: foram verificadas informações sobre o método utilizado para cobrir a camada final de cobertura dos aterros; sobre o método de captação inadequada do biogás e, também sobre o método de estimativa utilizado nos primeiros PDDs dos Projetos de MDL nos aterros

Bandeirantes e São João, a metodologia ACM0001 nas versões 02 e 13, embora tal metodologia esteja na 15ª. Versão. Cabe mencionar que a revisão 14 tratou de alterações em outros tipos de projeto, que não os realizados em aterros sanitários. A versão 15 dá instruções para projetos em aterros que visam à produção de até 10MW de energia;

- meio ambiente: Dados como temperatura e pluviometria foram analisados neste componente. Tais dados foram obtidos por meio de pesquisa no site do INMET (www.inmet.gov.br) e comparados com os valores utilizados no momento da estimativa inicial de produção de biogás e CERS, a fim de verificar alguma possível influência na produção de biogás;
- meio de medição: foram observados os principais instrumentos de medição utilizados nas usinas de captação de biogás, sendo eles: medidores de vazão, analisadores de gás, sopradores e *flares*. Desta forma, pretendeu-se verificar possíveis erros oriundos de calibrações e/ou defeitos que possam contribuir para a diferença de volume de gás estimado e gerado;
- mão de obra: Por meio de informações prestadas pelos Proponentes dos Projetos, foram avaliados os cargos relacionados à produção (manutenção de campo) e captação (usina) de biogás, a fim de avaliar possíveis falhas relacionados à qualificação das equipes envolvidas nesses trabalhos; e
- máquina (equipamentos): foi realizada uma verificação *in loco* dos equipamentos utilizados para a manutenção e captação de biogás nos projetos. Essas verificações levaram em conta se houve equipamentos envolvidos na extração de biogás apresentam algum tipo de defeito, de modo a prejudicar a produção/captação de biogás.

A Figura 5 ilustra o Diagrama de Ishikawa utilizado.

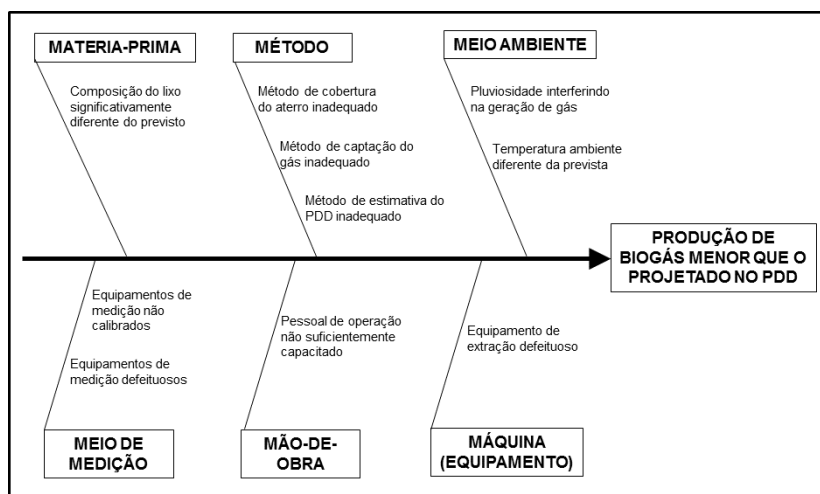


Figura 5 – Exemplos de Potenciais causas da produção de biogás menor que o projetado no PDD

Fonte: Pedott e Aguiar, 2012.

Após a avaliação pretendeu-se apontar possíveis caminhos para os estudos futuros no sentido de aprimorar as estimativas de geração, ou os métodos de operação dos aterros que favoreçam a máxima geração de biogás para fins de aproveitamento energético.

Os dados de geração de gás prevista para cada uma das versões da metodologia ACM001, versões 02 e 13, e dados de captação de gás foram examinados estatisticamente, testando-se as seguintes hipóteses:

- a) Hipótese H_0 : a captação de biogás prevista pela metodologia ACM 001 não se relaciona com as quantidades verificadas de captação real de biogás. Para verificar esta hipótese, foi usado o teste do coeficiente de correlação de Pearson (MARTINS; TEOPHILO, 2009; COSTA NETO, 1988);
- b) Hipótese H_0 : as quantidades de biogás efetivamente captadas são diferentes das quantidades previstas pela metodologia ACM001 em suas versões 2 e 13. Para verificar esta hipótese, foi verificado teste ANOVA de diferenças de médias seguido do teste de Tukey dos intervalos de confiança para identificação das médias diferentes, quando existentes (MARTINS; TEOPHILO, 2009; COSTA NETO, 1988).

Os dados foram processados com uso do software Minitab 16, que calcula para os testes de correlação e ANOVA o parâmetro p-value, que deve ser menor que 0,05 para que as hipóteses H_0 sejam rejeitadas.

Grande parte das informações necessárias para realizar os cálculos foi fornecida pelos Projetos e podem ser confirmadas nas respectivas páginas dos Projetos no site da UNFCCC (www.unfccc.int), com o número de registro dos Projetos – 0164 e 0373, para Bandeirantes e São João, respectivamente.

Nos projetos estudados há diversos *stakeholders* envolvidos, direta ou indiretamente, conforme ilustra a Figura 6. As relações institucionais foram averiguadas superficialmente, tendo em vista que em ambos os aterros, a empresa que opera o aterro tem o dever de mantê-lo mesmo após o encerramento do recebimento de resíduos, mas não participa da distribuição dos CERs gerados. A Figura ilustra o arranjo institucional dos projetos estudados.

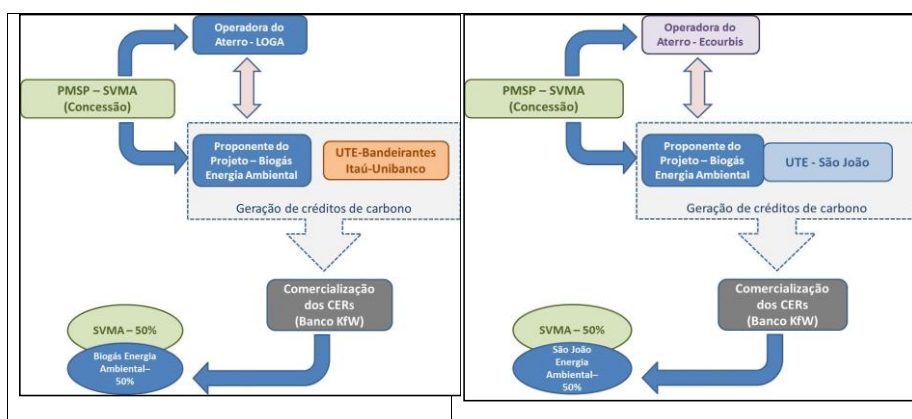


Figura 6: Arranjo institucional dos Projetos Bandeirantes e São João.

Fonte: Elaborado pela autora.

4 RESULTADOS

Neste estudo de casos múltiplos, os objetos da pesquisa foram dois aterros sanitários localizados no Município de São Paulo – Aterro Sanitário Bandeirantes e Aterro Sanitário São João. Ambos os aterros já estão encerrados, isto é, não recebem mais resíduos sólidos urbanos da capital paulista desde o ano de 2007.

Os projetos são considerados os maiores Projetos de MDL do Brasil que utilizam a metodologia consolidada aprovada pela UNFCCC, a ACM0001.

A escolha destes projetos se deu pela facilidade de se obter dados, seja pelo conhecimento prévio dos projetos, pela entrevista com funcionários ou, até mesmo pela presença de dados oficiais publicados nos relatórios de validação (PDD) e monitoramento dos Projetos.

Alguns resultados foram sumarizados em um Quadro-Resumo no Apêndice 01.

4.1. Aterro Sanitário Bandeirantes

O Aterro Sanitário Bandeirantes, que pertence à Prefeitura Municipal de São Paulo, começou a ser estruturado em 1978 e passou a operar em 1979, com a finalidade de disposição de resíduos sólidos urbanos.

O Bandeirantes possui área total de aproximadamente 140 (cento e quarenta) hectares, com altura máxima (profundidade) de 110 metros a contar da primeira camada de disposição de resíduos até o platô.

A área do Aterro Sanitário Bandeirantes é estruturado em 5 áreas, sendo AS1, AS2, AS3, AS4 e AS5, sendo o AS4 e AS5 as áreas mais novas. O AS5 foi a última a receber resíduos.

Até a data de encerramento da operação do aterro, em 12 de março de 2007, foram dispostas aproximadamente 35 (trinta e cinco) milhões de toneladas de resíduos (LOGA, 2008). Das 12 mil de toneladas de resíduos sólidos urbanos gerados diariamente no município de São Paulo até o ano de 2007, 7,5 mil eram dispostas no Aterro Bandeirantes. Tais resíduos eram provenientes das Zonas Norte e Oeste de São Paulo (LIMPURB, 2010).

O Aterro Bandeirantes, seguindo a NBR 8.419 (ABNT NBR 8419, 1992), possui

impermeabilização do solo formada pela combinação de argila compactada e manta de PEAD para fins de evitar infiltração dos líquidos percolados no solo e possível contaminação de lençol freático.

O Aterro Sanitário Bandeirantes é dividido em cinco áreas, sendo denominadas de AS-I, AS-II, AS-III, AS-IV e AS-V. Cabe mencionar que as áreas AS-III, IV e V são as áreas mais novas, estruturadas após 1992. Desta forma, são estas áreas as estruturadas em forma de aterro sanitário, conforme estabelece a NBR 8.469 (ABNT NBR 8419, 1992).

As últimas células a serem encerradas foram aquelas localizadas na área do AS-V e, provavelmente, serão as células as quais esgotarão por último a produção de biogás, tendo em vista que a decomposição da matéria orgânica correrá posteriormente às outras células.

O chorume gerado é escoado por gravidade para as 4 estações elevatórias de chorume localizadas em pontos estratégicos do aterro, que bombeiam o líquido gerado para duas lagoas de chorume instaladas próximas à entrada principal do Aterro.

O chorume é levado por caminhões pipa para o Posto de Recebimento de Efluentes do Piqueri, que é interligado ao sistema da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri (ETE – Barueri). Na ETE, o chorume é tratado até adquirir característica de água de reuso, que é utilizada para umidificar as vias do aterro as quais transitam os veículos que realizam a manutenção estrutural do aterro (LOGA, 2008).

Em um de Captação de biogás e geração de energia, há diversos *stakeholders* envolvidos, direta ou indiretamente, conforme ilustra a figura abaixo. Cada um deles é responsável por uma parte importante no processo de produção e captação de biogás e geração de energia elétrica.

A Operadora do Aterro - LOGA, mesmo sendo envolvida indiretamente no Projeto Bandeirantes, pois não participa da distribuição dos CERs gerados, possui um papel fundamental, que é o de realizar a manutenção do aterro sanitário, ainda que ele já não receba mais resíduo desde o ano de 2007.

A Figura 7 ilustra os *stakeholders* envolvidos, direta ou indiretamente, no Projeto de MDL do Aterro Bandeirantes.

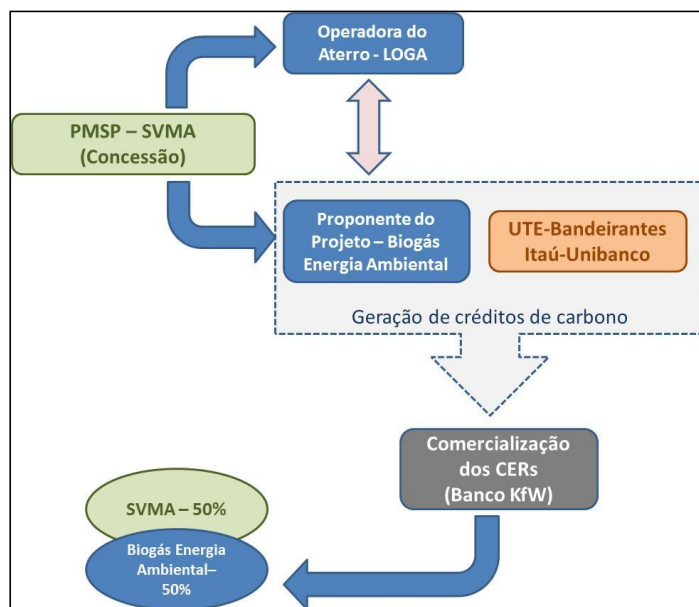


Figura 7: Stakeholders envolvidos no Projeto de MDL do Aterro Bandeirantes

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.1. Histórico da Concessão à Biogás Energia Ambiental S.A.

A Biogás Energia Ambiental SA assinou, em 11 de novembro de 2000, com a Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP), por meio da Secretaria do Verde e Meio Ambiente (SVMA), um contrato de concessão da área do Aterro Sanitário Bandeirantes para exploração de biogás nele gerado, visando a produção e comercialização de energia elétrica e créditos de carbono.

Em 29 de dezembro de 2003, no entanto, houve um aditivo de contrato no qual ficou acertado que a Biogás Energia Ambiental SA partilharia com a PMSP, na proporção de 50% para cada uma das partes, os créditos de carbono gerados pelo projeto BLFGE – 0164. O aditivo também cita que os créditos podem ser comercializados livremente por cada uma das partes, separadamente e no mercado internacional. Em contrapartida, os valores arrecadados pela PMSP com a comercialização dos créditos de carbono, devem ser obrigatoriamente destinados ao Fundo Especial de Meio Ambiente (FEMA).

O FEMA destina-se a apoiar projetos que visem o uso sustentável dos recursos naturais, manutenção, melhoria e/ou recuperação da qualidade ambiental, pesquisa e atividades ambientais de controle, fiscalização e defesa do meio ambiente.

O Fundo Especial de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (FEMA), foi criado pela Lei nº 13.155 de 29/06/2001, com nova disciplina por meio da Lei nº 14.887, de 15/01/2009, vinculado à Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente (SVMA). É regulamentado pelo Decreto nº 52.153, de 28/02/2011 e Decreto nº 52.388, de 03/06/2011 e sua gestão é realizada pelo Departamento de Participação e Fomento a Políticas Públicas (DPFPP) (PMSP, 2013).

O Conselho do Fundo é órgão de instância deliberativa, composto por representantes de Governo e da Sociedade Civil, presidido pelo Secretário Municipal do Verde e do Meio Ambiente, cujas decisões são tomadas pela maioria simples.

O Departamento de Participação e Fomento a Políticas Públicas conta com uma estrutura para avaliar, orientar e supervisionar os planos, programas e projetos. Essa estrutura é composta pela Comissão Técnica de Avaliação (CAV), Comissão de Acompanhamento Técnico (CAT), Comissão de Prestação de Contas (CPC), Departamento de Administração e Finanças (DAF) e a Assessoria Jurídica da SVMA.

O projeto, no momento de sua concepção, pretendia deixar de emitir algo em torno de seis milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera e gerar 20 MWh de energia, suficientes para abastecer 100 (cem) mil residências (JUSTI; MOLIETRNO, 2008).

4.1.2. Comercialização dos CERs gerados

A comercialização dos CERs pertencentes à Biogás Energia Ambiental SA é realizada por meio de um contrato bilateral, ou seja, só envolve as partes contratante e contratada, onde o comprador e o vendedor obtém suas respectivas aprovações e autorizações junto à autoridades locais.

A negociação bilateral se inicia com a identificação de um potencial comprador, o qual tem adequado conhecimento do mercado de CER, apresentando-se a potencialidade do projeto. No referente Projeto, a instituição financeira alemã KfW Bankken Group recebeu um documento denominado de “*term-sheet*” da oferta, que por sua vez, encaminhou uma carta

de intenção de compra após a aceitação de todas as condições por ambos os interessados. Desta forma, foi elaborado um contrato, denominado de “*Emission Reduction Purchase Agreement (ERPA)*” e assinado em 06/04/2006 pela Biogás Energia Ambiental S.A e o Banco alemão KfW.

O contrato assinado previa a venda de cinco milhões de toneladas de CERs até 2012 e estabelecia que os CERs verificados em determinado período estabelecido pela Biogás fossem repassados ao KfW. O valor do CER a ser pago pelo comprador a cada verificação era de EUR 10,00.

Até maio de 2013 foram realizadas dezenove verificações e gerados no Projeto BLFGE – 0164 um total de 4.074.830 CERs, sendo que não há previsão de emissão dos CERs referentes à 18ª Verificação. Do total de créditos gerados, há uma exclusão de 2% que é destinado ao Fundo de Administração da UNFCCC. Após a retirada destes 2%, o restante é dividido igualmente entre Biogás Energia Ambiental e a Prefeitura Municipal de São Paulo.

Faz-se importante mencionar que os créditos de carbono resultantes da 19ª Verificação ainda não foram emitidos pela UNFCCC

A PMSP não possui um comprador fixo de seus créditos de carbono e acumula uma quantidade suficiente de CERs para lançar concorrência pública para oferta da sua cota, por meio de leilões monitorados pela BM&FBOVESPA. Até o momento foram realizados três leilões, totalizando 1.996.673 (um milhão, novecentos e noventa e seis mil, seiscentos e setenta e três) CERs (PMSP, 2014).

Seguem, na Tabela 6 as informações sobre a comercialização dos CER da PMSP, nos dois leilões já realizados.

Tabela 6: Informação sobre comercialização dos CERs gerados no Projeto Bandeirantes

	Período	Data Emissão	CERs emitidos	Taxa UNFCCC (2%)	Distribuição	PMSP	Biogás
1a Verificação	JAN/04 a FEV/06	18/04/2007	1.150.144	23.002	1.127.142	563.571	563.571
2a Verificação	MAR/06 a SET/06	27/12/2006	377.234	7.544	369.690	184.845	184.845

	Período	Data Emissão	CERs emitidos	Taxa UNFCCC (2%)	Distribuição	PMSP	Biogás
3a Verificação	OUT/06 a DEZ/06	25/05/2007	142.928	2.858	140.070	70.035	70.035
4a Verificação	JAN/07 a JUN/07	14/12/2007	356.638	7.132	349.506	174.753	174.753
5a Verificação	JUL/07 a OUT/07	13/02/2008	249.612	4.992	244.620	122.310	122.310
6a Verificação	NOV/07 e DEZ/07	21/04/2008	120.514	2.410	118.104	59.052	59.052
7a Verificação	JAN/08 a MAR/08	07/08/2008	181.273	3.625	177.648	88.824	88.824
8a Verificação	ABR/08 a JUN/08	27/10/2008	160.564	3.211	157.353	78.677	78.676
9a Verificação	JUL/08 a SET/08	28/11/2008	128.676	2.573	126.103	63.051	63.052
10a Verificação	OUT e NOV/2008	26/06/2009	79.919	1.598	78.321	39.161	39.160
11a Verificação	DEZ/08 a MAR/09	20/07/2009	145.355	2.907	142.448	71.224	71.224
12a Verificação	ABR a JUN/09	17/12/2009	89.083	1.781	87.302	43.651	43.651
13a Verificação	JUL a SET/09	14/04/2010	89.303	1.786	87.517	43.759	43.758
14a Verificação	OUT a DEZ/09	23/12/2010	87.846	1.756	86.090	43.045	43.045
15a Verificação	JAN a JUL/10	12/01/2011	192.460	3.849	188.611	94.306	94.305
16a Verificação	AGO a OUT/10	26/04/2011	70.956	1.419	69.537	34.769	34.768
17a Verificação	NOV/10 a 22 DEZ/10	08/09/2011	40.816	816	40.000	20.000	20.000
Total	-	-	4.074.830,00	81.489,00	3.993.341,00	1.996.673,00	1.996.668,00

Fonte: Biogás Energia Ambiental S.A., 2013. UNFCCC, 2013.

A Tabela 7 ilustra a quantidade de CERs vendidos pela PMSP em cada um dos três leilões já realizados:

Tabela 7: Venda de CERs em leilão

	1o leilão PMSP	2o leilão PMSP	3º leilão PMSP
Ano de realização	2006	2007	2012
Total CERs	818.451	444.939	531.643

Fonte: Prefeitura Municipal de São Paulo, 2013 – Secretaria do Verde e Meio Ambiente e FEEMA.

4.1.3. Matéria – prima

A composição gravimétrica dos resíduos depositados diariamente nos aterros sanitários, objetos de estudo desta dissertação, pode ser distinta da utilizada para realizar as estimativas para a elaboração dos PDDs em 2006 e 2009, sendo respectivamente os anos em

que foram publicados no site da UNFCCC as primeiras versões dos PDDs dos aterros Bandeirantes e São João, utilizando a metodologia da UNFCCC, a ACM0001 – revisão 02 e a revalidação do PDD do Projeto Bandeirantes, em 2011, que utilizou a revisão 11 da mesma metodologia.

Para o cálculo da estimativa de produção de biogás realizada na elaboração do primeiro PDD do Aterro Bandeirantes, aprovado pela UNFCCC em 2006, foi utilizado para a gravimetria um valor *default*, assumindo que 50% dos resíduos depositados eram orgânicos, oriundo da coleta municipal de resíduos domiciliares.

Na revalidação do PDD, aprovado pela UNFCCC em 2011, foram utilizados os resultados quantitativos da análise gravimétrica da composição dos resíduos de um estudo realizado por consultoria especializada em aterros sanitários em 2008 e 2009 (FRAL Consultoria de Aterros), o qual caracterizou os resíduos dispostos no Aterro Sanitário Bandeirantes oriundos das regiões Norte e Oeste do Município de São Paulo, conforme Gráfico 2. A amostragem para qualificação dos resíduos foi realizada na área mais nova do aterro, isto é, AS-5, entretanto, o resíduo já havia sido disposto em 2007, ano de encerramento do aterro. O fato de a amostragem ter sido realizada aproximadamente 2 anos após o encerramento do alterou as características da análise, pois a matéria orgânica presente nos resíduos já se encontrava em fase avançada de decomposição. A operadora do aterro não possui registro da caracterização dos resíduos dispostos diariamente nos anos de operação do aterro.

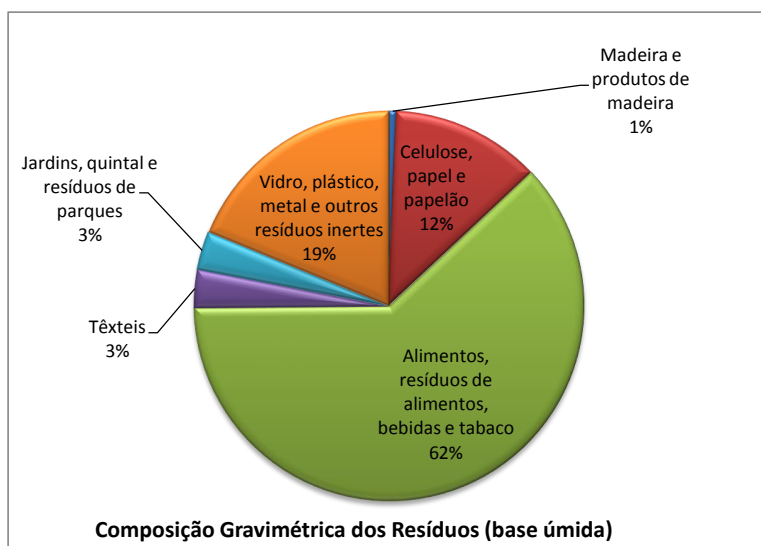


Gráfico 2: Composição Gravimétrica dos Resíduos dispostos no Aterro Sanitário Bandeirantes

Fonte: Adaptado de FRAL CONSULTORIA LTDA, 2009.

Sabe-se que este tipo de informação é essencial para os cálculos de estimativa de produção de biogás em um determinado período de tempo, tendo em vista que os diversos tipos de matéria orgânica possuem tempo de decomposição deferente, pois possuem mais ou menos carbono em sua estrutura molecular. Desta forma, alimentos e resíduos alimentares se decompõem de maneira mais rápida que madeira e resíduos de jardim, por exemplo.

O período estimado de produção de biogás e sua curva de decaimento são importantes, pois são determinantes no momento de realizar o planejamento físico e financeiro do projeto. Quanto maior for a estimativa do fluxo de biogás captado, maior será o investimento em estrutura necessária para realizar a captação, queima e geração de energia elétrica, além de investimento em adaptações nos poços de captação de biogás e no próprio maciço do aterro.

Cabe também citar que devem também ser contabilizados os custos com a elaboração do Projeto de MDL, incluindo consultoria especializada na elaboração do PDD, auditoria para a validação do PDD, auditoria para o monitoramento, taxas relacionadas com a venda de créditos de carbono gerados e as taxas de administração cobradas pela UNFCCC, como taxa para registro do Projeto e percentagem nos CERS gerados e verificados.

Se aplicarmos o valor default de 50% de resíduos orgânicos na ACM0001 – versão 13, os valores estimados de produção de biogás para o período entre os anos de 2004 e 2012 sofrem uma alteração de aproximadamente 35% para mais, fato este que comprova que a gravimetria esta extremamente ligada à produção de biogás em aterros.

Foi realizada pelo Proponente do Projeto Bandeirantes uma análise para verificar os parâmetros dos resíduos dispostos no Aterro Bandeirantes. Desta forma, verificou-se nos laudo que umidade média dos nove poços selecionados para realizar a análise gravimétrica dos resíduos dispostos é 37,90%, enquanto que a quantidade média de matéria orgânica presente esta em torno de 18,8%. A análise foi realizada pelo Laboratório Operator no ano de 2008 e fez parte de um estudo realizado pela Biogás Energia Ambiental S.A para confirmar a umidade e qualidade dos resíduos presentes no maciço do aterro, num momento prévio a cobertura.

