

LUIZ GUSTAVO GALHARDO MENDES

**PROPOSTA DE UM SISTEMA PARA APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE UM ATERRO SANITÁRIO REGIONAL NA
CIDADE DE GUARATINGUETÁ**

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Mecânica na área de Transmissão e
Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

Guaratinguetá
2005

M538p	Mendes, Luiz Gustavo Galhardo Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá / Luiz Gustavo Galhardo Mendes.- Guaratinguetá : [s.n.], 2005 161f.: il. Bibliografia: f. 143-153 Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2005 Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho 1. Aterro sanitário. 2. Resíduos sólidos. 3. Biogás. 4.Energia I. Título CDU 628.472.3
-------	--

**PROPOSTA DE UM SISTEMA PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO
DE UM ATERRO SANITÁRIO REGIONAL NA CIDADE DE
GUARATINGUETÁ.**

LUIZ GUSTAVO GALHARDO MENDES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE

“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO

Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. JOÃO UBIRATAN DE LIMA E SILVA
UNESP-FEG/Secretaria de Planejamento e Coordenação

Eng. Dr. ANDRÉ LUIS DE PAULA MARQUES
SAAEG

Setembro de 2005

DADOS CURRICULARES

LUIZ GUSTAVO GALHARDO MENDES

NASCIMENTO	21.09.1977 – GUARATINGUETÁ / SP
FILIAÇÃO	João Bosco Gomes Mendes Alaísa Helena Galhardo
1997 / 2003	Curso de Graduação em Engenharia Industrial Química Faculdade de Engenharia Química de Lorena – Faenquil
2003	Estágio Escola de Especialistas de Aeronáutica - EEAER
2003 / 2005	Mestrado em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista - UNESP

DEDICATÓRIA

À minha família, minha namorada Vanessa, amigos e a todos aqueles que trabalham e lutam por um mundo melhor.

AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar o meu caminho e por me acompanhar em todas as horas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho pela confiança em meu trabalho e por me mostrar o “caminho das pedras”.

Ao amigo João Wagner Silva Alves (CETESB) que sempre recebeu com imensa alegria as minhas idas a São Paulo. Sou muito grato pelo seu apoio, incentivo, paciência, companheirismo e principalmente pelas idéias e valiosas informações que colaboraram de forma inestimável em todas as fases deste trabalho. Muito obrigado!

Aos conselheiros estaduais e membros da Comissão Especial de Recursos Hídricos e Saneamento do Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONSEMA). Agradeço especialmente à Dirce, Lady, Malu (Cepam), Flávio, Edília e Germano pelos ensinamentos transmitidos.

Ao sempre amigo Alan pela ajuda na impressão dos trabalhos.

Aos meus pais e irmãos pelo incentivo e apoio que me deram.

À minha namorada Vanessa pelo apoio, preocupação e incentivo que sempre me deu.

As secretárias da Pós-graduação e as funcionárias da biblioteca pelos esclarecimentos e serviços prestados.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

Apoio financeiro

Este trabalho contou com o apoio financeiro da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior através do Programa de Bolsas de Mestrado.

A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.
(Albert Einstein)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
RESUMO	
ABSTRACT	
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	3
1.4 SITUAÇÃO DA LIMPEZA URBANA NO BRASIL	6
1.4.1 ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA DE COLETA DE RESÍDUOS NO BRASIL	8
1.5 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	11
1.5.1 ATERRO SANITÁRIO	13
1.5.2 COMPOSTAGEM	15
1.5.3 INCINERAÇÃO	17
1.5.4 RECICLAGEM	19
1.6 O EFEITO ESTUFA E O PROTOCOLO DE KYOTO	19
CAPÍTULO 2 GERAÇÃO DE BIOGÁS	25
2.1 INTRODUÇÃO	25
2.2 HISTÓRIA DO BIOGÁS	26
2.2.1 FORMAÇÃO DO BIOGÁS DE ATERRO	27
2.2.2 FATORES QUE AFETAM A DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA	30
2.3 EMISSÕES DE BIOGÁS PELA DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS	32
2.3.1 QUANTIFICAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS	37
CAPÍTULO 3 DIAGNÓSTICO DA GESTÃO DE RSU NO VALE DO PARAÍBA	46
3.1 SITUAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DOS RSU NO BRASIL, SP E NO VALE DO PARAÍBA	46
3.1.1 BRASIL	46
3.1.2 ESTADO DE SÃO PAULO	50
3.1.3 VALE DO PARAÍBA	55
3.2 ESCOLHA DOS MUNICÍPIOS DESTE ESTUDO	60
3.2.1 GUARATINGUETÁ E MUNICÍPIOS VIZINHOS	60
3.2.2 COOPERAÇÃO INTERMUNICIPAL	66
CAPÍTULO 4 ASPECTOS CONSTRUTIVOS E ENERGÉTICOS DO ATERRO	69
4.1 TECNOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO	69

4.1.1	MEDIDAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL.....	74
4.2	ENERGIA DO BIOGÁS.....	80
4.2.1	TECNOLOGIAS PARA A RECUPERAÇÃO DO BIOGÁS.....	80
4.2.2	PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS.....	87
4.3	ALTERNATIVAS DE USO DO BIOGÁS.....	90
4.3.1	TURBINAS A GÁS.....	90
4.3.2	MICROTURBINAS.....	90
4.3.3	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	91
4.3.4	CALDEIRAS.....	92
4.3.5	TRATAMENTO DE CHORUME.....	93
4.3.6	OUTROS APROVEITAMENTOS.....	95
	CAPÍTULO 5 ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO ATERRO EM ESTUDO.....	96
5.1	TAMANHO DO ATERRO.....	96
5.2	PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO (L_0).....	98
5.3	CÁLCULO DO L_0	100
5.4	CONSTANTE DE DECAIMENTO (k).....	100
5.5	ESCOLHA DO MÉTODO E OBTENÇÃO DAS CURVAS DE GERAÇÃO DE METANO.....	101
5.6	EFICIÊNCIA DE COLETA E EMISSÕES FUGITIVAS.....	105
5.7	ESCOLHA DO GRUPO MOTO GERADOR.....	106
5.8	ESTIMATIVA DA POTÊNCIA ELÉTRICA.....	110
5.9	ETAPAS DO PROJETO.....	113
5.10	POTENCIAL DE GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO.....	116
	CAPÍTULO 6 ANÁLISE ECONÔMICA.....	118
6.1	CUSTOS DAS TECNOLOGIAS.....	118
6.2	ESTIMATIVA DE CUSTOS.....	120
6.3	RECURSOS FINANCEIROS.....	128
6.3.1	LINHAS DE FINANCIAMENTO INTERNACIONAL.....	128
6.3.2	MDL.....	129
6.3.3	BNDES.....	133
6.3.4	FNMA.....	134
6.3.5	MINISTÉRIO DAS CIDADES.....	135
6.3.6	PROINFA.....	136
6.3.7	PROCOP.....	138
	CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES.....	140
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
	APÊNDICE.....	154
	ANEXO.....	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Grandes regiões geográficas do Brasil e suas respectivas capitais.....	7
Figura 2:	Efeito estufa.....	20
Figura 3:	Fases de formação do biogás de aterro.....	28
Figura 4:	Projeção tendencial das emissões de metano pelos resíduos no Brasil.....	33
Figura 5:	Número mínimo de habitantes para exploração de um LDRS.....	35
Figura 6:	Principais LDRS do Brasil.....	36
Figura 7:	Emissão de metano gerado pelos resíduos.....	43
Figura 8:	Geração de metano.....	44
Figura 9:	Quantidade de resíduos urbanos gerados no Brasil.....	47
Figura 10:	Destinação final dos resíduos em peso.....	47
Figura 11:	Destinação final dos resíduos por número de municípios.....	48
Figura 12:	Tipo de destinação final por região.....	49
Figura 13:	Destino do lixo coletado para aterro sanitário em municípios com mais de 100.000 habitantes.....	50
Figura 14:	Evolução do IQR médio dos aterros no Estado de São Paulo – Período de 1997 a 2003.....	52
Figura 15:	Distribuição da quantidade de resíduos sólidos domiciliares dispostos quanto à qualidade dos aterros – 1997 a 2003.....	53
Figura 16:	Distribuição dos municípios do Estado de São Paulo quanto à qualidade dos aterros – 1997 a 2003.....	54
Figura 17:	Mapa do Vale do Paraíba e sua localização no Estado de São Paulo....	56
Figura 18:	Evolução do IQR médio dos aterros no Vale do Paraíba – Período de 1997 a 2003.....	57
Figura 19:	Faixa de enquadramento do IQR-2002.....	58
Figura 20:	Faixa de enquadramento do IQR-2003.....	58
Figura 21:	Distribuição dos municípios do Vale do Paraíba quanto à qualidade dos aterros – 1997 a 2003.....	59
Figura 22:	Município de Guaratinguetá.....	60
Figura 23:	Mapa de localização dos quatro municípios no Vale do Paraíba.....	61
Figura 24:	Evolução do IQR para os municípios do estudo – Período de 1997 a 2003.....	62
Figura 25:	Precipitação anual na cidade de Guaratinguetá.....	65
Figura 26:	Método de trincheira ou vala.....	72
Figura 27:	Método de rampa.....	72
Figura 28:	Método de área.....	73
Figura 29:	Detalhe de um dreno convencional de gás.....	78
Figura 30:	Instalação de poços drenantes verticais no aterro finalizado.....	81
Figura 31:	Instalação de poços drenantes verticais com o aterro em operação.....	82
Figura 32:	Instalação de poços drenantes verticais no início da operação do aterro.....	83
Figura 33:	Detalhe do poço drenante vertical.....	83
Figura 34:	Visão de perfil.....	84
Figura 35:	Corte transversal.....	84

Figura 36: Sistema de cogeração.....	92
Figura 37: Evaporação do chorume com aproveitamento energético do biogás.....	94
Figura 38: Distribuição da quantidade de RSD ao longo dos anos.....	97
Figura 39: Curvas de geração de metano.....	104
Figura 40: Estimativas de gerações de metano no aterro.....	105
Figura 41: Aplicação da eficiência de coleta à geração de metano.....	106
Figura 42: Moto geradores em contêineres.....	108
Figura 43: Estimativa de potência disponível no aterro.....	111
Figura 44: Potência elétrica útil.....	111
Figura 45: Simulação de grupos moto geradores.....	112
Figura 46: Etapas de aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica com motores de combustão interna.....	113
Figura 47: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa I).....	125
Figura 48: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa II).....	126
Figura 49: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa III).....	126
Figura 50: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa IV).....	127
Figura 51: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa V).....	127
Figura 52: Ciclo do Projeto.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Municípios com serviços de limpeza urbana e/ou coleta de resíduos e situação das entidades prestadoras de serviços, segundo as grandes regiões.....	8
Tabela 2:	Principais gases de efeito estufa (GEE).....	21
Tabela 3:	Total das emissões de dióxido de carbono das Partes do Anexo I em 1990 e compromisso de redução estabelecido no Protocolo de Kyoto..	23
Tabela 4:	Composição básica do biogás de aterro.....	30
Tabela 5:	Emissão de metano por resíduos sólidos no período de 1990 a 1994....	32
Tabela 6:	Emissão média de metano “ <i>per capita</i> ” gerado por resíduos no Brasil	33
Tabela 7:	Dados obtidos pela equação (1).....	35
Tabela 8:	Valores para o FCM.....	38
Tabela 9:	Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do lixo...	39
Tabela 10:	Valores sugeridos para k.....	41
Tabela 11:	Dados fictícios para a estimativa de geração de metano.....	44
Tabela 12:	Estimativa de geração de resíduos sólidos no Brasil.....	46
Tabela 13:	Tipo de destinação final do RSU em percentual (%).....	48
Tabela 14:	Enquadramento das instalações de destinação final de resíduos sólidos domiciliares em função dos índices de IQR e IQC.....	51
Tabela 15:	Índices de produção “ <i>per capita</i> ” de resíduos sólidos domiciliares em função da população urbana.....	52
Tabela 16:	Situação geral do Estado de São Paulo, quanto às quantidades de resíduos sólidos domiciliares gerados e a faixa de enquadramento do IQR.....	53
Tabela 17:	Situação geral do Estado de São Paulo quanto ao número de municípios e o seu enquadramento no IQR.....	54
Tabela 18:	Número de municípios do Estado de São Paulo com TAC em vigência e o respectivo percentual em relação ao total de municípios do Estado.....	55
Tabela 19:	Situação geral dos municípios do Vale do Paraíba quanto às quantidades de RSD gerados e a faixa de enquadramento do IQR no período de 2002 a 2003.....	58
Tabela 20:	Situação geral do Vale do Paraíba quanto ao número de municípios e o seu enquadramento no IQR.....	59
Tabela 21:	Dados relevantes ao estudo.....	62
Tabela 22:	Dados de temperatura, umidade, pressão e precipitação no período de 1976 a 1999.....	64
Tabela 23:	Exemplos de consórcios intermunicipais para aterro sanitário.....	68
Tabela 24:	Características dos drenos verticais.....	82
Tabela 25:	Técnicas de remoção de impurezas de biogás.....	89
Tabela 26:	Valores necessários ao cálculo do tamanho do aterro.....	96
Tabela 27:	Composição percentual em peso dos RSD em Guaratinguetá.....	98
Tabela 28:	Valores encontrados para o cálculo de L_0	100
Tabela 29:	Valores para R_x	103
Tabela 30:	Especificações técnicas do grupo gerador de energia elétrica.....	107

Tabela 31: Etapas do projeto e período de operação.....	114
Tabela 32: Quantidade equivalente de CO ₂ ao CH ₄ emitido pelo aterro.....	117
Tabela 33: Custos do sistema de recuperação de biogás em aterros sanitários.....	119
Tabela 34: Custos da Etapa I.....	120
Tabela 35: Custos da Etapa II.....	121
Tabela 36: Custos da Etapa III.....	122
Tabela 37: Custos da Etapa IV.....	122
Tabela 38: Custos da Etapa V.....	123
Tabela 39: Recursos obtidos com a venda de CERs.....	123
Apêndice A: Custo da eletricidade na Etapa I.....	155
Apêndice B: Custo da eletricidade na Etapa II.....	156
Apêndice C: Custo da eletricidade na Etapa III.....	157
Apêndice D: Custo da eletricidade na Etapa IV.....	158
Apêndice E: Custo da eletricidade na Etapa V.....	159
ANEXO I: Enquadramento dos municípios do Vale do Paraíba na disposição de RSD (1997 a 2003).....	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CDM – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (*Clean Development Mechanism*)
CEMPRE – Centro Empresarial de Compromisso à Reciclagem
CEPAM – Centro de Estudos e Pesquisas da Administração Municipal – SP
CERs – Certificados de Redução de Emissão (*Certified Emissions Reduction*)
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
COD – Carbono Orgânico Degradável
CODf – Fração de Carbono Orgânico Degradável
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONSEMA – Conselho Estadual de Meio Ambiente
COP – Convenção das Partes (*Convention of the Parties*)
CQNUMC - Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DF – Distrito Federal
DQO – Demanda Química de Oxigênio
EIA – Estudo de Impacto Ambiental
EPA – Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency*)
ETAET – Estação de Tratamento Anaeróbico de Efluentes
ETE – Estação de Tratamento de Efluentes
F – Fração de Metano no Biogás
FCM – Fator de Correção de Metano
FNMA - Fundo Nacional de Meio Ambiente
GEE – Gases de efeito estufa
GLP – Gás Liquefeito de Petróleo
GO – Estado de Goiás
GWP - Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Power*)
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH-M – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IQC - Índice de Qualidade de Usinas de Compostagem
IQR – Índice de Qualidade de Resíduos
IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*International Panel On Climate Change*)
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
k – Constante de Decaimento
L₀ – Potencial de Geração de Metano
LI – Licença de Implantação
LO – Licença de Operação
LDRS – Local de Disposição de Resíduos Sólidos
MCIDADES – Ministério das Cidades
MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MG – Estado de Minas Gerais
MMA – Ministério do Meio Ambiente

NBR – Norma Brasileira Registrada
NMVOCs – Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos (*Nom Methane Volatile Organic Compounds*)
OMM - Organização Meteorológica Mundial
ONG – Organização Não Governamental
O&M – Operação e Manutenção
PCHs – Pequenas Centrais Hidroelétricas
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PIB – Produto Interno Bruto
PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RSDV – Resíduos Sólidos Domiciliares e de Varrição
PR – Estado do Paraná
PROCOP - Programa de Controle de Poluição
PROINFA – Programa de Incentivo à Fonte Alternativa de Energia Elétrica
RIMA - Relatório de Impacto ao Meio Ambiente
RJ – Estado do Rio de Janeiro
RMSP - Região Metropolitana de São Paulo
RN – Estado do Rio Grande do Norte
RS – Estado do Rio Grande do Sul
R\$ - Reais
RSD - Resíduos Sólidos Domiciliares
RSDf – Fração de Resíduo Sólido Domiciliar
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
SC – Estado de Santa Catarina
SMA – Secretaria de Meio Ambiente
SP – Estado de São Paulo
TAC – Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta
TJLP – Taxa de Juros de Longo Prazo
UNFCCC - Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change*)
USEPA – Agência Americana de Proteção Ambiental (*United States Environment Protection Agency*)
US\$ - Dólar Americano
VOCs - Compostos Orgânicos Voláteis (*Volatile Organic Compounds*)

Substâncias Químicas

C - Carbono	H ₂ S - Ácido sulfídrico
CH ₄ - Metano	N - Nitrogênio
CH ₃ COOH - Ácido Acético	NH ₃ - Amônia
CO - Monóxido de carbono	N ₂ O ₅ - Pentóxido de Dinitrogênio
CO ₂ - Dióxido de Carbono	O - Oxigênio
H - Hidrogênio	S - Enxofre
H ₂ O - Água	SO ₂ - Dióxido de enxofre

MENDES, L. G. G. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá.** 2005. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2005.

RESUMO

A intensificação das atividades humanas nas cidades tem gerado um acelerado aumento na produção de resíduos sólidos, os quais se constituem em grande problema para as administrações públicas.

Após dispostos nos aterros sanitários, os resíduos sólidos urbanos, que contêm significativa parcela de matéria orgânica biodegradável, passam por um processo de digestão anaeróbia provocado pela ação de microorganismos que transformam a matéria orgânica em um gás conhecido como biogás. Os principais constituintes da composição do biogás são o metano e o dióxido de carbono. Estudos existentes indicam que, considerando um período de 100 anos, 1 grama de metano contribui 21 vezes mais para o potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warning Power*) do que 1 grama de dióxido de carbono. A queima do biogás transforma o metano em dióxido de carbono e vapor d'água, reduzindo o GWP e possibilitando a participação no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) previsto no Protocolo de Kyoto, ao qual é permitida a venda de certificados de redução de emissão por países em desenvolvimento.

O presente trabalho propõe a cooperação intermunicipal entre quatro municípios localizados no Vale do Paraíba para a construção de um aterro sanitário com recuperação de biogás visando a geração de eletricidade. Para isso, utilizaram-se de equações existentes na literatura com o objetivo de mensurar a quantidade de biogás emitida pelo aterro sanitário, possibilitando avaliar o potencial de geração de energia elétrica e o potencial de geração de créditos de carbono.

Ao final é feita uma análise econômica do projeto possibilitando comparar o custo da geração de eletricidade com o valor cobrado pela concessionária local.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro sanitário, resíduos sólidos, biogás, energia.

MENDES, L.G.G. **Proposition of a system for energetic utilization of a regional sanitary landfill in Guaratinguetá city.** 2005. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2005.

ABSTRACT

The human activities intensification in the cities has been generating an accelerated increase in the solid residues production, which constitute a big problem for the public administrations.

After arranged in the sanitary landfill, the urban solid residues, that contains biodegradable organic matter significant bit, they pass through an anaerobic digestion process provoked by the microorganisms action that transform the organic matter in a gas well-known as biogas. Biogas main composition constituent are the methane and the carbon dioxide. Existing studies indicate that, considering a period of 100 years, 1 methane gram contributes 21 times more for Global Warning Power (GWP) than 1 carbon dioxide gram. Biogas burning transforms the methane in carbon dioxide and water vapor, reducing the GWP and enabling the participation in the Clean Development Mechanism foreseen in the Kyoto Protocol, to which is allowed the certificates emissions reductions sales for countries in development.

The hereby work proposes the inter-municipal cooperation among four municipal districts located in “Vale do Paraíba” for the construction of a sanitary landfill with biogas recovery aiming at electricity generation. For that, existing equations in the literature was made use of with the goal of measuring biogas quantity emitted by the sanitary landfill, enabling to evaluate the electric power generation potential and for the carbon potential credits generation.

At the end a project economic analysis is made enabling to compare the electricity generation cost with the value charged by the local concessionary.

KEYWORDS: Sanitary landfill, solid residues, biogas, energy.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O presente trabalho é fruto de uma revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados e de diversas reuniões realizadas na CETESB, visitas técnicas e participações em reuniões da Comissão Especial de Recursos Hídricos e Saneamento do CONSEMA (Conselho Estadual de Meio Ambiente).

A existência de projetos destinados à recuperação de biogás em aterros sanitários nas diversas cidades do mundo e os vários benefícios sociais e ambientais obtidos pela aplicação destes, podem ser considerados como uma motivação para a realização deste trabalho.