O tempo de operação do local de disposição também é importante, tendo em vista que há diversos tipos de resíduos orgânicos e que seu tempo de decomposição ocorre em função da quantidade de carbonos presente em sua cadeia carbônica. Restos alimentares, por exemplo, se decompõem mais facilmente que madeira, pois a cadeia carbônica da madeira é mais extensa que a cadeia presente nos alimentos.

A quantidade de resíduos disposta nos aterros também é importante no momento de elaborar os cálculos estimativos, pois quanto mais houver disposição de resíduos orgânicos, maior será a produção de biogás.

A quantificação dos resíduos dispostos diariamente nos aterros ficou a cargo das operadoras, sendo Heleno & Fonseca (até 2006) e LOGA S.A (a partir de 2006) no Aterro Sanitário Bandeirantes e Ecourbis no Aterro Sanitário São João.

Tão logo os caminhões entram no aterro, são pesados e seguem para a disposição em local indicado pela operadora do aterro. Após descarregarem, são novamente pesados. Desta forma, sabe-se a quantidade que cada caminhão depositou.

A Tabela 8 discrimina a quantidade de resíduos dispostos nos aterros objeto de estudo desta dissertação. Entretanto, faz-se necessário mencionar que nos primeiros PDD elaborados, alguns anos tiveram seus valores de resíduos dispostos estimados, tendo em vista que não se

conhecia tais valores. No segundo momento, foram utilizados os valores reais depositados, informados pelas operadoras dos aterros.

Tabela 8: Quantidade de resíduos disposta desde a abertura até o encerramento do Aterro Sanitário Bandeirantes:

Ano	Resíduo Disposto (t)	Ano	Resíduo Disposto (t)
1979	37.450	1994	1.616.710
1980	229.040	1995	1.823.170
1981	231.408	1996	1.971.651
1982	313.633	1997	1.992.386
1983	321.956	1998	2.142.325
1984	325.585	1999	2.305.464
1985	408.887	2000	1.964.424
1986	801.366	2001	2.043.617
1987	1.017.866	2002	2.082.855
1988	1.283.852	2003	1.993.371
1989	977.852	2004	1.965.347
1990	1.206.964	2005	1.594.350
1991	1.224.954	2006	1.974.799
1992	1.508.817	2007	489.627
1993	1.377.148	TOTAL	37.226.874

Fonte: Biogás Energia Ambiental S.A, 2010 e LOGA S.A, 2010 – Dados utilizados na revalidação do PDD.

O Gráfico 3 ilustra as quantidades supracitadas.



Gráfico 3: Quantidade de resíduos disposta desde a abertura até o encerramento do Aterro Sanitário Bandeirantes

Fonte: Biogás Energia Ambiental S.A, 2010 e LOGA S.A, 2010 – Dados utilizados na revalidação do PDD.

Cabe mencionar que em 2005, no momento da estimativa de produção de biogás para o Projeto de MDL do Aterro Sanitário Bandeirantes, os valores referentes aos volumes a serem dispostos nos anos de 2005, 2006 e 2007 eram de 1.850.000 t/ano. Nos cálculos realizados posteriormente, foram corrigidos os volumes dispostos em tais anos, pois tais volumes já eram conhecidos.

4.1.4. Método

Nos métodos, foram verificadas informações sobre o pH dos resíduos, a qualidade da cobertura da camada final (qualidade do solo utilizado, grama plantada e emissões fugitivas de gás), sistema de drenagem de chorume e gás, sistema de captação de gás e as estimativas de produção de biogás no Aterro Bandeirantes, por meio da metodologia ACM0001, revisões 02 e 13.

4.1.4.1. pH

Não foram verificadas análises periódicas do pH nos resíduos depositados no maciço do aterro e nem do chorume, embora seja de conhecimento que a análise do chorume seja

realizada. A realização destas análises é de responsabilidade da operadora do aterro, que não forneceu os dados, alegando confidencialidade de informação.

A Proponente do Projeto realizou, no ano de 2008, uma análise dos resíduos presentes na área mais nova de disposição de resíduos. Tal análise verificou que o pH médio das amostras estava em torno de 9,1.

4.1.4.2. Cobertura do Aterro

Na entrevista realizada com o gerente operacional do Aterro Sanitário Bandeirantes, foi informado que foi em meados de 2007, a Biogás Energia Ambiental S.A realizou uma análise gravimétrica na cobertura final das camadas de resíduo disposto para verificar a qualidade da terra utilizada pela LOGA S.A – operadora do aterro. Foi verificado, durante a visita técnica, o laudo da análise emitido por um laboratório de confiança da proponente do projeto, o qual apontou que a terra utilizada na cobertura final apresenta característica arenosa.

A profundidade média de cobertura verificada na última camada, conforme medições realizadas pela Biogás Energia Ambiental S.A, estava em torno de 30 cm.

Tanto a qualidade da terra quanto a profundidade são diferentes do proposto pela Operadora do Aterro em seu Plano de Encerramento apresentado para o órgão ambiental do Estado de São Paulo – CETESB em 2007, o qual previa uma terra com qualidade argilosa e cobertura entre 0,60 e 1 m de terra.

A terra, que é espalhada por todo o maciço, é compactada e posteriormente é plantado grama para melhorar o visual do aterro.

A grama plantada após a cobertura com terra argilosa foi a “Batatais” - *Paspalum notatum*, enquanto que a prevista no Plano de Encerramento era a “Esmeralda”- *Zoysia japonica*. A grama Batatais (R\$ 1,50 m²), conforme informado pelo Proponente do Projeto, custa menos que a prevista Esmeralda (R\$ 2,80 m²). Para verificar a veracidade da informação, foi realizado em janeiro de 2014 um orçamento com empresa especializada. Cabe mencionar que o custo total com a compra da grama Batatais foi de aproximadamente R\$ 1.965.000,00 (um milhão e novecentos e sessenta e cinco mil Reais) e o plantio da grama Esmeralda corresponderia a R\$ 3.164.000,00 (Três milhões e cento e sessenta e quatro mil Reais), apresentando uma economia para o operador do aterro de aproximadamente R\$ 1,5

milhão. Se compararmos ao custo total do Projeto Bandeirantes, que custou US\$ 30 milhões (com cotação do dólar na época em torno de R\$ 2,20) – R\$ 66 milhões, esta diferença representa 0,22% do valor total do projeto.

Não foi possível mensurar a perda de receita oriunda da não geração e CERs e energia elétrica, pois não há como estimar a quantidade de biogás que se perdeu para a atmosfera em decorrência do plantio de grama inadequada.

Outro ponto negativo da grama Batatais, conforme informado pelo gerente do aterro Bandeirantes durante a entrevista, é que, por possuir raízes mais grossas, aumenta a possibilidade de fissuras no maciço e taludes do aterro. As fissuras nos taludes e maciço do aterro foram verificadas pessoalmente no ano em que elas ocorreram, nos anos de 2007 e 2008, e, também, em fotos feitas pela equipe de monitoramento de campo do Projeto Bandeirantes, conforme consta no relatório elaborado na época para documentar os fatos. Cabe mencionar que a situação perdurou até o momento em que o platô do aterro foi coberto com a manta de PEAD, no ano de 2009.

O ponto positivo é que, por justamente possuir raízes mais grossas, a grama Batatais permite que a água das chuvas penetre nos taludes do aterro, auxiliando as arqueas metanogênicas no processo de decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos dispostos, que precisa de umidade para ocorrer. Cabe mencionar que a água de chuva não penetra no maciço do aterro Bandeirantes, pois esta última camada de resíduos foi coberta com material impermeável – PEAD. Desta forma, a grama Batatais plantada nos taludes do aterro Bandeirantes auxilia a manutenção bacteriana.

Foram constatadas, entre os anos de 2007 e 2008, diversas fissuras em pontos localizados principalmente na última camada de cobertura do aterro bandeirantes. Não foi possível mensurar a quantidade de trincas, tendo em vista que algumas estavam localizadas em locais de acesso remoto, entretanto, estima-se algo em torno de 25 (vinte e cinco) trincas no platô do aterro. As fotos abaixo ilustram as trincas. As maiores apresentavam até 9 cm entre bordas e a maioria apresentava 3 a 4 cm entre bordas.

É importante citar que as trincas não foram, necessariamente, geradas unicamente pela grama, mas favorecidas por ela. As trincas também são geradas pelo excesso de calor e ausência de chuva, provocando um processo semelhante ao de erosão no aterro.



Figura 8: Trinca de aproximadamente 4 cm.



Figura 9: Trinca de aproximadamente 9 cm.

Figuras 8 e 9: Trincas visualizadas no Aterro Bandeirantes

Fonte: Acervo Biogás Energia Ambiental S.A, 2007.

Desta forma, entende-se que estes três fatos estão diretamente relacionados à emissão fugitiva de biogás pelo maciço e taludes do Aterro Bandeirantes.

No momento do encerramento do aterro, a última camada de resíduos foi compactada e, posteriormente, coberta com terra e grama. Nessa época ocorreram as fissuras. Decidiu-se então realizar os testes com as lonas instaladas em locais estratégicos e, após os resultados, cobrir o platô do aterro. Entretanto, não há cobertura de PEAD nos taludes, que são cobertos de terra e grama.

A emissão fugitiva do biogás produzido no Aterro Bandeirantes pode ser observada nas fotos abaixo. Tais fotos fazem parte de um relatório produzido pela Biogás Energia Ambiental S.A após a realização de um teste de emissão fugitiva de biogás. O teste consistiu em instalar lonas de PVC em locais estratégicos e que apresentavam as maiores trincas.



Figura 10: Lona instalada no talude.

Figura 11: Lona instalada no platô.

Figuras 10 e 11: Teste de Emissão Fugitiva de Gás no Aterro Bandeirantes

Fonte: Acervo Biogás Energia Ambiental S.A, 2007.

Após conclusão dos testes, para tentar solucionar o problema das emissões fugitivas, o proponente do projeto optou por cobrir o maciço do aterro com lona de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), em uma área que cobre aproximadamente 95% do platô.

Além disso, foram perfurados 40 poços novos de drenagem de biogás, para tentar minimizar a emissão fugitiva, considerando também o fato de provável entupimento das drenagens de gases e chorume antigos. Os poços foram perfurados em locais estratégicos, após a verificação de bolsões de gás em vários pontos do aterro.

A princípio, os resultados superaram as expectativas. Em longo prazo, os resultados não se mostraram satisfatórios, principalmente pela cobertura, tendo em vista que as bactérias necessitam de umidade em seu processo de produção do biogás.

4.1.4.3. Captação de biogás

Assim como a gravimetria e volume de resíduos, temperatura e umidade, sistemas eficientes de drenagem de gases e chorume são essenciais para que a captação do biogás seja realizada de maneira eficiente.

Os poços de drenagem de gás tiveram que ser adaptados pela Biogás Energia Ambiental S.A no início das instalações do projeto para receberem os cabeçotes acoplados à tubulação de PEAD, com diâmetro de 110 mm. Assim sendo, a captação do biogás é realizada por meio de adaptação dos poços até um grupamento de ramais, o coletor, o qual recebe o

biogás proveniente de até 18 poços captados. Deste coletor, o biogás segue por uma tubulação de diâmetro superior (315 mm) até a usina de captação.

O processo de captação de biogás no aterro é semelhante em ambos os projetos. Ele ocorre por meio de pressão negativa exercida por equipamentos chamados *blowers* – ou sopradores em português. Tais equipamentos são instalados na usina de captação e são os responsáveis por realizar a sucção do biogás dos poços de captação espalhados pelo aterro. Estes equipamentos são fundamentais, tendo em vista que grande parte dos poços captados são passivos, ou seja, necessitam que seja feita uma sucção para extrair o biogás.

Conforme informado pelos gerentes operacionais e visualizado *in loco* em ambos os aterros estudados, apenas 35% dos poços captados de biogás são ativos, ou seja, 65% necessitam de auxílio mecânico dos *blowers* a fim do gás ser enviado à usina de captação.

O processo de captação do gás é importante, tendo em vista que a usina de geração de energia precisa receber um biogás com certa especificação, ou seja, entre 45 e 55% de metano e até 2% de oxigênio.

Esta concentração é necessária, pois os motogeradores, responsáveis pela combustão do metano e geração de energia, estão regulados para trabalharem com a concentração média de 50% de CH₄ no biogás, com variação de 5% para mais ou menos.

Desta forma, quando ocorre uma variação maior que 5%, os motores são desligados automaticamente, prejudicando a produção de energia e créditos de carbono provenientes da geração. A perda de créditos de carbono só não é maior, pois quando a usina de geração é desligada, os *flares* entram automaticamente em operação a fim de queimar a temperaturas superiores a 1000°C o metano presente no biogás e, desta forma, gerar créditos de carbono.

Faz-se importante citar que, em ambas as situações, quando há o desligamento da usina de geração de energia, o biogás, independente da qualidade, é enviado aos *flares* e queimado em condições normais. Tendo em vista que não há restrição de concentração de metano ou oxigênio, a queima é realizada com sucesso, entretanto não há o adicional de 5% de CERs oriundos da geração de energia.

Os Diários de Operação das Usinas de Captação e Geração de Energia Elétrica foram observados durante as visitas técnicas nos dois projetos e, não foi possível verificar com clareza este tipo de registro. Entretanto, conforme informações prestadas pelos gerentes

operacionais dos projetos no momento da visita técnica, as usinas de captação ficam paradas por problemas técnico-operacionais desta natureza ao menos duas vezes ao mês. Conforme informado pelos gerentes dos aterros e confirmado pela verificação no Diário de Operação das Usinas, as paradas são de aproximadamente três horas, prejudicando financeiramente os projetos. Sendo assim, as usinas de captação ficam paradas aproximadamente 72 horas/ano, o que representa algo em torno de 1% das horas úteis de funcionamento.

Além da variação na concentração de CH_4 , a variação de O_2 também prejudica a captação de biogás. No momento em que o analisador de gases registra tal concentração, é emitido um alarme no sistema informatizado para avisar aos operadores da usina que os motogeradores da usina de geração de energia serão desligados caso uma medida de emergência não seja tomada. Desta forma, são acionados os técnicos de campo para verificarem de qual local provem o O_2 e como solucionar o problema. Na maioria das vezes há rompimento de tubulação devido à manutenção de poços, mas pode acontecer rompimento pela passagem de caminhões e/ou máquinas pesadas em cima das tubulações de PEAD que levam o biogás até a usina de captação.

4.1.4.4. Sistema de drenagem de chorume e gás

Por se tratar de aterro sanitário antigo, o Bandeirantes não foi estruturado para se tornar projeto de MDL com captação e queima de biogás e geração de energia elétrica.

Desta forma, os poços de drenagem de gás instalados juntamente com a operação do aterro devem passar por manutenção devido ao recalque natural do aterro. Os poços são praticamente refeitos desde a sua base, pois se estiverem obstruídos, impedem a passagem do biogás, que percorre outro caminho, possivelmente por pequenas rachaduras, até chegar à superfície do aterro. Sendo assim, há perda no volume total de biogás captado, prejudicando a geração de créditos de carbono e energia elétrica no período entre a ocorrência e o final do trabalho de manutenção, que durava em média dois dias, dependendo das condições meteorológicas, pois em períodos de chuva a manutenção é mais lenta devido às medidas preventivas de saúde e segurança ocupacional (SSO). Tais medidas incluem desde a utilização de equipamentos individuais de proteção como, capas de chuva, botas de cano alto, até o isolamento de uma área maior tendo em vista que algum trabalhador possa escorregar para dentro da vala que é cavada no momento da manutenção. Os operadores de retroescavadeira e

motoristas de caminhão também são instruídos, por meio da realização de treinamento interno e procedimentos de SSO, a ficarem mais atentos e terem mais cautela.

O sistema de drenagem de chorume e de biogás, muitas vezes tem de passar por reparos, devido ao tráfego constante de máquinas pesadas e caminhões. O fluxo constante de máquinas diminui consideravelmente à medida que o aterro passa pelo processo de descomissionamento e suas atividades vão chegando ao fim, beneficiando de forma considerável o monitoramento e a manutenção de campo, tendo em vista que os rompimentos e entupimentos nas tubulações passam a ser praticamente nulos.

De acordo com informações dos gerentes das usinas e comprovado pela observação no Diário de Operação de ambos os projetos, atualmente é difícil observar este tipo de ocorrência, entretanto há registros no Diário de Operação de duas ocorrências, no aterro Bandeirantes, nos anos de 2008 e 2009, em que caminhão e retroescavadeira danificaram tubulações das linhas principais de envio de biogás dos coletores à usina de captação. As paradas foram de aproximadamente 4 horas, prejudicando a geração, na época, de aproximadamente 3600 CERs e 80 MW de energia elétrica.

4.1.4.5. Estimativa de geração de CERs

Analisando as estimativas realizadas nos distintos momentos, elaboração do primeiro PDD em 2005 e no ano de 2013, por meio da metodologia da UNFCCC – ACM0001 – versões 02 e 13, percebeu-se uma diferença de estimativas de 30,4% considerando-se o total no período 2004 a 2012, e as emissões verificadas são 51,2% menores que as previstas no PDD no período com dados de validação (2004-2010). A Tabela 9, aponta os valores estimados pelas duas versões da ACM0001 e o real captado.

Tabela 9: Estimativas de produção de biogás e a captação real no Aterro Sanitário Bandeirantes

Ano	Bandeirantes				
	Estimativa de Emissões (t CO ₂) calculada pela metodologia ACM0001- rev. 02 (1)	Estimativa de Emissões (t CO ₂) calculada pela metodologia ACM0001- rev.13 (2)	Emissões verificadas (t CO ₂) (1)	Diferença entre as emissões reais e a estimativa pela ACM0001 – rev. 02	Diferença entre as emissões reais e a estimativa pela ACM0001 – rev. 13
2004	748.624	1.035.510	506.063	32,40%	51,13%
2005	1.086.919	995.370	552.069	49,21%	44,54%

Ano	Bandeirantes				
	Estimativa de Emissões (t CO ₂) calculada pela metodologia ACM0001- rev. 02 (1)	Estimativa de Emissões (t CO ₂) calculada pela metodologia ACM0001- rev.13 (2)	Emissões verificadas (t CO ₂) (1)	Diferença entre as emissões reais e a estimativa pela ACM0001 – rev. 02	Diferença entre as emissões reais e a estimativa pela ACM0001 – rev. 13
2006	1.364.960	1.015.351	612.173	55,15%	39,71%
2007	1.236.153	851.128	726.764	41,21%	14,61%
2008	1.120.186	672.813	586.770	47,62%	12,79%
2009	1.015.780	533.332	375.248	63,06%	29,64%
2010	921.782	433.793	304.232	67,00%	29,87%
2011	768.201	361.517	N/D	-	-
2012	654.396	307.960	N/D	-	-
Total	8.917.001	6.206.774	3.663.319	58,92%	40,98%

Fontes: (1) Biogás Energia Ambiental, 2005. (2) Biogás Energia Ambiental, 2011.

A não disponibilidade de dados referente às diferenças relacionadas aos valores do ano de 2011 e 2012 é justificada pelo fato de as emissões reduzidas produzidas pelo Projeto nos referidos anos ainda não terem sido aprovadas pela UNFCCC para comercialização.

Pode-se perceber que a diferença entre as emissões verificadas e a revisão 02 da ACM0001 são maiores se comparadas com a revisão 13. Tal fato se deve aos avanços da metodologia ao longo de aproximadamente 8 anos.

Para melhor visualizar e ilustrar os valores acima foi elaborado o Gráfico 4, ilustrando os valores estimado *versus* os reais.

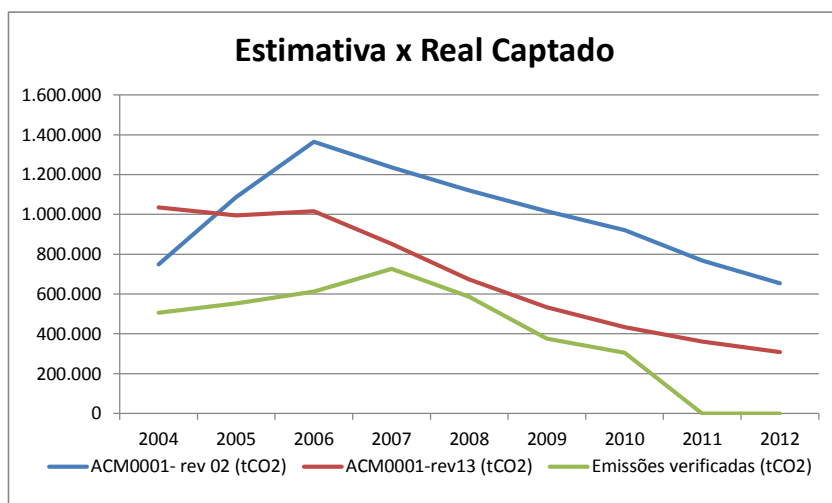


Gráfico 4: Valores estimados versus valores captados

Fontes: (1) Biogás Energia Ambiental, 2005. (2) Biogás Energia Ambiental, 2011.

Os resultados supracitados foram submetidos aos testes estatísticos, conforme descrito na metodologia. O Quadro XX mostra os resultados. Quadro XX: Resumo dos testes estatísticos realizados no Projeto Bandeirantes	
Correlação de Pearson ACM001 rev2 x emissões verificadas	r = 0,628 p = 0,131
Correlação de Pearson ACM001 rev13 x emissões verificadas	r = 0,671 p = 0,099
ANOVA unidirecional	P=0,003
Com Teste Tukey	Agrupamento A: ACM001 ver 2 Agrupamento B: ACM001 ver 13 Emissões verificadas P = 0,003

Quadro 1: Resultados do teste de Tukey

No caso do Aterro Bandeirantes, os resultados estatísticos mostram que, ao nível de significância de 5% não há evidência estatística de correlação entre a geração real e qualquer das duas metodologias usadas para a previsão da geração. Por outro lado, o teste ANOVA seguido de Tukey permite concluir que os resultados da metodologia ACM001 ver 13 se aproximam mais dos resultados reais que a metodologia ACM001 ver 2, o que poderia ser considerado indício de alguma melhoria na previsão.

4.1.5. Meio Ambiente

Nesta seção são descritas as variáveis consideradas como interferências externas à produção de biogás, como a pluviosidade, temperatura e maturação bacteriana relacionadas ao Projeto Bandeirantes.

4.1.5.1. Pluviosidade

A pluviosidade, além de fornecer umidade para a produção do biogás, promove uma pequena vedação do solo, evitando a emissão fugitiva de biogás pelo maciço do aterro, ainda que por pouco tempo.

O valor utilizado pelo Proponente do Projeto Bandeirante para realizar os cálculos de estimativa de biogás e créditos de carbono, conforme ACM0001 – versão 13 foi 1.376,2 mm.

Entretanto, a média mensal pluviométrica verificada, conforme estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada na região de Santana, Zona Norte de São Paulo, foi de 157 mm para os anos de 2009 A 2012. A média anual do período entre 2009 e 2012 é aproximadamente, 1.884 mm por ano. O Gráfico 5 ilustra os índices pluviométricos registrados entre os anos de 2009 e 2012.

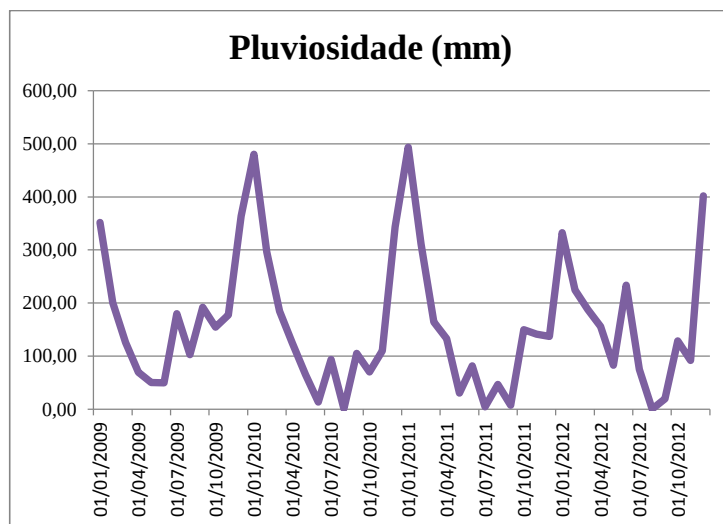


Gráfico 5: Índices pluviométricos (2009 e 2012)

Fonte: BDMEP – INMET, 2014.

4.1.5.2. Temperatura

No Projeto Bandeirantes, para realizar as estimativas de produção de biogás e CER, conforme a ACM0001 – versão 13, foi utilizada uma temperatura média de 20,7 °C. Entretanto, verificou-se que a temperatura média para o Município de São Paulo, no mesmo período foi de 21,19°C. O Gráfico 6 ilustra esta informação.

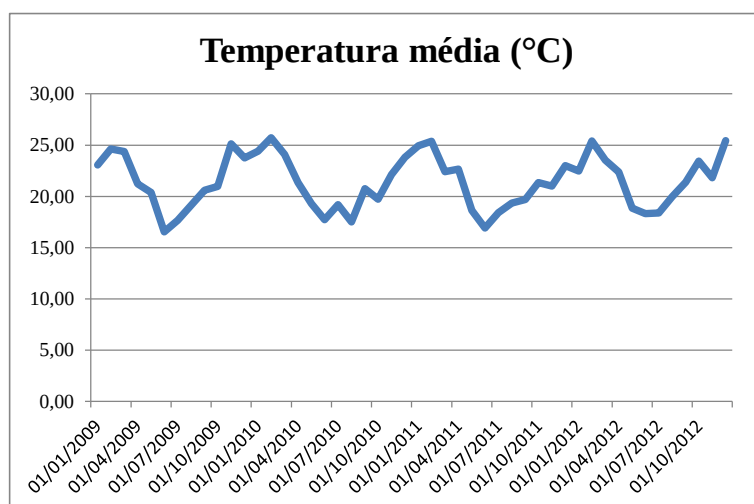


Gráfico 6: Temperatura média no Município de São Paulo entre os anos de 2009 e 2012

Fonte: BDMEP – INMET, 2014.

4.1.5.3. Maturação Bacteriana

Conforme informado pelos gerentes dos aterros sanitários no momento das visitas técnicas, as arqueas metanogênicas, responsáveis pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos, podem estar na fase de Maturação Bacteriana. Esta fase, considerada como a Fase V da decomposição dos resíduos, ocorre após grande quantidade do material orgânico ter sido biodegradado e convertido em CH₄ e CO₂ durante a fase metanogênica (Fase IV). A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta.

4.1.6. Meio de Medição

Alguns instrumentos de medição instalados na usina de captação de biogás devem ser calibrados conforme orientação dos fabricantes a fim de evitar perdas. O analisador de gases, por exemplo, responsável por medir a quantidade de metano presente no biogás deve ser calibrado semanalmente, pois a concentração de metano no biogás interfere diretamente na produção de energia e na contabilização dos créditos de carbono.

Os principais instrumentos de medição são os medidores de vazão, que registram a quantidade de biogás que é captada e enviada para a geração de energia, além de registrarem os CERs gerados pelo projeto para fins de comercialização.

A temperatura de queima do biogás, tanto nos *flares* quanto nas turbinas dos motogeradores, para que seja feita a total combustão do metano, deve ser superior a 1000°C, conforme *Guidelines* da UNFCCC para elaboração de Projetos de MDL e pela própria ACM0001 – versão 13 (UNFCCC, 2013).

Na primeira auditoria para verificação de créditos de carbono realizada em meados de 2006, foi constatado pela equipe auditora que não havia um registro digital confiável para a medição da temperatura de queima do biogás nos *flares*. Desta forma, foi preciso comprovar, sob pena de perder todos os créditos de carbono oriundos da queima do biogás nos *flares*, que o biogás foi queimado em temperaturas superiores a 1000°C e o registro era feito manualmente pelos operadores da usina de captação de gás. O registro manual foi aceito pela verificadora e, também pela UNFCCC, por julgar que o Proponente do Projeto não agiu de má fé na maneira de registros de dados, entretanto foram solicitadas melhorias no sistema e a Biogás Energia Ambiental S.A se comprometeu prontamente a realizar a melhoria sugerida.

Não houve perda nos créditos de carbono gerados no período, entretanto, uma pequena multa foi paga ao comprador dos CERs desta primeira verificação, o Banco alemão KfW Bankengruppe. O pagamento da multa foi feito em CERs, provenientes da segunda e terceira verificações.

Assim sendo, foram instalados, para auxiliar no registro digital da temperatura de queima dos flares, sensores que foram conectados ao computador que monitora e controla a usina de captação, além de registrar todos os dados gerados em intervalos de 5 minutos, hora em hora e diariamente.

O processo para provar que não havia fraude no registro da temperatura de queima dos *flares* levou aproximadamente um ano e os créditos de carbono da primeira verificação foram liberados para comercialização apenas após a terceira verificação, aproximadamente um ano depois da auditoria de verificação.

Ainda na primeira verificação de CERs do Projeto Bandeirantes, foi solicitada a instalação de novos medidores de vazão a fim de proporcionar maior confiabilidade na quantidade de biogás enviado à usina de geração de energia. Antes da instalação, havia apenas dois medidores - FIR100 e FIR200, responsáveis por medir a vazão total de gás e a quantidade enviada aos *flares*, respectivamente. Assim, para saber a quantidade de biogás enviado à usina de geração, fazia-se uma subtração da captação total menos o queimado nos *flares*.

Com a solicitação da equipe auditora, foram instalados mais quatro medidores de vazão sendo um em cada tubulação que envia biogás para os motogeradores da usina de geração de energia. Essa solicitação foi verificada na segunda auditoria e não ocasionou maiores complicações, nem perda na quantidade de CERs.

4.1.7. Mão de Obra

Por se tratar de atividades específicas, a busca por mão de obra qualificada não é considerada como uma tarefa fácil. Conforme informações do gerente da usina de captação de gás, aproximadamente 80% dos profissionais que atualmente trabalham nos projetos dos aterros, foi treinada internamente. Também foi informado que há certa rotatividade, principalmente entre os funcionários que realizam manutenção de campo. Há poucos, cerca de 5, funcionários que trabalham no projeto desde a implantação.

Atualmente, conforme informado pelo gerente de operação e manutenção do Projeto Bandeirantes, o quadro de funcionários é composto da seguinte maneira:

- 4 profissionais responsáveis pela operação e manutenção da usina de captação de gás;
- 8 profissionais responsáveis pela manutenção de campo;
- 2 profissionais responsáveis pelo monitoramento de campo;
- 1 gerente operacional;
- 1 profissional responsável por compras;
- 1 profissional de departamento administrativo; e

- 1 faxineira/copeira.

Os profissionais que realizam a manutenção e operação das usinas de geração de energia são contratados, apenas, se possuírem conhecimento técnico específico para trabalharem com os motogeradores.

Entretanto, muitos deles não seguem corretamente os procedimentos operacionais e prejudicam o bom funcionamento das usinas de captação e geração de energia. Este fato foi confirmado por meio da experiência comprovada de aproximadamente quatro anos da pesquisadora.

Um exemplo claro são os operadores do turno da noite, que não ficam atentos aos alarmes emitidos pelo computador que controla as usinas de captação e geração. Quando se dão conta, os motogeradores já foram automaticamente desligados sem a partida dos queimadores. Este fato pode gerar perda na produção de energia, créditos de carbono e, consequentemente, interfere de forma negativa na receita do projeto.

Não se sabe ao certo e não há registro de quantas vezes fatos semelhantes ocorreram, tendo em vista que são os próprios operadores os responsáveis por descrever as atividades e fatos ocorridos em seus turnos de trabalho. Os operadores registram as ocorrências manualmente, em um livro denominado Diário de Operação. Ainda que a operação das usinas seja semi automatizada e que o computador registre todos os dados gerados a cada 5 minutos e uma hora, o registro manual das operações ainda é utilizado. As anotações feitas no Diário da Operação são cruzadas semanalmente com as informações disponibilizadas pelos operadores, a fim de verificar possíveis disparidades de informações. O não cumprimento de algumas atividades rotineiras pode ser detectado pelo simples fato de equipamentos não estarem calibrados, por alarmes soarem no painel de controle das usinas e, também, pelo não preenchimento do Diário de Operação os das Fichas de controle de funcionamento dos equipamentos das usinas de captação biogás e geração e energia.

No momento da implantação do Projeto Bandeirantes foi montado um sistema de garantia da qualificação do pessoal que incluía:

- treinamento dos operadores da usina de captação e geração de energia, com carga horária de 40 (quarenta) horas;

- treinamento de Brigada de Incêndio e Primeiros Socorros, sendo 24 (vinte e quatro) horas de carga horária;
- treinamento de NR10 para os profissionais envolvidos na manutenção das usinas de captação e geração de energia, sendo 40 (quarenta) horas de carga horária; e
- controle por meio de certificados internos de treinamento, emitidos pela Biogás Energia Ambiental S.A e também por empresa terceira contratada, especializada em treinamentos de Brigada, NR10 e Primeiros Socorros.

Os certificados dos treinamentos são checados durante as auditorias de verificação de créditos de carbono, o que confere certa confiabilidade ao processo.

4.1.8. Máquina (Equipamento)

Nesta seção são descritos os equipamentos e instrumentos utilizados no Projeto Bandeirantes, nas usinas de captação de gás e geração de energia elétrica.

4.1.8.1. Usina de Captação de biogás

Conforme informado pelo gerente da Biogás Energia S.A, observado nas visitas técnicas e ainda conforme experiência da pesquisadora desta dissertação, a usina de captação de biogás tem como principais funções a geração de pressão negativa constante para extrair o biogás do Aterro, realizar a remoção de contaminantes prejudiciais ao biogás que será enviado à usina termelétrica e contabilizar/registrar os dados de concentração de metano e vazão de biogás.

A Usina de Captação de biogás é composta por uma estrutura e equipamentos relativamente simples, conforme descrito a seguir:

- Trocador de Calor: O biogás extraído do aterro sanitário chega à usina com variação de temperatura de 25°C a 40°C. Além da temperatura, o biogás contém elevada umidade proveniente da reação de formação do gás, que é prejudicial ao funcionamento dos motogeradores. Os quatro trocadores de calor condensam a umidade do gás, tornando-o seco e utilizam uma mistura de água e monoetilenoglicol (MEG) (84% e 16% respectivamente) como fluido frio. Essa mistura refrigerante circula a uma vazão média de até 56,9 m³/h por um sistema fechado de tubulações por bombas entre o trocador de calor e o Resfriador.

- **Chiller ou Resfriador:** A função deste equipamento é resfriar o fluido frio, oriundo dos trocadores de calor, para que a remoção de umidade seja contínua. O Chiller, através de compressores, comprime o gás Freon R22 (Du Pont), que depois de comprimido e resfriado a ar e se expande, reduzindo a temperatura do biogás. Com o Freon R22 em baixas temperaturas, ocorre a troca térmica do gás com uma superfície de contato onde passa a mistura dos trocadores de calor e resfriando a mistura de água com monoetilenoglicol a temperaturas próximas de 0°C.
- **Torre de Resfriamento:** A torre de resfriamento foi instalada para auxiliar no sistema de resfriamento. Com a Torre, o resfriamento do R22 do *chiller* passa a não ser somente a ar, e sim a um sistema integrado de ar e água, quando necessário. A água possui melhor troca térmica que o ar, aumentando o rendimento do sistema. A água quente proveniente da troca térmica para refrigeração do R22 volta para a Torre, que possui um sistema de resfriamento a ar. O uso do monoetilenoglicol possibilita a redução da temperatura de fusão da mistura, trabalhando a temperaturas inferiores a 0°C, sem congelamento. A temperatura de chegada da mistura refrigerante após a troca térmica é de cerca de 5°C.
- **Blowers ou Sopradores:** São os equipamentos responsáveis por trazer o gás do aterro até a usina de captação através de pressão negativa. Ao total são quatro sopradores, com capacidade nominal de vazão de 4.250 Nm³/h, e temperatura de saída do gás de 55°C, favorecendo a combustão. Cada soprador possui um sistema de um compressor e dois vasos silenciadores que possibilitam a criação do vácuo na entrada e pressão do gás na do equipamento. Quando o biogás passa pelo soprador, ele é o fluido frio responsável pela refrigeração dos sopradores.
- **Flares ou Queimadores:** A produção excedente à demanda de biogás é queimada em dois queimadores idênticos (*flares*) do tipo enclausurado, com capacidade para 2.500 metros cúbicos/hora cada um, a temperatura superior a 1.200°C. Outra finalidade dos *flares* é a de realizar o *start up* da planta, tendo em vista que os motores só podem receber o biogás após o mesmo sofrer o pré-tratamento acima descrito (secagem e pressurização).
- **Analisador de Gases:** Para manter a estabilidade da UTE - Bandeirantes, o biogás deve apresentar concentração de CH₄ entre 45 a 55% e a concentração do O₂ não deve ultrapassar 2%. Concentrações diferentes podem prejudicar consideravelmente o bom funcionamento dos motogeradores. Deste modo, o Projeto possui um analisador de gases que permite, em tempo

real, verificar as concentrações do CH₄ e do O₂. O princípio de funcionamento deste aparelho para a leitura do CH₄ é por detectores de infravermelho, e para o O₂ um sensor eletroquímico. Se a concentração de metano atingir valores inferiores a 45% ou superiores a 55% e o oxigênio acima de 2,00%, um alarme é acionado no painel do analisador, indicando que haverá desligamento de motores em decorrência da alteração na concentração de gases. O analisador de gases é calibrado semanalmente com um padrão certificado, a fim de garantir exatidão nas leituras.

- *Flow Meters* ou Medidores de Vazão: Ao todo são sete medidores de vazão instalados nas tubulações principais e nos pontos de entrega de gás à UTE. Esses medidores registram a quantidade de biogás captado e que será destruído, seja nos *flares* ou nos motogeradores. Com as variações de pressão e temperatura do gás, as medições se tornam imprecisas, sendo necessário corrigir o volume de modo a torná-lo constante. Para isso, o volume registrado pelos medidores de vazão é transformado em Normal (Nm³). Para a normalização da medição da vazão em normal metro cúbico por segundo (Nm³/s) nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) recomendadas pela *International Union of Pure and Applied Chemistry* (MILLS *et al.*, 1993), é utilizado um fator de correção de acordo com a pressão e temperatura do biogás coletado no local por meio da equação a seguir:

Onde:

$$Q = (V \times A) \times \frac{273,15}{273,15 + T} \times P$$

Q: vazão de biogás (Nm³/s)

V: velocidade do biogás no medidor de vazão (m/s)

A: área da seção de passagem do fluido (m²)

T: temperatura do biogás no medidor (°C)

P: pressão atmosférica (bar)

Os dados de temperatura e pressão são coletados no próprio medidor de vazão. Outro dispositivo acoplado ao medidor de vazão é um corretor de volume, que com os dados de temperatura e pressão calcula e transforma o volume automaticamente para Nm³. O corretor

de volume oferece também dados de vazão calculada, volume totalizado, temperatura e pressão. Os seis equipamentos estão instalados em locais estratégicos onde há divisão do fluxo de biogás, entrada para a usina termelétrica e para os queimadores.

- **PLC:** O controle de dados e parâmetros de funcionamento da usina de captação ficaria muito comprometido se fosse registrado manualmente. Por esta razão, o controle das usinas é feito via *Programmable Logical Controller* (PLC), que segundo a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), é um aparelho eletrônico digital que utiliza memória programável para armazenar internamente instruções e implementar funções específicas, de acordo com a necessidade de cada empresa. Os dados de produção e funcionamento da usina de degaseificação são registrados a cada 5 minutos, realizado a média de hora em hora e, ao final de cada dia, o PLC registra os dados totalizados de acordo com o funcionamento da usina. Este equipamento também é utilizado para operar e acompanhar o funcionamento de todos os equipamentos da usina de captação.

A Figura 12 ilustra os equipamentos do Projeto Bandeirantes.



Figura 12: Equipamentos utilizados na usina de captação de biogás

Fonte: Acervo Biogás Energia Ambiental S.A, 2013.

4.1.8.2. Usina de Geração de Energia Elétrica

A Usina Termelétrica Bandeirantes (UTE - Bandeirantes) está instalada nas dependências da Biogás Energia Ambiental S.A, localizada no Aterro Sanitário Bandeirantes. Esta usina termelétrica tem certo apelo ambiental por aproveitar o biogás oriundo do aterro,

com potencial energético, para gerar energia e, desta forma, atuar na redução da emissão de GEE prejudiciais ao meio ambiente.

A potência instalada da Usina Termelétrica Bandeirantes é 22,2 MWh por meio de 24 conjuntos motogeradores de ciclo Otto – fabricados pela Caterpillar. Os motogeradores são instalados em dois barramentos independentes de geração: A e B, sendo 12 conjuntos de motogeradores em cada barramento. A Figura 13 mostra os motogeradores.



Figura 13: Conjunto de motogeradores instalado na UTE - Bandeirantes

Fonte: Acervo Biogás Energia Ambiental S.A, 2013.

A potência elétrica individual dos motogeradores é de 925 kWh e o consumo médio é de 530 m³/h de biogás a 50% de CH₄, entretanto, os motogeradores são regulados para trabalharem num range de 45 a 55% de CH₄. Alterações na concentração de CH₄ faz com que o consumo seja variável, chegando a 480 Nm³/h de biogás a 55% de CH₄.

Do início do Projeto até o ano de 2010, eram enviados aproximadamente 12.500 Nm³ de biogás aos conjuntos de motogeradores da usina, a 50% de CH₄. O gás excedente, ou que não tem condições de ser utilizado por alguma razão adversa, era queimado nos *flares*, que pertencem à Biogás.

É importante mencionar que atualmente, o volume de biogás captado no Aterro Bandeirantes esta em torno de 6.000 Nm³/h, com 48,5% de concentração de CH₄.

Conforme informado pelo Gerente de Operação da Usina Termelétrica Bandeirantes, a produção de 20 MWh é suficiente para abastecer uma cidade com cerca de 350.000 habitantes. A Figura 14 ilustra o layout da usina de geração de energia do Projeto

Bandeirantes.

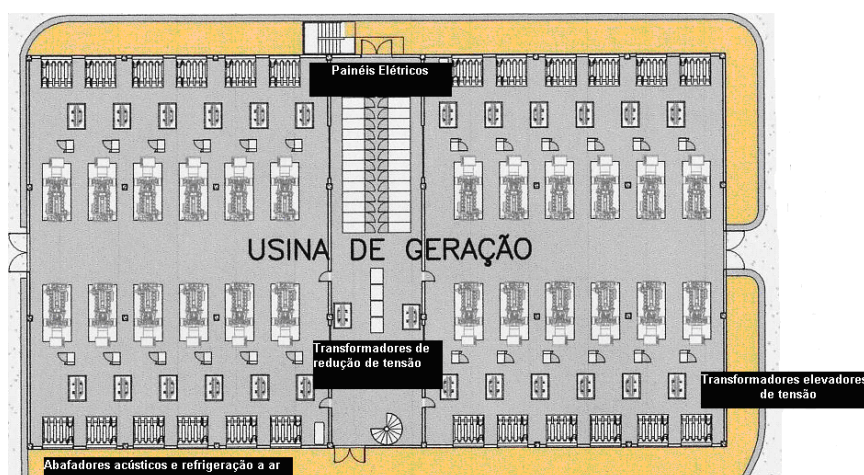


Figura 14: Layout da UTE-Bandeirantes

Fonte: Acervo Biogás Energia Ambiental, 2005.

Os motogeradores da usina são movidos a combustão do biogás, que é considerado um combustível de baixo potencial energético, com concentrações necessariamente acima de 45% de CH_4 , O_2 abaixo de 2% e pressão a 45 psi. Com o mesmo princípio de elevação de temperatura dos *flares* da usina de gás, há a injeção de comburente (ar) no gás na entrada dos motores. A combustão do biogás nos cilindros dos motogeradores atinge temperaturas médias de 480°C.

Os motogerador possuem 16 cilindros (8 em cada lado, em formato “V”) com taxa de compressão de 12:1. Também possuem um painel elétrico, semelhante ao PLC da usina de captação para controlar as manutenções, horas trabalhadas e dados de energia gerada e consumida (tensão, corrente, potência).

Os motores geram uma tensão de 480V, que é elevada em um transformador elevador de potência a 13.800 V, para auxiliar a condução da energia sem ter perdas significativas para a subestação de Perus, construída especialmente para atender as necessidades da UTE-Bandeirantes. A energia chega à subestação por cabeamento aéreo e é distribuída pela concessionária de energia elétrica (AES Eletropaulo). A Figura 15 ilustra a Subestação de

Perus.



Figura 15: Subestação de Perus

Fonte: Acervo Biogás Energia Ambiental S.A, 2013.

4.2. Aterro Sanitário São João

O Projeto São João de Geração de Energia foi desenvolvido para captar o biogás produzido no Aterro Sanitário Sítio São João e gerar energia. O aterro teve sua operação iniciada no ano de 1992 e foi encerrado em março de 2009, aproximadamente 2 anos após a data prevista para encerramento.

Durante a vida útil de operação, o Aterro São João recebeu aproximadamente 25 milhões de toneladas de resíduos das Zonas Sul e Leste do Município de São Paulo e, assim como o Aterro Sanitário Bandeirantes, nos últimos anos de sua operação chegou a receber aproximadamente 7,5 mil toneladas/dia de resíduos, das 15 mil geradas diariamente no Município.

O Aterro São João, seguindo a NBR 8.419 (ABNT NBR 8419, 1992), possui impermeabilização do solo formada pela combinação de argila compactada e manta de PEAD para fins de evitar infiltração dos líquidos percolados no solo e possível contaminação de lençol freático.

O chorume gerado é escoado por gravidade para duas lagoas de chorume instaladas próximas à entrada principal do Aterro.

O chorume é levado por caminhões pipa para a Estação de Tratamento de Esgoto de

São Miguel Paulista (ETE – São Miguel). Na ETE, o chorume é tratado até adquirir característica de água de reuso, que é utilizada para umidificar as vias do aterro as quais transitam os veículos que realizam a manutenção estrutural do aterro.

Da mesma forma que o Projeto Bandeirantes, no Projeto São João há diversos *stakeholders* envolvidos, direta ou indiretamente, conforme ilustra a figura abaixo. Cada um deles é responsável por uma parte importante no processo de produção e captação de biogás e geração de energia elétrica.

A Operadora do Aterro - Ecourbis, ainda que envolvida indiretamente, pois não participa da distribuição dos CERs gerados, possui uma das funções mais importantes, que é o de realizar a manutenção do aterro sanitário, ainda que ele já não receba mais resíduo desde o ano de 2009.

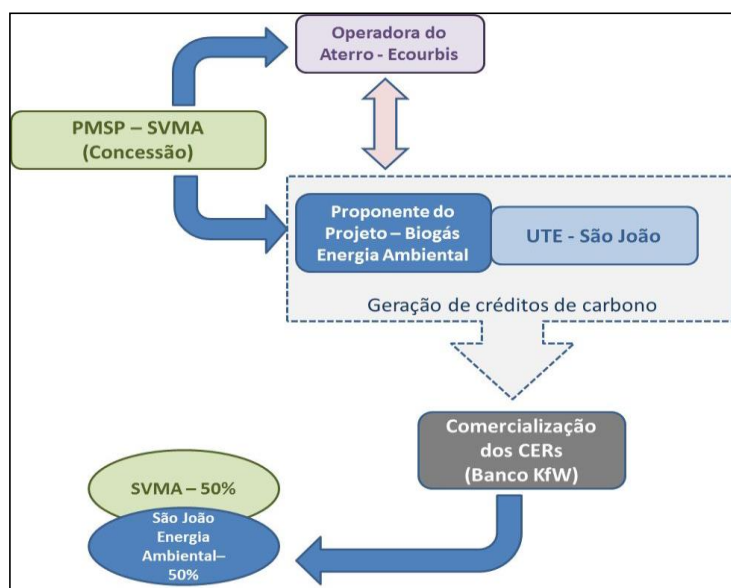


Figura 16: Stakeholders envolvidos no Projeto de MDL do Aterro São João.

Fonte: Elaborado pela Autora.

4.2.1. Contrato de Concessão de Extração de biogás

O Contrato e Concessão de Extração de biogás firmado entre a PMSP e a São João Energia Ambiental S.A é semelhante ao firmado entre PMSP e Biogás Energia Ambiental

S.A, sendo que a divisão dos CERs gerados pelo Projeto São João ocorreu nos mesmos moldes do Projeto Bandeirantes, na proporção de 50% para o Proponente do Projeto e 50% para a Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP), entretanto, a concessão ocorreu três anos mais tarde, em 2003.

O Projeto São João, no momento de sua concepção, pretendia deixar de emitir 824.150 milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera e gerar 22 MWh de energia, suficientes para abastecer 110 (cento e dez) mil residências.

4.2.2. Comercialização dos CERs gerados

A comercialização dos créditos de carbono gerados pelo Projeto São João é semelhante à realizada pelo Projeto Bandeirantes, ou seja, ocorre por meio de um contrato bilateral que envolve apenas as partes contratante e contratada, onde o comprador e o vendedor obtém suas respectivas aprovações e autorizações junto à autoridades locais.

O comprador dos CERs gerados é o mesmo do Projeto Bandeirantes, a instituição financeira alemã KfW Bankken Group.

Seguem, na Tabela 10 as informações sobre a comercialização dos CER da PMSP, nos dois leilões já realizados.