A inadequação da disposição de resíduos sólidos em alguns municípios do Vale do Paraíba não difere da situação de muitos outros existentes no país, este problema associado à emissão de metano pelo aterro (um dos gases que causam o efeito estufa) também pode ser apontado como um fator motivante à elaboração do trabalho, que busca apresentar propostas para a mudança deste quadro, como por exemplo, a utilização de ações conjuntas entre municípios para a gestão dos resíduos sólidos, a recuperação do biogás gerado no aterro visando à geração de energia elétrica e a participação da região no Protocolo de Kyoto, colocando o Vale do Paraíba em consonância com o que está sendo realizado no mundo.

O trabalho é dividido em sete partes, as quais correspondem aos sete capítulos desta dissertação. Estes capítulos serão resumidamente apresentados abaixo.

No capítulo 1, intitulado “Introdução”, descreve-se o objetivo do trabalho. Neste capítulo apresenta-se a definição de resíduos sólidos e como estes podem ser classificados, descrevendo-se a situação da limpeza urbana e do sistema de coleta existente no Brasil. Ainda no capítulo 1, são apresentados alguns tipos de tratamento e disposição de resíduos sólidos, relatando-se também o problema do aquecimento global e o surgimento do Protocolo de Kyoto.

O capítulo 2 apresenta a composição e os fatores determinantes para a geração do biogás. Destaca-se neste capítulo a apresentação das equações utilizadas para mensurar a quantidade de biogás emitida pela degradação anaeróbia de resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários.

No capítulo 3 é abordada, em âmbito nacional, estadual e regional, a situação da disposição dos resíduos sólidos urbanos. São apresentados os dados e os motivos que levaram à escolha dos municípios que são alvo deste estudo. Ainda neste capítulo, é proposta a cooperação intermunicipal para a construção de um aterro sanitário com aproveitamento energético.

Os aspectos construtivos e ambientais de um aterro sanitário, as tecnologias existentes para a recuperação e purificação do biogás e os diversos aproveitamentos dados a este são abordados no capítulo 4.

Baseado em equações, parâmetros e aspectos existentes para a estimativa de geração de biogás são apresentados no capítulo 5 os resultados obtidos para o projeto.

A estimativa da potência elétrica existente e o potencial de geração de créditos de carbono também fazem parte do corpo deste capítulo.

No capítulo 6 é apresentada a análise econômica do projeto. Nesta análise são apresentados os custos dos equipamentos necessários à recuperação do biogás para cada etapa do projeto.

Objetivando o enriquecimento deste capítulo, são apontados possíveis recursos financeiros provenientes de órgãos nacionais e internacionais.

Por fim, o capítulo 7 conclui o trabalho enfatizando a importância dos projetos de recuperação e aproveitamento de biogás tanto para o meio ambiente como para a sociedade.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo propor a construção de um aterro sanitário regional com recuperação energética de biogás. Para isso, foram estudados alguns aspectos relativos aos resíduos sólidos urbanos e ao biogás, apresentando-se as equações existentes à quantificação deste e os equipamentos necessários à recuperação

do mesmo, apresentando-se ainda, uma análise do potencial energético do aterro, da geração de créditos de carbono e de custos dos equipamentos.

1.3 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Como resíduos sólidos urbanos ou, simplesmente lixo, entende-se todo e qualquer material sólido proveniente das atividades diárias do homem em sociedade, cujo produtor ou proprietário não o considere com valor suficiente para conservá-lo (CETESB, 1997a).

A definição de lixo segundo o IPT/CEMPRE (2000) é a seguinte: restos de atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. Normalmente, apresentando-se no estado sólido, semi-sólido ou semi-líquido, ou seja, com conteúdo líquido insuficiente para que este líquido possa fluir livremente.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1987), na Norma Brasileira Registrada - NBR 10.004, os resíduos sólidos são definidos como “aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Para TEIXEIRA et al. (1991), a definição da ABNT é muito ampla e equivocada-se ao incluir líquidos como resíduos sólidos. A norma poderia incluir os líquidos juntamente com os resíduos sólidos para efeito de tratamento, mas não simplesmente denominá-los de resíduos sólidos.

Na norma NBR 10.004 da ABNT, os resíduos sólidos no Brasil são classificados de acordo com sua periculosidade conforme a definição a seguir:

“A periculosidade de um resíduo é definida como a característica apresentada por um resíduo, que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar:

- risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças, e/ou;
- riscos ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada”.

A norma NBR 10.004 estabelece três classes de periculosidade para os resíduos sólidos a saber: resíduos perigosos – classe I, resíduos não inertes – classe II e resíduos inertes – classe III. A seguir, são apresentadas as suas definições.

- Classe I : apresentam risco à saúde pública ou ao meio ambiente, caracterizando-se por possuir uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Classe II : podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, porém, não se enquadram como resíduos classes I ou III;
- Classe III : não têm constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas.

Os resíduos sólidos, considerando-se o critério de origem, podem ser classificados em (CETESB, 1997b):

- domiciliares: são os resíduos sólidos produzidos em residências, em estabelecimentos comerciais, industriais, prestadores de serviços públicos e similares, cujo volume é compatível ao dos recipientes padronizados adotados para apresentação à coleta regular e à legislação municipal no que se refere à produção máxima diária de materiais que, pelas suas características físico-químicas, exigem tratamento diferenciado;
- industriais: são aqueles gerados pela atividade industrial e que não cabem na definição de lixo domiciliar;

- urbanos: todo e qualquer resíduo gerado dentro dos limites de um conglomerado urbano. De acordo com sua origem específica, volume, periculosidade ou estado físico, é classificado por definição própria;
- especiais: aqueles não removidos pela coleta regular, em virtude de suas características próprias, origem e quantidade, enquadrando-se em legislação específica;
- de serviços de saúde: aqueles gerados pela atividade de hospitais, instituições de saúde, farmácias, laboratórios, clínicas e similares;
- perigosos: aqueles que requerem cuidados especiais quanto à coleta, ao transporte, ao tratamento e à destinação final, pois apresentam substancial periculosidade à saúde humana ou aos organismos vivos ou ao meio ambiente e se caracterizam pela letalidade e/ou pelos efeitos cumulativos adversos.

Os resíduos sólidos, pela sua constituição predominante, podem ser classificados assim (CETESB, 1997a):

- residenciais: constituídos de restos de preparo de refeições, de alimentos, de lavagens, de invólucros diversos, de vasilhames, de papéis, de papelão, de plásticos, de vidro, de varredura, de folhagens, de ciscos e outros;
- comerciais: constituídos de papel, de papelão, de plástico, de caixas, de restos de lavagens, e outros;
- industriais: constituídos de sobras de refeitórios, de papel e de restos de limpeza de escritórios que normalmente são removidos pela própria indústria ou por seus empreiteiros;
- de serviços de saúde: constituídos de restos de alimentação e de seu preparo, de sobras de refeições, de restos de salas de operação, de medicamentos, de papéis, de invólucros, de varredura, de flores, de restos de laboratório, de biotério e de jardins, etc.;
- especiais: constituídos de resíduos produzidos esporadicamente, como; folhagens, restos de poda, animais mortos, entulhos, mobiliário, carros abandonados e outros não coletados pela coleta regular;

- feiras, mercados, varrição, áreas públicas e outros: constituídos de papéis, de pontas de cigarros, de invólucros descartados, de restos de capinação ou de roçagem, de folhas, de areia, de cisco, de restos de limpeza de bocas-de-lobo, de ramais, de galerias e outros esporádicos.

Para a legislação brasileira, o lixo doméstico é de propriedade da prefeitura, cumprindo-lhe a missão de assegurar sua coleta e destinação final (CALDERONI, 1998) . O lixo industrial é de responsabilidade do gerador, devido à sua diversidade e potencial risco à saúde pública.

A fim de padronizar a classificação dos resíduos sólidos, a ABNT dispõe do seguinte conjunto de normas:

- NBR - 10.004 - Resíduos Sólidos - Classificação
- NBR - 10.005 - Lixiviação de Resíduos
- NBR - 10.006 - Solubilização de Resíduos
- NBR - 10.007 - Amostragem de Resíduos

1.4 SITUAÇÃO DA LIMPEZA URBANA NO BRASIL

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento SNIS (2003), a limpeza urbana, como serviço público de interesse local, é definida, na Constituição Federal (inciso V do Art.30), como uma responsabilidade dos municípios. Assim sendo, ainda que a execução desses tipos de serviços possa ser repassada a terceiros, através de contratos de prestação de serviços ("terceirização") ou de concessão / "sub concessão", a responsabilidade por sua gestão permanece com os municípios.

Apresenta-se, a seguir, por Grandes Regiões no Brasil, um panorama da limpeza urbana. As cinco grandes regiões geográficas são: NORTE, CENTRO OESTE, NORDESTE, SUDESTE e SUL, as quais estão mostradas na figura 1. Para cada região são apresentadas as áreas ocupadas, os estados componentes das mesmas, os números e os percentuais em relação ao número total de municípios da região que são atendidos por serviços de limpeza urbana.



Figura 1: Grandes regiões geográficas do Brasil e suas respectivas capitais
 Fonte: JUCÁ et al. (2001).

A Região Norte é constituída por sete estados: Amazonas, Pará, Acre, Rondônia, Tocantins, Amapá e Roraima. Os estados desta região ocupam uma área de 3.851.560 km², correspondendo a 45,25% do território nacional, com uma população de 12.900.704 habitantes (IBGE, 2000a), que perfazem 7,6% da população brasileira. A taxa anual de crescimento demográfico é de 2,20% e a taxa de urbanização é de 69,87%.

A Região Nordeste é formada por nove estados: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Possui uma área de 1.556.001 km², ou 18,28% do território nacional, com uma população de 47.741.711 habitantes (IBGE, 2000a), ou 28,10% do total do país. A taxa anual de crescimento demográfico é de 1,08% e a taxa de urbanização de 69,07%.

A Região Centro Oeste é constituída por quatro estados: Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e o Distrito Federal. Ocupa uma área de 1.604.852 km², ou 18,86% do território nacional, onde habitam 11.636.728 habitantes (IBGE, 2000a), que representam 6,80% da população brasileira. A taxa anual de crescimento demográfico é de 1,87 % e a taxa de urbanização de 86,73%.

A Região Sudeste é constituída por quatro estados: São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Espírito Santo. Ocupa uma área de 924.266 km², que corresponde a 10,85% do território brasileiro, com uma população de 72.412.411 habitantes (IBGE, 2000a), que representa 42,60% do total nacional com uma taxa anual de crescimento demográfico de 1,31% e uma taxa de urbanização de 80,30%.

A Região Sul é formada por três estados: Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, ocupando uma área de 575.316 km² ou 6,76% do território brasileiro. Sua população é de 25.107.616 habitantes (IBGE, 2000a), que correspondem a 14,8% do total nacional. A taxa de crescimento demográfico é de 1,16% ao ano e a taxa de urbanização de 80,93%.

A tabela 1 mostra para as diversas regiões do Brasil o total de seus municípios, os percentuais de municípios atendidos pelos serviços de limpeza urbana e a situação das entidades que prestam tais serviços.

Tabela 1: Municípios com serviços de limpeza urbana e/ou coleta de resíduos e situação das entidades prestadoras de serviços, segundo as grandes regiões

GRANDES REGIÕES	TOTAL DE MUNICÍPIOS	MUNICÍPIOS COM SERVIÇOS DE LIMPEZA URBANA E/OU COLETA DE RESÍDUOS				
		MUNICÍPIOS COM SERVIÇOS	[%]	SITUAÇÃO DAS ENTIDADES PRESTADORAS DOS SERVIÇOS		
				PREFEITURA	TERCEIROS	PREFEITURA E TERCEIROS
BRASIL	5.507	5.475	99,4	4.822	73	580
NORTE	449	445	99,1	409	2	34
NORDESTE	1.787	1.769	99,0	1.632	28	109
SUDESTE	1.666	1.666	100,0	1.482	36	148
SUL	1.159	1.149	99,1	881	4	264
CENTRO-OESTE	446	446	100,0	418	3	25

Fonte: IBGE (2000a).

1.4.1 Organização do Sistema de Coleta de Resíduos no Brasil

As autoridades responsáveis pelos serviços de limpeza urbana nos municípios brasileiros não têm logrado alcançar um nível satisfatório de qualidade, devido principalmente, à carência de planejamento. Esta falta de planejamento, aliada a

equipes pouco qualificadas, a falta crônica de recursos, legislações desatualizadas ou incompletas, instituições deficitárias e aplicação de tecnologias inapropriadas, levam à realização de serviços ineficientes ou à sua ausência.

Descrevem-se a seguir os principais serviços que são realizados nas operações de limpeza urbana.

1.4.1.1 Coleta

É a principal atividade da limpeza urbana, correspondente à remoção dos resíduos sólidos produzidos na área urbana dos municípios. A coleta e o transporte de resíduos, para a área de tratamento ou para disposição final, são ações de grande repercussão junto à população. O objetivo mais importante da coleta é impedir que insetos (moscas e mosquitos) e roedores (ratos e camundongos), que são vetores transmissores de doenças, encontrem alimento e abrigo nos resíduos (PROEMA, 2004).

Distinguem-se, segundo as suas origens, vários tipos de coleta, a saber:

- Coleta regular: consiste na coleta de resíduos em residências, estabelecimentos comerciais e indústrias. Este tipo de coleta é limitado ao volume por unidade previsto pela legislação municipal, em geral 100 litros por dia, por residência.
- Coleta especial: denomina-se especial a coleta em feiras-livres, em praias, comércio e indústrias, resíduos de residências com volume superior ao normal e de animais mortos entre outros.
- Coleta privada: trata-se da coleta de resíduos de serviços de saúde em hospitais e clínicas veterinárias, de resíduos industriais e entulhos de construções, as quais são realizadas por empresas privadas contratadas pelos geradores destes resíduos.

1.4.1.2 Varrição de logradouros públicos

Esta é a segunda atividade da limpeza urbana em importância para a população (PROEMA, 2004). A varrição remove os resíduos e demais detritos que são lançados

nas vias públicas. Graças à varrição são mantidos limpos os logradouros municipais, são prevenidos os assoreamentos de rios e córregos e as enchentes.

Segundo PROEMA (2004), as tecnologias usadas na limpeza dos logradouros identificam os seguintes tipos de varrição:

- Varrição manual: esta operação é efetuada manualmente com pás e vassouras por operários contratados.
- Varrição mecânica: geralmente é realizada em avenidas mais longas das grandes cidades com máquinas varredeiras motorizadas.
- Lavagem: esta operação de limpeza é realizada em avenidas importantes das grandes cidades e nas ruas onde são realizadas as feiras livres.

1.4.1.3 Transporte

É uma atividade distinta, porém, complementar à coleta que remove os resíduos de seu ponto de geração até os sistemas de tratamento ou até a disposição final no aterro sanitário (PROEMA, 2004).

São identificadas as diferentes formas de transporte segundo o equipamento utilizado, e assim tem-se:

- Rodoviário direto: realizado por via rodoviária pelos próprios veículos que executam a coleta dos resíduos sólidos domiciliares e de varrição - RSDV.
- Rodoviário com transbordo: quando as distâncias de remoção até os pontos de destinação final são longas, em geral superiores a 20 km, os resíduos são transferidos para carretas que, por vez, levam os resíduos até a sua destinação final. No município de São Paulo operam estações de transbordo.

Para cada tipo de transporte os resíduos podem, ainda, estar acondicionados a granel, compactados, triturados ou enfardados.

1.4.1.4 Serviços complementares

São os serviços que compõem as demais atividades da limpeza urbana:

- Limpeza das bocas de lobo, galerias e valas: são as operações de desobstrução das bocas de lobo, galerias e valas componentes do sistema de captação de águas pluviais.
- Limpeza do mobiliário urbano: consiste na limpeza de monumentos, túneis, escadarias, abrigos e outros; e na capina manual ou mecanizada e na limpeza de terrenos baldios, raspagem de sarjetas e de materiais provenientes de alagamento.
- Desinfestações e desinfecções: visando eliminar principalmente os roedores é procedida a aplicação controlada de raticidas.

1.5 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A intensificação das atividades humanas nas cidades tem gerado um acelerado aumento na produção de resíduos sólidos, os quais se constituem em grande problema para as administrações públicas.

O crescimento demográfico, a mudança ou a criação de novos hábitos, a melhoria do nível de vida, o desenvolvimento industrial e uma série de outros fatores são responsáveis por alterações nas características dos resíduos, contribuindo para agravar o problema de sua destinação final. O gerenciamento inadequado de tais resíduos pode resultar em riscos indesejáveis às comunidades, constituindo-se, ao mesmo tempo, em problema de saúde pública e fator de degradação do meio ambiente, além, é claro, dos aspectos sociais, estéticos, econômicos e administrativos envolvidos.

O equacionamento e a solução dos problemas relacionados aos resíduos urbanos, em todas as etapas do processo, desde a geração até a disposição final, estão intrinsecamente ligados à população envolvida, ao seu estágio de desenvolvimento, aos hábitos, às condições econômicas e, naturalmente, à disponibilidade de locais e tecnologias adequadas para tratamento e disposição final.

A preocupação com o volume dos resíduos gerados, bem como com as possibilidades de aproveitamento dos materiais potencialmente recicláveis, ainda é incipiente, sendo raras as iniciativas dos poderes públicos voltadas à conscientização e à mobilização da comunidade.

O tratamento e a destinação final dos resíduos ainda se resumem na adoção de soluções imediatistas, quase sempre fundamentadas no simples descarte, predominando os depósitos a céu aberto que contribuem para a deterioração ambiental.

A CETESB (1997b) propõe uma estruturação das ações necessárias ao manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos, numa hierarquia de objetivos centrada em quatro principais áreas de programas :

- Minimização da geração de resíduos;
- Maximização da reutilização e reciclagem ambientalmente adequadas;
- Adoção de formas de destinação final ambientalmente adequadas; e
- Expansão dos serviços que se ocupam dos resíduos a toda população.

Todo cidadão deve aprender a reduzir a quantidade de resíduo que gera, quando possível. Deve-se entender que a redução não implica em diminuição do padrão de vida. É, simplesmente, uma questão de reordenar os materiais usados no dia-a-dia.

O desperdício resulta em ônus para o poder público e para o contribuinte. A sua redução significa diminuição nos custos de produção e aquisição, além de fator decisivo na preservação dos recursos naturais.

O BNDES (1998) complementa que a utilização de formas de redução de resíduos não elimina a necessidade de aterro para a disposição dos rejeitos. No entanto, prolonga a vida útil do aterro e minimiza seus custos e impactos ambientais.

Segundo TAU-K-TORNISIELO et al. (1995), a coleta seletiva deve integrar qualquer sistema de manejo, tratamento e destinação final de resíduo sólido urbano. Sua implantação deve ser precedida por estudos para se obter o apoio e a colaboração da população. O objetivo é a economia de energia, matéria prima e o estabelecimento de um programa de educação e reeducação ambiental.

Conforme o CENTRO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO (2003), a separação dos resíduos sólidos é fundamental, pois quando misturados, alguns materiais perdem a oportunidade de serem reciclados. A separação, no momento em que se produz o resíduo, facilita o trabalho de triagem e o reaproveitamento.

Para PEREIRA NETO (1999), a reciclagem garante muitos ganhos. Por exemplo, tem-se a geração de empregos diretos, a possibilidade de união e organização da força

trabalhista mais desprestigiada e marginalizada, em cooperativas de reciclagem, nas centrais ou usinas, e a oportunidade de incentivar a mobilização comunitária para o exercício da cidadania, em busca da solução de seus próprios problemas.

Segundo IPT / CEMPRE (2000), para a definição do procedimento mais adequado à disposição de resíduo sólido, deve-se partir de um diagnóstico da situação atual do município, considerando-se aspectos como tipo, origem e quantidade de resíduo produzido, tratamentos existentes e características dos locais onde estes serão dispostos.

Para TAUKE-TORNISIELO et al. (1995), dentre os métodos mais comuns de tratamento de resíduo sólido, considerados adequados sob o ponto de vista sanitário e ecológico, pode-se citar:

- aterro sanitário;
- compostagem; e,
- incineração.

Fica claro que os problemas relacionados aos resíduos sólidos não se resumem apenas na abordagem do descarte final do lixo. Num enfoque mais amplo, envolvem questões relacionadas à otimização do uso dos recursos naturais, à seleção de processos industriais de produção de materiais menos agressivos ao meio ambiente, à racionalização dos procedimentos de manejo dos resíduos, à possibilidade de aproveitamento de materiais recicláveis e, também, o envolvimento da comunidade no equacionamento dos problemas.

1.5.1 Aterro Sanitário

O aterramento sanitário é um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, que permitem a proteção do meio ambiente e da saúde pública (CETESB, 1997a).

Os resíduos sólidos, quando dispostos em aterros sanitários, são compactados e cobertos com terra na forma de células diárias, dispostas lado a lado, formando camadas de resíduos sobre o solo.

Segundo LIMA (1991), a prática de aterrar resíduo sólido como forma de destino final não é privilégio da civilização moderna, pois, também, os antigos já faziam uso dela. Os Nabateus na Mesopotâmia, 2.500 anos antes de Cristo, enterravam seus resíduos domiciliar e agrícola em trincheiras escavadas no solo. Passado algum tempo, as trincheiras eram abertas e a matéria orgânica, já decomposta, era removida e utilizada como fertilizante orgânico na produção de cereais.

Para GROSSI e VALENTE (2001), há quem chame de aterro sanitário aos aterros controlados e aos lixões. Deve-se ressaltar a diferença, pois o aterro sanitário é baseado em normas técnicas de engenharia, enquanto os outros dois são apenas o lançamento de resíduo sólido descomprometido com as questões ambientais e sanitárias. Mesmo os aterros controlados, onde o resíduo é recoberto periodicamente, comprometem, e muito, o ambiente.