Tabela 10: Comercialização de CERs no projeto São João

Período	Verificação	Data Emissão	CERs emitidos	2% UNFCCC	Distribuição	PMSP	Biogás
22/MAI/07 a 30/JUN/07	1a Verificação	23/06/2008	43.144	862	42.281	21.141	21.140
JUL/07 a OUT/07	2a Verificação	23/06/2008	201.275	4.025	197.250	98.625	98.625
NOV/07 e DEZ/07	3a Verificação	08/05/2008	123.948	2.479	121.469	60.735	60.734
JAN/08 a MAR/08	4a Verificação	07/08/2008	159.501	3.190	156.311	78.156	78.155
ABR/08 a JUN/08	5a Verificação	30/12/2010	171.603	3.432	168.171	84.086	84.085
JUL/08 a SET/08	6a Verificação	22/12/2010	148.240	2.964	145.276	72.638	72.638
OUT e NOV/2008	7a Verificação	23/12/2010	103.851	2.077	101.774	50.887	50.887

Período	Verificação	Data Emissão	CERs emitidos	2% UNFCCC	Distribuição	PMSP	Biogás
DEZ/08 a MAR/09	8a Verificação	22/12/2010	214.144	4.282	209.862	104.931	104.931
ABR a JUN/09	9a Verificação	23/12/2010	140.028	2.800	137.228	68.614	68.614
JUL a SET/09	10a Verificação	07/01/2011	146.032	2.920	143.112	71.556	71.556
OUT a DEZ/09	11a Verificação	10/01/2011	144.635	2.892	141.743	70.872	70.871
JAN a JUL/10	12a Verificação	26/01/2011	308.974	6.179	302.795	151.398	151.397
AGO a OUT/10	13a verificação	20/04/2011	105.597	2.111	103.486	51.743	51.743
NOV/10 a JAN/11	14a verificação	25/08/2011	102.834	2.056	100.778	50.389	50.389
FEV/11 a MAI/11	15a verificação	28/10/2011	110.074	2.201	107.873	53.937	53.936
JUN/11 a SET/11	16a Verificação	09/03/2012	93.646	1.872	91.774	45.887	45.887
OUT/11 a JAN/12	17a Verificação	06/07/2012	84.533	1.690	82.843	41.422	41.421
FEV/12 a 15/MAI/12	18a Verificação	21/12/2012	65.326	1.306	64.020	32.010	32.010
16/MAI/2012	19a Verificação*		174.704	3.494	171.210	85.605	85.605
		Total	2.467.385,00	49.337,96	2.418.046,04	1.209.027,00	1.209.019,04

Fonte: São João Energia Ambiental S.A, 2013.

4.2.3. Matéria – prima

O primeiro PDD elaborado para o Projeto de MDL do Aterro São João, aprovado pela UNFCCC em 2007, seguiu os mesmos moldes do Aterro Bandeirantes, supracitado, fazendo uso de um valor *default* para a gravimetria dos resíduos dispostos.

A revalidação PDD do Projeto de MDL do São João, diferente do Bandeirantes, ainda não ocorreu e esta prevista para meados de maio/2014. Assim sendo, foi utilizada a metodologia ACM0001 – versão 13 para estimar a quantidade de biogás produzido utilizando a versão mais recente da metodologia utilizada anteriormente.

Para a gravimetria dos resíduos dispostos no aterro São João, foi utilizado um estudo realizado por consultoria especializada em aterros sanitários em 2003 (FRAL Consultoria de Aterros), o qual caracterizou os resíduos dispostos que foram oriundos das zonas Leste e Sul do Município de São Paulo, conforme Tabela 10.

Tabela 11: Análise Gravimétrica dos Resíduos dispostos no Aterro Sanitário São João

Tipo de Resíduos	% (base úmida)
Madeira e produtos de madeira	0,50%
Celulose, papel e papelão	11,60%
Alimentos, resíduos de alimentos, bebidas e tabaco	64,40%
Têxteis	2,20%
Jardins, quintal e resíduos de parques	2,60%
Vidro, plástico, metal e outros resíduos inertes	18,70%
Total	100 %

Fonte: FRAL CONSULTORIA LTDA, 2003.

O Gráfico 7 foi elaborado para ilustrar os dados mencionados na tabela supracitada.

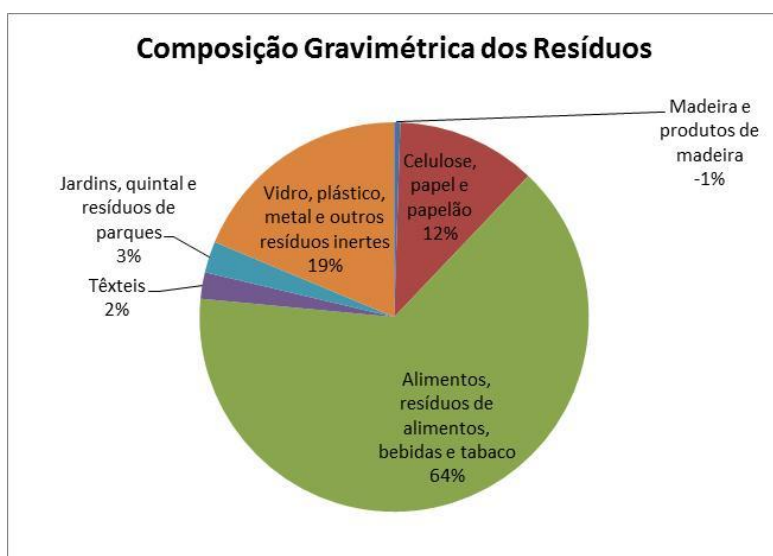


Gráfico 7: Composição Gravimétrica dos Resíduos dispostos no Aterro Sanitário São João

Fonte: FRAL CONSULTORIA LTDA. - Caracterização Gravimétrica e Físico-Química dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Município de São Paulo - Agrupamento Sudoeste – 2003 – 2003.

A quantificação dos resíduos dispostos diariamente no Aterro São João seguiu o mesmo modelo utilizado pelo Aterro Bandeirantes, ou seja, a ficou a cargo da operadora do aterro - Ecourbis. A Ecourbis, até o presente momento, é responsável pelas tarefas de manutenção do aterro São João.

Tabela 12: Quantidade de resíduos disposta desde a abertura até o encerramento do Aterro Sanitário São João:

Ano	Resíduo Disposto (t)	Ano	Resíduo Disposto (t)
1992	5.500	2001	2.157.783
1993	768.591	2002	2.292.821
1994	862.211	2003	2.120.943
1995	1.516.727	2004	2.008.528
1996	1.841.783	2005	2.200.000
1997	1.971.480	2006	2.421.714
1998	2.046.081	2007	1.523.096
1999	2.126.986	2008	348.428
2000	2.034.546	2009	295.271
		TOTAL	28.542.489

Fonte: São João Energia Ambiental S.A, 2011 e Ecurbis, 2011 – Dados utilizados no PDD.

O Gráfico 8 ilustra as quantidades dispostas no Aterro São João ao longo do período de operação, conforme dados acima mencionados.

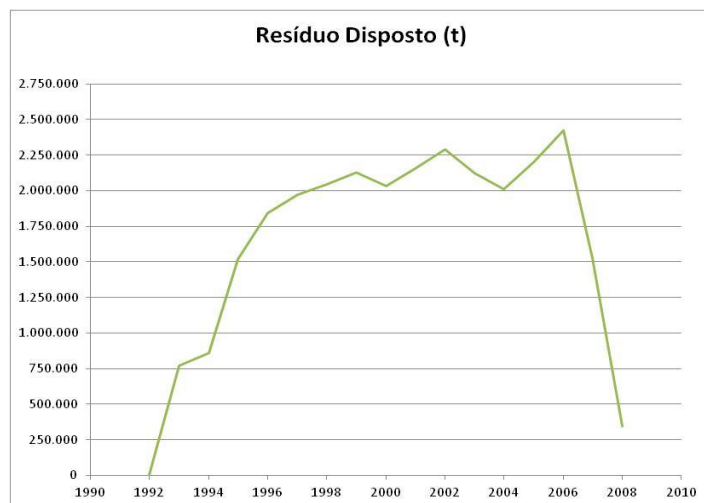


Gráfico 8: Quantidade de resíduos disposta desde a abertura até o encerramento do Aterro Sanitário São João.

Fonte: São João Energia Ambiental S.A, 2011 e Ecurbis, 2011 – Dados utilizados no PDD.

Assim como ocorreu no Projeto Bandeirantes, no momento da elaboração do PDD e realização dos cálculos de produção de biogás no Aterro São João, foram utilizados valores

referentes aos volumes de resíduos a serem dispostos nos anos de 2004, 2005 e 2006, sendo respectivamente 2.008.528, 2.200.000 e 2.200.000 toneladas de resíduo/ano. Para os anos de 2007 a 2009, não previu-se disposição de resíduos, pois a vida útil do Aterro Sanitário São João foi estendida. Tais volumes foram informados pela Operadora do Aterro – Ecourbis, tendo como base seu contrato com a Prefeitura Municipal de São Paulo. Tais valores foram corrigidos de acordo com o volume real depositado no momento das novas estimativas, conforme ACM0001 – ver.13.

4.2.4. Método

Nos métodos, foram verificadas informações sobre o pH dos resíduos, a qualidade da cobertura da camada final (qualidade do solo utilizado, grama plantada e emissões fugitivas de gás), sistema de drenagem de chorume e gás, sistema de captação de gás e as estimativas de produção de biogás no Aterro São João, por meio da metodologia ACM0001, revisões 02 e 13.

4.2.4.1. pH

Não foi verificada análise de pH realizada nos resíduos dispostos no Aterro São João, tampouco no chorume gerado.

A Proponente do Projeto de MDL, diferente do ocorrido no Projeto Bandeirantes, não realizou tal amostragem.

4.2.4.2. Cobertura do aterro

Assim como no Projeto Bandeirantes, a camada final e cobertura do aterro após o término de suas atividades foi de responsabilidade da Operadora do Aterro São João, a Ecourbis. Entretanto, algumas diferenças fazem com que este projeto seja mais bem estruturado e planejado que no Projeto Bandeirantes.

A terra utilizada como cobertura final dos resíduos após o encerramento das atividades do aterro foi o *silte*, de característica argilosa. Esta terra permite maior permeabilidade ao manto do aterro e dificulta a emissão fugitiva dos gases.

A profundidade média da terra na cobertura final também é melhor ao comparada com o Projeto Bandeirantes, pois esta na ordem de 60 cm.

A grama plantada após a compactação da terra foi a Batatais e não a Esmeralda como previa o Plano de Encerramento do Aterro São João, entretanto, foi observado que este tipo de

grama em solos com característica argilosa auxilia a penetração de água de chuva e, consequentemente, no processo de decomposição de matéria orgânica e produção de biogás pelas arqueas metanogênicas.

Foi informado pelo Proponente do Projeto que houve formação de pequenas fissuras no maciço do aterro, entretanto, esse fato não estava relacionado à cobertura final e nem ao tipo de grama utilizado.

Assim como no Projeto Bandeirantes, também houve perfuração de novos poços, sendo 60 no total, para melhorar o desempenho dos poços antigos, entretanto, neste projeto não houve cobertura do platô com manta de PEAD.

Faz-se importante mencionar que o Plano de Encerramento do Aterro São João, protocolado na CETESB em 2009, previa que a cobertura da última camada de resíduos disposto apresentasse altura entre 0,50 e 1m, sendo esta feita com terra argilosa. Após a compactação da cobertura estava previsto o plantio de grama esmeralda.

4.2.4.3. Captação de biogás

O processo de captação de biogás no Aterro São João é semelhante ao do Aterro Bandeirantes, o qual ocorre por meio de pressão negativa exercida por equipamentos chamados *blowers* – ou sopradores em português. Tais equipamentos são instalados na usina de captação e são os responsáveis por realizar a sucção do biogás dos poços de captação espalhados pelo aterro.

4.2.4.4. Sistema de Drenagem de chorume e biogás

No Projeto São João, ocorrências deste tipo ocorreram 03 vezes, conforme foi verificado no Diário de Operação, duraram aproximadamente 5 horas cada e foram responsáveis pela não geração de 4.700 CERS e 110 MW de energia elétrica.

A perda de geração e CERS e energia elétrica pode ser calculada por hora parada das usinas, pois ambas possuem medidores que registram tanto o volume captado de biogás, quanto a energia gerada.

Para que sejam realizados os reparos necessários, a equipe de monitoramento de campo (normalmente formada por um engenheiro e quatro estagiários) verifica diariamente os poços de captação de biogás, as linhas principais e secundárias de tubulação de biogás e os

coletores, de forma a identificar qualquer alteração que possa eventualmente ocorrer em campo.

Ao identificar um reparo a ser realizado, a equipe de monitoramento, por meio de uma ordem de serviço, informa a equipe de manutenção de campo o problema encontrado e a urgência para realização do reparo. As equipes, dependendo da gravidade e urgência da execução do reparo, se reúnem para discutir a melhor estratégia a ser utilizada, visando garantir a não interrupção de biogás às usinas de captação e geração de energia.

4.2.4.5. Estimativa de geração de CERs

No caso do Aterro São João, a diferença de estimativa é mais dramática, sendo a estimativa pela ACM0001- ver 13 menor em 56,2% que a estimativa original. No entanto, no período verificado (2007 a 2012), a diferença entre a previsão da versão 13 para a quantidade verificada é de apenas 0,1%, no total, embora a produção de biogás tenha sido maior que o previsto no início e menor que o previsto nos anos mais recentes. De qualquer modo, a produção de biogás verificada foi 55,1% menor que o originalmente previsto. A tabela 13, aponta os valores estimados e o real gerado e o Gráfico 9 ilustra tais valores.

Tabela 13: Estimativas de produção de biogás e a captação real no Aterro Sanitário São João

Ano	São João				
	Estimativa de Emissões (t CO ₂) calculada pela metodologia ACM0001-rev02 (3)	Estimativa de Emissões (t CO ₂) calculada pela metodologia ACM0001-rev13 (2)	Emissões Verificadas (t CO ₂) (3)	Diferença entre as emissões reais e a estimativa pela ACM0001 – rev. 02	Diferença entre as emissões reais e a estimativa pela ACM0001 – rev. 13
2006	686.170	250.688	-	-	-
2007	1.070.233	391.003	368.367	65,58%	5,79%
2008	968.442	353.815	590.333	39,04%	-66,85%
2009	876.797	320.333	452.109	48,44%	-41,14%
2010	794.288	361.779	483.128	39,17%	-33,54%
2011	720.002	405.320	301.398	58,14%	25,64%
2012	653.121	445.787	87.026 ¹	86,68%	80,48%
Total	5.769.053	2.528.725	2.282.361	60,44%	9,74%

¹ Valores contabilizados até 15 de maio de 2012. Após esta data, não houve aprovação de novas emissões.

Fontes: (2) Estimativas elaboradas pela autora. (3) São João Energia Ambiental, 2006.

Nos primeiros anos (2009 e 2010), houve uma geração maior de créditos de carbono maior que o estimado. Este fato deve estar relacionado à maior quantidade de resíduo orgânico disposto que o previsto, tendo em vista que o aterro foi reestruturado após um desabamento de talude.

Ainda que nos primeiros anos de projeto a produção tenha sido maior que o estimado, o total de créditos de carbono gerado é inferior em aproximadamente 10%.

As diferenças relacionadas aos valores do ano de 2012 são justificadas pelo fato de as emissões reduzidas produzidas pelo Projeto no referido ano ainda não terem sido aprovadas pela UNFCCC para comercialização.

Os valores negativos apresentados podem estar relacionados à reestruturação de alguns taludes após um desmoronamento que ocorreu no ano de 2007 e, devido a tal ocorrência, o aterro previsto para encerrar suas atividades em 2007, recebeu resíduos até 2009.

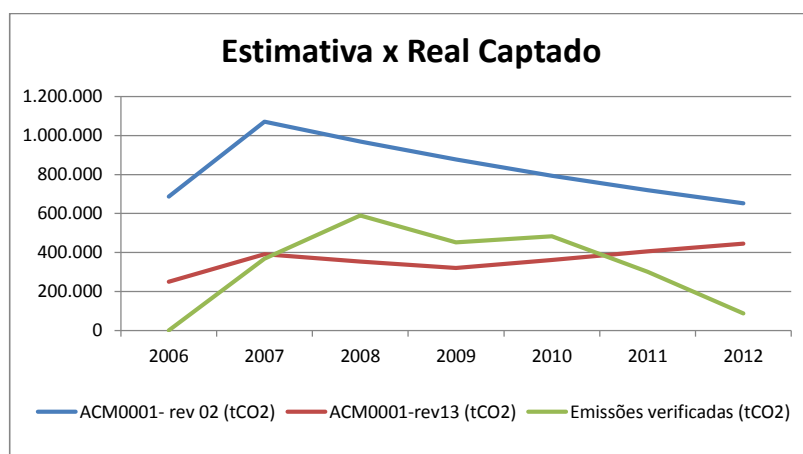


Gráfico 9: Estimativa versus real captado de biogás no Aterro São João

Fontes: (2) Estimativas elaboradas pela autora. (3) Projeto São João, 2006.

Os resultados foram submetidos aos testes estatísticos, conforme descrito na metodologia. O Quadro 2 mostra os resultados.

	Aterro Sítio São João
Correlação de Pearson	$r = 0,634$
ACM001 rev2 x emissões verificadas	$p = 0,176$
Correlação de Pearson ACM001 rev13 x emissões verificadas	$r = -0,862$ $p = 0,027$
ANOVA unidirecional	$P=0,000$
Com Teste Tukey	Agrupamento A: ACM001 ver 2 Agrupamento B: ACM001 ver 13 Emissões verificadas $P < 0,001$

Quadro 2: Resultados dos testes estatísticos

No caso do aterro São João, a geração de biogás prevista pela metodologia ACM 001 ver 2 não apresentou correlação estatística com a geração de biogás verificada, ao nível de significância de 5%. Por outro lado, os resultados da metodologia ACM 001 ver 13 apresentaram uma correlação negativa estatisticamente significativa. A correlação negativa se explica porque a metodologia previu uma produção de biogás crescente entre 2009 e 2012, no entanto houve um forte decréscimo entre 2010 e 2012. Por outro lado, na média do período houve uma boa aproximação da previsão, e o teste Tukey mostrou que os resultados da metodologia ACM 001 ver 13 se aproximam mais do real, na média, do que a metodologia em sua revisão 2.

4.2.5. Meio Ambiente

As maiores interferências externas relacionadas à produção de biogás são a pluviosidade e a temperatura. Sabe-se que ambas são importantes no processo de decomposição da matéria orgânica, que dependem de tais fatores para completar o ciclo de produção de biogás. Quanto maior forem a temperatura e a pluviosidade, maior tende a ser a produção.

A pluviosidade, além de fornecer umidade para a produção do biogás, promove uma pequena vedação do solo, evitando a emissão fugitiva de biogás pelo maciço do aterro, ainda que por pouco tempo.

4.2.5.1. Pluviosidade

O valor utilizado pelo Proponente do Projeto São João para realizar os cálculos de estimativa de biogás e créditos de carbono, conforme ACM0001 – versão 13 foi 1.413,6mm.

Entretanto, a média pluviométrica mensal verificada, conforme estação do INMET localizada na região de Santana, Zona Norte de São Paulo, foi de 157 mm para os anos de 2009 A 2012, sendo aproximadamente de 1.884 mm por ano.

O Gráfico 10 ilustra os índices pluviométricos registrados entre os anos de 2009 e 2012.

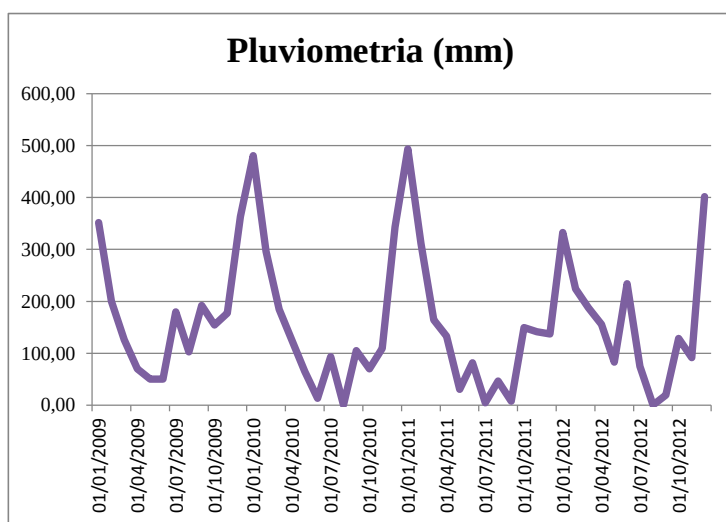


Gráfico 10: Índices pluviométricos (2009 a 2012)

Fonte: BDMEP – INMET, 2014.

4.2.5.2. Temperatura

No Projeto São João, para realizar as estimativas de produção de biogás e CER, conforme a ACM0001 – versão 13, foi utilizada uma temperatura média de 19,6°C. Entretanto, verificou-se que a temperatura média para o Município de São Paulo, no mesmo período foi de 21,19°C. O Gráfico 10 abaixo ilustra esta informação.

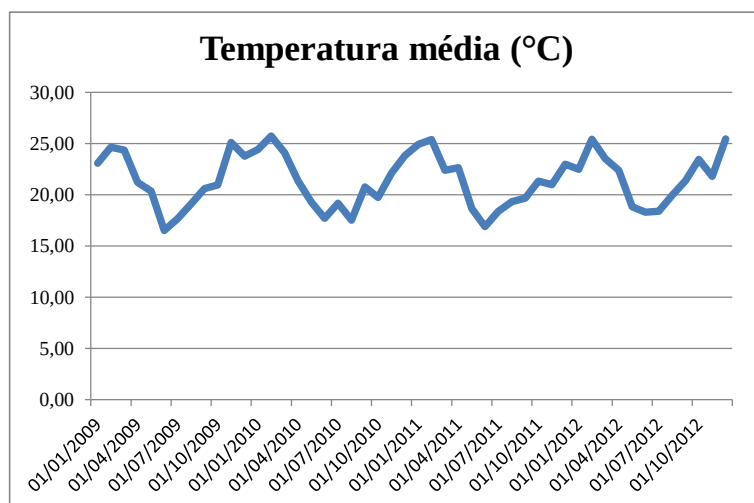


Gráfico 11: Temperatura média no Município de São Paulo entre os anos de 2009 e 2012.

Fonte: BDMEP – INMET, 2014.

4.2.5.3. Maturação Bacteriana

Conforme informado pelos gerentes dos aterros sanitários no momento das visitas técnicas, as arqueas metanogênicas, responsáveis pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos, podem estar na fase de Maturação bacteriana. Esta fase, considerada como a Fase V da decomposição dos resíduos, ocorre após grande quantidade do material orgânico ter sido biodegradado e convertido em CH₄ e CO₂ durante a fase metanogênica (Fase IV). A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta.

4.2.6. Meio de Medição

Em algumas verificações de créditos de carbono do Projeto São João, houve questionamentos por parte da equipe auditora em relação à calibração do analisador de gases. O questionamento se deu por conta de atrasos na calibração semanal do instrumento.

O Proponente do Projeto, por sua vez, explicou que em algumas situações não há como realizar a calibração no dia agendado, pois podem ocorrer emergências nas plantas de

captação e geração que impedem o congelamento do painel do analisador de gases, uma das fases de calibração do instrumento. O congelamento do painel, necessário para a calibração do analisador de gases, consiste no travamento das funções básicas das usinas de captação e geração, que passam a operar em modo *stand-by*, para que a calibração do analisador de gases seja realizada com exatidão. Durante o congelamento do painel, as usinas operam normalmente, com queima no *flare* e geração de energia e sem perda de créditos de carbono. Após a calibração, o painel é descongelado e volta a operar normalmente.

Desta forma, foram mostrados documentos, manuais do instrumento e até realizada uma calibração na presença do auditor, que serviram como evidência para comprovar que a não realização da calibração não havia sido intencional.

Não houve desconto de CERs por conta da calibração não ter sido realizada na data previamente estabelecida, tendo em vista que a equipe auditora concordou com os argumentos apresentados pela São João Energia Ambiental S.A.

4.2.7. Mão de Obra

No Projeto São João ocorrem fatos semelhantes aos ocorridos no Projeto Bandeirantes, pois os operadores do turno da noite, muitas vezes não percebem os alarmes emitidos pelos computadores que controlam as usinas de captação e geração. Assim que se dão conta, os motogeradores já foram automaticamente desligados sem a partida dos queimadores. Esta situação pode gerar perda na produção de energia, créditos de carbono e, consequentemente, interfere de forma negativa na receita do projeto. Este fato foi confirmado por meio da experiência comprovada de aproximadamente 4 anos da pesquisadora e entrevista com o gerente do aterro.

Atualmente, conforme informado pelo gerente de operação e manutenção do Projeto São João, o quadro de funcionários é composto da seguinte maneira:

- 18 profissionais responsáveis pela operação e manutenção das usinas de captação de gás e geração de energia elétrica;
- 7 profissionais responsáveis pela manutenção de campo;
- 4 profissionais responsáveis pelo monitoramento de campo; e

- 12 profissionais do departamento administrativo (diretor técnico, gerente da usina de captação, gerente da usina de geração, comprar, RH, faxina, copa, portaria e segurança).

4.2.8. Máquina (Equipamento)

4.2.8.1. Usina de Captação de biogás

Assim como no Projeto Bandeirantes, a usina de captação de biogás do Projeto São João tem como principais funções a geração de pressão negativa constante para extrair o biogás do Aterro, realizar a remoção de contaminantes prejudiciais ao biogás que será enviado à usina termelétrica e contabilizar/registrar os dados de concentração de metano e vazão de biogás.

Os equipamentos para a realização das atividades de captação e beneficiamento do biogás extraído do aterro são semelhantes. A principal diferença entre os projetos é no Projeto São João há três *flares* instalados com capacidade de queima de 5.000 Nm³/h de biogás cada um, enquanto que no Projeto Bandeirantes há apenas dois, com capacidade de 2.500 Nm³/h de queima cada um.



Figura 17: Flares instalados no Projeto São João

Fonte: Acervo São João Energia Ambiental S.A, 2013.

4.2.8.2. Usina de Geração de Energia:

Em formas gerais, a principal diferença entre as UTEs dos aterros estudados é que, enquanto a UTE - Bandeirantes pertence ao Itaú-Unibanco, a Usina Termelétrica São João pertence à São João Energia Ambiental S.A, isto é, ao Proponente do Projeto.

Tecnicamente, os motogeradores instalados na UTE-São João (Modelo CAT 3520), por serem aproximadamente 2 anos mais novos, são mais potentes e mais eficientes. Desta forma, foram instalados apenas 16 motogeradores com capacidade instalada de 24.64 MWh, sendo 8 motogeradores a menos que no Projeto Bandeirantes e capacidade de geração de 2,44 MWh menor.

Os motogeradores da UTE - São João foram instalados em linha, ou seja, não há divisão de barramentos e todos ficam alinhados em um mesmo local.



Figura 18: Motogeradores instalados na UTE – São João

Fonte: Acervo São João Energia Ambiental S.A, 2013.

A energia gerada é enviada a uma subestação localizada ao lado da UTE-São João, que realiza a distribuição à rede da AES-Eletropaulo.



Figura 19: Subestação da UTE – São João

Fonte: Acervo São João Energia Ambiental S.A, 2013.

5 DISCUSSÃO

A utilização do biogás gerado em aterros sanitários para produzir energia é prática comum em outros países com tecnologia mais avançada, como Holanda, por exemplo. Entretanto, os aterros sanitários brasileiros iniciaram as atividades de captação e queima do biogás motivados pelo incremento financeiro advindo do Protocolo de Kyoto por meio do MDL. A implementação desse instrumento econômico no Brasil, a viabilidade técnica e econômica para a mitigação da emissão do gás CH₄ em atividades de disposição de resíduos mostravam-se uma incógnita até pouco tempo atrás (TOZETTO, 2008).

Com a implantação de diversos projetos de MDL em aterros sanitários no Brasil, as análises de viabilidade técnica e financeiras tornaram-se cada vez mais necessárias. Neste contexto, tais análises dependem, em primeiro lugar, da elaboração de estimativas precisas de produção de biogás e CERs. Caso as estimativas sejam superestimadas, o projeto inteiro será superestimado, tendo em vista que mais equipamentos e/ou instrumentos deverão ser adquiridos para manter as usinas em funcionamento. O lucro com a comercialização de CERs e energia elétrica será diretamente afetado, pois contratos de compra e venda normalmente são realizados no momento da implantação dos projetos.

Operadores de aterros sanitários podem quantificar as emissões de metano, utilizando um modelo de emissão ou de um método de medição adequado. Modelos de emissão diferentes dão resultados muito diferentes, ainda que os mesmos dados sejam introduzidos. Métodos de medição de emissões são geralmente considerados insuficientemente precisos e esta não é uma situação desejável, tendo em vista a dificuldade em avaliar o impacto negativo das medidas tomadas pelos operadores de aterros e proponentes de projetos de MDL quanto às políticas desenvolvidas pelos organismos reguladores (OONK, 2010).

As estimativas realizadas pelos Projetos Bandeirantes e São João, utilizando a metodologia de cálculo disponibilizada pela UNFCCC, apontam que tais modelagens matemáticas disponíveis precisam ser aperfeiçoadas, tendo em vista que diversos parâmetros que podem comprometer os valores previstos, como, por exemplo, o tipo de cobertura final do aterro, se há recirculação de chorume, cobertura da última cama de resíduos, ou, ainda se há emissões fugitivas de biogás pelos taludes e platô, não são considerados nos cálculos.

A fim de discutir as potenciais causas avaliadas após a realização da pesquisa, foi utilizado o diagrama tipo espinha de peixe, proposto por Ishikawa (1993), conforme ilustra a Figura 20. A avaliação prévia pretendia apontar possíveis caminhos para os estudos futuros no sentido de aprimorar as estimativas de geração, ou os métodos de operação dos aterros que favoreçam a máxima geração de biogás para fins de aproveitamento energético, conforme diagrama apresentado na Metodologia. Entretanto, após realização da pesquisa, achou-se necessário incluir outros parâmetros dentro dos “6 Ms” pré-definidos no momento de pesquisa.

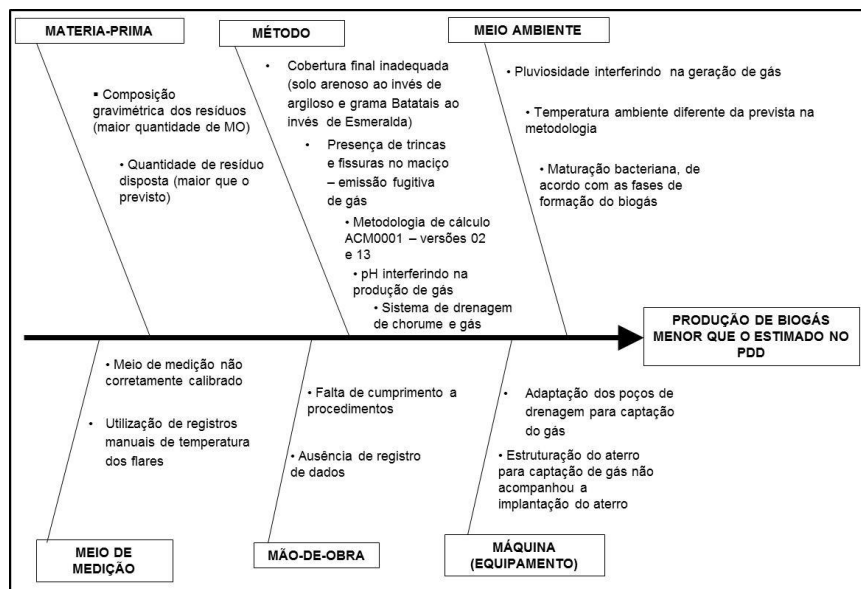


Figura 20: Potenciais causas da produção de biogás menor que o projetado no PDD

Fonte: Elaborado pela autora.

Algumas dessas falhas são menos prováveis, como, por exemplo, as associadas a equipamentos e instrumentos de medição, porque o processo de medição e de extração do gás é exaustivamente monitorado e conferido durante as auditorias de verificação de créditos de carbono, as quais exigem certificados de calibração e aferição de todos os equipamentos e instrumentos (PEDOTT; AGUIAR, 2012).

5.1. Matéria Prima

A composição dos resíduos dispostos é um dos fatores-chave para a geração de metano em aterros sanitários, conforme menciona Chakraborty *et al.* (2011).

Conforme mencionado nos resultados apresentados nos Projetos Bandeirantes e São João, a quantidade de biogás gerado em ambos os aterros objeto de estudo da presente dissertação varia consideravelmente se utilizarmos valores *default* de 50% de resíduos orgânicos presentes nos resíduos domiciliares dispostos, sendo eles de base úmida, na estimativa de produção de biogás.

A quantidade e qualidade de resíduo dispostos nos aterros sanitários talvez sejam os principais fatores relacionados a estimativa de produção de biogás. De acordo com Pattharathanon, Towprayoon e Wangyao (2012), os fluxos de biogás gerado e captado nos aterros sanitários dependem da quantidade e qualidade de resíduos dispostos no aterro.

Scharff e Jacobs (2006) mencionam que o problema que surge imediatamente ao aplicar um dos modelos matemáticos para estimativa de produção de biogás em aterros é como dividir as diferentes categorias de resíduos registradas pelo operador do aterro, tendo em vista o número limitado de categorias indicadas nos modelos. As definições das categorias de resíduos podem ser diferentes entre os países que fazem uso da mesma metodologia.

Farquhar e Rovers (1973) concordam com Scharff e Jacobs (2006) e afirmam que há materiais que são tóxicos ou inibitórios para os micro-organismos produtores de gás e estes estão presentes nos resíduos dispostos em aterros sanitários, ainda que tais aterros recebam apenas resíduos sólidos urbanos. Nestes casos, a composição do lixo que desempenha um papel importante na produção de gás, pode ser prejudicada e impedir o crescimento da população microbiana, retardando, assim, as taxas de produção de CH₄.

Há uma diferenciação dos materiais que compõe os RSU dispostos nos aterros brasileiros (restos de comida, madeira, papel, papelão, tecidos, borracha, varrição, plásticos, vidros, metais, etc.), de maneira que a porcentagem de cada um deles interfere diretamente no potencial de geração de CH₄, devido ao seu potencial de biodegradabilidade. Os restos de comida, por exemplo, são os resíduos que possuem maior degradabilidade devido ao alto conteúdo de matéria orgânica (BARLOZ; HAM; SCHAEFER, 1989).

Justi e Moliterno (2008) concordam com a afirmação de Barloz, Ham e Schaefer (1989) e relatam que a composição gravimétrica do resíduo depositado é algo que pode variar bastante de aterro para aterro e, normalmente, não é acompanhada tão de perto ao longo da operação dos locais de disposição, para saber se está de acordo com o planejado. Tais autores ainda defendem que, para estimar a geração de biogás é importante conhecer previamente a quantidade de matéria orgânica presente no total de resíduo depositado e essa quantidade normalmente é estimada ou verificada em análises gravimétricas dos resíduos. Estes fatores interferem diretamente na quantidade de CH_4 presente no biogás, normalmente em torno de 50%, portanto pode ser uma das causas da baixa geração de biogás.

De acordo com a observação participante da autora da presente dissertação, que fez parte dos projetos enquanto os aterros ainda estavam ativos, era possível perceber a diferença nos tipos de resíduos dispostos de acordo com a época do ano. Durante a semana entre os feriados de Natal e Ano Novo, havia muitas embalagens plásticas, papelão e papéis de presente. Na Páscoa, percebia-se um aumento na quantidade de plásticos, principalmente os embrulhos de ovos de Páscoa. Durante o período de férias escolares, meses de julho, dezembro e janeiro, percebia-se uma quantidade maior de resíduos orgânicos, provavelmente em decorrência do maior desperdício de alimentos nas residências por terem crianças e jovens em casa.

As quantidades de resíduos dispostas nos aterros estudados foram maiores que as planejadas, entretanto, os aterros foram reestruturados para que pudessem receber mais resíduos até alcançar seu limite.

O fato de ter sido depositada uma quantidade de resíduos maior que o previsto, pode ter favorecido a produção de biogás, tendo em vista que houve disposição de mais matéria orgânica. Figueiredo (2007) menciona que a quantidade de metano produzida depende diretamente da quantidade e da composição dos resíduos depositados no aterro. Ainda segundo o mesmo autor, quanto maior a fração orgânica dos resíduos, mais rápida será a taxa de produção de biogás no aterro.

A concentração de CH_4 presente no biogás produzido nos aterros esta na média prevista, entre 45 e 55%. Entretanto, o valor *default* de CH_4 utilizado para realizar as estimativa é 50%. Percebe-se que a concentração de CH_4 no Projeto Bandeirantes, em torno de 48,5%, é inferior a concentração do mesmo gás no Projeto São João, em torno de 49,5%. O

valor de O₂ é semelhante em ambos os aterros, ainda que o Projeto Bandeirantes apresente um valor mais baixo, provavelmente em decorrência da cobertura do maciço do aterro.

Cabe mencionar que outros projetos no Brasil apresentam problemas similares. Brito Filho (2005) relatou que em ensaios realizados nos gases provenientes do aterro sanitário de Nova Iguaçu, localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro, os valores de metano variaram entre 44 e 76% e os valores de CO₂ variaram entre 8 e 15%. No aterro controlado “Terra Brava”, também localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro, o autor relata quantidades de metano variando entre 40 e 76%, para valores de CO₂ variando entre 7 e 15% (JUSTI; MOLITERNO, 2008).

Real (2005), afirmou que os gases presentes no Lixão de Paracambi, localizado no Município de Paracambi, Estado do Rio de Janeiro, apresentou quantidades de metano variando entre 64 e 72% e valores de dióxido de carbono inferiores a 10%.

O Aterro Sanitário São João com projeto de compensação ambiental e produção de energia elétrica, analisado pelos indicadores demonstra que faz uso, em sua maioria de recursos provenientes da economia. Este fato demonstra que o sistema explora de maneira pouco eficiente, todavia justifica-se o investimento desses insumos visto que o sistema é implantado com a finalidade de mitigar impactos ambientais ainda maiores, na cidade de São Paulo, caso os resíduos fossem depositados de forma inadequada (SILVA *et al.*, 2011).

Conclui-se, então, que a composição gravimétrica e a quantidade de resíduos dispostas nos locais de disposição interferiram de forma positiva nos cálculos de estimativa de produção de biogás e geração de energia elétrica, sendo que, quanto mais resíduo orgânico disposto, mais biogás será produzido. Não há, conforme o ponto de vista dos operadores dos aterros, notícias sobre contaminações inibidoras nos projetos estudados.

5.2. Método

Neste item serão discutidos os métodos utilizados pelos projetos para verificação do pH dos resíduos, sobre a qualidade da cobertura da camada final (qualidade do solo utilizado, grama plantada e emissões fugitivas de gás), o sistema de drenagem de chorume e gás, o sistema de captação de gás e os resultados das estimativas de produção de biogás nos Aterros Bandeirantes e São João, por meio da metodologia ACM0001, revisões 02 e 13.

5.1.1. pH

Os dados de medição de pH nos resíduos dispostos e no chorume gerado nos projetos estudados é praticamente desconhecido, tendo em vista que não foram verificadas análises periódicas realizadas pelas operadoras do aterro.

De acordo com Rovers e Farquhar (1973), o pH ideal para a produção de CH₄ durante a decomposição anaeróbica de biogás e chorume normalmente está próximo a 7,0. Os desvios a este resultado podem levar a uma reduzida produção de gás.

Os autores Qian, Koerner e Gray (2002) e Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) concordam com Rovers e Farquhar (1973) quanto ao intervalo ideal de pH para o perfeito desenvolvimento bacteriano está em torno de 6,7 a 7,5, isto é próximo a 7,0. Neste intervalo é possível se obter uma alta taxa de crescimento de arqueas metanogênicas, aumentando a produção de CH₄. Fora deste intervalo (pH menor que 6 e maior que 8), a produção de CH₄ pode ser seriamente limitada.

Kotze *et al.* (1969) afirmam que o pH aceitável está em torno de 6,4 a 7,2, ou seja, levemente mais ácido. Skinner (1968), por sua vez, definiu uma variação aceitável de pH entre 5,5 e 9,0, ou seja, ampliou o limite aceitável.

A diferença de limites aceitáveis de pH estabelecidas por diversos autores pode estar relacionada às características dos locais de disposição de resíduos estudados por eles e as diferentes características dos resíduos presentes no maciços destes locais. Sabe-se que a composição dos resíduos difere de país a país, fazendo com que a presença de determinados tipos de resíduos possa interferir nos limites de pH.

Tal informação é embasada por Farquhar e Rovers (1973), que mencionam que os extremos de pH podem resultar da existência de materiais ácidos ou alcalinos dentro do maciço do aterro. Reduções no pH também podem ocorrer em resposta a uma inibição da produção de CH₄ com uma acumulação resultante de ácidos orgânicos. Estes poderão ser acompanhadas por uma redução da alcalinidade.

Dos Projetos estudados, apenas o Projeto Bandeirantes realizou análises deste tipo e apenas em um momento, no ano de 2008. A média de pH nas 9 amostras verificadas foi de 9,1. Desta maneira, pode estar próximo do limite satisfatório para o crescimento bacteriano,

conforme Skinner (1968) e fora dos limites aceitáveis para Qian, Koerner e Gray (2002), Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993), Rovers e Farquhar (1973) e Kotze *et al.* (1969).

Segundo (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002) a maioria dos aterros de RSU tendem a apresentar ambientes ácidos, entretanto, o Aterro Bandeirantes apresentou ambiente básico.

Assim sendo, pode-se concluir que o nível de pH pode ter interferido na produção de biogás no Aterro Sanitário Bandeirantes. Não se sabe se este parâmetro também auxilia na diferença de produção de biogás no projeto São João, tendo em vista que não foi possível analisar tal parâmetro.

5.1.2. Cobertura

O modo de operação dos aterros sanitários pode influenciar negativamente a produção de biogás, uma vez que grande parte dos aterros em operação não foi estruturada para receber, mesmo seguindo as normas de engenharia estabelecidas na NBR 8.469 (ABNT, 1992).

Nos aterros objeto desta dissertação, esta tarefa de cobertura cabe aos operadores dos aterros e não às empresas responsáveis pela captação de biogás. Assim, os operadores não se dão a devida importância à qualidade do material utilizado. Ao invés da terra arenosa utilizada no Aterro Bandeirantes, recomenda-se a utilização de terra argilosa, conforme previsto no Plano de Encerramento dos Aterros – documento entregue à CETESB. O mesmo ocorre com a qualidade da grama. Atualmente é utilizada a grama “batatais”, que por apresentar raiz profunda, permite emissão fugitiva do biogás produzido. A recomendação é utilizar a grama da qualidade esmeralda, pois possui raiz mais fina e menos profunda, além de absorver menor quantidade de água e permitindo maior umidade ao solo.

A cobertura de um aterro de resíduos sólidos tem como finalidade minimizar o impacto gerado pelo contato dos resíduos com o meio ambiente, interceptar a entrada de água de chuvas para o interior do aterro como forma de controle da produção de líquidos percolados e evitar a saída do gás, viabilizando a produção de biogás para aproveitamento como fonte de energia ou na transformação de CH₄ para a produção de CERs (FERREIRA; MAHLER 2005).

Aronica *et al.* (2008) concorda com Ferreira e Mahler (2005) quando mencionam que a quantidade de chuva também influencia as emissões fazendo com que a cobertura da última camada fique menos permeável.

A capacidade de infiltração da cobertura de um aterro de resíduos sólidos pode ser afetada por diversos fatores (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995):

- porosidade, densidade e granulometria do solo, teor orgânico;
- umidade inicial;
- inclinação e deformação na superfície;
- descida d'água com alta velocidade;
- duração e intensidade de tempestades;
- carreamento de materiais finos;
- vegetação (raízes profundas); e
- temperatura.

Ainda de acordo com Ferreira e Mahler (2005), a qualidade na compactação de solos de baixa taxa de infiltração envolve custos adicionais em equipamentos adequados. Sobre superfícies altamente compactadas podem ocasionar as existências de poças de água e em áreas de baixa compactação o aumento da infiltração, incrementa a produção do percolato resultando em bolsões de lixiviados e ocasionando problemas de estabilidade.

Ferriz (1999) afirma que sistemas de cobertura de aterros que fazem uso de solos de alta permeabilidade (arenosos) provocarão perdas no sistema de coleta de gases e as condições anaeróbicas serão destruídas pela entrada de ar.

A cobertura final dos taludes e platô dos aterros é uma questão que deve ser observada com cautela, pois trincas e rachaduras podem fazer com que ocorra emissão fugitiva do biogás presente no maciço do aterro para a atmosfera. Sendo assim, uma cobertura argilosa é recomendada (SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2012).

A cobertura da última camada de disposição de resíduos do aterro com material arenoso favorece emissões fugitivas. A metodologia ACM001 nas duas versões – 02 e 13 - considera que a cobertura é perfeita e que não há, portanto emissões fugitivas. Essa é uma limitação da metodologia que precisa ser compensada. Há dificuldades para medir emissões fugitivas.

Silva, Freitas e Candiani (2013) calcularam a eficiência da cobertura de dois aterros em São Paulo, Bandeirantes e Caieiras, após medições e testes realizados com placa de fluxo,

e concluíram que a eficiência da cobertura do aterro é importante tendo em vista as emissões fugitivas dos aterros estudados.

Atualmente, as avaliações em relação à eficiência de estanque para gases de cobertura final em aterro são praticamente inexistentes, pois no lugar de tal eficiência de estanque costuma-se adotar valores padrões de eficiência que podem variar entre 60 a 80% de eficiência (SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2012).

No Aterro Sanitário Bandeirantes foi instalada na célula mais alta, denominada platô, uma manta de Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Tal instalação ocorreu após a verificação de vazamento de biogás por meio de pequenas rachaduras, fato que prejudicava a geração de créditos de carbono e energia. Conforme Silva, Freitas e Candiani (2012), deve-se levar em consideração que o valor fixado nas modelagens considera não só a possível perda de gás pela superfície, mas também as condições ideais de compactação, cobertura, temperatura e umidade para a biodegradação dos resíduos orgânicos presentes no maciço sanitário do aterro que podem interferir na produção de gás.

No caso dos aterros estudados, tanto a escolha da grama correta, como o tipo de terra utilizada na cobertura podem interferir na produção de biogás. Tais materiais, se comparados com o investimento e retorno financeiro dos projetos, possuem custos baixos e os prejuízos são potencialmente grandes.

A decisão pelo tipo de cobertura que será utilizada fica a cargo das operadoras dos aterros estudados. Talvez tenha que ficar por conta do proponente do projeto, pois pode ser um erro deixar essa decisão na mão de quem, mais tarde, não vai se beneficiar dela por não fazer parte do projeto de MDL. Assim, a operadora do aterro não irá investir em algo que não terá retorno financeiro para ela.

Outra forma de solucionar a questão da qualidade da cobertura final dos resíduos dispostos é incluir a empresa responsável pela operação do aterro na divisão dos lucros advindos da comercialização dos créditos de carbono. A operadora, desta forma, não se importará em investir na maneira correta de cobertura, conforme consta no Plano de Encerramento dos Aterros, pois terá retorno financeiro.

Cabe à CETESB a fiscalização dos aterros sanitários, a fim de verificar se as operadoras do aterro estão cumprindo com o estabelecido nas licenças ambientais e planos de encerramento dos locais de disposição de resíduos.

A cobertura do maciço do aterro Bandeirantes com manta de PEAD pode ter prejudicado a produção de biogás tendo em vista que houve uma diminuição considerável na umidade, pois a chuva que auxilia neste aspecto não penetra mais.

Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) concordam com Mcbean, Rovers e Farquhar (1995) e defendem que as de produção do metano em aterros sanitários dependem de numerosos fatores, incluindo o tipo de resíduo, teor de umidade, nutrientes, tipos de bactérias e nível de pH.

Haichun, Lanlan e Qingxia (2011) afirmam que o teor de umidade dos RSU depende de alguns fatores como o volume de água presente no próprio RSU, água das chuvas no aterro, medidas de águas superficiais e subterrâneas controle de escoamento. Tais autores também afirmam o teor de umidade excessiva causará um efeito de arrefecimento, bloqueando o fluxo de gás e resultando na redução da captação de gás. Estudos têm mostrado que o teor de umidade inicial dos RSU em torno 60% a 80% é o mais apropriado para a degradação (HAICHUN; LANLAN; QINGXIA, 2011).

Nos últimos anos, com o interesse no aproveitamento do gás produzido em aterros sanitários, a aplicação do processo de recirculação tem sido intensificada (CHANG; CHU e WONG, 2002). A recirculação de chorume pode ser uma solução à baixa umidade verificada no Projeto Bandeirantes, auxiliando a distribuição de umidade, matéria orgânica e micro-organismos ao longo das células de aterro.

Segundo Chan, Chu e Wong *et al.* (2002), o processo de recirculação é relativamente controlado e auxilia na estabilização do aterro, entretanto, o volume e a frequência de recirculação de chorume devem ser rigorosamente controlados para não resultar na imposição de condições ácidas, as quais vão reduzir a atividade metanogênica e alterando a cinética dos processos de decomposição mediados por micro-organismos.

Koerner e Soong (2000) afirmam que em aterros ocorre a recirculação de chorume, há o aumento de risco de rompimento dos taludes de proteção do aterro e das geomembranas.

Após a análise das estimativas de produção de gás e comparação com o real captado, conclui-se que há fatores que podem interferir no sucesso do projeto, sendo eles:

- a umidade no maciço do aterro – no caso do Projeto Bandeirantes a umidade pode ter sido comprometida pela cobertura; e
- a qualidade da cobertura da camada final de resíduos dispostos composto pelo tipo de grama e solo utilizados pelos operadores dos aterros.

Faz-se importante mencionar que os Planos de Encerramento dos Aterros, os quais são de domínio público por serem disponibilizados para consulta pelo órgão ambiental, possuem as informações sobre as atividades relacionadas ao encerramento, descomissionamento e manutenção pós-encerramento. Os Planos, realizados pelas operadoras do aterro, informam o tipo de terra que será utilizado como cobertura final, a espessura desta camada, o tipo de grama utilizado, como será a manutenção das vias, entre outras informações. Desta forma, o acesso a tais documentos poderia ser facilitado pelos operadores dos aterros a fim de facilitar a pesquisa.