Segundo IPT / CEMPRE (2000), aterro sanitário é um processo utilizado para a disposição de resíduo sólido no solo, particularmente resíduo domiciliar, que, fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública.

De acordo com LIMA (1991), o aprimoramento contínuo da prática de aterrar resíduo sólido fez surgir o que hoje se conhece por aterro sanitário, que é uma das práticas mais utilizadas no presente, em virtude de sua relativa simplicidade de execução, tendo como fator limitante a disponibilidade de áreas próximas aos centros urbanos.

Segundo IPT / CEMPRE (2000), os aterros podem ser classificados em :

- Lixões: forma inadequada de deposição final de resíduos sólidos, que se caracterizam pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.
- Aterros controlados: técnica de disposição de resíduos sólidos que utiliza alguns princípios de engenharia para confinar os resíduos, cobrindo-os com uma camada

de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho. Geralmente não dispõe de impermeabilização de base, nem de sistemas de tratamento de percolado ou do biogás gerado.

- Aterros sanitários: técnica de disposição de resíduos no solo baseada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança da população, minimizando os impactos ambientais.

1.5.2 Compostagem

A compostagem é um método de tratamento de resíduos sólidos no qual a matéria orgânica presente, em condições adequadas de temperatura, umidade e aeração, é transformada num produto estável, denominado composto orgânico, que tem propriedades condicionadoras de solo, sendo, portanto, de grande aplicabilidade na agricultura (CETESB, 1997a).

Para um melhor tratamento dos resíduos, os diversos materiais que os compõem são separados, obtendo-se, no final do processo, composto orgânico, materiais recicláveis e rejeitos. Assim, este é um método que possibilita sensível redução da quantidade de resíduos a serem destinados no solo, além da devolução à natureza de parte dos materiais dela retirados, fato que se constitui em grande vantagem ambiental.

Segundo LIMA (1991), o processo de compostagem foi muito utilizado na antiguidade, principalmente pelos orientais que faziam uso intensivo de compostos orgânicos na produção de cereais. As técnicas empregadas eram artesanais e fundamentavam-se na formação de leiras ou montes de resíduos que ocasionalmente eram revolvidos. Após cessar o processo de fermentação, o composto resultante era incorporado ao solo, favorecendo o crescimento de vegetais.

Para IPT / CEMPRE (2000), compostagem é um processo biológico de decomposição da matéria orgânica contida nos restos de origem animal ou vegetal. Este processo tem como resultado final um produto (o composto orgânico) que pode ser aplicado ao solo para melhorar suas características, sem ocasionar riscos ao ambiente.

Para MANSUR (1993), basicamente, existem dois tipos de compostagem: um que se dá com a presença do oxigênio (via aeróbia) e outro que ocorre sem oxigênio (via anaeróbia). A recuperação energética será em função do tipo de compostagem praticada: aeróbia ou anaeróbia.

Na compostagem aeróbia, indiscutivelmente a mais praticada, a recuperação energética dá-se, como na reciclagem, em termos da recuperação da energia contida nos resíduos e passada para o composto, o qual será utilizado como condicionador de solos.

Na compostagem anaeróbia, quase não usada, a recuperação energética será a mesma dos reatores anaeróbios e do aterro sanitário: através do aproveitamento do biogás (TEIXEIRA, 2000).

Conforme MANSUR (1993), as substâncias resultantes da decomposição por via aeróbia são: gás carbônico (CO_2); água (H_2O); e, produtos finais oxidados (nitratos, sulfatos, etc.), havendo uma grande liberação de energia sob a forma de calor durante o processo.

Na compostagem anaeróbia, além de gás carbônico e água, são produzidos metano (CH_4), amônia (NH_3) e produtos finais parcialmente reduzidos (aldeídos, álcoois, etc.), ocorrendo uma liberação de energia, durante a decomposição, em intensidade menor que na compostagem aeróbia (MANSUR, 1993). Por ser mais rápido e não exalar odores desagradáveis ou líquidos agressivos, o processo aeróbio de compostagem tem sido preferido. A compostagem de baixo custo, para PEREIRA NETO (1996), envolve processos simplificados e é feita em pátios onde o material a ser compostado é disposto em montes de forma cônica denominados pilhas de compostagem, ou em montes de forma prismática denominados leiras de compostagem.

Segundo PEREIRA NETO (1996), a compostagem de resíduos orgânicos em um país com as características do Brasil reveste-se de grande importância e necessidade. Trata-se de uma medida que atende a vários objetivos: sanitários (na eliminação de doenças, de vetores, etc.), ambientais (pelo controle da poluição), econômicos (por gerar divisas para a economia da região), sociais (absorção de mão-de-obra, participação comunitária, eliminação de catadores, etc.) e agrícolas (desenvolvimento

de práticas agrícolas de baixo custo). As características tropicais do país, associadas à grande produção diária de resíduos orgânicos nas comunidades brasileiras, fazem da compostagem um dos processos com grande viabilidade de uso e flexibilidade em escala operacional.

1.5.3 Incineração

Segundo ABNT (1989), incineração de resíduo sólido é o processo de oxidação a alta temperatura que destrói, reduzindo o volume, ou recuperando materiais ou substâncias presentes.

Segundo LIMA (1991), a incineração é o processo de redução de peso e volume do resíduo sólido através de combustão controlada em temperaturas elevadas (871 °C a 1204 °C). Os remanescentes são geralmente gases (CO_2 , SO_2 , N_2 , gases inertes provenientes do ar e do próprio resíduo e oxigênio do ar em excesso), água, cinzas e escórias que se constituem por metais ferrosos e inertes, como vidros e pedras. Cita ainda que, havendo combustão incompleta, podem aparecer monóxido de carbono (CO) e particulados que consistem de carbono finamente dividido, lançado à atmosfera como fuligem ou negro de fumo. Se a combustão é realizada em altas temperaturas pode haver dissociação do nitrogênio, surgindo ainda compostos resultantes da combinação deste com o oxigênio, como o NO e N_2O_5 .

Os incineradores de resíduo domiciliar, que são unidades totalmente fechadas e controladas, podem ser localizados próximos aos sistemas de coleta, evitando o transporte desnecessário dos resíduos à grande distância. São, também, unidades mais compactas (menor requisito de área) em relação aos processos de compostagem e, principalmente, de aterramento sanitário (CETESB, 1997a).

Para SCHNEIDER et al. (2001), os incineradores de resíduo de serviços de saúde têm sido apontados entre os sistemas de combustão como um dos maiores geradores de dioxinas e furanos, havendo, desta forma, a necessidade urgente de se exigir, avaliar e controlar os sistemas de tratamento das emissões gasosas nestas instalações.

Por se tratarem de unidades complexas, com alto grau de automatização e número elevado de dispositivos de controle de processo, que exigem especialização da

mão-de-obra, os incineradores requerem valores altos de investimento e custos de operação mais elevados em relação a outros processos. No entanto, os resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) resultantes dessa forma de tratamento, que são descartados no ambiente, têm volumes bastante reduzidos, além de haver a possibilidade de aproveitamento da energia, liberada na queima, para geração de vapor e eletricidade.

Existem vários sistemas de incineração, podendo ser divididos em dois tipos (CETESB, 1997a):

Incineradores Estáticos ou de Batelada

- Caracterizam-se por seu funcionamento intermitente e são de fácil operação e tecnologia simples.

Incineradores Dinâmicos ou Contínuos

- Caracterizam-se por seu funcionamento contínuo e em geral são mais complexos e sua operação requer maiores atenções.

Os estágios do processo da incineração são os seguintes (CETESB, 1997a):

- Alimentação do forno;
- Secagem dos resíduos;
- Combustão dos resíduos;
- Resfriamento e tratamento dos gases e outros produtos da combustão;
- Filtragem e tratamento dos gases;
- Emissão dos gases;
- Emissão de escórias;
- Tratamento de águas residuárias; e,
- Retirada das cinzas e envio para disposição em aterros.

Segundo PINTO et al. (1979), a recuperação da energia e a utilização de outras fontes energéticas como combustível auxiliar, por exemplo o gás natural, pode vir a amenizar os custos operacionais, tornando viável a utilização deste processo.

1.5.4 Reciclagem

A reciclagem é uma das soluções mais viáveis ecologicamente para a resolução dos problemas pertinentes ao lixo. Essa prática não apenas reduz a quantidade de resíduos como também recupera produtos já produzidos, economiza matéria-prima, energia e desperta nas pessoas hábitos conservacionistas, além de reduzir a degradação ambiental.

É importante salientar que, apenas a reciclagem não constitui-se numa solução para os problemas gerados pelo acúmulo de lixo, pois ligados a ele existem alguns problemas de ordem técnica que devem ser solucionados. Alguns materiais de consumo disperso selecionados na origem (no local de consumo) podem ter seu processamento, via reciclagem, comprometido em virtude do alto consumo energético associado à coleta e ao transporte difuso. Da mesma forma, a reutilização de componentes presentes na massa de resíduos municipais deve ser precedida de uma separação, mecânica ou manual, e de um pré-processamento, que englobe a lavagem, a descontaminação e o acondicionamento destes componentes.

Antes de ser implantado um sistema de reciclagem é necessário que se estude e se desenvolva um projeto detalhando as diversas fases do procedimento, sendo as principais:

- Projeto da coleta seletiva;
- Separação do material coletado; e
- Destinação do material coletado.

1.6 O EFEITO ESTUFA E O PROTOCOLO DE KYOTO

Desde o período da revolução industrial e ao longo dos cem últimos anos vem ocorrendo um aumento significativo nas concentrações dos chamados Gases de Efeito Estufa (GEEs) na atmosfera terrestre, fato atribuído principalmente às ações chamadas antrópicas ou induzidas por atividades humanas.

O grande aumento dessas atividades se deu principalmente pela expansão das atividades no setor industrial, agrícola e de transportes, que demandou grande

consumo de energia, proveniente da queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural), além do desflorestamento de novas áreas para ocupação e uso da terra com outras atividades.

Com a queima de combustíveis fósseis, somados o desmatamento e demais atividades responsáveis pela emissão de GEEs à atmosfera, a concentração desses gases aumentou significativamente ocasionando o fenômeno chamado de efeito-estufa (CENAMO, 2004a).



Figura 2: Efeito estufa

A energia solar chega na Terra na forma de radiação de ondas curtas. Parte dela é refletida e repelida pela superfície terrestre e pela atmosfera, mas a maior parte desta passa diretamente pela atmosfera para aquecer o planeta. Essa radiação é devolvida para o espaço na forma de radiação infravermelha de ondas longas; entretanto, o excesso de gases na atmosfera impede que esta radiação volte ao espaço, aumentando a temperatura da Terra (efeito estufa).

O Potencial de Aquecimento Global - GWP (*Global Warning Power*) é a principal medida de comparação entre os diferentes GEE. Tomando-se como referência o CO₂, os demais GEE são estimados, considerando-se diferentes intervalos de tempo (IPCC, 1996).

Tabela 2: Principais gases de efeito estufa (GEE)

Espécies (GEE)	Fórmula química	Tempo de vida [anos]	Potencial de aquecimento global (GWP*)		
			20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono	CO ₂	Variável	1	1	1
Metano	CH ₄	12 ± 3	56	21	6,5
Óxido Nitroso	N ₂ O	120	280	310	170
Ozônio	O ₃	0,1 – 0,3	n.d.	n.d.	n.d.
CFCs	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

* GWP dado o horizonte de tempo

n.d. – não disponível

Fonte: IPCC (1996) ; ALVES e VIEIRA (1998).

Na década de 1990 eram grandes as pressões para a criação de um tratado mundial para cuidar deste tema. O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) responderam a tais pressões criando um grupo de trabalho intergovernamental que se encarregou de preparar as negociações desse tratado. Desde então, fizeram-se enormes progressos na área científica - podendo citar a criação do Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) e na área política - com a Organização das Nações Unidas estabelecendo o Comitê Intergovernamental de Negociação para a Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima (INC/FCCC), que mais tarde culminou na criação da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – CQNUMC (*UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change*). Em 1992, o INC/FCCC elaborou a redação da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – CQNUMC, que foi aberta às assinaturas de todos os chefes de estado presentes durante a Cúpula da Terra no Rio de Janeiro (Eco-92). Na ocasião, 154 países (mais União Européia) assinaram a convenção. Em 21 de março de 1994 a convenção entrou em vigor e, atualmente conta com 186 “partes” (países), unidos com a missão de reduzir a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e controlar o aquecimento global (CENAMO, 2004b).

Para a implementação da CQNUMC foram criados alguns órgãos que seriam responsáveis por fazer com que seus objetivos fossem atingidos, dentre estes está a Conferência das Partes (COP) que objetiva promover e revisar a implementação da UNFCCC, revisar compromissos existentes periodicamente levando em conta os

objetivos da convenção, divulgar achados científicos novos e verificar a efetividade dos programas de mudanças climáticas nacionais.

Foram realizadas até o ano de 2004 dez Conferências das Partes (COP), e estas estão listadas abaixo (CENAMO, 2004a; CENAMO, 2004b):

- COP 1 - Berlim, Alemanha (28/03 a 07/04 de 1995);
- COP 2 - Genebra, Suíça (08 a 19/06 de 1996);
- COP 3 - Kyoto, Japão (01 a 10/12 de 1997) – O Protocolo de Kyoto;
- COP 4 - Buenos Aires, Argentina (02 a 13/11 de 1998);
- COP 5 - Bonn, Alemanha (25/10 a 05/11 de 1999);
- COP 6 - Haia, Países Baixos (13 a 24/11 de 2000);
- COP 6-bis - Bonn, Alemanha (16 a 27/07 de 2000);
- COP 7 - Marrakesh, Marrocos (29/10 a 09/11 de 2001);
- COP 8 - Nova Deli, Índia (23/10 a 01/11 de 2002);
- COP 9 - Milão, Itália (01 a 12/12 de 2003); e,
- COP 10 - Buenos Aires, Argentina (6 a 18/12 de 2004).

Quando as “Partes” adotaram a Convenção Quadro das Nações Unidas em Mudanças Climáticas - CQNUMC, já se esperava que fossem adotadas ações mais enérgicas futuramente para combater o problema do aquecimento global.

Com o estabelecimento de um processo de revisão, discussão e troca de informações permanentes, a Convenção permite a adoção de compromissos adicionais em resposta a avanços científicos e disposições políticas.

Em 1997, na cidade de Kyoto no Japão, contando com representantes de 159 nações, foi então realizada a terceira Conferência das Partes (COP 3), que culminou na adoção, por consenso, deste protocolo que ficou como um dos marcos mais importantes desde a criação da CQNUMC no combate à mudança climática (CENAMO, 2004b).

O Protocolo de Kyoto define que os países industrializados (ver na tabela 3 - Anexo I do Protocolo de Kyoto) reduziriam em pelo menos 5% suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em relação aos níveis de 1990. A União Européia assumiu o compromisso de reduzir em 8%; ficou acertada a redução de 7% para os

Estados Unidos, entretanto esta não foi ratificada por aquele país; e o Japão concordou em reduzir 6%. Essa meta global deverá ser atingida no período de 2008 a 2012.

Alguns países como Islândia, Austrália e Noruega ainda teriam permissão para aumentar suas emissões (MCT, 2002).

Tabela 3: Total das emissões de dióxido de carbono das Partes do Anexo I em 1990 e compromisso de redução estabelecido no Protocolo de Kyoto

Parte/País	Total das Emissões de CO ₂ em 1990		Compromisso de redução [%]
	[Gg]	Porcentagem	
Alemanha	1.012.443	7,4	8
Austrália	288.965	2,1	-8
Áustria	59.200	0,4	8
Bélgica	113.405	0,8	8
Bulgária*	82.990	0,6	8
Canadá	457.441	3,3	6
Comunidade Européia	n.d.	n.d.	8
Croácia	n.d.	n.d.	5
Dinamarca	52.100	0,4	8
Eslováquia	58.278	0,4	8
Eslovênia	n.d.	n.d.	8
Espanha	260.654	1,9	8
Estados Unidos da América	4.957.022	36,1	7
Estônia*	37.797	0,3	8
Federação Russa*	2.388.720	17,4	0
Finlândia	53.900	0,4	8
França	366.536	2,7	8
Grécia	82.100	0,6	8
Hungria*	71.673	0,5	6
Irlanda	30.719	0,2	8
Islândia	2.172	0,0	-10
Itália	428.941	3,1	8
Japão	1.173.360	8,5	6
Letônia*	22.976	0,2	8
Liechtenstein	208	0,0	8
Lituânia*	n.d.	n.d.	8
Luxemburgo	11.343	0,1	8
Mônaco	71	0,0	8
Noruega	35.533	0,3	-1
Nova Zelândia	25.530	0,2	0
Países Baixos	167.600	1,2	8
Polônia*	414.930	3,0	6
Portugal	42.148	0,3	8
Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte	584.078	4,3	8
República Tcheca	169.514	1,2	8
Romênia*	171.103	1,2	8
Suécia	61.256	0,4	8
Suíça	43.600	0,3	8
Ucrânia*	n.d.	n.d.	0
Totais	13.728.306	100,0	-

* Países em processo de transição para uma economia de mercado

n.d. – não disponível / Obs: 1Gg = 1.000t

Fonte: MCT (2002).

Para que o Protocolo de Kyoto entrasse em vigor ficou decidido que seria necessária a ratificação de pelo menos 55 países, e que juntos deveriam corresponder por pelo menos 55% das emissões globais de GEEs. Ao ser ratificado, o Protocolo passaria a vigorar no prazo de 90 dias da data de ratificação, o que significa que passaria a ter um compromisso legal vinculando todas as “Partes” envolvidas, e a não complacência de alguma “Parte” estaria sujeita a penalidades dentro do Protocolo (CENAMO, 2004b).

A terceira Conferência das Partes serviu para aumentar os esforços de implementação da CQNUMC e se preparar para a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto.

O Brasil ratificou o protocolo em 23 de julho de 2002 (MCT, 2002).

Com a ratificação da Rússia, o Protocolo de Kyoto entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005. Mesmo sem o apoio de alguns países, como os EUA que, sozinhos, são responsáveis por 25% da poluição mundial, o Protocolo de Kyoto se concretizou e, finalmente, tem valor legal.

Segundo BEZERRA et al. (2005), com a entrada da Rússia, mesmo sem a adesão dos EUA, o Protocolo de Kyoto atende aos requisitos necessários e passa a vigorar, com a ratificação de 125 países correspondendo por 61,6% das emissões globais de GEEs.

CAPÍTULO 2 GERAÇÃO DE BIOGÁS

2.1 INTRODUÇÃO

A utilização de aterros sanitários como forma de destinação final dos resíduos sólidos urbanos apresenta-se ainda hoje no Brasil e na maioria dos países do mundo como a principal alternativa encontrada para o lixo.

No aterramento do lixo, diversos problemas ambientais devem ser considerados, sendo um deles a emissão de gases pela decomposição do material orgânico. Os principais constituintes desses gases são o dióxido de carbono e o gás metano, sendo este último um combustível, possível de ser coletado e utilizado como fonte de energia.

O aterramento do lixo é apontado, juntamente com o tratamento anaeróbio de esgotos domésticos e efluentes industriais, como uma das maiores fontes de metano liberado para a atmosfera.

Segundo IPCC (1996), os aterros são responsáveis por cerca de 5 a 20% do total de metano liberado por fontes com origem em atividades humanas.

Em VIEIRA e ALVES (2002) foram apresentados resultados do inventário nacional de emissões de metano decorrentes da disposição de resíduos sólidos e do tratamento de águas residuárias no Brasil, para o período de 1990 a 1994, com base na metodologia sugerida pelo *International Panel on Climate Change* em IPCC (1996). A partir de dados estatísticos de população e fatores estimados de geração de resíduos, chegou-se a uma quantidade de emissões de gás metano por resíduos sólidos no Brasil para o ano de 1990 de 618.000 toneladas, aumentando para 677.000 toneladas no ano de 1994.

O gás metano gerado em aterros, quando não devidamente controlado, seja por meio de sistemas de coleta e aproveitamento, seja pela queima em *flares*, contribui para o agravamento do efeito estufa, desse modo, conclui-se que o gás citado afeta não somente a integridade da região onde é gerado, mas também o meio ambiente como um todo.

Além dos danos causados pelo agravamento do efeito estufa, o biogás gerado pelos aterros e “lixões” pode representar riscos para o ambiente local quando não devidamente controlado, podendo migrar lateralmente para áreas próximas ou mesmo emanar pela superfície, causando prejuízos à saúde humana e à vegetação, decorrentes da formação de ozônio de baixa altitude ou da exposição a alguns constituintes do biogás que podem causar câncer e outras doenças que atacam fígado, rins, pulmões e o sistema nervoso central (USEPA, 1991).

Ainda segundo USEPA (1991), devido às altas concentrações de gás metano no biogás, existe o risco de incêndios e explosões em instalações próximas aos aterros. Outro efeito negativo da emissão descontrolada de biogás é o inconveniente causado por odores desagradáveis que, segundo a mesma referência, levam a distúrbios emocionais em indivíduos que residem em áreas próximas aos aterros e favorecem a desvalorização das propriedades.