A cobertura final do Aterro Bandeirantes com terra de qualidade arenosa ao invés de argilosa, conforme previa o Plano de Encerramento do Aterro, e a qualidade das gramas plantadas em ambos os projetos, sendo a Batatais ao invés da Esmeralda, pode ter comprometido a produção de biogás no maciço dos aterros e ainda ter colaborado com as emissões fugitivas de gás, uma vez que as raízes mais profundas deste tipo de grama podem provocar trincas e fissuras nos taludes e platôs dos aterros. As questões relacionadas ao arranjo institucional também devem ser levadas em consideração, uma vez que as operadoras dos aterros não participam da divisão dos CERs gerados pelos projetos, assim, tendem a economizar em matéria-prima no momento de realizar o encerramento dos locais de disposição e na manutenção pós encerramento.

Desta forma, conclui-se que um bom arranjo institucional entre as empresas detentoras dos projetos de MDL e os operadores dos aterros é fundamental para que sejam seguidas as diretrizes propostas no Plano de Encerramento dos Aterros, de forma que a produção de biogás não seja prejudicada por conta do não cumprimento de regras pré-estabelecidas.

Os projetos de MDL nos quais o operador do aterro participa do projeto de MDL ou é o próprio proponente do projeto, tendem a apresentar menos erros com uma parte importante

do projeto: encerramento do aterro, pois o operador conhecerá os malefícios causados ao projeto se não cumprir o estabelecido nos planos de aterro.

5.1.3. Captação

Estudos realizados em 29 aterros sanitários com projetos de MDL registrados na UNFCCC mostram redução de 34% de sucesso em relação à produção real de créditos de carbono comparados à modelagem teórica adotada em seus projetos (PDD). Um dos dados de entrada que mais afeta o cálculo final destas modelagens é a eficiência de captação do biogás (KWON; CHO; KIM, 2009).

A captação de biogás em aterros sanitários deve ocorrer desde a fase de implantação, isto é, desde a impermeabilização do solo até a cobertura da última célula em que foi disposto resíduo, pois a captação de gases e chorume dependem dos sistemas de drenagem verticais e horizontais instalados à medida que as células são formadas (FERREIRA; MAHLER, 2005).

Como os aterros estudados não foram planejados para terem usinas de captação e geração de energia, a captação do biogás pode ter sido prejudicada, levando em consideração que muitos poços de drenagem de chorume e gás estavam obstruídos, trincados e danificados pela movimentação do maciço do aterro.

A reestruturação/adaptação dos poços, drenagens e vias de acesso dos projetos objeto de estudo da presente dissertação foram necessárias, entretanto, não prejudicaram a viabilidade técnica e financeira dos projetos.

O Aterro Sanitário de Palmas, por exemplo, possui potencial de geração de biogás que pode ser utilizado para produzir energia elétrica. No entanto observou-se que as condições para o aproveitamento deste potencial estão comprometidas, já que o aterro não dispõe de estrutura adequada para a captação e tratamento dos gases (SOUZA *et al.*, 2011).

Conclui-se que a estruturação dos sistemas de captação de chorume e gás junto à implantação do aterro pode facilitar o processo de captação e evitar perdas em decorrência da adaptação dos poços e que fazer projetos desse tipo em aterros existentes é um desafio que pode acabar, na prática, se tornando inviável.

5.1.4. Estimativa

Silva, Freitas e Candiani (2013), mencionam que a produção de biogás ao longo do tempo nos aterros sanitários é estimada por meio de modelos matemáticos. A maioria dos modelos considera, para realização os cálculos dados em sua maioria empíricos, a quantidade de resíduos orgânicos, a condição operacional e de gerenciamento do aterro, a fração de metano do biogás e, principalmente, a eficiência de captação de biogás do projeto.

Aronica *et al.* (2008) afirmam ainda que a avaliação das emissões de biogás dos aterros não é simples uma tarefa, uma vez que são múltiplas fontes pontuais com a variabilidade espacial e temporal alta.

O fato de a maioria das modelagens não considerarem dados reais, como a composição gravimétrica adequada, os aspectos climáticos e o tipo de cobertura final do aterro, por exemplo, tem resultado em grandes distorções entre os valores reais encontrados e os mensurados nos projetos de MDL (ENSINAS, 2003) (BOSCOV, 2008) (MACHADO *et al.*, 2009) (SILVA, 2010) (MACIEL; JUCÁ, 2011).

As principais consequências das discrepâncias entre as estimativas de produção de biogás e o real captado podem ser listadas como: perdas financeiras em decorrência da não geração de créditos de carbono previsto e também da não geração de energia, considerando que a venda de energia acarreta em multas pesadas aplicadas conforme contrato realizado entre as partes.

Existem várias técnicas para a medição de campo das emissões de biogás, considerando que as medições de emissões em campo são fundamentais para a quantificação das emissões de biogás, apesar de deficiências inerentes, como a necessidade de ampla cobertura espacial, o alto custo de implementação e as incertezas nas metodologias de medição (EL-FADEL; ABI-ESBER; SALHAB, 2012).

Ainda conforme El-FAdel, Abi-Esber e Salhab (2012), o monitoramento de gás durante o traçado, sensoriamento remoto óptico terrestre, e outros métodos micro meteorológicos são caros e requerem equipamentos altamente sofisticados e sensíveis que não são amplamente comercializados. As técnicas estática (fluxo fechado) e/ou dinâmico de câmara (fluxo livre) constituem uma maneira mais fácil, mais popular e de baixo custo para realizar a medição.

Por outro lado, conforme menciona Jha, Sharma, e Singh (2008), as abordagens indiretas baseadas em modelos matemáticos são igualmente atraentes, dando a vantagem de ampla cobertura espacial a um custo reduzido, no entanto, a menos que juntamente com medições diretas no campo, os modelos matemáticos tendem a superestimar a geração e emissão de CH₄. Neste contexto, algumas medidas diretas de aterro as emissões de CH₄ superfície foram relatados em países em desenvolvimento, nenhum dos quais se refere a um aterro sanitário fechado ou inativo, e não é suficiente para generalizar os dados de medição diretos coletados em países desenvolvidos para o caso dos países em desenvolvimento por causa de diferenças significativas na composição dos resíduos.

Neste contexto, Chiemchaisri e Visvanathan (2008) abordam que medidas diretas das emissões de CH₄ na superfície foram relatadas em países em desenvolvimento, nenhum dos quais se refere a um aterro sanitário fechado ou inativo, e não é suficiente para generalizar os dados de medição diretos coletados em países desenvolvidos para o caso dos países em desenvolvimento por causa de diferenças significativas na composição dos resíduos. Os autores concluem que é essencial a realização de medições de campo das emissões de biogás de aterros sanitários ativos e inativos nos países em desenvolvimento para calibrar e aplicar modelos matemáticos que simulem as futuras emissões de CH₄ e o potencial de recuperação de forma adequada.

El-FADEL, Abi-Esber e Salhab (2012) concluem que a diferença nos resultados entre as várias técnicas utilizadas para a medição de biogás gerado nos aterros parece menor do que entre os diferentes modelos matemáticos utilizados para estimativas de produção. Assim sendo, o desenvolvimento dessas técnicas e posterior utilização deles para ajustar os modelos podem fornecer uma ferramenta mais confiável no futuro próximo do que os modelos atuais.

Aronica *et al.* (2008), realizaram testes no Aterro Sanitário de Palermo aplicando o modelo de estimativa Gaussiana para verificar a pluma das emissões atmosféricas e chegaram a conclusão que a velocidade do vento e sua direção também podem interferir. Os autores consideram o modelo Gaussiano como um primeiro passo para estimar a quantidade de biogás emitido por aterro, pois o modelo utilizado não considerou a topografia e drenagem do aterro estudado. Além desses parâmetros, os autores afirmam ser necessária a utilização de um modelo que considere as diferentes alturas do aterro sanitário e da estação de medição de gás produzido e concluem que a implementação de uma campanha de medições no aterro é indispensável para validar o modelo.

Aronica *et al.* (2008) concluem que não é fácil e simples definir as regras gerais para verificação de emissões de gases em terrenos irregulares e afirmar que cada *site* é único, uma vez que suas próprias características induzem variações específicas sobre o fluxo de ar.

Figueroa, Cooper e Mackie (2008) propuseram um método para estimar as emissões de metano em aterros sanitários, utilizando centenas de pontos de medição de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), como receptores. As equações de dispersão foram resolvidas por meio de métodos da matriz de Gauss padrão a fim de determinar as taxas de emissão de metano em diversos pontos do aterro de resíduos sólidos urbanos. O Aterro estudado por Figueroa, Cooper e Mackie (2008) foi Aterro Sanitário Central Florida MSW. Os autores mencionam que a modelagem necessita de novos testes para verificar a sensibilidade a todos os parâmetros: número de fontes, os erros nas medições de concentração, velocidade do vento, direção do vento, e classe de estabilidade e que desta maneira, poderá ser útil para mensurar a eficiência dos sistemas de captação de gás existentes em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos e identificar áreas que apresentam perdas superiores aos padrões considerados normais em cada aterro, além de melhorar o desenvolvimento e manutenção do sistema de captação de biogás de um aterro sanitário. Chakraborty *et al.* (2011) realizaram um estudo para verificar e comparar os resultados das emissões de em três aterros sanitários em Delhi - Índia, utilizando quatro metodologias distintas: metodologia padrão do IPCC (1996), metodologia de Primeira Ordem de Decaimento, Método de Triangulação Modificado. Os resultados revelaram o método in-situ aponta valores emissões anuais de CH₄ menores em comparação com outros três métodos, portanto, mais conservador. A metodologia padrão do IPCC produz os valores de emissão mais altos seguidos pelos métodos de Triangulação Modificado e Primeira Ordem de Decaimento, mostrando a possível superestimação das emissões de CH₄ por estes métodos.

Os resultados apresentados pelos estudos realizados nos Projetos Bandeirantes e São João comprovam a dificuldade em estimar, tanto a quantidade de gás produzido quanto o perdido por emissões fugitivas nos aterros, ainda que tenha sido utilizada metodologia diferente das apresentadas pelos autores supracitados.

Seria desejável que, antes da estimativa de produção de gás, CERs e geração de energia elétrica, todos os parâmetros fossem conhecidos. Para que isso aconteça, a utilização dos métodos propostos, como o modelo de estimativa de Gauss para verificar a pluma das emissões atmosféricas e/ou a utilização de pontos de medição de Compostos Orgânicos

Voláteis (VOCs) como receptores para medição da dispersão, podem auxiliar a obtenção de dados prévios às estimativas realizadas.

No caso da revalidação do projeto junto à UNFCCC, as estimativas serão obrigatoriamente mais conservadoras que as primeiras estimativas, tendo em vista a evolução da metodologia no que tange a captação de biogás, geração de créditos de carbono e geração de energia. Ainda assim, poderia ser incluído um fator de incerteza relacionado aos parâmetros que não são considerados na fórmula utilizada para realizar os cálculos estimativos.

Observou-se que as emissões reais estão bem abaixo das estimadas inicialmente nos PDDs, pela versão 2 da metodologia ACM0001. As quantidades estimadas pela versão 13 da mesma metodologia são mais próximas do real captado, conforme demonstrado no teste estatístico ANOVA seguido de Tukey, o qual conclui que os resultados obtidos por meio da metodologia ACM001 ver. 13 se aproximam mais dos resultados reais verificados nos projetos do que as estimativas realizadas por meio da metodologia ACM 001 ver. 2. Este fato pode ser considerado indício de alguma melhoria na previsão, isto é, o aperfeiçoamento do modelo matemático.

No entanto, as diferenças persistem com consequências significativas para todas as partes envolvidas: PMSP, Proponentes do Projeto, investidores e a comunidade do entorno, que se beneficia com projetos socioambientais realizados com a parte que cabe à PMSP da venda dos CERs.

Para a PMSP, que recebe 50% dos créditos gerados em ambos os projetos, a principal consequência de superestimar a produção de biogás e geração de CERs é a redução da verba a ser disponibilizada para a implantação de projetos socioambientais na região dos aterros. No entanto, Justi e Moliterno (2008) constataram uma dificuldade por parte da Secretaria do Verde e Meio Ambiente da PMSP em estabelecer os projetos para a aplicação dos recursos obtidos. Em 2012 havia aproximadamente R\$ 65 milhões de reais aguardando elaboração e aprovação projetos.

Os Proponentes dos Projetos são os maiores prejudicados, pois investem milhões de reais nos projetos, arcam com todos os custos referentes às verificações (Contratação de empresa certificadora, pagamento de taxas de comercialização à UNFCCC, taxas bancárias de transferência internacional e etc.), arcam, muitas vezes, com a manutenção do aterro ainda

que não seja de sua responsabilidade e pagam multas pelo não fornecimento de gás para a UTE-Bandeirantes, no caso do Projeto Bandeirantes, e fornecimento de energia no caso do Projeto São João. Pode-se concluir que o erro na estimativa pode levar o projeto ao fracasso.

Assim, sugere-se que a metodologia de cálculo proposta pela UNFCCC seja revista ou que seja criada outra, a qual possa se adequar aos projetos brasileiros, considerando todas as variáveis e interferências dos locais de disposição existentes.

Outra forma de diminuir as perdas é realizar cálculos de acordo com as estimativas realizadas por meio da metodologia ACM0001 e, em seguida, aplicar um fator de erro associado à metodologia, considerando as variáveis e interferências dos locais de disposição, como tipo de cobertura (solo e grama), presença de fissuras e trincas e recirculação de chorume. Tais cálculos podem ser utilizados internamente, apenas que se tenha uma previsão mais realista, em paralelo com aquela apresentada a ONU.

5.3. Meio Ambiente

Conforme Farquhar e Rovers (1973), há 3 grupos de fatores que podem interferir na produção de biogás em aterros sanitários:

- fatores de grupo A: são características do ambiente microbiano imediato em que ocorre a produção de gás. A redução da temperatura, por exemplo, pode impedir a produção de CH_4 , o que resultaria em acúmulo de ácidos orgânicos e traria reduções de alcalinidade e pH. Como consequência, uma redução do pH poderia dificultar ainda mais a produção de CH_4 ;
- fator do grupo B: a infiltração, dependendo da quantidade de água e infiltração no maciço do aterro, as suas características físicas e químicas, podem afetar o grupo A; e
- fatores do grupo C: a temperatura do ar determina, em parte, quedas na temperatura. Também influencia a infiltração e afeta a evaporação. As variações da pressão atmosférica podem provocar trocas entre o ar e os gases dentro do maciço. A não realização de procedimentos e materiais utilizados para cobertura podem afetar a movimentação de gás e de água na superfície do aterro. A precipitação afeta, também, a infiltração, assim como a topografia e a hidrologia do local.

A Figura 21 identifica os fatores que parecem ter efeitos mais significativos sobre a produção de gás em aterros sanitários. Ela também ilustra as série interações que podem existir entre estes fatores.

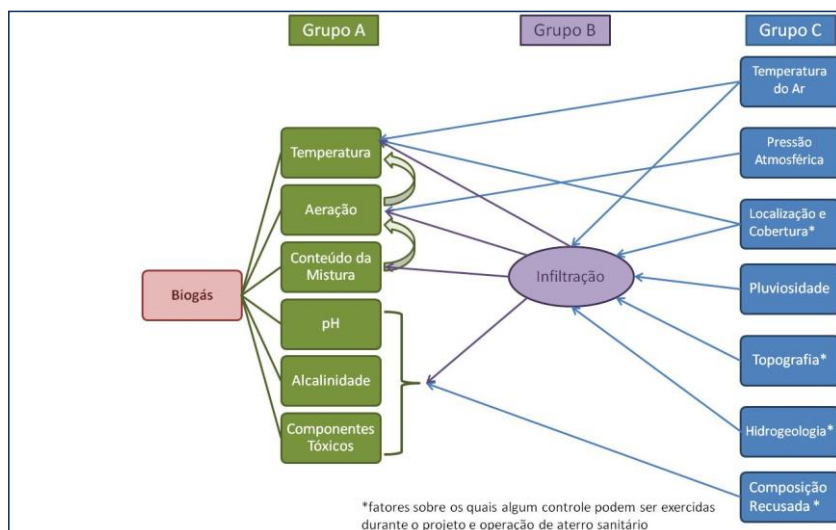


Figura 21: Principais fatores que afetam a produção de biogás em aterros sanitários

Fonte: Adaptado de FARQUHIAR; ROVERS, 1973.

O modelo matemático de estimativa de produção de biogás utilizado na elaboração dos primeiros PDDs, a ACM0001 – ver. 02, não considerou alguns fatores ambientais como a pluviosidade e variação de temperatura de países tropicais. Este fato possivelmente prejudicou a estimativa de produção de biogás e créditos de carbono, tendo em vista que esses dois fatores são considerados importantes na maturação bacteriana e produção do biogás, conforme aponta Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993).

Os parâmetros de temperatura e pluviosidade são muito diversificados e em países com o clima tropical, como o Brasil, a maturação bacteriana tende a sofrer interferência maior.

Ramaswamy (1970) e Songonuga (1970) verificaram que as taxas de produção de gases oriundos do processo de decomposição aumentam em decorrência do teor de umidade presente nos resíduos e a percentagem de CH_4 produzido também aumentou. Este fato pode estar associado à produção de gás do São João estar mais próximo do estimado que o Projeto Bandeirantes, que contém cobertura no patô do aterro.

Resultados de estudos realizados por Ludwig (1970) apontam que no aterro de Azusa, localizado na Califórnia – Estados Unidos, a concentração de CH_4 presente no biogás

aumentou após uma chuva pesada e grande infiltração de água no maciço do aterro. Em decorrência da utilização de grama Batatais, com raízes mais profundas que a grama Esmeralda, estabelecida como a ideal pelo Plano de Encerramento do Aterro, maior quantidade de água proveniente de chuvas pode ter infiltrado no maciço do aterro São João e aumentado a produção de biogás.

Com as afirmações acima, pode-se supor que a infiltração de água de chuva no maciço dos aterros estudados tenha causado um pico de geração maior que o previsto, antecipando a degradação da matéria orgânica e, prejudicando as previsões estimadas para os projetos ao longo dos anos.

Farquhar e Rovers (1973) afirmam que, assim como o pH, a temperatura é suscetível de desempenhar um papel importante na regulação da taxa de produção de biogás em aterros sanitários.

Na realização dos cálculos com a ACM0001 – ver. 13, a qual considera dados de temperatura, volume de chuva e outras variáveis, os valores ficam mais próximos do real captado. A temperatura utilizada nos cálculos estimativos esta próxima da verificada no banco de dados do INMET, entretanto, no caso do Aterro São João, a estação meteorológica mais próxima se localiza no bairro de Santana – Zona Norte do município de São Paulo, ou seja, distante do local de disposição de resíduos.

Ainda no caso do Projeto São João, a média de temperatura utilizada na realização dos cálculos esta abaixo do limite previsto na metodologia, de 20°C, sendo utilizado o valor de 19,6°C e, portanto, mais conservador. Assim sendo, possivelmente o conservadorismo referente aos valores de temperatura contribuíram para compensar o erro das estimativas.

No caso do Projeto Bandeirantes, a estação meteorológica se localiza próximo ao aterro, entretanto, no momento da realização das estimativas, o valor médio de temperatura utilizada foi 20,7°C, fazendo com que os cálculos deixassem de ser conservadores, como do São João.

Vale ressaltar que a média de temperatura para os anos entre 2009 e 2013 registrados na base de dados do INMET, na estação de Santana é de 21,19°C.

Ainda que o volume de chuva registrado e as temperaturas utilizadas tenham sido distintas, conclui-se que tais parâmetros não interferiram de forma significativa nos cálculos.

Entretanto, o volume de chuva pode interferir na umidade do maciço do aterro e, consequentemente, na maturação bacteriana, fazendo com que a produção de biogás diminua.

Após a análise dos potenciais parâmetros que interferem na produção do biogás, conclui-se que a produção abaixo do estimado não está relacionada com o tempo de decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos orgânicos, uma vez que a produção não se estendeu ao longo do tempo.

Cabe ressaltar que metodologia já evoluiu se comparada à versão 02. Entretanto, conclui-se que novas variáveis devem ser incluídas na metodologia de cálculo de estimativa para ajustar os cálculos a fim de obter estimativas cada vez mais próximas da captação real.

5.4. Meio de Medição

Os meios de medição são a única maneira de registrar as quantidades de biogás captado do aterro, enviado para a usina de geração de energia e para os *flares*. Também são registradas as quantidades de energia elétrica gerada, utilizada pelo projeto e comercializada.

Toda a medição é feita por meio de equipamentos calibrados periodicamente, de acordo com especificações do fabricante ou estabelecida pelo proponente do projeto no momento da elaboração do Plano de Monitoramento do PDD.

Nos Projetos de MDL estudados, não houve desconto de créditos de carbono gerados em decorrência da não calibração de equipamentos. O prejuízo ocorreu apenas no prazo de liberação dos CERs gerados no Projeto Bandeirantes por conta de esclarecimentos solicitados pela equipe certificadora. Uma pequena multa foi paga ao comprador dos CERs desta primeira verificação, o Banco alemão KfW Bankengruppe. O pagamento da multa foi feito em CERs, provenientes da segunda e terceira verificações.

No momento das auditorias de verificação de CERs, os auditores – equipe normalmente formada por um especialista em Projetos de MDL em aterros sanitários e um especialista em energia elétrica – verificam se todas as ações constantes no Plano de Monitoramento apresentadas pelos Proponentes do Projeto à UNFCCC estão sendo cumpridas. Desta forma, eles verificam os certificados de calibração dos instrumentos de medição, como os medidores de vazão, os analisadores de gás, termômetros e outros instrumentos.

Na primeira verificação de CERs no projeto Bandeirantes foram solicitadas pelos auditores algumas alterações e inclusões de instrumentos de forma a deixar mais confiável a maneira de contabilização do gás enviado à usina de geração de energia. No momento da auditoria, os responsáveis pelo projeto não aceitaram e tentaram justificar que os instrumentos já instalados eram suficientes, entretanto, perceberam que poderiam ocorrer eventuais erros e que a instalação dos novos equipamentos poderia, inclusive, resguardá-los quanto a perda de danos ou erros de contabilização.

Houve, ainda na primeira verificação, a utilização de registros de dados manuais, que, na época era procedimento padrão da usina utilizado para dupla checagem dos dados. O registro manual foi aceito pela verificadora e, também pela UNFCCC, por julgar que o Proponente do Projeto Bandeirantes não agiu de má fé na maneira de registros de dados, entretanto foram solicitadas melhorias no sistema e a Biogás Energia Ambiental S.A se comprometeu prontamente a realizar a melhoria sugerida. A alteração no sistema foi realizada para a segunda verificação, aproximadamente seis meses depois.

No Projeto Bandeirantes, as primeiras auditorias foram mais complexas, tendo em vista o pioneirismo do projeto e a falta de experiência da equipe interna com este tipo de auditoria.

O Projeto São João, em suas primeiras verificações, teve auxílio da equipe envolvida com tais questões do Projeto Bandeirantes, fazendo com que as auditorias transcorressem com maior tranquilidade, pois a equipe tinha conhecimento dos pontos mais críticos (calibração, licenças de operação e verificação dos dados informados com os registrados pelo sistema informatizado). O projeto é sensível a tal ponto que, caso a concentração de CH₄ ou de O₂ no gás captado saia dos limites estabelecidos, os motogeradores automaticamente se desligam e deixam de gerar energia elétrica. A usina de captação é reestabelecida e o biogás então é enviado para queima nos flares. Não há uma perda significativa na geração de créditos de carbono, apenas o adicional da energia, de 5%. Entretanto, há perda de receita pela energia não gerada até o momento do reestabelecimento total da usina termelétrica. O que poderia ser feito:

- mudar o projeto para ser mais flexível no que diz respeito aos tipos de contratos que foram firmados, pois sabe-se que durante o verão a produção de biogás é mais em decorrência das altas temperaturas e chuvas e o oposto ocorre no inverno. Assim, os

proponentes do projeto deixariam de pagar multas em função da diminuição na produção;

- não há como automatizar mais o projeto, pois a manutenção e operação de campo necessitam de mão de obra humana para a visualização de eventuais problemas e a realização dos devidos reparos; e
- melhorar rotina da operação das usinas de modo que os responsáveis por estas usinas fiquem mais atentos e façam a ação corretiva o mais breve possível. Instalar alarmes sonoros de maior alcance talvez seja uma solução.

Pode-se concluir que os meios de medição, principalmente os medidores de vazão e de energia gerada, são de extrema importância para os Projetos, pois são eles que registram todo o volume de biogás captado do campo e energia líquida gerada e exportada. Entretanto, não foi observada perda de CERs em decorrência de falhas de tais instrumentos e nem de suas calibrações.

Conclui-se que os instrumentos de medição não foram uma causa de perda importante para a geração de créditos de carbono e geração de energia, pois As perdas observadas foram pequenas e ocorreram, principalmente, por conta de paradas nas usinas de geração por alteração nas concentrações de metano e oxigênio, ocasionando perdas financeiras por conta da não geração de energia para ser exportada e o adicional de créditos de carbono oriundos desta geração.

5.5. Mão de Obra

Os projetos de MDL dos Aterros Sanitários Bandeirantes e São João são completamente dependentes de mão de obra humana, pois para realizar o monitoramento e a manutenção de campo não há outros métodos senão a manual.

Toda a verificação de eventuais problemas e inadequações nos sistemas de captação de gás, drenagem de chorume e/ou outro tipo de manutenção que deve ser realizado nas áreas de disposição de resíduos é realizado por equipe técnica qualificada, de maneira manual e, apenas, com auxílio de algumas máquinas como, por exemplo, retroescavadeira.

São as equipes de monitoramento e manutenção de campo as responsáveis por identificar os problemas e verificar a melhor forma de resolvê-los, verificar sua urgência e o

tempo de execução dos serviços. Assim sendo, o projeto cria uma dependência da ação humana, ainda que as usinas de captação de biogás e geração de energia sejam automatizadas.

Como não há maneiras de automatizar tais tipos de serviços, a perda de produção de CERs pode ser maior ou menor em decorrência da atividade humana.

O Projeto Bandeirantes, por anteceder o Projeto São João, enfrentou maiores dificuldades para a realização de treinamento. O Projeto São João, com implantação de quase dois anos mais tarde, recebeu muitos profissionais previamente treinados e qualificados no Aterro Sanitário Bandeirantes. Este fato foi fundamental no início da operação das usinas, pois diminuiu os eventuais erros que funcionários não treinados poderiam cometer, como ocorreu no Projeto Bandeirantes.

Com a inauguração de um terceiro projeto no Aterro Jardim Gramacho – RJ em meados de 2009, muitos profissionais dos Projetos Bandeirantes e São João foram transferidos para o Rio de Janeiro a fim de auxiliar na implantação do novo projeto. Nesta época, a mão de obra tornou-se escassa e houve dificuldades de encontrar novos profissionais qualificados. A mão de obra interna se tornou insuficiente e aos poucos o quadro de funcionários se regularizou, sempre enfrentando os antigos problemas com capacitação. Entretanto, tal fato não colaborou de forma significativa para a diminuição na quantidade de biogás captado e emissão de CERs e geração de energia, pois parte da equipe permaneceu nos projetos Bandeirantes e São João.

5.6. Máquina (Equipamento)

Os aterros sanitários estudados, por serem antigos, não foram estruturados para receberem projetos de captação de biogás e geração de energia elétrica, ainda que seguiram no decorrer da implantação das novas células as normas regulamentadoras, como a NBR 8.419 (ABNT NBR 8.419, 1992). Foram necessárias diversas adaptações em seus sistemas de drenagem de gás e chorume, que demandaram tempo e verba, para que o biogás pudesse ser extraído de maneira eficiente e sem danificar o sistema já estabelecido.

Os aterros sanitários mais novos, que entraram em operação recentemente, já são estruturados para operarem com usina de captação de biogás, ainda que o aterro só queime o gás nos *flares* e não gere energia elétrica. A preparação começa desde a base, com a compactação do solo e instalação de manta impermeável de PEAD em toda a extensão do local de disposição de resíduo. O sistema de drenagem de chorume e gás também é preparado

para facilitar a separação e envio do chorume às lagoas e a inclusão de cabeçotes para a captação do biogás produzido (MACIEL; JUCÁ, 2011).

De acordo com Janke *et al.* (2013), a maioria dos locais de disposição de resíduos sólidos no Brasil foi construída/operada sem considerar critérios ambientais, como a instalação de poços de gás para permitir a recuperação do metano e sistemas de impermeabilização de solo para evitar a contaminação de água subterrânea por chorume.

As emissões de metano, em particular de aterros encerrados, não são desprezíveis e merecem especial atenção, pois operadores do aterro não levam em consideração os cuidados com remediação dos passivos ambientais gerados (PAPAGEORGIOU; BARTON; KARAGIANNIDIS, 2009).

Assim sendo, cabe mencionar que nem todos os aterros sanitários são viáveis para a construção de usina de geração de energia. Conforme menciona PNUD e MMA (2010), deve-se realizar, antes da realização do projeto executivo do aterro sanitário, um estudo de viabilidade que analise a quantidade de resíduo disposto diariamente, a qualidade deste resíduo, os anos de operação do aterro e, também, o retorno financeiro com e sem a implantação de um projeto de MDL.

5.7. Propostas

A partir das verificações realizadas nos aterros Bandeirantes e São João percebeu-se que diversos fatores demonstrados nos resultados não foram levados em consideração no momento da realização da estimativa e precisam ser considerados em projetos futuros. A realização de estudos de viabilidade técnica e financeira prévia em locais de disposição de resíduos que almejem a implantação de usinas de captação de biogás, com ou sem geração de energia, é fundamental. Cabe mencionar que seja utilizada a versão mais nova das metodologias de cálculo disponíveis, atentando-se para a que mais se adéqua aos padrões e necessidades do futuro projeto.

A realização de estudos de emissão fugitiva de biogás pela superfície do aterro é fundamental para as modelagens matemáticas, planejamento e instalação de projetos futuros e também para o acompanhamento da eficiência de captação de biogás dos projetos implantados e projetos futuros. Nesses estudos, devem ser avaliadas as variações sazonais ao longo do ano, a qualidade do solo de cobertura, que e a oxidação biológica de metano

realizada por micro-organismos presentes no solo da cobertura dos aterros podem contribuir para reduzir a emissão de metano para a atmosfera.

Os estudos futuros devem, também, levar em consideração as lições aprendidas nos projetos pioneiros, como os Projetos Bandeirantes e São João, ainda que os projetos novos não tornem Projetos de MDL e apenas reduzam as emissões de CH₄ geradas nos locais de disposição.

Após a análise dos resultados e referidas discussões sobre a metodologia de cálculo da UNFCCC – ACM0001, os proponentes de projeto e investidores devem levar em conta as limitações apresentadas a fim de prever o “nível de sucesso esperado” do futuro projeto, uma vez que para o projeto ser aprovado como projeto de MDL deve-se obrigatoriamente utilizar a ACM0001 ou propor nova metodologia, fato que pode atrasar a implantação do projeto tendo em vista o tempo de análise por conta dos especialistas da UNFCCC.

A Figura 22 ilustra o caminho de estimativa de CER por meio da metodologia ACM0001 ver. 02 e por meio da ACM0001 ver. 13, considerando outros parâmetros para ajustar a estimativa de modo que fique mais próximo da realidade.

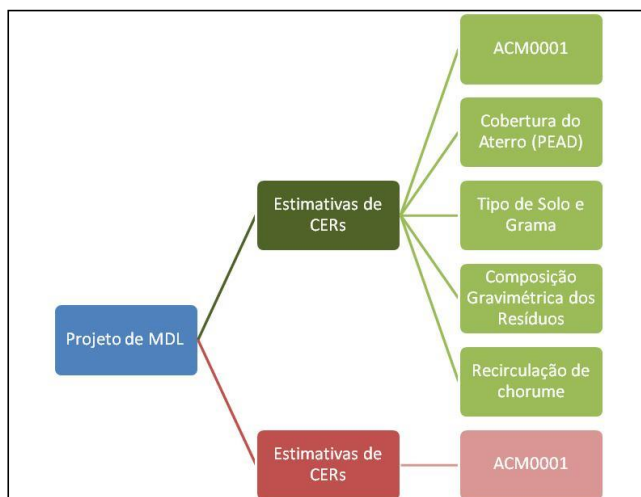


Figura 22: Estimativa de CERs pela ACM0001 e ACM0001 com inclusão de novos parâmetros.

Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda que as auditorias de verificação realizadas nos projetos sejam complexas, elas poderiam ter contribuído mais, de forma a verificar questões operacionais do projeto todo como, por exemplo, a cobertura utilizada (tipo de solo e grama) e a presença de trincas e fissuras (emissões fugitivas), e não apenas as questões relacionadas à captação de biogás e geração de CERs nas usinas. É importante mencionar que tal verificação, não faz parte do escopo este tipo de verificação, principalmente porque as operadoras dos aterros não participam dos projetos de MDL.

Os auditores, neste tipo de verificação, apenas verificam se as licenças ambientais e as referidas condicionantes pertencentes aos aterros sanitários estão sendo cumpridas, pois consideram que os locais de disposição são reservatórios de gás, isto é, a auditoria nos aterros não faz parte do escopo das auditorias de verificação de CERs.

Após analisar o modelo no qual são realizados os contratos entre os *stakeholders* nos aterros sanitários, sendo observado que algumas responsabilidades atribuídas aos operadores interferem diretamente na produção e captação de biogás, recomenda-se que o arranjo institucional seja verificado de forma a contribuir positivamente aos projetos. Talvez a melhor maneira seja fazer com que o proponente do projeto fique encarregado de algumas atividades, originalmente desenvolvidas pelos operadores do aterro, como a cobertura final com solo e grama adequados e, também o monitoramento contínuo de parâmetros como pH, umidade, pluviosidade e temperatura.

Conforme menciona Godoy (2013), a complexidade do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo resulta de uma série de instituições e organizações responsáveis por seu desenvolvimento. Ao mesmo tempo em que é necessário um aparato institucional para evitar oportunismos e falhas de procedimentos de implantação de um MDL, o excesso de normas e de organizações acaba dificultando a implantação de novos projetos. Assim, surgem os custos de transação inerentes a todas as etapas do ciclo do projeto, que podem afetar a eficiência de um projeto e influenciar a decisão de um proponente em implantar um MDL.

Sugere-se que o monitoramento de alguns parâmetros que interferem diretamente na produção de biogás seja realizada em conjunto entre o operador do aterro e o proponente do projeto como, por exemplo, o pH, a composição gravimétrica dos resíduos, a umidade do maciço, entre outros. Esta ação em conjunto pode facilitar a identificação de possíveis causas que por ventura possam atrapalhar na produção e captação de biogás.

5.8. Limitações

Neste item são descritas as limitações encontradas tanto no momento da pesquisa, quanto no momento de realização dos cálculos. As principais limitações verificadas são:

- a) dificuldade de acesso a alguns documentos, como por exemplo, o Plano de Encerramento do Aterro São João e alguns relatórios de estudos internos realizados pelos Proponentes dos Projetos;
- b) o Projeto Bandeirantes realizou análise gravimétrica dos resíduos e registrou a temperatura e pluviosidade entre janeiro de 2009 e novembro de 2012. O Projeto São João, por sua vez, não realizou o mesmo tipo de análise e registro de dados. O que há de análise gravimétrica do Projeto São João são informações de uma determinada área onde foi depositado resíduo no ano de 2009. A qualificação deste resíduo foi feita pela Operadora do aterro – Ecourbis. Este fato fez com que não fosse possível realizar algumas comparações entre dados obtidos por meio da literatura e o real registrado;
- c) as anotações realizadas pelos operadores das usinas de captação de biogás e geração de energia muitas vezes são confusas e não foi possível entender a letra do responsável pelo turno;
- d) não foi possível verificar os valores de pH do chorume gerado nos aterros, tampouco da massa de resíduos. Apenas foi verificada pequena amostragem no Projeto São João. A análise dos valores de pH poderia ter auxiliado na verificação de outro parâmetro importante na produção de biogás;
- e) os dados pluviométricos e de temperatura foram retirados do site do INMET, pois outros sites oficiais não possuíam dados atualizados até as datas necessárias para realizar as comparações. Outro ponto que deve ser observado diz respeito ao local da estação meteorológica a qual foram extraídos os dados – Bairro de Santana, Zona Norte do Município de São Paulo, localizada relativamente próxima ao Projeto Bandeirantes e distante do Projeto São João, tendo em vista que este Projeto está localizado no extremo Leste do Município de São Paulo. Não há outra estação cadastrada no INMET mais próxima; e
- f) não foi possível identificar e/ou confirmar, nos Diários de Operação de ambos os projetos, a frequência com que falhas operacionais ocorrem nos turnos dos operadores, pois eles muitas vezes não registram.

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado assumiu como principais objetivos a verificação das possíveis causas entre as diferenças apresentadas das estimativas de produção de captação de biogás nos Aterros Sanitários Bandeirantes e São João e o real captado, por meio da metodologia ACM0001, versões 02 e 13 proposta pela UNFCCC.

Após avaliação dos parâmetros que podem influenciar, direta e indiretamente, a produção de gás e geração de CERs e energia elétrica, pode-se concluir que a composição gravimétrica e a quantidade de resíduos dispostas nos aterros sanitários interferem diretamente nos cálculos de estimativa de produção de biogás e geração de energia elétrica.

O nível de pH presente nos resíduos no maciço do aterro pode ter interferido, ainda que de maneira reduzida, na produção de biogás no Aterro Sanitário Bandeirantes, tendo em vista que o pH apresentado foi maior que o limite considerado ideal para o crescimento bacteriano. Em relação ao Projeto São João, não foi possível mensurar, pois não houve acesso aos dados.

A cobertura dos resíduos da última camada de disposição dos aterros estudados pode interferir na produção, pois a utilização da grama correta e o tipo de terra utilizada na cobertura podem interferir na produção de biogás. Tais materiais, se comparados com o investimento e retorno financeiro dos projetos, possuem custos baixos e os prejuízos são potencialmente grandes.

No Projeto Bandeirantes, foi constatado que a cobertura do maciço com manta de PEAD pode ter prejudicado a produção de biogás tendo em vista que houve uma diminuição considerável na umidade, pois a chuva que auxilia neste aspecto não penetra mais.

Em relação ao sistema de captação de gás dos aterros, verificou-se que a estruturação dos sistemas de captação de chorume e gás junto à implantação do aterro pode facilitar o processo de captação e evitar perdas em decorrência da adaptação dos poços.

Após avaliar as duas versões da metodologia ACM0001 – 02 e 13, concluiu-se que a versão 13 ainda precisa de novos ajustes, de modo a se adequar aos projetos brasileiros, considerando todas as variáveis e interferências dos locais de disposição existentes. Cabe

ressaltar que metodologia já evoluiu se comparada à versão 02. A questão que permanece é se tal avanço é suficiente ou se devem ainda ser incluídas novas variáveis para ajustar os cálculos a fim de obter estimativas cada vez mais próximas da captação real.

Concluiu-se, após análise dos fatores ambientais - temperatura e pluviosidade, que em ambos os projetos a produção e captação abaixo do estimado não esta relacionada com o tempo de decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos orgânicos, uma vez que a produção não se estendeu ao longo do tempo.

Os instrumentos de medição verificados nos Projetos bandeirantes e São João não foram uma causa de perda importante para a geração de créditos de carbono e geração de energia, já que as perdas verificadas foram pequenas e ocorreram, principalmente, por conta de paradas nas usinas de geração por alteração nas concentrações de metano e oxigênio, ocasionando perdas financeiras por conta da não geração de energia para ser exportada e o adicional de créditos de carbono oriundos desta geração.

Como não há maneiras de automatizar tais tipos de serviços, a perda de produção de CERs pode ser maior ou menor em decorrência da atividade humana.

Entretanto, tal fato não colaborou de forma significativa para a diminuição na quantidade de biogás captado e emissão de CERs e geração de energia, pois parte da equipe permaneceu nos projetos Bandeirantes e São João.

Concluiu-se, que os projetos de MDL objeto de estudo da presente dissertação, Bandeirantes e São João, foram superestimados por utilizarem uma metodologia que não previa parâmetros que interferem diretamente na produção de biogás. Desta forma, os projetos sofrem consequências de perdas financeiras pela não geração de energia elétrica e créditos de carbono.

A Figura 24, espinha de peixe proposta por Ishikawa anteriormente utilizado no presente estudo, resume os principais parâmetros que podem ter interferido na produção e captação de biogás abaixo de estimado nos Projetos de MDL dos Aterros Bandeirantes e São João.

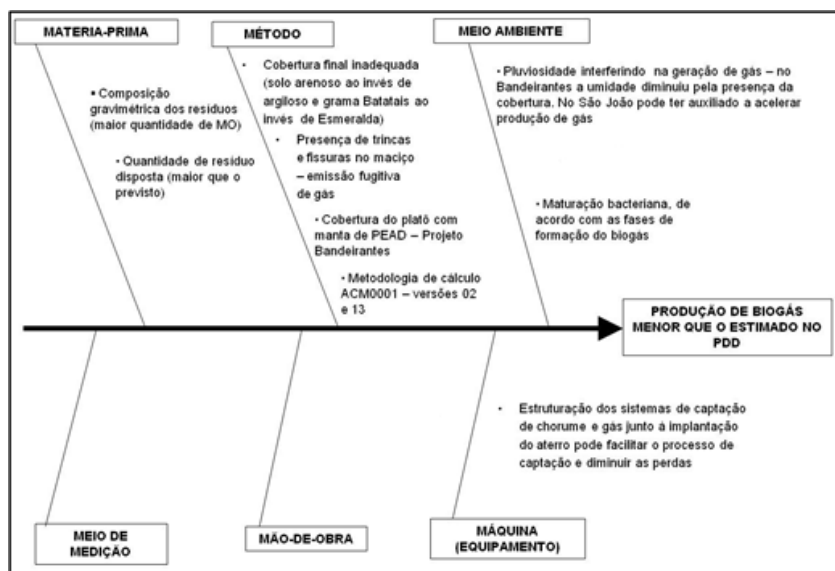


Figura 23: Principais causas da produção de biogás menor que o projetado no PDD nos Projetos Bandeirantes e São João

Fonte: Elaborado pela autora.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Independente dos rumos que o MDL, como mecanismo de flexibilização do Protocolo de Kyoto, venha a ter após o final de 2013, estudos semelhantes a este poderão úteis para verificar o potencial de geração de biogás para utilização em usinas termelétricas ou gás natural, ou simplesmente para conhecermos o potencial de emissão de GEE em um determinado aterro sanitário.

Como benefícios da aplicação dessas práticas, espera-se que seja atingida certa estabilidade nos resultados obtidos, como, por exemplo, a redução no consumo de combustível fóssil, diminuição de gastos envolvendo manutenções corretivas, redução no consumo de energia proveniente da rede, aproveitamento de materiais e matérias-primas nos trabalhos realizados, redução nas paradas da usina para manutenção corretiva, entre outros.

A utilização do biogás gerado em aterros sanitários para produzir energia é prática comum em outros países com tecnologia mais avançada, no entanto os aterros sanitários brasileiros iniciaram as atividades de captação e queima do biogás motivados pelo incremento financeiro advindo do Protocolo de Kyoto por meio da implantação de Projetos de MDL. A implementação desse instrumento econômico no Brasil, a viabilidade técnica e econômica para a mitigação do CH₄ em atividades de disposição de resíduos mostravam-se uma incógnita que esta pesquisa teve por objetivo elucidar.

Documentos e registros realizados pelos operadores do setor de Operação e Manutenção das Usinas de Captação e Geração de Energia podem ser fontes valiosas para estudos posteriores, tendo em vista o aperfeiçoamento dos métodos expostos nos procedimentos de projeto e de operação.

Sendo assim, cabe mencionar que a implementação da NBR ISO 14.001 em um projeto de MDL pode auxiliar de maneira significativa a gestão dos principais pontos examinados nas auditorias de verificação de créditos de carbono a fim de minimizar erros operacionais que podem influenciar na redução de créditos de carbono.

O Plano de Encerramento dos Aterros, documento enviado ao órgão ambiental para informar as etapas de encerramento e de manutenção pós-encerramento, é de domínio

público, pois a CETESB os disponibiliza quando solicitado. Desta forma, o acesso a tais documentos poderia ser facilitado pelos operadores dos aterros a fim de facilitar a pesquisa.

O aprofundamento nas questões referentes à mão de obra, incluindo capacitação e treinamento, e outros assuntos relacionados aos recursos humanos vai além do que seria possível explorar no âmbito da presente pesquisa. Este tema pode ser assunto para estudos futuros.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419 - Projeto de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2011**. São Paulo, 2012.

AGUIAR, A. O. **As parcerias em programas de coleta seletiva de resíduos sólidos domésticos**. 1999. 176f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Faculdade de Saúde Pública. Departamento de Saúde Ambiental. São Paulo, 1999.

ALVES, L.A., COLARES, R., UTURBEY, W. As Atratividades Ambientais e Econômicas do Uso do Biogás Produzido pelo Aterro Sanitário de Belo Horizonte para Geração de Energia Elétrica. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE**, Belo Horizonte, 2008.

ARONICA, S., BONANNO, A., PIAZZA, V., PIGNATO, L., TRAPANI, S. Estimation of biogas produced by the landfill of Palermo, applying a Gaussian model. **Waste Management**, v. 29, p. 233–239, 2009.

AUGENSTEIN, D., PACEY, J. Landfill methane models. **Sessions of SWANA's 29th Annual International Solid Waste Exposition**. Silver Spring, p. 87-111, 1991.

AYROZA, M. R. Mudança climática e modal: dois caminhos que se cruzam. Dissertação (Administração) - Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2011.

AZEVEDO, G. O. D. de. **Por menos lixo: a minimização dos resíduos sólidos urbanos na cidade do Salvador/Bahia**. 2004. 146 f. Dissertação (Engenharia Ambiental Urbana), Departamento de Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

BANDEIRA, M. S. **Análise e Perspectivas do Mercado de Carbono para o Brasil – MDL e REDD**. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto de Economia. Rio de Janeiro, 2011.

BARLAZ, M. A.; HAM, R. K.; SCHAEFER, D. M. Mass-balance analysis of anaerobically decomposed refuse. **Journal of Environmental Engineering**, v. 115, n. 6, p. 1088-1102, 1989.

BASTIAN, L., YANO, J., HIRAI, Y., SAKAI, S. Greenhouse gas emissions from biogenic waste treatment: options and uncertainty. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 15, n. 1, p. 49-60, 2013.

BENSEN, G. R. **Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles**. Libris. São Paulo, 2010.

BIDONE, F. R. A., POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. EESC-USP. São Carlos, 1999.

BIOGÁS ENERGIA AMBIENTAL S.A. **Project Design Document**, 2004. Disponível em <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1134130255.56>. Acesso em: 21 mar 2012.

_____. **Project Design Document - Revalidated**, 2011. Disponível em <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1134130255.56>. Acessos em 2012 e 2013

BLEWETT, M. **Waste and Climate Change: a Critical Review of Clean Development Mechanism Landfill Gas Projects**. 2010. Tese de Doutorado. Master's Thesis Technische Universität Wien, Vienna.

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

BM&F-BOVESPA. **O Mercado Brasileiro de Redução de Emissões**. São Paulo, 2005.

BORBA, Silvia Mary Pereira. **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso [Rio de Janeiro]**. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação, COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Civil, 2006. Disponível em: < www.scribd.com/doc/2363832/Analise-demodelos-de-geracao-de-gases-em-aterros-sanitarios-estudo-de-caso >. Acesso em: 20 set 2013.

BRITO FILHO, L. F. **Estudos de Gases em Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**". 2005. 222 f. Dissertação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

CADAVID, P.C. **Análise Técnico-econômica para o aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários utilizando pilhas a combustível - O caso do município de Campinas - SP - Brasil**. 2004. Dissertação (Engenharia Civil) - Universidade de Campinas - UNICAMP. Campinas, 2004.

CANDIANI, G., SILVA, M. R. Análise do biogás no aterro sanitário Caieiras. **Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas Londrina/PR**. v. 32, n. 1, p. 69-77, 2011.

CARDOSO, T. M., MONTEIRO, F. F., VENTURIERI, A., CAMPOS, G. S. Análise multitemporal da Área de Proteção Ambiental de Belém e Parque Ambiental de Belém. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 14, p. 1283-1290. Natal, 2009.

CASTILHOS Jr, A. B., LANGE, L. C., GOMES, L. P., PESSIN, N. Resíduos Sólidos Urbanos: aterro sustentável para município de pequeno porte. **ABES - RIMA**, 2003.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Pesquisa sobre emissões de metano dos depósitos de lixo no Brasil. **São Paulo**: 1999. Disponível em:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes-e-relatorios/1-publicacoes/-relatorios> . Acesso em: 10 mai 2013.

CHAKRABORTY, M. SHARMA, C., PANDEY, J., SINGH, N., GUPTA, P. K. Methane emission estimation from landfills in Delhi: A comparative assessment of different methodologies. **Atmospheric Environment**, v. 45 n. 39, p. 7135-7142, 2011. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv>. Acesso em: 18 fev 2014.

CHIEMCHASRI, C., VISVANATHAN, C. Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 58, n. 5, p. 629–635, 2008.

COELHO, S. T. Geração de energia a partir do biogás gerados por resíduos urbanos e rurais. Potencial e viabilidade econômica. **Congresso Brasileiro sobre eficiência energética e cogeração de energia**. São Paulo, 2008.

COIMBRA, V. P., MEDEIROS, G. A., MANCINI, S. D., ROSA, A. H.; AMARAL, T. Caracterização de Resíduos e Geração de Biogás em Aterro. **III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. 11 p. Goiânia, 2012.

COLE, J. Proposed UNFCCC CDM Materiality Standard and Brazil's Domestic Sustainable Development Assessment. **Carbon & Climate L. Rev.**, p. 432, 2011.

CORNETTA, Andrei. Mecanismos de desenvolvimento limpo e conflitos locais. **Revista Geográfica de América Central**, v. 2, n. 47E, 2011.

COSTA, D. F. **Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CRUZ, S. R. S.; PAULINO, S. R. Projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) em aterros sanitários na cidade de São Paulo como instrumento de melhoria na gestão de resíduos sólidos urbanos. **Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração**, v. 34, 2010.