Os primeiros projetos de aproveitamento de biogás em aterros foram implantados ainda na década de 1970 nos Estados Unidos, como medidas de controle das emissões descontroladas de metano nesses locais e também como uma nova fonte de energia em meio às crises do petróleo daquela época. Posteriormente, novos projetos surgiram em outros países, principalmente na Europa, sendo que atualmente mais de 500 aterros no mundo possuem plantas de aproveitamento de biogás (ENSINAS, 2003). Os tipos de aproveitamentos energéticos e as finalidades dos projetos são diversos, sendo as mais comuns a geração de energia elétrica e o uso direto como combustível para veículos e indústrias.

2.2 A HISTÓRIA DO BIOGÁS

Os processos bacteriológicos de fermentação da matéria orgânica são anteriores à existência do homem na terra. A quantidade de bactérias e a intensidade de sua ação no ambiente primitivo colaboraram na determinação da composição da atmosfera, propiciando as condições de desenvolvimento da vida.

MOTTA (1986), contando a história da fermentação anaeróbia, descreve que muito embora o gás metano (biogás) já fosse reconhecido, foi somente em 1776 que o

físico e químico italiano Alessandro Volta (1745-1827) identificou o metano no gás dos pântanos, verificando que o mesmo conferia ao gás encontrado na superfície das águas pantanosas suas características combustíveis. O metano passou, então, a ser conhecido como gás dos pântanos (CUNHA, 2002). Joseph Priestley (1733-1804), ao estudar os gases combustíveis, volta a citar o metano; foi, porém, o químico inglês Humphrey Davy (1778-1829) que, ao analisar, em 1808, os gases produzidos pela fermentação da palha de estábulos umedecida, observa a existência de metano e dióxido de carbono. Somente em 1844, Louis Pasteur (1822-1895) mostra que o gás metano pode ser produzido a partir da fermentação de uma mistura de excrementos, palha de estábulo e água, e discute as propriedades combustíveis do gás metano (CUNHA, 2002).

2.2.1 Formação do biogás de aterro

O lixo, ao ser depositado em aterros, permanece um período de tempo descoberto e em contato com o ar atmosférico, até ser compactado e coberto. Neste período já se constata a emissão de compostos voláteis que constituem a massa do resíduo. Esses compostos continuarão a ser emitidos mesmo após a aplicação do material de cobertura e o fechamento da célula do aterro.

A formação e a taxa de geração dos principais constituintes do gás de aterro é variável ao longo do tempo e segue várias fases distintas que podem ser observadas na figura 3.

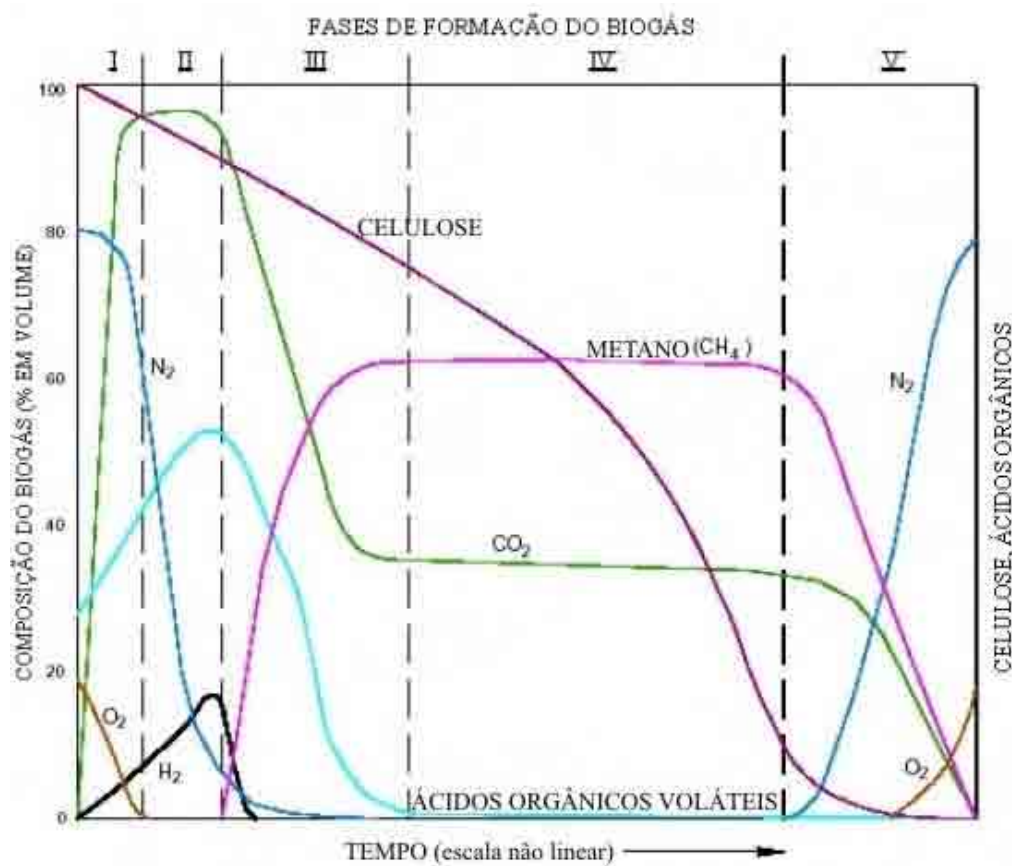


Figura 3: Fases de formação do biogás de aterro

Fonte: traduzido de WORLD BANK (2003).

As diversas fases apresentadas na figura 3 são descritas a seguir (TCHOBANOGLOUS et al., 1993):

- Fase I (ajuste inicial): A decomposição biológica da matéria orgânica ocorre principalmente em condições aeróbias devido à presença de certa quantidade de ar no interior do aterro. A principal fonte de microorganismos para a decomposição aeróbia e anaeróbia nessa fase é a terra que é usada como material de cobertura para divisão das células do aterro e como camada final.
- Fase II (transição): a quantidade de oxigênio decai e as reações anaeróbias se desenvolvem. Nitratos e sulfatos podem servir como receptores de elétrons nas reações biológicas de conversão. As reações de redução podem ser monitoradas medindo-se o potencial de óxido-redução do lixo, ocorrendo aproximadamente entre -50 e -100 milivolts para nitratos e sulfatos. A produção do metano ocorre

com valores entre -150 e -300 milivolts. Com a continuidade da queda do potencial de óxido-redução, os microorganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Nesta fase, o pH do chorume começa a cair devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de CO_2 dentro do aterro.

- Fase III (ácida): as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. A primeira das etapas do processo envolve transformação enzimática (hidrólise) dos compostos de maior massa molecular (lipídeos, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos) em compostos apropriados para o uso como fonte de energia pelos microorganismos. A segunda etapa do processo (acidogênese) envolve a conversão microbiológica dos compostos resultantes da primeira etapa em compostos intermediários com massa molecular menor, como o ácido acético (CH_3COOH) e pequenas concentrações de outros ácidos mais complexos. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante esta fase e os microorganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas. As demandas bioquímica (DBO) e química de oxigênio (DQO) e a condutividade do chorume aumentam significativamente durante esta fase devido à dissolução de ácidos orgânicos no chorume. Também devido ao baixo pH, constituintes inorgânicos como os metais pesados serão solubilizados.
- Fase IV (metanogênica): nesta fase predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH_4 e CO_2 . A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH do chorume nesta fase tende ao meio mais básico, na faixa de 6,8 a 8,0.
- Fase V (maturação): Esta fase ocorre após grande quantidade do material orgânico ter sido biodegradado e convertido em CH_4 e CO_2 durante a fase

metanogênica. Como a umidade continua a migrar pela massa de lixo, porções de material biodegradável ainda não convertidos acabam reagindo. 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. Dependendo das medidas no fechamento do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no gás do aterro.

O biogás de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é composto por vários gases, sendo o gás metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) seus principais constituintes. A tabela 4 apresenta os valores típicos de sua composição.

Tabela 4: Composição básica do biogás de aterro

Gás	Fórmula Química	Concentração [%]
Hidrogênio	H_2	1-10
Nitrogênio	N_2	0,5-3
Oxigênio	O_2	0,1-1
Monóxido de Carbono	CO	0,1
Gás Sulfídrico	H_2S	0,1
Vapor d'água	H_2O	Variável
Dióxido de Carbono	CO_2	35-45
Metano	CH_4	50-70

Fonte: MOTTA (1986).

Para GUNNERSON e STUCKEY (1986), a diferença existente entre a concentração de gás metano e dióxido de carbono encontrada no biogás se deve à dissolução de parte do CO_2 na fração aquosa da massa de lixo.

2.2.2 Fatores que afetam a degradação anaeróbia

O conhecimento dos processos envolvidos na fermentação da matéria orgânica e conseqüente geração de metano é útil no projeto de Estações de Tratamento Anaeróbio de Efluentes - ETAE ou Locais de Disposição de Resíduos Sólidos - LDRS operacionais. A digestão anaeróbia envolve as atividades de várias comunidades

bacterianas diferentes que necessitam condições adequadas para o seu desenvolvimento. O processo de produção de biogás depende de muitos parâmetros, como, por exemplo: temperatura ambiente, umidade, presença de substâncias tóxicas e nutrientes cuja presença ou ausência são determinantes na atividade bacteriana (ALVES, 2000).

De acordo com USEPA (1991) e USEPA (1996a), diversos fatores influenciam a taxa de geração do biogás:

- Composição dos resíduos - Quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano. O lixo destinado aos aterros pode ter uma composição variada ao longo do ano, dependendo do clima e dos hábitos de consumo da população local.
- Ambiente anaeróbio - Para que haja produção de metano, a matéria orgânica deve sofrer decomposição em ambiente sem oxigênio; para tanto, pode-se cobrir os resíduos com terra, ou com o próprio resíduo, criando condições anaeróbias nas camadas inferiores dos LDRS.
- Umidade - A umidade é essencial à vida das bactérias decompositoras. Uma umidade alta (60 a 90 %) pode aumentar a geração de biogás. A construção do aterro com baixa permeabilidade para controle da formação do chorume mantém a umidade do lixo baixa e prejudica a formação de biogás.
- Acidez e temperatura - As bactérias metanogênicas atingem maior produtividade a pHs entre 6,8 e 7,2. Inicialmente os aterros apresentam pH ácido, que tende a aproximar-se da neutralidade a partir da fase metanogênica. A produção de metano é afetada pela temperatura. A temperatura ideal para a digestão anaeróbia está entre 29 e 38°C para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70°C para as termofílicas. Abaixo de 10°C há uma queda brusca na taxa de geração do gás metano. Tipicamente, a própria decomposição fornece calor suficiente para que ocorra a metanogênese, nos LDRS.

2.3 EMISSÕES DE BIOGÁS PELA DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS

O IPCC estima que dentre as emissões antropogênicas de metano, as geradas pela decomposição anaeróbia dos resíduos contribuem com aproximadamente 13 a 31% da estimativa de $375 \cdot 10^6$ t de metano lançadas anualmente em todo o planeta (IPCC, 1996). A tabela 5 apresenta valores de emissões de metano no período de 1990 a 1994.

Tabela 5: Emissão de metano por resíduos sólidos no período de 1990 a 1994

Emissões de metano [Gg CH ₄ /ano]							
	Resíduos sólidos		Esgotos domésticos e comerciais		Efluentes industriais		Total
Ano	Emissões	%	Emissões	%	Emissões	%	Emissões
1990	618,01	84	39,34	5	80,00	11	737,35
1991	636,34	84	40,51	5	79,82	11	756,67
1992	649,68	84	41,36	5	82,01	11	773,05
1993	663,28	84	42,23	5	82,71	11	788,22
1994	677,18	84	43,11	5	84,41	11	804,70

Obs: 1Gg = 1.000t

Fonte: ALVES (2000).

Conclui-se que a principal fonte de emissão de metano pelos resíduos provém dos sólidos, e que esta parcela corresponde a 84% das emissões dos resíduos, emissões pela digestão anaeróbia de efluentes domésticos e comerciais são as menos significativas correspondendo a 5% do total.

Tendo conhecimento da população urbana nacional neste período pode-se considerar o potencial de geração de metano no período, representado na tabela 6.

Tabela 6: Emissão média de metano “per capita” gerado por resíduos no Brasil

Ano	População urbana [habitantes]	Emissão [Ggde CH ₄]	Emissão média anual de metano per capita gerado por resíduos no Brasil [kg CH ₄ /habitante·ano]
1990	107.789.249	741,89	6,88
1991	110.990.990	761,50	6,86
1992	113.314.572	778,21	6,87
1993	115.686.797	792,21	6,85
1994	118.108.685	808,52	6,85

Fonte: ALVES (2000).

A partir dos resultados do inventário, ALVES (2000) apresentou uma estimativa da tendência de evolução das emissões de 1990 a 2000 em função do ano, o que é apresentado pela figura 4.

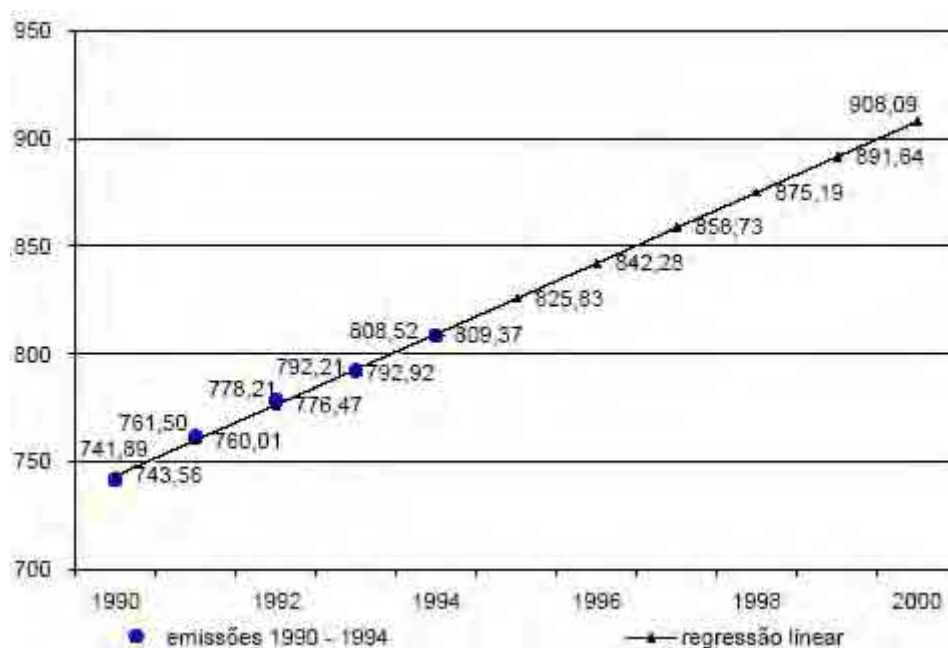


Figura 4: Projeção tendencial das emissões de metano pelos resíduos no Brasil

Obs: Em 1.000 t de CH₄

Fonte: ALVES (2000).

Conclui-se que as emissões que no início da década de 1990 eram de aproximadamente 800 mil toneladas passaram ao final da mesma década para cerca de 900 mil toneladas.

Tais valores, numa estimativa que considera inalteradas as condições de produção industrial e crescimento populacional, indicam que esta estimativa é de valor mínimo.

A experiência da USEPA (1996a) indica que locais de disposição de resíduos sólidos que contenham pelo menos 1 milhão de toneladas de resíduos são aproveitáveis para coleta e utilização de metano.

A USEPA propõe uma metodologia de avaliação preliminar de viabilidade econômica de recuperação do biogás gerado pelos LDRS, no qual é verificado o tamanho economicamente explorável do LDRS. Este tamanho pode ser estimado pela equação (1):

$$T = \text{Pop}_{\text{urb}} \cdot \% \text{ coleta} \cdot \text{Taxa RSD} \cdot \text{Idade} \cdot 0,001 \quad (1)$$

Sendo:

T: tamanho do LDRS [t]

0,001: conversão de unidades [t/kg]

Pop_{urb} : população urbana [habitantes]

Taxa RSD: taxa de geração de resíduos sólidos urbanos [kg de RSD/hab·ano]

% coleta: taxa de coleta de resíduos [%]

Idade: número de anos em que vem sendo depositado resíduo no LDRS [ano]

Portanto, considerando que são necessárias pelo menos 1 milhão de toneladas de resíduos para que o LDRS seja considerado viável do ponto de vista de geração de metano para fins energéticos, pode-se estimar o número mínimo de pessoas requeridas para que um LDRS seja economicamente viável. Para esta estimativa utilizou-se a equação (1) proposta pela USEPA e a partir dela formulou-se a tabela 7 e a figura 5.

Tabela 7: Dados obtidos pela equação (1)

Taxa RSD [kg/hab.dia]	População [habitantes]			
	5 anos	10 anos	15 anos	20 anos
0,4	1.369.863	684.931	456.621	342.466
0,5	1.095.890.	547.945	365.297	273.973
0,6	913.242	456.621	304.414	228.311
0,7	782.779	391.389	260.926	195.695
0,8	684.932	342.466	228.310	171.233
0,9	608.828	304.414	202.943	152.207
1,0	547.945	273.972	182.648	136.986

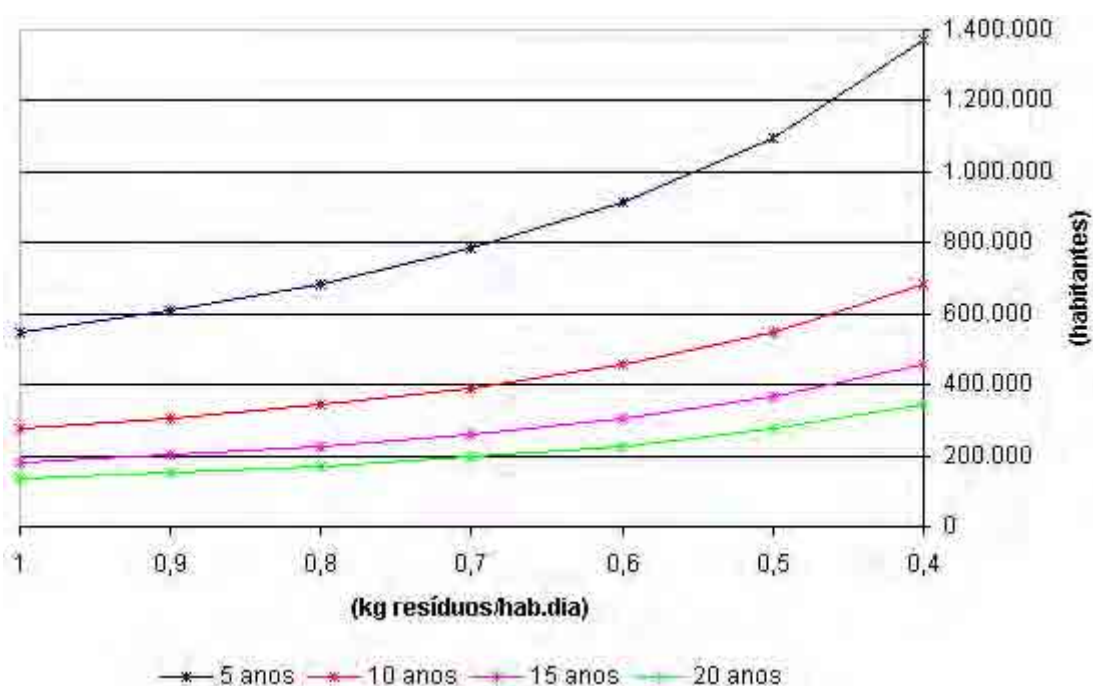


Figura 5: Número mínimo de habitantes para exploração de um LDRS

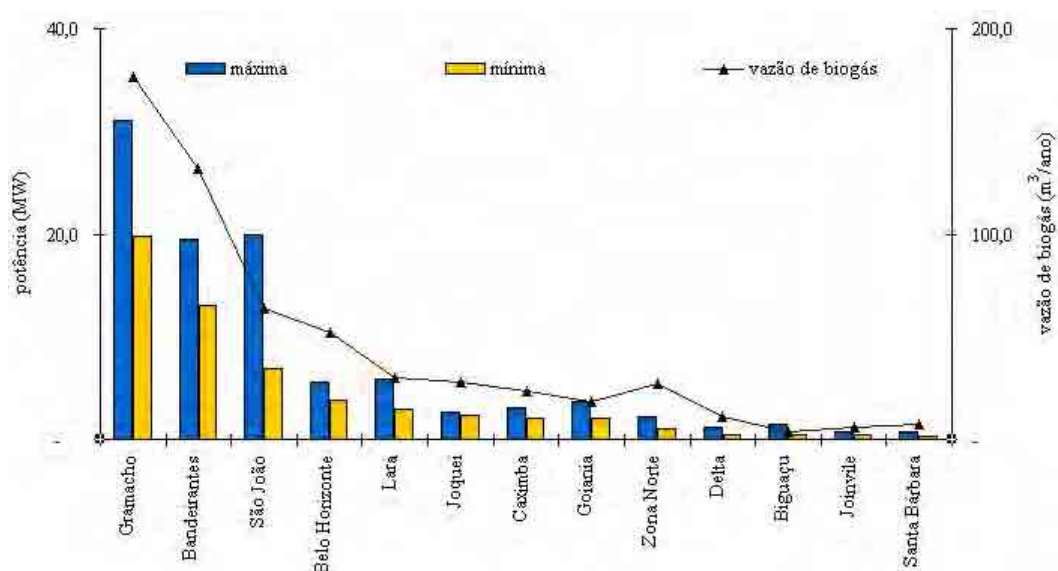
OBS: supõe-se que 100% do resíduo gerado seja coletado e depositado no LDRS.

Fonte: Adaptado de ALVES (2000).

Segundo KESSLER¹ (2000 apud ALVES, 2000), o inventário de produção de gás metano realizado pela CETESB em convênio com o Ministério de Ciência e Tecnologia, indica a possibilidade de estar disponível de 303 a 578 milhões de m³ de

¹ KESSLER, T. *Utilização de Gás Metano de Aterros Sanitários: Recomendações para seu aproveitamento prático*. Revista Engenharia. São Paulo, n. 54, 2000 apud ALVES, J. W. *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos*. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000. 142 p.

gás metano por ano, somente em base de 13 aterros. A USEPA levantou a viabilidade de recuperação do biogás de LDRS no Brasil e no Estado de São Paulo, sendo que no primeiro levantamento foram considerados 13 LDRS localizados nas maiores cidades do país, e no segundo 6 LDRS da RMSP - Região Metropolitana de São Paulo. No município de Campinas foram considerados pelo estudo da USEPA os dois LDRS (Aterro de Santa Bárbara e Aterro Delta A). Ainda no Estado de São Paulo foram avaliados: Aterro Bandeirantes (São Paulo), Aterro Lara (Mauá), São João (São Paulo), Aterro Vila Albertina (São Paulo), Aterro Santo Amaro (RMSP), Aterro Sapopemba (RMSP), Aterro São Mateus (RMSP) e Aterro Jacuí (RMSP) (USEPA, 1997b).



- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 - Bandeirantes (São Paulo, SP) | 7 - Gramacho (Duque de Caxias, RJ) |
| 2 - Belo Horizonte (Belo Horizonte, MG) | 8 - Joinville (Joinville, SC) |
| 3 - Biguaçu (Florianópolis, SC) | 9 - Jockey (Brasília, DF) |
| 4 - Caximba (Curitiba, PR) | 10 - Lara (Mauá, SP) |
| 5 - Delta (Campinas, SP) | 11 - Santa Bárbara (Campinas, SP) |
| 6 - Goiânia (Goiânia, GO) | 12 - São João (São Paulo, SP) |
| | 13 - Zona Norte (Porto Alegre, RS) |

Figura 6: Principais LDRS do Brasil

Fonte: USEPA (1997d) ; ALVES (2000).

2.3.1 Quantificação de Biogás em Aterros Sanitários

Segundo CETESB/SMA (2003), existem diferentes métodos para calcular a quantidade de metano gerado, desde métodos que apresentam uma aproximação grosseira, considerando somente a quantidade de resíduo sólido doméstico disposta no aterro, até métodos que considerem uma cinética de geração de biogás em função de três tipos importantes de parâmetros (condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo).

Algumas metodologias para estimativas teórica da produção de gás metano em locais de deposição de resíduos sólidos urbanos são encontradas na literatura. Esses métodos variam em suas considerações, em sua complexidade e na quantidade de dados de que necessitam.

Em IPCC (1996) é apresentada uma metodologia de fácil aplicação para cálculo de emissão de metano a partir de resíduos sólidos para países ou regiões específicas. Esse método, que segue a equação (2), envolve a estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável presente no lixo, calculando assim a quantidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo depositado, considerando diferentes categorias de resíduos sólidos domésticos. São necessários dados estatísticos de população e sobre os resíduos sólidos urbanos. Caso não haja dados disponíveis para o cálculo no país, poderão ser usados dados padronizados fornecidos pelo IPCC, mas a qualidade dos resultados pode ser prejudicada. Esta equação também é conhecida como equação de inventário do IPCC (CETESB/SMA, 2003).

$$Q_{CH_4} = \frac{PopUrb \cdot Taxa\ RSD \cdot RSDf \cdot L_0}{\rho_{CH_4}} \quad (2)$$

Sendo:

Q_{CH_4} : metano gerado [m^3CH_4 / ano]

PopUrb: população urbana [habitantes]

Taxa RSD: taxa de geração de resíduos sólidos domiciliares por habitante por ano [kg de RSD/habitante · ano]

RSDf: fração de resíduos sólidos domésticos que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos [%]

L_0 : potencial de geração de metano do lixo [kg de CH_4 / kg de RSD]

ρ_{CH_4} : massa específica do metano [kg/m³]

Obs: O valor da massa específica do metano é 0,7167 kg/m³ (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

O potencial de geração de metano a partir do lixo (L_0) pode ser obtido pela metodologia apresentada em IPCC (1996), que segue a equação (3).

$$L_0 = FCM \cdot COD \cdot CODf \cdot F \cdot (16/12) \quad (3)$$

Sendo:

L_0 : potencial de geração de metano do lixo [kg de CH_4 / kg de RSD]

FCM: fator de correção de metano [%]

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD]

CODf: fração de COD dissociada [%]

F: fração em volume de metano no biogás [%]

(16/12): fator de conversão de carbono em metano [kg de CH_4 / kg de C]

Conforme CETESB/SMA (2003), o FCM varia em função do tipo de local. O IPCC define quatro categorias de locais: Aterros Inadequados, Aterros Controlados, Aterros Adequados (Aterro Sanitário) e Aterros Sem Classificação e para cada uma das categorias o FCM apresenta um valor diferente, como mostra a tabela 8.

Tabela 8: Valores para o FCM

Tipo de local de disposição	FCM	Profundidade (p) [m]
Lixão	0,4	$p < 5$
Aterro Controlado	0,8	$5 \leq p \leq 10$
Aterro Sanitário	1,0	$p \geq 10$
Locais sem categoria	0,6	Não classificado

Fonte: adaptado de IPCC (1996).

O cálculo da quantidade de carbono orgânico degradável (COD) segue a equação (4) e é baseado na composição do lixo e na quantidade de carbono em cada componente da massa de resíduo como apresentado em IPCC (1996). Na tabela 9 são encontrados os valores de COD para diferentes componentes do lixo.

Tabela 9: Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do lixo

Componente	Porcentagem COD (em massa)
A) papel e papelão	40
B) resíduos de parques e jardins	17
C) restos de alimentos	15
D) tecidos	40
E) madeira*	30

* excluindo a fração de lignina que se decompõe muito lentamente.

Fonte: BINGEMER e CRUTZEN² (1987 apud IPCC, 1996).

$$\text{COD} = (0,40 \cdot A) + (0,17 \cdot B) + (0,15 \cdot C) + (0,40 \cdot D) + (0,30 \cdot E) \quad (4)$$

Sendo:

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD]

A: fração de papel e papelão no lixo

B: fração de resíduos de parques e jardins no lixo

C: fração de restos de alimentos no lixo

D: fração de tecidos no lixo

E: fração de madeira no lixo

A fração de COD dissociada (COD_f), segundo BINGEMER e CRUTZEN² (1987 apud IPCC, 1996), indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida pela equação (5).

$$\text{COD}_f = 0,014 T + 0,28 \quad (5)$$

² BINGEMER, H.G., CRUTZEN, P.J. *The production of methane from solid wastes*. Journal of Geophysical Research, v. 92, n° D2, . 1987 apud IPCC – International Panel On Climate Change. *Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual (Vol.3)*. 1996.

Sendo:

COD_f: fração de COD dissociada [%]

T: temperatura na zona anaeróbia [°C]

Os mesmos autores afirmam que o restante é assimilado no material celular dos microorganismos durante a degradação da matéria orgânica.

Assim como o IPCC, a USEPA também desenvolveu uma equação recomendada para a elaboração de inventários e esta é conhecida como equação de Inventário da USEPA (USEPA, 1997a):

$$Q = \text{População} \cdot \text{Taxa RSD} \cdot \text{RSD}_f \cdot 0,45 \cdot F \quad (6)$$

Onde:

Q = metano gerado [m³/ano]

População = número de habitantes atendidos pelo aterro [habitantes]

Taxa RSD = taxa de geração de resíduos sólidos por habitante por ano [kgRSD/habitantes · ano]

RSD_f = fração de resíduos sólidos coletados que é depositada nos LDRS [%]

0,45 = volume de biogás gerado por 1kg de resíduo sólido [m³ biogás/kg RSD]

F = fração de metano no biogás [%]

Os métodos de inventário apresentados acima são uma aproximação grosseira, pois calculam o biogás gerado em função de dados do Censo sem levar em conta a cinética de geração do biogás pelos resíduos (CETESB/SMA, 2003).

Para uma avaliação mais detalhada da geração de metano em aterros sanitários recomenda-se métodos que levem em consideração a geração de biogás ao longo dos anos, através de uma aproximação da cinética de decomposição do resíduo.

Assim como nas equações de inventário, os métodos de cinética encontrados são também da USEPA e do IPCC (CETESB/SMA, 2003). Portanto, serão descritos mais dois métodos diferentes: Método de Projeto e Método de Decaimento de Primeira Ordem I .

Estes dois métodos utilizam uma constante denominada constante de decaimento (k). A constante de decaimento é função de fatores como disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e principalmente umidade. Os valores sugeridos para k podem variar de 0,01 ano⁻¹ a 0,09 ano⁻¹ conforme pode ser observado na tabela 10.

Tabela 10: Valores sugeridos para k

Precipitação anual	Valores para k [ano ⁻¹]		
	Relativamente inerte	Decomposição moderada	Decomposição alta
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
> 250 a < 500 mm	0,01	0,03	0,05
> 500 a < 1.000 mm	0,02	0,05	0,08
> 1.000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: WORLD BANK (2003).

O Método de Projeto (USEPA, 1997a ; IPCC, 1996) é recomendado para aterros sanitários ainda na fase de projeto, pois ainda não se sabe realmente qual será o fluxo anual de resíduos.

Conforme CETESB/SMA (2003), esse método se divide em duas etapas: enquanto o aterro recebe resíduos e após o seu fechamento.

Enquanto o aterro está aberto, o termo de cinética $e^{-k \cdot c}$ será igual a 1. Após o fechamento, esse termo de cinética deverá ser considerado. Assim, pode-se dividir essa equação em duas:

- durante a vida útil:

$$Q = F \cdot R \cdot L_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (7)$$

- após o fechamento do aterro:

$$Q = F \cdot R \cdot L_0 \cdot (e^{-k \cdot c} - e^{-k \cdot t}) \quad (8)$$

Sendo:

Q = metano gerado [m³/ano]

F = fração de metano no biogás [%]

R = quantidade média de resíduos depositados durante a vida útil do aterro
[kg RSD/ano]

L_0 = potencial de geração de biogás [m^3 de biogás/kg RSD]

k = constante de decaimento [ano^{-1}]

c = tempo decorrido desde o fechamento do aterro [ano]

t = tempo decorrido desde a abertura do aterro [anos]

O Método de Decaimento de Primeira Ordem I (USEPA, 1997b; IPCC, 1996) considera a geração de metano por uma quantidade de resíduo depositada no ano x durante os anos posteriores. Como a cada ano novas quantidades de resíduos são depositadas, a quantidade de metano gerada em um determinado ano será igual à geração do resíduo depositado no ano T somada das gerações dos resíduos depositados nos anos anteriores, referenciadas no ano T (CETESB/SMA, 2003).

$$Q_T = F \cdot R_x \cdot k \cdot L_0 \cdot e^{-k(T-x)} \quad (9)$$

Sendo:

Q_T = metano gerado no ano T [m^3 /ano]

F = fração de metano no biogás [%]

R_x = quantidade de resíduo depositado no ano x [kg]

k = constante de decaimento [ano^{-1}]

L_0 = potencial de geração de biogás [m^3 de biogás/kg RSD]

T = ano atual

x = ano de deposição do resíduo

O resíduo disposto anualmente (R_x) é variável e depende de fatores como a taxa de crescimento populacional, taxa de RSD produzido por habitante ao ano e da porcentagem de resíduos que é coletada e disposta no aterro. A multiplicação de todos estes fatores originam os valores de R_x .

A equação (9) fornece a emissão de metano gerado pelo resíduo que degrada anaerobicamente após sua deposição no aterro; esta afirmação pode ser exemplificada pela figura 7.

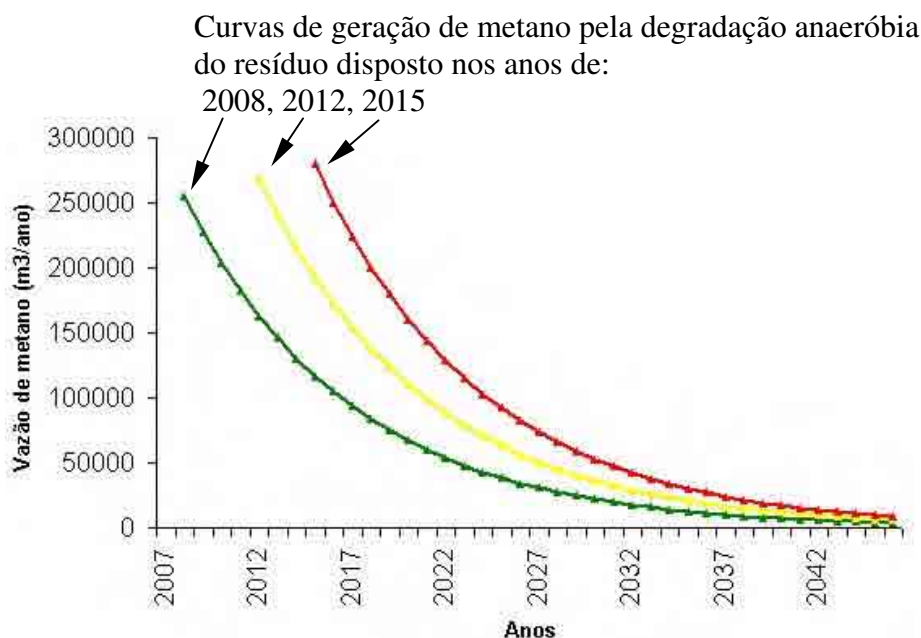


Figura 7: Emissão de metano gerado pelos resíduos

A estimativa de soma das vazões (ΣQ_T) de metano é dada pela equação 10, que representa a soma das vazões de metano correspondentes às quantidades de resíduo depositadas no aterro ano a ano.

$$\Sigma Q_T = F \cdot k \cdot L_0 \cdot \Sigma R_x \cdot e^{-k(T-x)} \quad (10)$$

Sendo:

ΣQ_T = estimativa da soma das vazões de metano no ano considerado [m^3CH_4 /ano]

Portanto, esta estimativa é feita ano a ano, obtendo-se assim a emissão de metano do aterro durante toda a sua vida útil e pelos anos seguintes após o seu fechamento.

Com o objetivo de demonstrar o comportamento gráfico de cada uma das equações apresentadas acima foram estimados dados para uma população fictícia afim

de exemplificar também os cálculos como pode ser observado na tabela 11 e na figura 8.

Tabela 11: Dados fictícios para a estimativa da geração de metano

Ano de abertura do aterro	1
Ano de fechamento do aterro	20
Tempo que o aterro permanece fechado gerando biogás	20 anos
População atendida pelo aterro	100.000 habitantes
Taxa de crescimento populacional	1,38% ao ano
Taxa de geração de resíduos “ <i>per capita</i> ” diária	0,5 kg RSD/hab·dia
Taxa de resíduos coletados que são depositados em aterro	88%
Constante de decaimento (k)	0,125/ano
Potencial de geração de biogás	0,25 m ³ de biogás/kg RSD
Temperatura de digestão anaeróbia	35°C
Fator de conversão de metano (FCM)	1,0 (aterro sanitário)
Fração de metano no biogás	50%

Com os dados da tabela 11 construiu-se a figura 8:

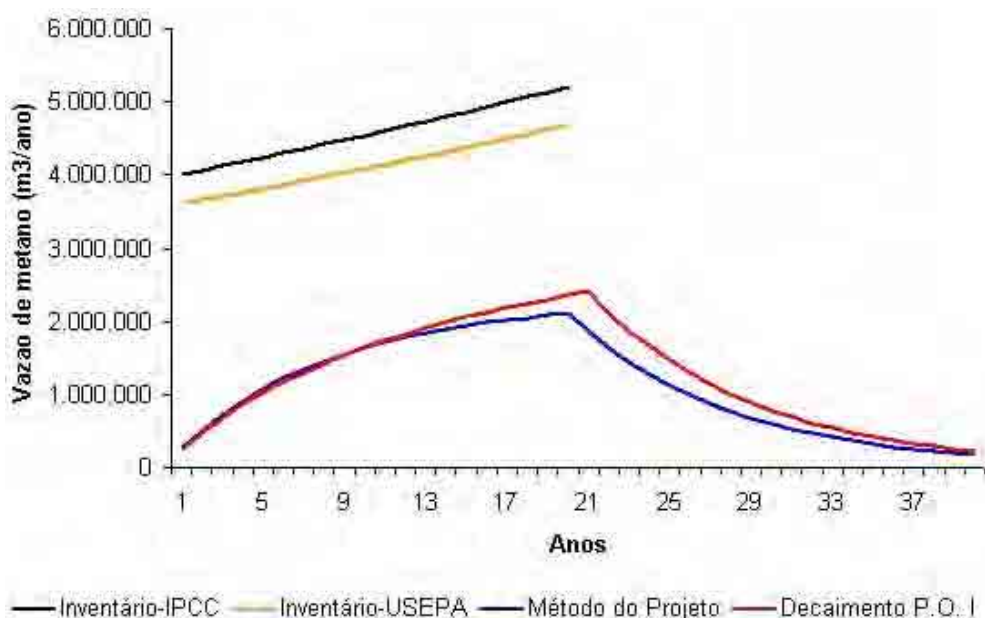


Figura 8: Geração de metano

Analisando a figura 8, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- O método de inventário do IPCC estima as maiores quantidades.

- O método de projeto estima as menores quantidades.
- As duas equações de inventário não apresentam valores de geração de biogás após o encerramento do aterro. Por essa razão não devem ser utilizados em projetos de reaproveitamento de biogás. Além disso, suas estimativas são maiores que as estimativas do método de projeto.

Recomenda-se o desenvolvimento, para aplicação no Brasil, de pesquisas que definam uma equação com validade em todo o território nacional. Enquanto isso não ocorre, recomenda-se utilizar as equações consagradas da literatura americana, com as quais centenas de projetos foram implantados com sucesso.

CAPÍTULO 3 DIAGNÓSTICO DA GESTÃO DE RSU NO VALE DO PARAÍBA

3.1 SITUAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DOS RSU NO BRASIL, SP E NO VALE DO PARAÍBA

3.1.1 Brasil

Nesta seção apresenta-se a situação atual da destinação final dos resíduos sólidos no Brasil, a partir de levantamentos do setor de saneamento, em especial, os dados do último PNSB – Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico, realizado pelo IBGE em 2000. Não se pretende com este trabalho elaborar um diagnóstico detalhado de todo o país, mas ter-se uma visão geral da situação atual brasileira e perspectivas para o setor.

No Brasil, de acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000a), coleta-se cerca de 228.413 toneladas de resíduos sólidos diariamente, sendo 125.258 toneladas referentes aos resíduos domiciliares. A tabela 12 apresenta a população brasileira e sua distribuição regional, a quantidade de resíduos sólidos gerados diariamente e a geração por pessoa e por região. Em relação à geração por pessoa, observa-se uma grande discrepância de resultados por região, devido aos resíduos não domiciliares, que não tem uma relação direta com a população.

Tabela 12: Estimativa de geração de resíduos sólidos no Brasil

Grandes Regiões	População Total		Geração de Resíduos [t/dia]		Geração <i>per capita</i> [kg/hab/dia]
	Valor	Percentual [%]	Valor	Percentual [%]	
Brasil	169.799.170	100	228.413	100,0	1,35
Norte	12.900.704	7,6	11.067	4,8	0,86
Nordeste	47.741.711	28,1	41.558	18,2	0,87
Sudeste	72.412.411	42,6	141.617	62,0	1,96
Sul	25.107.616	14,8	19.875	8,7	0,79
Centro-Oeste	11.636.728	6,9	14.297	6,3	1,23

Fonte: IBGE (2000a).

A figura 9, baseada na tabela 12, apresenta o percentual de resíduos gerados por região, onde se destaca a Região Sudeste, que é responsável pela geração de aproximadamente 62% dos resíduos sólidos no país.

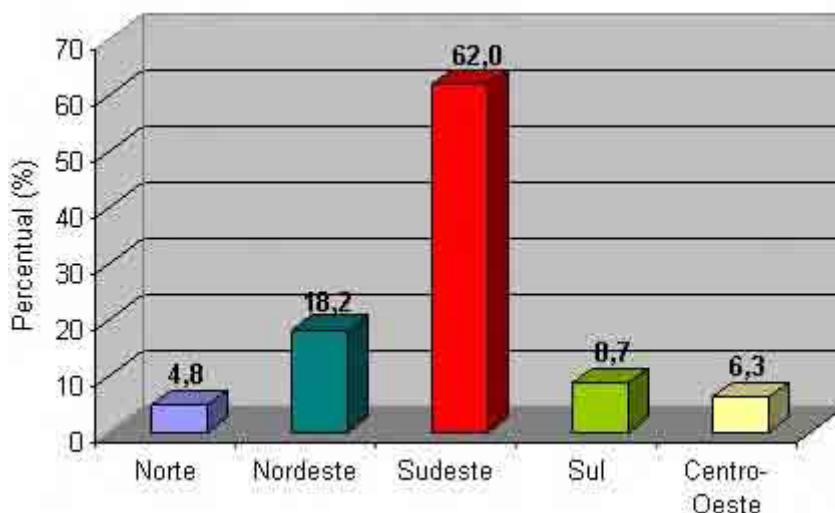


Figura 9: Quantidade de resíduos urbanos gerados no Brasil

Fonte: IBGE (2000a).