CZEPIEL, P. M. et al. Landfill methane emissions measured by enclosure and atmospheric tracer methods. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, v. 101, n. D11, p. 16711-16719, 1996.

EEA - European Environment Agency. Better management of municipal waste will reduce greenhouse gas emissions. **Copenhagem:** 2008. Disponível em: http://www.eea.europa.eu/publications/briefing_2008_1. Acesso em: 15 dez 2012.

EL-FADEL, M; ABI-ESBER, L; SALHAB, S. Emission assessment at the Burj Hammoud inactive municipal landfill: Viability of landfill gas recovery under the clean development mechanism. **Waste management**, v. 32, n. 11, p. 2106-2114, 2012.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro Delta em Campinas-SP. 2003.** Mestrado (Engenharia Mecânica) Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

EPA. Environmental Protection Agency. **Methane.** 1996. Disponível em: <https://www.epa.gov/methane> . Acesso em: 12 jun 2013.

FERREIRA, M. A. S., MAHLER, C. F. **Avaliação do Solo das Camadas de Cobertura Intermediárias e Finais – Estudo de Caso.** Rio de Janeiro: COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

FERRIZ, H. **Landfill Gas Issues for Design of Monofill Alternative Covers.** Disponível em: <https://www.rtdf.org/public/phyto/minutes/altcov/acap/ferriz/>. Acesso em 02 de 12 de 2014.

FIGUEROA, V.; COOPER, D.; MACKIE, K. R. Estimating Landfill Greenhouse Gas Emissions from Measured Ambient Methane Concentrations and Dispersion Modeling. In: **2008 AWMA Annual Conference, Portland, Oregon, Paper.** 2008.

FRÉSCA, F. R. C. **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física.** 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

GERRING, J. **Case Study Research: Principles and Practices.** Cambridge, 2007.

GUTIERREZ, M. B. G. P. S. **Do MDL às NAMAS: Perspectivas para o Financiamento do Desenvolvimento Sustentável Brasileiro.** Centro de Estudos sobre Desigualdade e Desenvolvimento, 2011.

HAICHUN, L., LANLAN, L., QINGXIA, S. Research on the effects of moisture on landfill waste degradation and leachate feature. **Bulletin of Science and Technology**, p. 610-614, 2011.

HAM, R. K.; BARLAZ, M. A. Measurement and prediction of landfill gas quality and quantity. IN: **Sanitary Landfilling: Process, Technology, and Environmental Impact.** Academic Press, New York. 1989. p 155-166, 4 tab, 6 ref., 1989.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Pesquisa Nacional de Sanemaneto Básico 2000.** Rio de Janeiro, 2002.

ICLEI. Governos Locais para a Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos.** São Paulo, 2010.

_____. **Plano de Gestão de Resíduos Sólidos: Manual de Orientação.** Brasília - DF, 2012.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2007.** Disponível em: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf . Acesso em: 19 abr 2013.

_____. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan, 2006.

_____. **Chapter 3: Solid Waste Disposal. In:** Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 -. 2006. Disponível em: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf . Acesso em: 17 jul 2012.

_____. **The Science of Climate Change - Summary for Policymakers.** Madrid: Office Graphics Studio, 1995.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado.** São Paulo: IPT/CEMPRE, 1995, 278.

ISHIKAWA, K. **Controle de Qualidade Total: à maneira japonesa.** Rio de Janeiro: Campus, 1993.

JACOBI, Pedro Roberto; BESEN, Gina Rizpah. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011.

JHA, A.K., SHARMA, C., SINGH, N., *et al.* Greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Indian mega-cities: a case study of Chennai landfill sites. **Chemosphere**, v. 71, n. 4, p. 750-758, 2008.

JUCÁ, T. *et al.* Destinação final dos resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas. In: **Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.** AIDIS, 2002. p. sp.

JUSTI, J. G., MOLIETRNO, M. **Geração de Energia Elétrica por Meio de Biogás Extraído do Aterro Sanitário Bandeirantes e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo como Indutor de Investimentos Socioambientais.** IEE-USP. São Paulo: 2008.

KOTZE, J. P.; THIEL, P. G.; HATTINGH, W. H. J. Anaerobic digestion II. The characterization and control of anaerobic digestion. **Water Research**, v. 3, n. 7, p. 459-494, 1969.

KUMAR, S., MONDAL, A.N., GAIKWAD, S.A., DEVOTTA, SINGH, R. N. Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study **Atmospheric Environment**, v.38, n. 29. p. 4921–4929, 2004.

LAFOND, T. J. Landfill gas used as fuel reaps economic and environmental benefits. **Industrial Engineering**, 52 p. 1992.

LIMA, L.M.Q. **Tratamento e Biorremediação**. São Paulo: Hemus Livraria, v. 03, 1985.

LINNER'R, B., PAHUJA, N. A Registry of Nationally Appropriate Mitigation Actions: Goals, Outcomes, and Institutional Requisites. **Ambio**, v. 41, n.1, p.56–67, 2012.

LOPES, I. V. **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL: guia de orientação**. Rio de Janeiro, 2002.

LOZANO, L. Environment Finance: Brazil pioneers carbon credits market. 2006. Disponível em:
<http://prhttp://proquest.umi.com/pqdweb?did=1014390551&Fmt=3&clientId=57113&RQT=309&VName=PQD&cfc=1> . Acesso em: 22 jul 2012.

LUDWIG, H. Effects of Refuse Dumps on Groundwater Quality. California State Water **Pollution Control Board, Publication**, n. 24, 1961.

MACHADO, S.L., KARIMPOUR-FARD, M., SHARIATMADARI, N., CARVALHO, M. F., NASCIMENTO J. C.F. Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills. **Waste Management**, v. 30, n. 12, p. 2579–2591, 2010.

MACIEL, F. J., JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. **Waste Management**, v. 31, n. 5, p. 966-977, 2011..

MARIANO, M. O. H. **Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2001. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia São Carlos. São Carlos, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001.

MCBEAN, E.A., ROVERS, F.A., FARQUHAR, G. J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. Prentice Hall, 1995.

MCT. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no Mundo**. Ministério da Ciência e Tecnologia. 2010. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>> . Acesso em: 17 out 2012.

MIDLANE, G. Producing power from landfill in South Africa is a gas. **Power Engineering International**, v. 16, n. 4, 2008.

MMA. MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - versão preliminar para consulta pública**. Brasília, 2011.

_____. Ministério do Meio Ambiente e Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento PNUD. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. Brasília, 2010.

MORITA, M., SASAKI, K. Factors influencing the degradation of garbage in methanogenic bioreactors and impacts on biogas formation. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 94, n. 3, p. 575–582, 2012.

MUYLAERT, M.S., et al. **Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudo de Caso**. COPPE/RJ . Rio de Janeiro: 2000.

OLIVEIRA, L. B. **Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil**. 2004. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004.

OONK, H. Literature Review: Methane From Landfills - Methods to Quantify Generation, Oxidation and Emission. **Innovations in Environmental Technology**, 2010.

PAPAGEORGIOU, A., BARTON, J.R., KARAGIANNIDIS, A. Assessment of the greenhouse effect impact of technologies used for energy recovery from municipal waste: a case for England. **Journal of Environ Management**, v. 90, n. 10, p. 2999-3012, 2009.

PATTHARATHANOON, T., TOWPRAYOON, S., WANGYAO, K. Greenhouse Gas Emission and Economic Evaluation from Municipal Solid Waste Landfill in Thailand. **International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering**, v. 42, 2012.

PECORA, V., SILVIA, M. S., COELHO, S. T. Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: Estudo de caso em São Paulo. **Congresso Internacional de Bioenergia**. Curitiba, 2006.

PEDOTT, J. G. J., AGUIAR, A. O. Captação de Biogás em Aterros Sanitários: Produção Real X Produção Estimada. **XIV ENGEMA**, 2012.

PENTEADO, R., CAVALLI, M., MAGNANO, E., CHIAMPO, F. Application of the IPCC model to a Brazilian landfill: First results. **Energy Policy**, v. 42, p. 551-556, 2012

PMSP. PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Secretaria do Meio Ambiente - CONFEMA**. Prefeitura Municipal de São Paulo. 2013. Disponível em: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/confema/idex.php?p=3299. Acesso em: 12 abr 2013.

POMPEMAYER, M. L. Desafios e perspectivas para inovação tecnológica. **Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL - Setor Elétrico no Caminho da Inovação**, 2009.

QIAN, X., KOERNER, R. M., GRAY, D. H. **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction**. Prentice Hall, 2002.

QIN, W., EGOLFOPOULOS, F.N., TSOTSIS, T. T. Fundamental and Environmental Aspects of Landfill Gas Utilization for Power Generation. **Chemical Engineering Journal**, v. 82, n. 1, p. 157-172, 2001.

RAMASWAMY, J. N. **Gas Enhancement Techniques in Landfill Simulators**. 1970. Ph.D. Thesis, West Virginia University, 1970.

REZENDE, A.V., VALE, A. A., SANQUETTA, C. R., FILHO, A. F., FELFILI, J. M. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado sensu stricto em Brasília - DF” **Scientia Forestalis**, v. 17, p. 65-76, 2006.

RIBEIRO, M. S., RESENDE, A. J., DALMÁCIO, F. Z. Uma Análise Multidimensional dos Projetos Brasileiros de MDL – Mecanismos de Desenvolvimento Limpo. **Revista de Contabilidade da UFBA**, v. 2, n. 1, p. 14-29, 2008..

ROSA, L. P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. . **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 39, 2007..

ROVERE, E. L. L., COSTA, C. V., DUBEUX, C.B. S. **Aterros Sanitários no Brasil e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): Oportunidades de promoção de desenvolvimento socioambiental**. Rio de Janeiro: COPPE/RJ, 2005.

ROVERS, F. A. and Farquhar, G. J. Sanitary Landfill Study Final Report, Volume 11, Effect of Season on Landfill Leachate and Gas Production. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 2, n. 4, p. 483-495, 1973..

SALDIVA, P. Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles. **Ex-Libris**, 2010.

SÃO JOÃO ENERGIA AMBIENTAL S.A. **Project Design Document**, 2006. Disponível em <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1145141778.29>. Acesso em: 2012 e 2013.

SAWYER, J. **Canadian Landfill Gas Production: Improving the model to estimate present and future methane production**. Thesis submitted to Masters of Environment , 2007.

SCHARFF, H., JACOBS, J. Applying Guidance for Methane Emission Estimation for Landfills. **Waste Management**, v. 26, n. 4, p. 417-429, 2006.

SCHARFF, H., OONK, J., VROON, R., HENSEN, A., de VISSCHER, A., BOECKX, P. A comparison of measurement methods to determine landfill methane emissions. NOVEM Programme Reduction of Other Greenhouse Gases (ROB). **Waste Management**, v. 26, n. 4, p. 417-429, 2006

SILVA, G. F., ALMEIDA, C. M. V. B., GIANETTI, B., BONILLA, S. H. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro Sanitário. *Revista Agrogeoambiental*, v. 3, n. 1, 2011.

SILVA, T. N, F. S. N de FREITAS, e G. CANDIANI. Emissões Superficiais de Gás de Aterros Sanitários de Grande Porte com Projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 95-104, 2013..

SILVA, T. N. **Biogás de aterro para a geração de energia: resultados, dificuldades e perspectivas do monitoramento do sistema de captação**. 2006 (Dissertação) (ciência e tecnologia ambiental). Itajaí - SC: UNIVALI, 2006.

SILVA, W. R. **Biogás: Potencialidade dos Aterros Sanitários do Estado do Paraná**.Dissertação (PRODETEC). Paraná, 2010.

SNIS. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento Ambiental. **Diagnósticos Do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília - DF, 2011.

SOUZA, R. M., SERRA, J. C. V., ZUKOWSKI Jr, J. C., SANTOS, D. C. R. Análise do Potencial Energético do Biogás Proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/To Para Geração De Energia Elétrica. **AJES**, 2011.

SZEMESOVA, J., GERA, M.. “Uncertainty analysis for estimation of landfill emissions and data sensitivity for the input variation.” **Climatic Change**, 103, n. 1-2, p. 37-54, 2010..

TARAZONA, C. F. **Estimativa de Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2010. Dissertação (Engenharia Civil) COPPE-RJ, 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G., H. THEISEN, e S. VINIL. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. USA: McGraw-Hill, 1993.

TENÓRIO, J. A. S., e D. C. R. ESPINOSA. Controle Ambiental de Resíduos. **In: Curso de Gestão Ambiental**, por PHILIPPI JR, A., ROMERO, M. A., BRUNA, G. C. (Eds.). , 155-211. São Paulo: Manole, 2004.

TOLMASQUIM, M. T. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande - MS**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisas Energéticas, 2008.

_____. Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2003.

TRIVIÑOS, A. **Introdução à pesquisa em Ciências Sociais**. São Paulo: Atlas, 1994.

UNEP. UNITED NATION ENVIRONMENT PROGRAM. **Capacity Development for Clean Development Mechanism - CDM/JI Pipelines**. CD4CDM. 2013. Disponível em: <http://www.cd4cdm.org/CDMJIpipeline.htm> . Acesso em: maio 2013.

Formatado: Português (Brasil)

UNFCCC. **United Nation Framework Convention on Climate Change. ACM0001 Methodology.** United Nation Framework Convention on Climate Change. 2013. Disponível em:

<http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/EYUD9R1ZAUZ2XNZXD3HQB18OK3VWIV/view.html> . Acesso em 25 de maio de 2013.

_____. **Rules of the Kyoto Protocol - 2008.** Disponível: http://unfccc.int/kyoto_protocol/registry_systems/items/2723.php. Acesso em 12 de junho de 2013.

VELA, J. A., FERREIRA, E. Vantagem competitiva do Brasil nos projetos de MDL. **VIII ENGEMA.** Rio de Janeiro, 2005.

VELLINI, M. Natural gas decarbonization technologies for advanced power plants. Journal of engineering for gas turbines and power. **American Society of Mechanical Engineers**, v. 129, n. 4, p. 1114-1124, 2007.

VIDIGAL, F. A. M. **O Protocolo de Kyoto, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e as Formas de Circulação dos Créditos de Carbono.** 2011

WANG, Y., HE, Y., YAN, B., MA, W., HAN, M. Collaborative emission reduction of greenhouse gas emissions and municipal solid waste (msw) management - case study of Tianjin. **Procedia Environmental Sciences**, v. 16, p. 75-84, 2012..

WORLD-BANK. **Estudo de pré-viabilidade para recuperação de biogás no aterro de Muribeca Pernambuco.** The World Bank. 2006. Disponível em: http://www.bancomundial.org/ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Muribeca_PreFeasibility_Study_Portuguese.pdf . Acesso em: 22 jun 2012.

XUYA, P., FANGYING, J., Xiao, B. Analysis of landfill gas production and its affecting factors. **Journal of Chongqing Jianshu University**, v. 19, n. 8, p. 2010-2016, 2010.

YIN, R. K. (Ed.) **The Case Study Anthology.** Sage Publications, 2004.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil.** 2009. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

APÊNDICE 1 – Lista de Documentos

Os documentos aqui listados foram de fundamental importância na pesquisa, tendo em vista que proporcionou um conhecimento das rotinas internas das usinas, fato que não pode ser verificado em documentos públicos. São eles:

- Relatórios Mensais de Monitoramento das Equipes de Manutenção e Monitoramento de Campo;
- Ordens de Serviço para execução de trabalhos de manutenção corretiva e/ou preventiva;
- Relatórios de Análise da Composição Gravimétrica dos Resíduos – Apenas no Projeto Bandeirantes;
- Relatório Técnico de Trincas e Rachaduras no Aterro Bandeirantes;
- Planta dos Aterros, com localização dos poços de drenagem;
- Planos de Encerramento dos Aterros, fornecidos pelas operadoras dos aterros à CETESB;
- Procedimentos Operacionais Internos;
- Diários de Operação – usinas de captação de gás e geração de energia;
- Certificados de Treinamentos das Equipes Técnicas;
- Lista de Funcionários;
- Acervo de Fotos;

APÊNDICE 2 – Quadro- resumo dos resultados

O Apêndice 2 refere-se ao Quadro –resumo dos resultados obtidos após estudos realizados nos dois Projetos estudados.

Parâmetros	BANDEIRANTES				SÃO JOÃO				Comparação dos resultados: Bandeirantes x São João
	Previsto		Real	Perdas	Previsto		Real	Perdas	
	ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			
Quantidade de Resíduo Disposto	38.718.098 t (1979 a 2007)	37.226.874 t (1979 a 2004)	37.226.874 t (1979 a 2004)	1.491.224 t (1979 a 2004)	26.153.980 t (1994 a 2006)	25.542.489 t (1994 a 2009)	25.542.489 t (1994 a 2009)	611.491 t (1994 a 2009)	A quantidade de resíduos disposto foi menor que o previsto no primeiro PDD no Projeto Bandeirantes, assim como no São João.
CERs (média)	990.778 tCO ₂ /ano	689.642 tCO ₂ /ano	523.331 tCO ₂ /ano (2004 a 2010)	- ACM0001 - ver. 02 x real = 467.447 tCO ₂ /ano - ACM0001 ver.13 x real = 166.311 tCO ₂ /ano - ACM0001 - ver. 02 x real = R\$ 14.865.769 - ACM0001	824.150 tCO ₂ /ano	361.246 tCO ₂ /ano	439.067 tCO ₂ /ano (2006 a 2011)	- ACM0001 - ver. 02 x real = 356.703 tCO ₂ /ano - ACM0001 ver.13 x real = - 77.821 tCO ₂ /ano - ACM0001 - ver. 02 x real = R\$ 11.343.155 - ACM0001	As quantidades de tCO ₂ /ano também estão abaixo do previsto pelo primeiro PDD no Aterro Bandeirantes, entretanto, com a segunda estimativa (ACM0001-ver. 13), os valores ficam mais próximos do real. Tal fato ocorre também com o São João, na primeira estimativa, entretanto, houve aumento na

Parâmetros	BANDEIRANTES				SÃO JOÃO				Comparação dos resultados: Bandeirantes x São João
	Previsto		Real	Perdas	Previsto		Real	Perdas	
	ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			
				ver.13 x real = R\$ 5.288.690				ver.13 x real = - R\$2.474.422	produção de tCO ₂ /ano provavelmente em decorrência da reestruturação de uma parte do aterro e da disposição de resíduos ser prorrogada por aproximadamente 2 anos frente ao previsto.
Gravimetria dos Resíduos Dispostos	50% orgânicos	81,21% orgânicos (dos diversos grupos de cadeia carbônica - base úmida)	20,40%	Não foi possível estimar as perdas, tendo em vista que a divisão dos resíduos orgânicos da metodologia não é a mesma utilizada pelo operador do aterro.	50% orgânicos	81,3% orgânicos (dos diversos grupos de cadeia carbônica - base úmida)	Aproximadament e 25% de orgânicos	Não foi possível estimar as perdas, tendo em vista que a divisão dos resíduos orgânicos da metodologia não é a mesma utilizada pelo operador do aterro.	Na primeira estimativa, foram usados valores default de gravimetria, entretanto, sabe-se que a realidade é diferente. A gravimetria informada pelos operadores dos aterros também é bem diferente dos valores dados como oficiais para os resíduos dispostos nos locais estudados. Sabe-se que a gravimetria interfere de maneira direta na estimativa, entretanto, não foi possível estimar as perdas, conforme exposto na coluna

Parâmetros	BANDEIRANTES				SÃO JOÃO				Comparação dos resultados: Bandeirantes x São João
	Previsto		Real	Perdas	Previsto		Real	Perdas	
	ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			
									“Perdas”.
Umidade	50%	De acordo com características dos resíduos dispostos (base úmida)	Média 37,9% (poços novos perfurados)	Provável queda na produção de gás por falta de umidade	50%	De acordo com características dos resíduos dispostos (base úmida)	Aproximadamente 40%	Como não há cobertura do maciço, provavelmente não houve perda, mas sim ganho na produção de gás.	Bandeirantes, por ter seu platô coberto, pode ter a umidade prejudicada e interferência na produção de biogás. Já o São João, como não é coberto não houve perda de produção em função da umidade.
Temperatura ambiente	Não foi previsto	20,7°C (2009)	21,19°C	Não houve alterações significativas, após realização dos cálculos com os valores reais.	Não foi previsto	19,6°C	21,19°C	Percebeu-se um aumento nos primeiros anos após calcular as estimativas com os valores reais, entretanto,	Não houve alterações significativas relacionadas à temperatura.
Pluviometria	Não foi previsto	1.376,2 mm (2009)	1.884 mm/ano (2009 a 2012)		Não foi previsto	1.413,6mm (2009)	1.884 mm/ano (2009 a 2012)		A pluviometria não interferiu nas previsões realizadas em ambos os projetos.

Parâmetros	BANDEIRANTES				SÃO JOÃO				Comparação dos resultados: Bandeirantes x São João
	Previsto		Real	Perdas	Previsto		Real	Perdas	
	ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			
							as quantidades totais, com os valores usados no momento da estimativa ficaram 1,14% maiores.		
Cobertura do aterro	Terra argilosa, com profundidade de 0,50 a 1,00.m		Terra arenosa, com 0,30m de profundidade	Perdas não foram estimadas pelos	Terra argilosa, com profundidade de 0,50 a 1,00.m		Silt, com 0,60m de profundidade de 0,30m	Perdas associadas não foram estimadas pelo Proponente do projeto	A cobertura do Aterro Bandeirantes esta inadequada ao compará-la ao previsto no Plano de Encerramento do Aterro e este fato, conforme observado na literatura. O Projeto São João, por sua vez, apresenta uma cobertura com silt, que é adequado, entretanto, a grama plantada é inadequada e o erro é o mesmo do apresentado no projeto bandeirantes. A profundidade de cobertura não foi
			Verificadas trincas e rachaduras no platô do aterro	Proponentes do projeto. Perdas financeiras pela não captação de gás para o Proponente do Projeto e ganho para o operador do aterro, que economizou com a					
			Instalação de manta na última camada de disposição de resíduos (platô)						

Parâmetros	BANDEIRANTES				SÃO JOÃO			Comparação dos resultados: Bandeirantes x São João	
	Previsto		Real	Perdas	Previsto		Real		Perdas
	ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			
				compra de solo arenoso de qualidade inferior.					respeitada no Bandeirantes, enquanto que o São João cumpriu com o estabelecido no Plano.
Grama plantada	Esmeralda		Batatais	Perdas não foram estimadas pelos Proponentes do projeto. Perdas financeiras pela não captação de gás para o Proponente do Projeto e ganho para o operador do aterro, que economizou com a compra de grama de qualidade inferior.	Esmeralda		Batatais	Perdas não foram estimadas pelos Proponentes do projeto. Perdas financeiras pela não captação de gás para o Proponente do Projeto e ganho para o operador do aterro, que economizou com a compra de grama de qualidade inferior.	Não foram verificadas trincas e rachaduras no Projeto São João, entretanto foram observadas diversas delas no Bandeirantes. Por conta das rachaduras, houve emissão fugitiva que não pode ser contabilizada.

Parâmetros	BANDEIRANTES				SÃO JOÃO				Comparação dos resultados: Bandeirantes x São João
	Previsto		Real	Perdas	Previsto		Real	Perdas	
	ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			ACM0001 - versão 02	ACM0001 - versão 13			
Método de Captação de gás do aterro	Adaptação de PDRs para captação de biogás por meio de tubulação de PEAD, com cabeçote e tubulação de envio do biogás a coletores e usina de captação.		Instalação e manutenção de poços conforme planejamento do Projeto	Não há como mensurar as perdas já ocorridas em função destas atividades.	Adaptação de PDRs para captação de biogás por meio de tubulação de PEAD, com cabeçote e tubulação de envio do biogás a coletores e usina de captação.		Instalação e manutenção de poços conforme planejamento do Projeto	Não há como mensurar as perdas já ocorridas em função destas atividades.	O método de captação de gás é semelhante nos dois projetos, assim como a instalação e manutenção de campo. Não foi possível mensurar as perdas ocorridas em função destas atividades.
Controle operacional	Controle da concentração de metano e O ₂ funcionando		Falhas frequentes com aumento na concentração de O ₂ .		Controle da concentração de metano e O ₂ funcionando		Falhas frequentes com aumento na concentração de O ₂ .		Foram verificadas nos dois projetos, pequenas falhas no processo, com alteração na concentração dos gases.
Mão de obra	Treinamento e Qualificação		Realização de treinamentos referentes às atividades das Usinas	Não há perdas, mas deve ser investido em treinamento.	Treinamento e Qualificação		Realização de treinamentos referentes às atividades das Usinas	Não há perdas, mas deve ser investido em treinamento.	Não foram observados, em ambos os projetos, perdas consideráveis em função das atividades relacionadas à mão de obra, entretanto, sugere-se investir em treinamento, tendo em vista a especificidade dos projetos em questão.

Cabe mencionar que para calcular as perdas relacionadas à quantidade de CER não gerado, foram utilizados os valores de comercialização vigentes na época do contrato firmado entre as Proponentes do Projeto e o Banco KfW. Para calcular os valores em Reais, foi utilizada a cotação do Euro do dia 28/02/2014, conforme informações no site do Banco Central.