As figuras a seguir apresentam a destinação final dos resíduos sólidos no Brasil, considerando o percentual por quantidade (em peso) dos resíduos (figura 10) e na figura 11 o percentual pelo número de municípios.

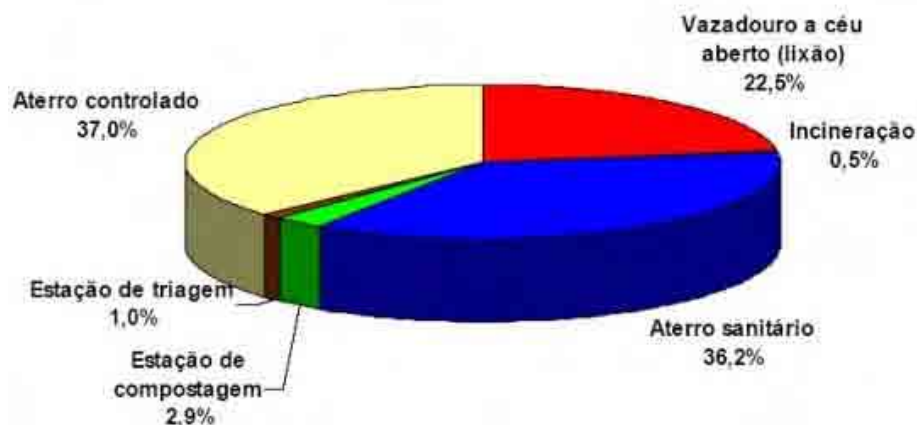


Figura 10: Destinação final dos resíduos em peso

Fonte: IBGE (2000a).

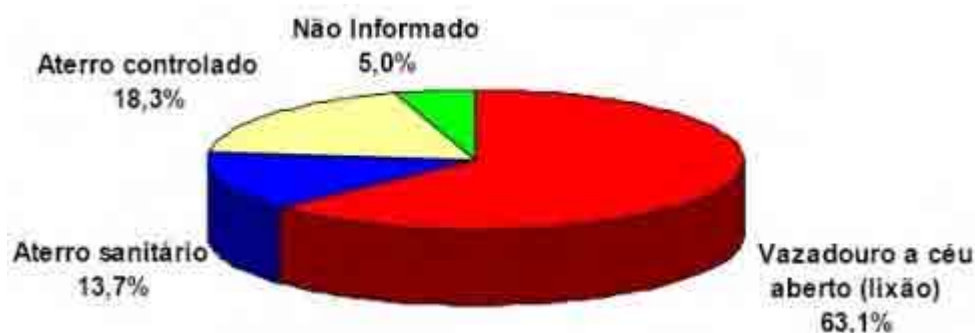


Figura 11: Destinação final dos resíduos por número de municípios

Fonte: IBGE (2000a).

De acordo com o apresentado nas figuras 10 e 11, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico indicou uma situação exageradamente favorável no que se refere a quantidade de lixo vazado nas unidades de destinação final, pois aproximadamente 73,2 % de todo o lixo coletado no Brasil estaria tendo um destino final adequado, em aterros sanitários ou controlados. Porém, quando se analisam as informações tomando-se por base o número de municípios, o resultado já não é tão favorável, pois 63,1% deles informam que depositam seus resíduos em lixões e apenas 13,7% declaram que possuem aterros sanitários. Por outro lado, dos 5.507 municípios brasileiros, 73,1% têm população inferior a 20.000 habitantes. Em tais municípios, 68,5% dos resíduos gerados são vazados em locais inadequados.

A tabela 13 e a figura 12 apresentam os tipos de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos por região brasileira, de acordo com o IBGE (2000a).

Tabela 13: Tipo de destinação final do RSU em percentual (%)

Destinação	Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
Vazadouro a céu aberto	21,3	57,2	48,3	9,8	25,9	22,0
Aterro controlado	37,0	28,3	14,6	46,5	24,3	32,8
Aterro sanitário	36,2	13,3	36,2	37,1	40,5	38,8
Estação de compostagem	2,9	0,0	0,2	3,8	1,7	4,8
Estação de triagem	1,0	0,0	0,2	0,9	4,2	0,5
Incineração	0,5	0,1	0,1	0,7	0,2	0,2
Locais não-fixos	0,5	0,9	0,3	0,6	0,6	0,7
Outros	0,7	0,2	0,1	0,7	2,6	0,2

Fonte: IBGE (2000a).

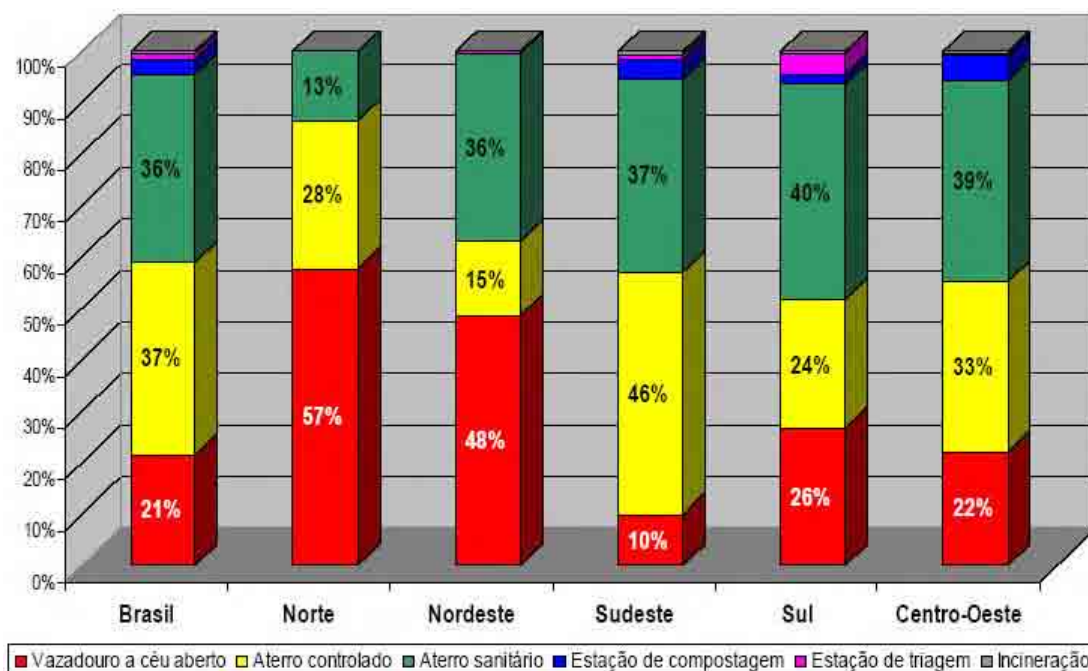


Figura 12: Tipo de destinação final por região

Fonte: IBGE (2000a).

Com relação à disposição em aterros sanitários, apresenta-se na figura 13 o destino do lixo coletado para aterro sanitário em municípios com mais de 100.000 habitantes.



Figura 13: Destino do lixo coletado para aterro sanitário em municípios com mais de 100.000 habitantes

Fonte: IBGE (2000b).

3.1.2 Estado de São Paulo

No Estado de São Paulo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, vem ao longo dos anos, desenvolvendo diversos levantamentos sobre as condições ambientais e sanitárias dos locais de destinação final de resíduos sólidos

domiciliares nos municípios paulistas que, a partir de 1997, passaram a constituir o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares.

As informações coletadas nas inspeções são homogeneizadas com a aplicação de um questionário padronizado referente as características locais, estruturais e operacionais de cada instalação de disposição de resíduo. As informações reunidas e devidamente analisadas permitem apurar o IQR – Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos e o IQC – Índice de Qualidade de Usinas de Compostagem, cuja pontuação varia de 0 a 10 (CETESB, 2004).

Em função dos índices IQR e IQC apurados, as instalações são enquadradas como *inadequadas*, *controladas* e *adequadas*, conforme o demonstrado na tabela 14.

Tabela 14: Enquadramento das instalações de destinação final de resíduos sólidos domiciliares em função dos índices de IQR e IQC

IQR/IQC	Enquadramento
$0,0 \leq \text{IQR/IQC} \leq 6,0$	Condições Inadequadas
$6,1 < \text{IQR/IQC} \leq 8,0$	Condições Controladas
$8,1 < \text{IQR/IQC} \leq 10,0$	Condições Adequadas

Fonte: CETESB (2004).

Saliente-se que as quantidades de resíduos geradas nos municípios foram calculadas com base na população urbana de cada cidade e nos índices de produção de resíduos por habitante.

Como referência oficial do número de habitantes, foi adotado o censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, publicado em 2000, atualizado para 2002, mediante a aplicação dos índices de crescimento fornecidos pelo IBGE (CETESB, 2004).

Para estimar a quantidade de resíduos dispostos, adotaram-se os índices de produção por habitante apresentados na tabela 15.

Tabela 15: Índices de produção "per capita" de resíduos sólidos domiciliares em função da população urbana

População [mil hab.]	Produção [kg de RSD/hab. · dia]
Até 100	0,4
100 a 200	0,5
200 a 500	0,6
Maior que 500	0,7

Fonte: CETESB (2004).

Foi criado no Inventário uma tabela demonstrando o enquadramento dos municípios do Estado de São Paulo quanto às condições da disposição dos resíduos domiciliares (de 1997 a 2003). Nesta tabela, pode-se verificar a qualidade das instalações de destinação de resíduos domiciliares nos municípios do Estado de São Paulo. A figura 14 apresenta a média dos IQRs presentes nesta tabela.

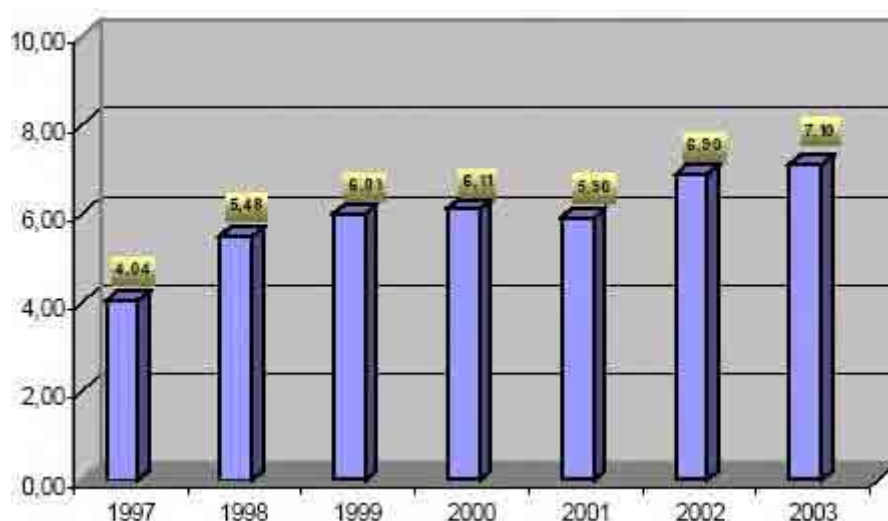


Figura 14: Evolução do IQR médio dos aterros no Estado de São Paulo - Período de 1997 a 2003

Fonte: CETESB (2004).

No que se refere à quantidade de resíduos domiciliares gerados no período computado, observa-se, uma melhora das condições de disposição dos resíduos, conforme demonstram a tabela 16 e a figura 15.

Com relação às quantidades geradas no período de 1997 a 2003, a situação dos resíduos dispostos de forma inadequada passaram de 30,7% para 9,8%.

Tabela 16: Situação Geral do Estado de São Paulo, quanto às quantidades de resíduos sólidos domiciliares gerados e a faixa de enquadramento do IQR

NOTA	1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003	
	Lixo [t/dia]	%	Lixo [t/dia]	%	Lixo [t/dia]	%	Lixo [t/dia]	%	Lixo [t/dia]	%	Lixo [t/dia]	%	Lixo [t/dia]	%
$0 \leq \text{IQR/IQC} \leq 6$	5.598	30,7	4.262	23,4	4.144	22,7	4.485	22,6	3.722	18,4	3.409	16,7	2.545	9,8
$6,1 < \text{IQR/IQC} \leq 8$	10.647	58,4	4.818	26,4	3.267	17,9	4.376	22,0	5.737	28,3	2.581	12,6	3.410	13,2
$8,1 < \text{IQR/IQC} \leq 10$	1.987	10,9	9.144	50,2	10.813	59,3	10.992	55,4	10.794	53,3	14.474	70,7	19.902	77,0
TOTAL	18.232	100,0	18.224	100,0	18.224	100,0	19.853	100,0	20.253	100,0	20.464	100,0	25.856	100,0

Fonte: CETESB (2004).

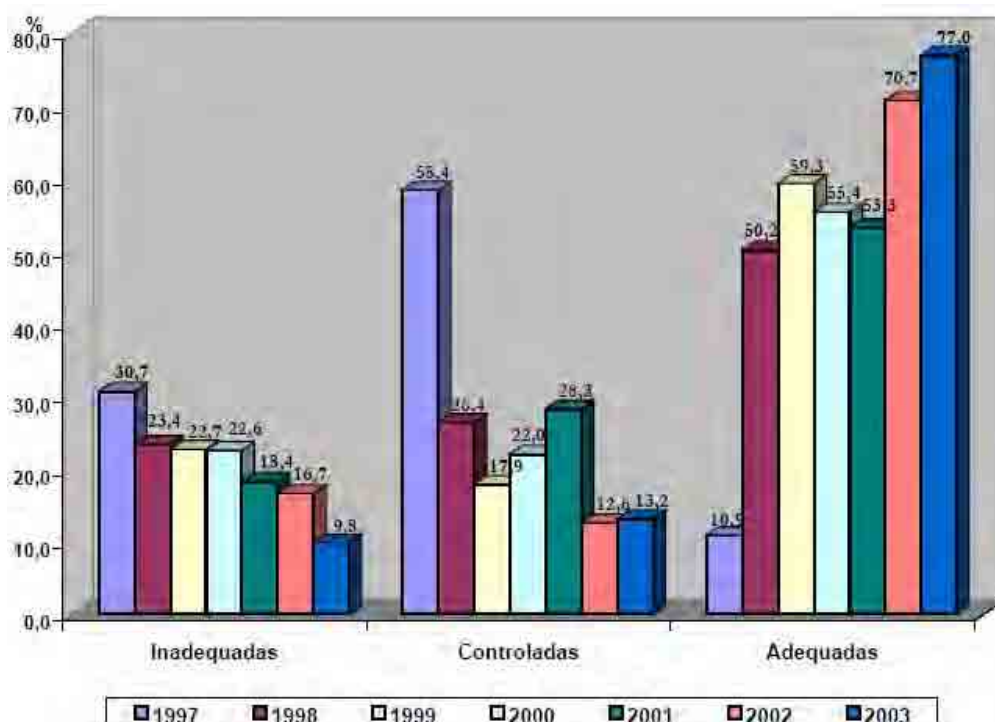


Figura 15: Distribuição da quantidade de resíduos sólidos domiciliares dispostos quanto à qualidade dos aterros – 1997 a 2003

Fonte: CETESB (2004).

A tabela 17 e a figura 16, que apresentam a distribuição dos municípios em termos da qualidade das instalações de destinação final de resíduos, apontam na direção de uma evolução. O número de municípios que dispõem os resíduos

domiciliares de forma adequada passou de 27, em 1997, para 270 em 2003. Em termos percentuais, verifica-se que, em 1997, 77,8% dos municípios do Estado encontravam-se em situação inadequada e que, em 2003, 72,2% dos municípios apresentam condição controlada e adequada.

Tabela 17: Situação geral do Estado de São Paulo quanto ao número de municípios e o seu enquadramento no IQR

NOTA	1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003	
	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%
$0 \leq \text{IQR}/\text{IQC} \leq 6$	502	77,8	363	56,5	324	50,4	301	46,7	234	36,4	191	29,6	179	27,8
$6,1 < \text{IQR}/\text{IQC} \leq 8$	116	18,0	163	25,3	136	21,2	146	22,7	156	24,3	157	24,3	196	30,3
$8,1 < \text{IQR}/\text{IQC} \leq 10$	27	4,2	117	18,2	183	28,5	197	30,6	253	39,3	297	46,1	270	41,9
TOTAL	645	100,0	643	100,0	643	100,0	644	100,0	643	100,0	645	100,0	645	100,0

Obs: As diferenças nos números totais de municípios em 1998, 1999, 2000 e 2001, deve-se ao fato de que alguns municípios dispunham seus resíduos domiciliares fora do Estado, nesta ocasião.

Fonte: CETESB (2004).

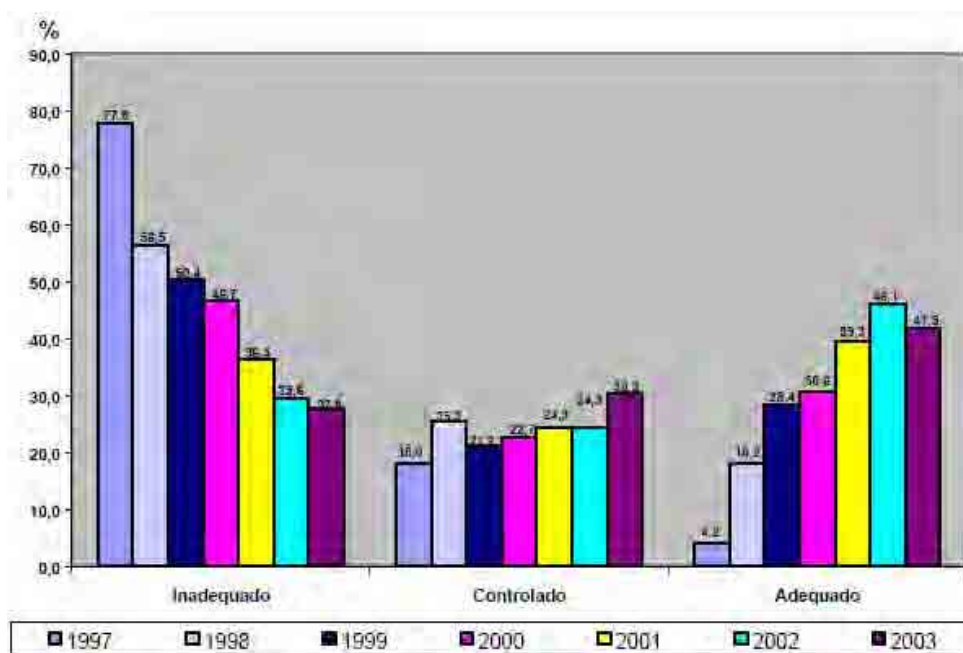


Figura 16: Distribuição dos municípios do Estado de São Paulo quanto à qualidade dos aterros – 1997 a 2003

Fonte: CETESB (2004).

Nos termos do Programa Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares, de 1997, para todos os municípios que apresentaram irregularidades na destinação final de

resíduos sólidos, foi proposta a assinatura de um Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta – TAC. Nos TACs constam propostas, às administrações municipais, para as usinas de compostagem, aterros e lixões, visando à sua regularização ou encerramento, com a implantação de uma solução definitiva e regularmente implantada. Em todos os casos, as ações propostas devem possibilitar a adequação técnica e ambiental das instalações, seguidas de seu correspondente licenciamento ambiental, bem como a remediação de passivos ambientais existentes.

Em 2003, verifica-se que 431 municípios do estado tem TACs assinados e em vigência, conforme detalhado na tabela 18.

Tabela 18: Número de Municípios do Estado de São Paulo com TAC em vigência e o respectivo percentual, em relação ao total de municípios do Estado

	Situação em 1998		Situação em 1999		Situação em 2000		Situação em 2001		Situação em 2002		Situação em 2003	
TAC	Nº Munic.	%	Nº Munic.	%	Nº Munic.	%	Nº Munic.	%	Nº Munic.	%	Nº Munic.	%
Sim	348	54,0	422	65,4	436	67,6	433	67,1	444	68,8	431	66,8
Não	297	46,0	223	34,6	209	32,4	212	32,9	201	31,2	214	33,2
Total	645	100,0	645	100,0	645	100,0	645	100,0	645	100,0	645	100,0

Fonte: CETESB (2004).

3.1.3 Vale do Paraíba

O Vale do Paraíba é uma importante região do Estado de São Paulo apresentando em sua composição 39 municípios, ocupando uma área de 16.181 km² e abrigando 2.166.813 habitantes (IBGE, 2000c). A sua localização geográfica em relação ao Estado de São Paulo é demonstrada na figura 17.



Figura 17: Mapa do Vale do Paraíba e sua localização no Estado de São Paulo

Fonte: SEADE (2004).

Para a análise da situação da disposição de resíduos sólidos no Vale do Paraíba, foram utilizados os dados presentes no Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares realizado pela CETESB. Na região existem regionais da CETESB que são responsáveis pelas inspeções e avaliações dos locais de disposição de resíduos sólidos domiciliares. São elas: Agência Ambiental de Aparecida, Agência Ambiental de Jacareí, Agência Ambiental de Taubaté e Agência Ambiental de Ubatuba.

No Anexo I, apresenta-se o enquadramento dos municípios do Vale do Paraíba quanto às condições da disposição dos resíduos sólidos domiciliares no período de 1997 a 2003. A coluna da quantidade de lixo gerada (Anexo I) é baseada na população da cidade atualizada (ver *site* do IBGE) e na aplicação do índice de produção de resíduos “*per capita*” (tabela 15). Os enquadramentos das instalações de destinação final de resíduos sólidos domiciliares apresentados no Anexo I estão em função dos índices de IQR e IQC já apresentados na tabela 14.

De acordo com o enquadramento do IQR e IQC dos municípios do Vale do Paraíba (Anexo I) baseado nos dados do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domésticos realizado pela CETESB, pode-se observar que todos os municípios do Vale do Paraíba produziram no período, em média, 1.039,4 t de RSD/dia, o que contabiliza para o ano de 2003 a geração de 379.381 t de RSD. A cidade que destina a maior quantidade de RSD inadequadamente é Guaratinguetá, embora tenha obtido

uma sensível melhora na disposição nos anos de 2002 e 2003. A maior quantidade de resíduos dispostos de forma controlada está na cidade de Queluz. São José dos Campos é a cidade com maior produção de lixo, porém, destina seu lixo de forma adequada e pode servir de exemplo para a região. Caçapava, Campos do Jordão e Santo Antônio do Pinhal dispõem seus RSDs no aterro da empresa SASA em Tremembé, Paraibuna dispõe seu RSD em São José dos Campos e Santa Branca em Jacareí. Estas cidades apresentam condições adequadas de disposição de resíduos e ajudam a elevar o IQR do Vale do Paraíba. Baseado em CETESB (2003) e CETESB (2004) elaborou-se a figura 18.

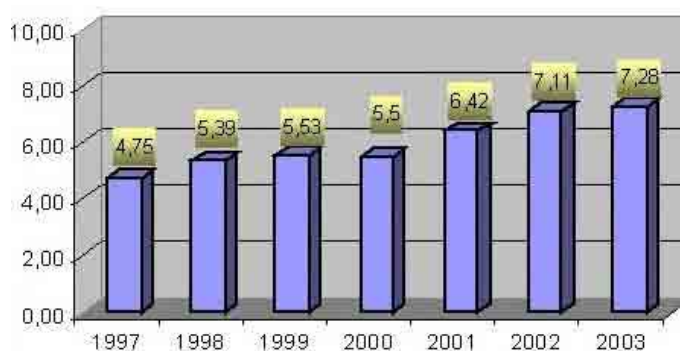


Figura 18: Evolução do IQR médio dos aterros no Vale do Paraíba - Período de 1997 a 2003

Fonte: elaborado a partir de CETESB (2004).

Com relação à qualidade da disposição de resíduos domiciliares gerados no período computado, observa-se uma melhora das condições de disposição dos resíduos, conforme o demonstrado na figura 18.

Analisando as quantidades de resíduo geradas no período de 2002 a 2003 nota-se que a situação dos resíduos dispostos de forma inadequada passou de 23,2% para 22,8%, conforme pode ser observado na tabela 19.

Tabela 19: Situação Geral dos municípios do Vale do Paraíba, quanto às quantidades de RSD gerados e a faixa de enquadramento do IQR no período de 2002 a 2003

NOTA	2002		2003	
	Lixo [t/dia]	%	Lixo [t/dia]	%
$0 \leq \text{IQR/IQC} \leq 6$	232,3	23,2	237,3	22,8
$6,1 < \text{IQR/IQC} \leq 8$	6,5	0,6	13,2	1,3
$8,1 < \text{IQR/IQC} \leq 10$	763,8	76,2	789,9	75,9
TOTAL	1.002,6	100	1.040,4	100

Fonte: CETESB (2003) para o ano de 2002 e CETESB (2004) para o ano 2003.

Observou-se também uma pequena redução da condição adequada para o mesmo período. A figura 19 (baseada em CETESB, 2003) apresenta o enquadramento do IQR no Vale do Paraíba no ano de 2002.



Figura 19: Faixa de enquadramento do IQR-2002

A figura 20 baseada em CETESB (2004), apresenta o enquadramento do IQR para o ano de 2003, na qual pode ser observado um sensível aumento nas condições controladas em relação ao ano de 2002.

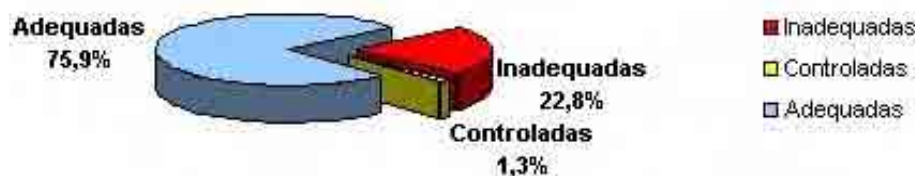


Figura 20: Faixa de enquadramento no IQR-2003

A tabela 20 e a figura 21, que apresentam a distribuição dos municípios em termos da qualidade das instalações de destinação final de resíduos, também apontam na direção de uma evolução. O número de municípios que dispõem os resíduos domiciliares de forma adequada passou de 8, em 1997, para 20 em 2003.

Tabela 20: Situação geral do Vale do Paraíba quanto ao número de municípios e o seu enquadramento no IQR

NOTA	1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003	
	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%	Nº de Munic.	%
$0 \leq \text{IQR/IQC} \leq 6$	26	66,7	21	53,8	22	56,4	19	48,7	19	48,7	15	38,5	13	33,3
$6,1 < \text{IQR/IQC} \leq 8$	5	12,8	4	10,3	5	12,8	4	10,3	2	5,1	3	7,7	6	15,4
$8,1 < \text{IQR/IQC} \leq 10$	8	20,5	14	35,9	12	30,8	16	41,0	18	46,2	21	53,8	20	51,3
TOTAL	39	100	39	100	39	100	39	100	39	100	39	100	39	100

Fonte: elaborado a partir de dados de CETESB (2004).

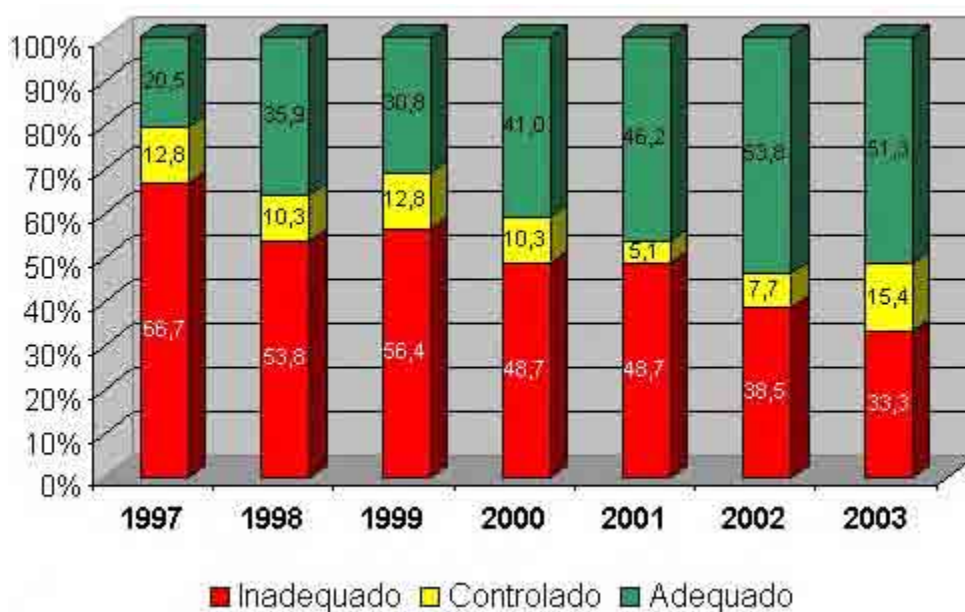


Figura 21: Distribuição dos municípios do Vale do Paraíba quanto à qualidade dos aterros – 1997 a 2003

Fonte: elaborado a partir de dados de CETESB (2004).

Em termos percentuais, verificou-se que, em 1997, 66,7% dos municípios do Vale do Paraíba encontravam-se em situação inadequada e que, em 2003, 66,7% dos municípios apresentaram condição controlada e adequada.

3.2 ESCOLHA DOS MUNICÍPIOS DESTE ESTUDO

3.2.1 Guaratinguetá e municípios vizinhos

O município de Guaratinguetá possui uma população de 104.219 habitantes (IBGE, 2000c) e está localizado em uma sub-região do Vale do Paraíba conhecida como Médio Vale no qual também estão localizados os municípios de Aparecida, Lorena, Cunha, Potim, Piquete, Cruzeiro, Cachoeira Paulista e Roseira.

A figura 22 apresenta uma imagem obtida por satélite do município de Guaratinguetá.



Figura 22: Município de Guaratinguetá

Fonte: Google (2005).

Esta região, entre outras sub-regiões, foi beneficiada com o grande crescimento industrial ocorrido no Vale do Paraíba na década de 1950 e apresenta diversos setores industriais importantes como o de alimentos, química, papel, mecânica pesada entre outros.

O município de Guaratinguetá possui uma área de 751 km² (IBGE, 2000c), que faz dentro do Estado de São Paulo, divisa com os municípios de Lorena, Aparecida, Potim, Cunha, Piquete, Lagoinha, Pindamonhangaba e Campos do Jordão.

Dentre estes municípios que podem ser considerados como “vizinhos” somente Aparecida e Lorena não dispõem seus resíduos de forma adequada, conforme pode ser observado no Anexo I deste trabalho. O município de Roseira também dispõe o seu resíduo sólido inadequadamente e embora não faça divisa com Guaratinguetá está relativamente próximo.

Neste contexto escolheu-se considerar a disposição dos resíduos sólidos gerados nos municípios de Guaratinguetá, Lorena, Aparecida e Roseira em um aterro sanitário regional localizado no município de Guaratinguetá.

Dentre os municípios considerados escolheu-se Guaratinguetá como o local para a construção do aterro sanitário regional devido ao fato de este ser o município que dispõe a maior quantidade de resíduos sólidos inadequadamente. Fatores importantes como proximidade física e serviço rodoviário podem justificar esta escolha. A figura 23 apresenta a localização dos municípios no Vale do Paraíba.

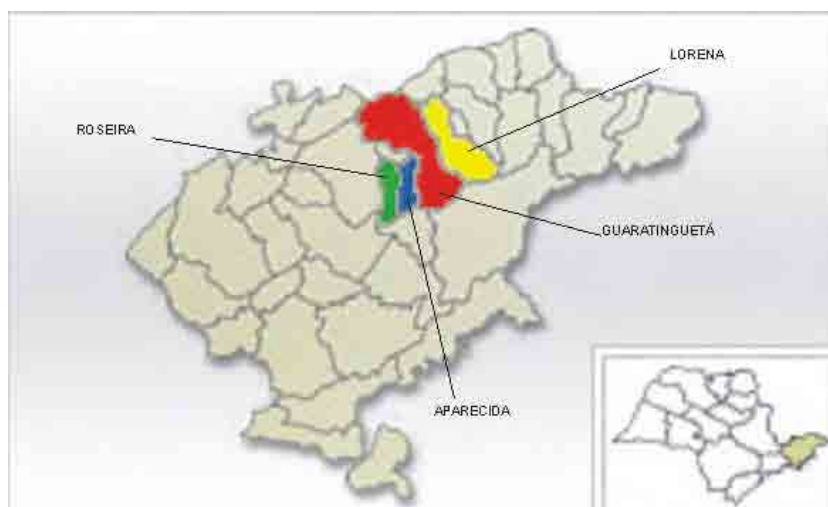


Figura 23: Mapa da localização dos quatro municípios no Vale do Paraíba

Fonte: modificado de SEADE (2004).

A região demonstrada no mapa ocupa uma área de 1.416 km² e a sua população total é de 225.690 habitantes, apresentando taxa de urbanização de 96% (IBGE, 2000c). A justificativa para tal escolha também baseia-se no Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares que vem sendo publicado desde 1997 pela CETESB.

Neste Inventário verifica-se que os quatro municípios abordados para estudo dispõem seus RSD de forma inadequada e pouco tem sido feito para a mudança deste quadro, conforme demonstra a figura 24.

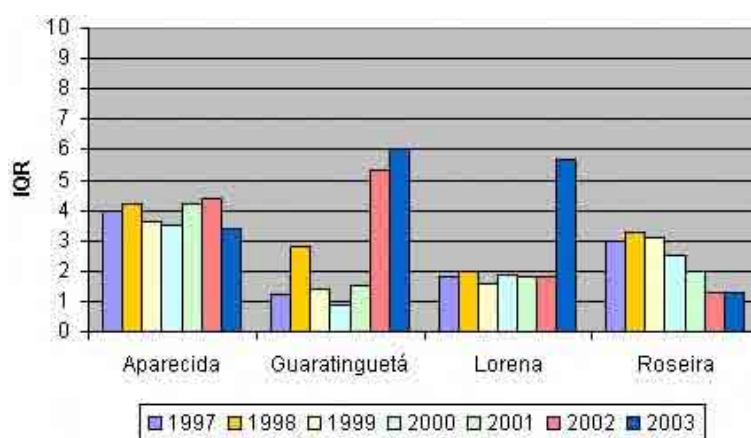


Figura 24: Evolução do IQR para os municípios do estudo - Período de 1997 a 2003

Fonte: Elaborado a partir de CETESB (2004).

A tabela 21 apresenta os dados populacionais, área, quantidade de lixo gerada e o IQR (ano de 2003) dos municípios escolhidos para o estudo.

Tabela 21: Dados relevantes ao estudo

Cidade	População urbana [hab.]	População total [hab.]	Área [km ²]	Disposição de RSD [t/dia]	IQR (2003)
Aparecida	34.382	34.904	121	13,8	3,4
Guaratinguetá	99.162	104.219	751	50,9	6,0
Lorena	75.097	77.990	414	30,9	5,7
Roseira	8.013	8.577	130	3,4	1,3
Total	216.654	225.690	1.416	99	-

Fonte: IBGE (2000c) para a população e área e CETESB (2004) para os demais dados.

Somente no ano de 2003, os quatro municípios dispuseram em condições inadequadas 36.135 t de RSD. Pela tabela apresentada, verifica-se que a cidade que possui o maior IQR é Guaratinguetá e o menor IQR é Roseira.

Os lixões existentes nestas cidades encontram-se saturados e a necessidade da construção de um aterro sanitário é plausível, visto que multas por inadequação de disposição de resíduos vêm sendo aplicadas pelas agências ambientais da CETESB na região.

Neste contexto, baseado em um projeto de construção de um aterro sanitário já elaborado no ano de 2000 (ASG, 2000) e com as informações obtidas nas diversas participações em reuniões da Comissão Especial de Recursos Hídricos e Saneamento realizadas no Conselho Estadual de Meio Ambiente - CONSEMA, apresenta-se como proposta para este trabalho a cooperação intermunicipal (a ser apresentada no item a seguir) dos quatro municípios citados para a elaboração e construção conjunta de um aterro sanitário na cidade de Guaratinguetá.

Nestas reuniões notou-se que há uma tendência de se repassar recursos provenientes das esferas de governo mais facilmente a cidades que resolverem seus problemas de forma conjunta (regionalmente).

Sendo a disposição de RSD um problema existente nos quatro municípios, justifica-se tal união, de modo que esta visa alcançar objetivos comuns, mediante soma de esforços e a articulação de recursos físicos, financeiros e tecnológicos, na busca de uma solução para a disposição dos RSD provenientes dos quatro municípios.

3.2.1.1 Dados climáticos

Na tabela 22 podem ser observados os valores de temperatura, umidade relativa, pressão e precipitação coletados no município de Guaratinguetá.

Tabela 22: Dados de temperatura, umidade, pressão e precipitação no período de 1976 a 1999

Anos	Temperaturas médias [°C]			Umidade relativa média [%]	Pressão média [mb]	Precipitação total [mm]
	<i>geral</i>	<i>máxima</i>	<i>mínima</i>			
1974	23,8	28,1	15,8	62	954,0	1.059,6
1975	22,1	28,0	16,3	66	953,4	1.500,3
1976	21,0	26,1	15,9	67	952,8	2.028,0
1977	23,3	29,9	16,7	66	953,5	1.065,0
1978	22,2	28,4	16,3	65	954,5	1.122,6
1979	21,4	27,1	15,3	64	953,7	1.062,4
1980	23,0	27,6	16,7	64	953,8	1.039,1
1981	22,5	27,7	16,2	68	953,7	1.130,9
1982	22,7	27,2	16,7	72	953,8	1.299,7
1983	22,5	27,0	17,0	75	953,4	1.638,9
1984	23,5	28,7	17,7	69	953,2	841,4
1985	22,6	27,7	16,0	70	953,4	1.556,6
1986	22,9	27,9	16,4	70	954,2	1.281,7
1987	22,9	28,0	15,9	66	953,7	1.389,4
1988	22,7	27,8	17,2	70	954,5	1.462,4
1989	22,5	27,1	16,9	72	954,0	1.339,0
1990	23,1	28,0	17,2	70	954,3	928,6
1991	22,9	27,8	17,1	70	954,2	1.541,2
1992	22,8	27,4	17,6	72	954,2	1.311,3
1993	23,2	27,9	17,3	71	954,4	1.573,7
1994	23,5	28,7	17,8	68	954,8	937,4
1995	23,8	28,4	17,6	69	954,4	1.528,5
1996	23,3	27,4	17,3	70	954,8	1.449,3
1997	24,2	28,6	17,7	66	954,5	1.245,3
1998	23,9	28,1	18,0	68	954,9	1.348,2
1999	23,4	25,3	17,3	67	955,0	1.038,9
Total	595,7	721,9	437,9	1.777	24.805,1	33.719,4
Média	22,9	27,8	16,8	68	954,0	1.296,9

Fonte: DADOS (não datado).

Calculando o desvio-padrão³ dos valores de precipitação no período de 1974 a 1999 (tabela 22) pode-se obter os anos considerados como secos e chuvosos.

3

$$s = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n \cdot (n-1)}}$$

S: desvio-padrão

x: valores disponíveis

n : quantidade de valores disponíveis

A média da precipitação (período de 1974 a 1999) somada ao valor calculado do desvio-padrão resulta em um valor máximo de precipitação. O ano com precipitação acima do valor máximo calculado pode ser considerado como chuvoso.

Para a obtenção do ano considerado como seco, utiliza-se do mesmo raciocínio ora apresentado, porém deve-se subtrair o valor da média da precipitação (período de 1974 a 1999) do valor do desvio-padrão calculado. O ano com precipitação inferior ao valor mínimo calculado pode ser considerado como seco.

O exposto pode ser observado na figura 25.

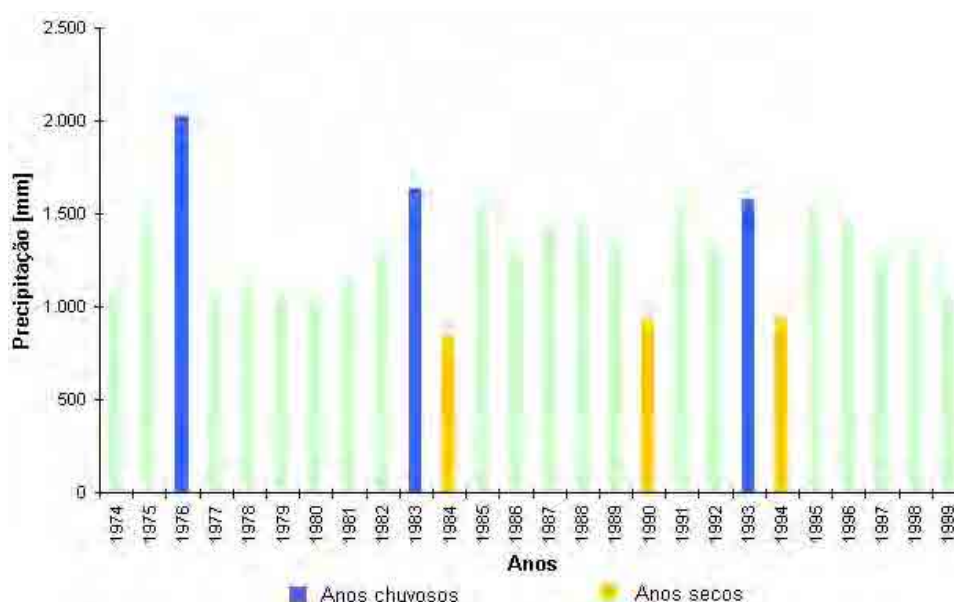


Figura 25: Precipitação anual na cidade de Guaratinguetá

Fonte: DADOS (não datado).

Para o caso deste estudo, o valor da precipitação dentre os outros apresentados é o muito importante, pois conforme já apresentado na tabela 10 é através do valor da precipitação anual que é obtido o valor para a constante de decaimento (k) necessária à quantificação do biogás.

3.2.2 Cooperação intermunicipal

Nesta seção, o objetivo principal é tratar de forma simplificada uma das diversas formas de cooperação intermunicipal e apresentá-la com o intuito de trazer esclarecimento e justificar a proposta adotada neste trabalho.

Muitos municípios não possuem recursos suficientes para a implantação de serviços, o que os coloca, quase sempre, em situação de dependência em relação aos grandes municípios.

Em áreas específicas, tais como educação, saúde, transportes, saneamento básico e outras, os problemas estão de tal sorte entrelaçados e entranhados na órbita de dois ou mais municípios, que os governos municipais precisam usar um instrumento operacional, de grande valia, para maior rendimento de seus esforços, evitando dispersão de recursos humanos e materiais para maximização do aproveitamento dos recursos municipais (CEPAM, 2001).

Segundo CRUZ (2001), vários municípios têm inovado e criado novas formas de prestação de serviços e de organização, bem como de articulação. Tomou corpo, nessa conjuntura, a discussão de “parceria” entre os municípios, chamada por alguns de cooperação horizontal, ou ainda, de cooperação intermunicipal. Os municípios passam a discutir alguns dos seus problemas conjuntamente.

Nessa situação, os pactos, os “consórcios” como sociedade civil sem fins lucrativos, as agências, as redes, as empresas, as associações, os fóruns intermunicipais, as autarquias e as câmaras intermunicipais são formas que os municípios têm encontrado para se associar e resolver problemas comuns.

A aplicabilidade de uma ação conjunta, independente do tipo, vai depender da necessidade local e do interesse dos municípios envolvidos.

Dentre as formas de cooperação intermunicipal apresentadas, uma que se destaca e vem sendo amplamente utilizada é o consórcio intermunicipal, motivo pelo qual será melhor detalhado neste estudo.

Atualmente entrou em vigor a Lei nº 11.107 de 6 de Abril de 2005 que dispõe sobre normas gerais para a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios

contratarem consórcios públicos para a realização de objetivos de interesse comum (PLANALTO, 2005).

O consórcio intermunicipal proposto neste trabalho deve ser baseado nesta lei.

Define-se consórcio intermunicipal como uma associação de municípios, criada para a execução de atividades e/ou serviços públicos de interesse comum dos partícipes. Visa alcançar objetivos comuns, mediante soma de esforços e a articulação de recursos físicos, financeiros e tecnológicos, na busca de soluções dos problemas compartilhados (CEPAM, 2001). Ainda segundo o CEPAM (2001), não são entidades supramunicipais e nem possuem autonomia política, mas sim organizações de auxílio e de cooperação com as unidades que as integram.

Os consórcios, na forma de associações ou de pactos, instrumentalizam a união entre municípios e têm o intuito de resolver problemas e implementar ações de interesse comum, por meio da articulação e racionalização dos recursos de cada esfera de poder. São um instrumento que tem viabilizado o planejamento local e regional, auxiliando na organização de planos, avaliações e controles; a superação de problemas locais; possibilitando ganhos de escala de produção; a racionalização no uso de recursos financeiros, humanos e tecnológicos; a modernização administrativa, por meio da padronização de suprimentos e procedimentos administrativos; o aumento da capacidade de cooperação técnica; e a implementação e regulação de políticas públicas regionalizadas (CEPAM, 2001). Têm sido utilizados por muitas administrações como um captador de recursos já que muitos governos estaduais e ministérios, ao longo dos anos, vêm estimulando a formação de consórcios, bem como priorizando o atendimento às demandas regionais.

Os consórcios são uma forma de organizar a regionalização de forma ascendente, isto é, é formado a partir dos municípios, de suas características locais e suas dificuldades, para discutir ações regionais, sem que os municípios percam a sua autonomia. É uma “parceria” baseada numa relação de igualdade jurídica, na qual todos os participantes – municípios – têm a mesma importância (JUNQUEIRA et al., 2002).

Os consórcios possibilitam a territorialização dos problemas. Existem diversos consórcios no país e dentre estes pode-se citar algumas áreas como: saúde,

recuperação e proteção ambiental, recursos hídricos, agricultura, abastecimento, desenvolvimento, informática, resíduos sólidos entre outros. Dentro deste contexto, apresentam-se na tabela 23 exemplos de consórcios intermunicipais para aterros sanitários.

Tabela 23: Exemplos de consórcios intermunicipais para aterro sanitário

Estado	Nome do Projeto	Municípios participantes
São Paulo	CIAS	Cajamar, Campo Limpo Paulista, Jundiaí, Louveira, Várzea Paulista e Vinhedo
Rio Grande do Sul	Citresu	Bom Progresso, Humaitá, Sede Nova, São Martinho, Criciúma, Campo Novo e Três Passos
Santa Catarina	–	Campo Alegre, Rio Negrinho e São Bento do Sul

Fonte: CRUZ (2001).

Segundo JUNQUEIRA et al.(2002), nas áreas de saúde, produção e abastecimento, informática, desenvolvimento e proteção ambiental, a maior parte dos consórcios existentes está formalizada como sociedade civil sem fins lucrativos. Nas áreas de obras, cultura e assistência social, os consórcios se estruturam por meio de pactos.

É fundamental para qualquer ação conjunta a cooperação por parte dos prefeitos na busca de solução para seus problemas e conflitos político-partidários.

Enfim, conclui-se que a cooperação intermunicipal pode ser um valioso instrumento para a gestão de resíduos sólidos nos municípios em estudo, dando uma solução conjunta aos problemas existentes, visto que estes municípios enfrentam problemas financeiros e dificilmente resolverão seus problemas individualmente.

CAPÍTULO 4 ASPECTOS CONSTRUTIVOS E ENERGÉTICOS DO ATERRO

4.1 TECNOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO

Para TEIXEIRA (2000), o aterro sanitário é uma forma de disposição de resíduo sólido urbano mas é, também, uma forma de tratamento da matéria orgânica presente no resíduo sólido, uma vez que as degrada. Para que um aterro possa ser considerado como sanitário tem que apresentar as seguintes características:

- impermeabilização de fundo e laterais;
- drenagem e tratamento de chorume;
- drenagem e tratamento de gases;
- drenagem de águas pluviais;
- compactação; e,
- cobertura diária do resíduo.

Segundo DERISIO (1992), em 1986, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) baixou uma resolução determinando que o licenciamento de atividades modificadoras do ambiente, tais como aterros sanitários, processamento e destino final de resíduos tóxicos ou perigosos, entre outras atividades, dependem de elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA). Desta forma, a avaliação da localização destes empreendimentos deve ser devidamente relatada, considerando os aspectos de caráter específico de cada sistema.

Para TAUKE-TORNISIELO et al. (1995), as exigências econômicas e sociais, obrigam a ocupação cada vez mais racional do solo, fazendo-se necessária a seleção criteriosa de locais para a disposição de resíduo sólido, de modo a preservar os recursos naturais peculiares a cada região.

Conforme IPT / CEMPRE (2000), uma área adequada para a instalação de um aterro sanitário é aquela que proporcionará menores riscos ao ambiente, à saúde

pública e menores gastos com o preparo, operação e encerramento do aterro. Os trabalhos de viabilização de uma área exigem o equilíbrio entre aspectos sociais, alterações no ambiente e custos decorrentes do empreendimento.

Para IPT / CEMPRE (2000), busca-se uma área que atenda de melhor forma aos seguintes aspectos:

- menor potencial para geração de impactos ambientais;
- estar fora de áreas de restrição ambiental;
- solos menos permeáveis;
- solos mais espessos e menos sujeitos aos processos da dinâmica superficial (erosão, escorregamentos, colapsos, etc.);
- declividade apropriada;
- menor influência com fauna e flora;
- menor influência com vizinhança;
- distância de habitações, cursos d'água e rede de alta tensão;
- maior vida útil para o aterro, ou seja, máxima capacidade de armazenamento de resíduo sólido;
- baixos custos de implantação e operação;
- menores gastos com infra-estrutura;
- menor distância da zona urbana geradora de resíduo;
- menor complexidade para o projeto; e,
- disponibilidade de material de empréstimo.

Conforme IPT / CEMPRE (2000), o dimensionamento do aterro sanitário depende:

- da quantidade e tipologia dos resíduos a serem dispostos;
- das características fisiográficas e ambientais; e,
- do uso futuro da área a aterrar.

Segundo LIMA (1991), nos aterros sanitários deve-se ter o controle dos poluentes do solo, da água e do ar.

Para IPT / CEMPRE (1995), o projeto básico de um aterro sanitário, normalmente, é composto por:

- planta da situação e locação;
- planta baixa;
- planta de locação das investigações, ensaios e pontos de amostragem;
- planta e detalhes do sistema de drenagem superficial;
- planta e detalhes do sistema de biogás;
- planta e detalhes do sistema de drenagem de água subterrânea;
- planta e detalhes do sistema de drenagem de chorume;
- planta e detalhes das lagoas de tratamento de chorume, tanques, etc.;
- detalhes da execução das células;
- perfis longitudinais e transversais;
- detalhes da área de emergência;
- detalhes da área administrativa, balança, etc.;
- plantas e detalhes do sistema de monitoramento;
- planta, detalhes e especificações técnicas do sistema de fechamento;
- especificações técnicas diversas;
- cronograma e planilha de custos;
- memoriais descritivos e de cálculo; e,
- orientação para licitação pública.

A elaboração do projeto de um aterro sanitário deve seguir as Normas Técnicas e a legislação específica (federal, estadual e municipal).

A correta operação de um aterro sanitário é fundamental para que o resíduo seja disposto com segurança e de forma otimizada. Deve ser executada por mão de obra devidamente qualificada, supervisionada por técnicos e, principalmente, cumprindo as diretrizes de um projeto pré-elaborado e aprovado pelas autoridades competentes.

Segundo IPT / CEMPRE (2000), o processo de aterramento de resíduo sólido é executado sob uma das três formas tradicionalmente empregadas: método de trincheira ou vala, método de rampa e método de área. Assim:

- método de trincheira ou vala: consiste na abertura de valas, onde o resíduo sólido é disposto, compactado e, posteriormente, coberto com solo;

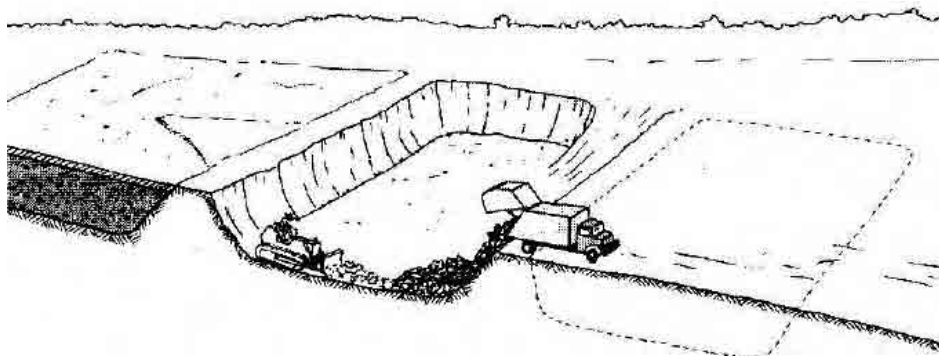


Figura 26: Método de trincheira ou vala

Fonte: IPT / CEMPRE (2000).

- método de rampa: conhecido, também, como método da escavação progressiva, empregado em áreas de meia encosta, onde o solo natural ofereça boas condições para ser escavado. É fundamentado na escavação da rampa, onde o resíduo sólido é disposto e compactado pelo trator e, posteriormente, coberto com solo; e,

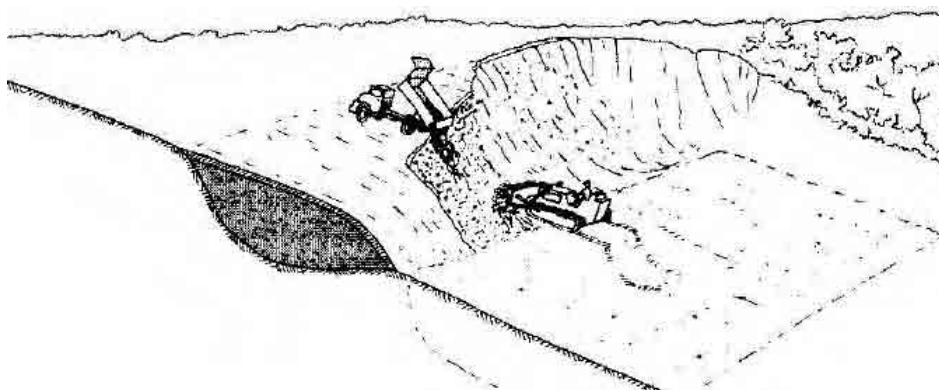


Figura 27: Método de rampa

Fonte: IPT / CEMPRE (2000).

- método de área: é empregado, geralmente, em locais de topografia plana e lençol freático raso.

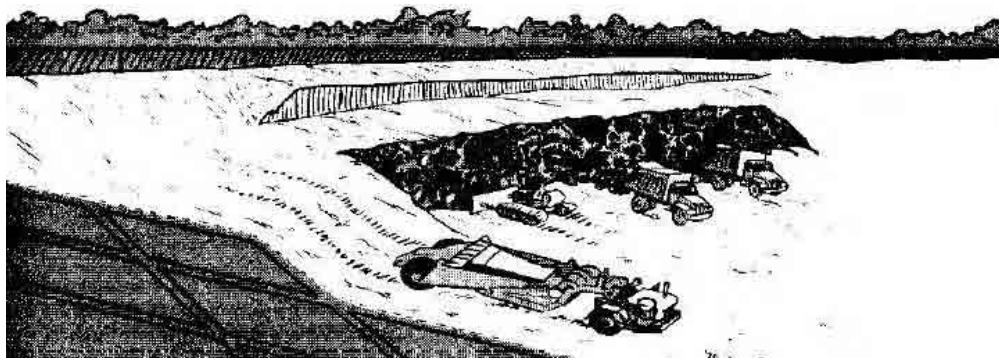


Figura 28: Método de área

Fonte: IPT / CEMPRE (2000).

LIMA (1991) entende que o método da rampa pode ser aplicado em áreas planas, não sendo necessário uma encosta natural para o início do processo de aterramento. Neste caso, a encosta é formada pelas escavações realizadas no local.

Para LIMA (1991), o método da área é aplicado em locais onde a topografia se apresenta de forma irregular e o lençol freático está em seu limite máximo. Este método exige o transporte e aquisição de terra para a cobertura e em alguns casos se faz necessário a construção de diques ou valas de retenção de águas pluviais.

Segundo LIMA (1991), quanto ao sistema de operação, os aterros podem ser classificados em aterros de superfície e aterros em depressões. Assim:

- aterros de superfície: são aqueles executados em regiões planas; os métodos operacionais empregados (de trincheira, de rampa ou de área) dependem de diversos fatores, como a disponibilidade de material de cobertura, vias de acesso que facilitam as operações de descarga, tipo de solo, dimensões da área, etc.; e,
- aterros de depressões: são aqueles executados em locais específicos como, por exemplo, em depressões, ondulações e em pedreiras extintas. Em geral, são escolhidas áreas de baixo valor comercial.

A opção por um método depende das características físicas e geográficas da área e da quantidade de resíduo sólido a dispor.

4.1.1 Medidas de proteção ambiental

4.1.1.1 Tratamento da base e Impermeabilização

Sob o sistema de tratamento de base (fundo) do aterro sanitário poderá ser conveniente, dependendo da profundidade do nível d'água e de sua variação sazonal, projetar-se um sistema de drenagem de fundação para a coleta de águas naturais do subsolo. Esse sistema deverá, também, ser acessado pelo sistema de monitoramento ambiental, de maneira a atestar as suas condições de desempenho, tanto durante a vida útil como após o fechamento do aterro (IPT / CEMPRE, 2000).

A camada de solo que servirá de base para o aterro deve ser a mais homogênea e trabalhável possível, isenta de blocos grandes e matacões, com permeabilidade em torno de 10^7 cm/s, como os depósitos de argilas, siltes e suas misturas (CETESB, 1997c).

Ainda segundo CETESB (1997c) a consistência ideal do solo deve ser de média a dura (índice de consistência entre 0,5 e 1,0), com resistência à compressão simples situada entre 0,50 e 4,00 kgf/cm².

Quanto à impermeabilização do terreno, podem ser utilizadas camadas de solos argilosos compactados e membranas sintéticas, também conhecidas como geomembranas (mantas de PEAD - Polietileno de Alta Densidade, de dois milímetros de espessura). Seja qual for o tipo de material adotado, este deverá, além de conferir estanqueidade, apresentar resistência mecânica e química à eventual agressividade dos materiais aterrados e dos líquidos e gases gerados e uma vida útil longa, suficiente para que ocorram todos os processos naturais de estabilização dos resíduos.

O sistema de tratamento da base (fundo) e a impermeabilização tem a função de proteger a fundação do aterro, evitando-se a contaminação do subsolo e aquíferos subjacentes pela migração de chorume e/ou do biogás (IPT / CEMPRE, 1995).

4.1.1.2 Cobertura

O sistema de cobertura, diária, intermediária e final, tem por funções: proteger a superfície das células, minimizando impactos ao ambiente; eliminar a proliferação de vetores; diminuir a taxa de formação de chorume; reduzir a exalação de odores; impedir a catação; permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro; e, eliminar a queima de resíduo e a saída descontrolada do biogás (IPT / CEMPRES, 2000).

Para SEWELL (1998), a cobertura diária deve ser realizada, após o término de cada jornada de trabalho, com uma camada de cerca de 0,15 m de terra compactada.

A cobertura intermediária, camada de solo que varia de 0,20 a 0,60 m, é necessária em locais onde a superfície de disposição ficará inativa por períodos mais prolongados, próximos de um mês, aguardando, por exemplo, a conclusão de um patamar para início do seguinte (IPT / CEMPRES, 2000).

Segundo LIMA (1991), o recobrimento definitivo ou o acabamento final do aterro é indispensável pela necessidade de se incorporar a área aterrada ao meio urbano, em condições de uso, sem causar incômodo à vizinhança. Varia de 0,60 a 1 m e, em seguida, uma fina camada de terra fértil, onde algumas espécies vegetais, resistentes à temperatura, possam ser cultivadas. Para SEWELL (1998), concluído o aterro sanitário, é preciso cobri-lo com, pelo menos, 0,50 m de terra compactada.

A instalação de vegetação sobre a camada de cobertura final é, ainda, importante por aumentar a evapotranspiração, diminuindo a quantidade de chuva que se infiltra e, conseqüentemente, a quantidade de chorume gerado. É necessário prever a manutenção deste sistema de cobertura, mesmo após a vida útil do aterro, garantindo as suas características de projeto (IPT / CEMPRES, 2000).

4.1.1.3 Drenagem de águas pluviais

O sistema de drenagem de águas pluviais tem a finalidade de interceptar e desviar o escoamento superficial das águas pluviais, durante e após a vida útil do aterro, evitando sua infiltração na massa de resíduo. Nos aterros, em geral, o sistema de drenagem de águas pluviais é constituído por estruturas drenantes compostas por

meia cana de concreto, escadas d'água e tubos de concreto. A água pluvial não deve ser misturada ao chorume do aterro, pois este necessita de tratamento mais complexo antes de ser lançado à drenagem natural, o que não ocorre com a água pluvial (IPT / CEMPRE, 2000).

4.1.1.4 Drenagem do chorume e líquidos percolados

A decomposição da matéria orgânica presente no lixo resulta na formação de um líquido de cor escura, odor desagradável e elevado potencial poluidor, denominado chorume. A percolação das águas de chuva através da massa de resíduos arrasta consigo o chorume, bem como outros materiais em solução ou suspensão, constituindo-se nos chamados líquidos percolados dos aterros.

Quando esses líquidos atingem os mananciais de águas subterrâneas ou superficiais, podem alterar de modo significativo as suas características, tornando-as impróprias ao consumo ou à sobrevivência de organismos aquáticos.

Portanto, ao se construir um aterro é primordial reduzir o volume dos líquidos percolados, através de uma adequada drenagem de águas de chuvas e de nascentes, visando a reduzir os custos de implantação e operação de um sistema de tratamento desses líquidos.

Para MANDELLI (1991), caso existam nascentes na área do aterro sanitário, deve-se desviá-las, pois, podem, também, acarretar um acréscimo de chorume a ser tratado.

O sistema de drenagem de chorume deve coletar e conduzir o chorume, reduzindo as pressões sobre a massa de resíduo e, também, minimizando o potencial de migração para o subsolo. Outro motivo para se drenar o chorume é impedir que ele ataque as estruturas do aterro (IPT / CEMPRE, 2000).

Os esforços, nesta direção, devem ser focalizados no sentido de minimizar a formação de chorume, desde a escolha da área e concepção do projeto até à própria operação do aterro.

Segundo LIMA (1991), os processos de tratamento possíveis para o chorume são:

- recirculação ou irrigação: consiste na infiltração do chorume, visando à atenuação do seu poder contaminante pelos organismos presentes na massa de resíduo;
- tratamento em lagoas de estabilização: esse sistema tem fundamento teórico na biodegradação da matéria orgânica do chorume pela ação de bactérias aeróbias e anaeróbias;
- tratamentos químicos: os líquidos de aterros podem ser tratados por processos envolvendo reações químicas como, por exemplo, neutralização, precipitação e oxidação;
- tratamento por filtros biológicos: consiste na descarga contínua ou intermitente de chorume através de um meio biológico enriquecido. Os filtros biológicos podem ser aeróbios e anaeróbios;
- tratamento por processos fotossintéticos: nos países de clima tropical é possível utilizar plantas que absorvem metais e traços orgânicos presentes na água e em líquidos a serem tratados;
- processos mistos; e
- Evaporação do chorume com o aproveitamento energético do biogás.

IPT / CEMPRE (2000) acrescenta a possibilidade de tratamento em estações de tratamento de esgoto, nas quais o chorume é encaminhado para tratamento juntamente com o esgoto doméstico.

Para CAPODAGLIO (1999), um conhecimento mais profundo das características quantitativas e qualitativas do chorume é necessária para implantar as ações de minimização, coleta, tratamento e disposição deste líquido.

4.1.1.5 Drenagem dos gases

O sistema de drenagem vertical dos gases consiste de drenos construídos em secção cilíndrica, mantidos através de telas para gabião ou cilindros móveis de aço carbono, preenchidos com brita, possuindo um tubo perfurado em sua extensão.

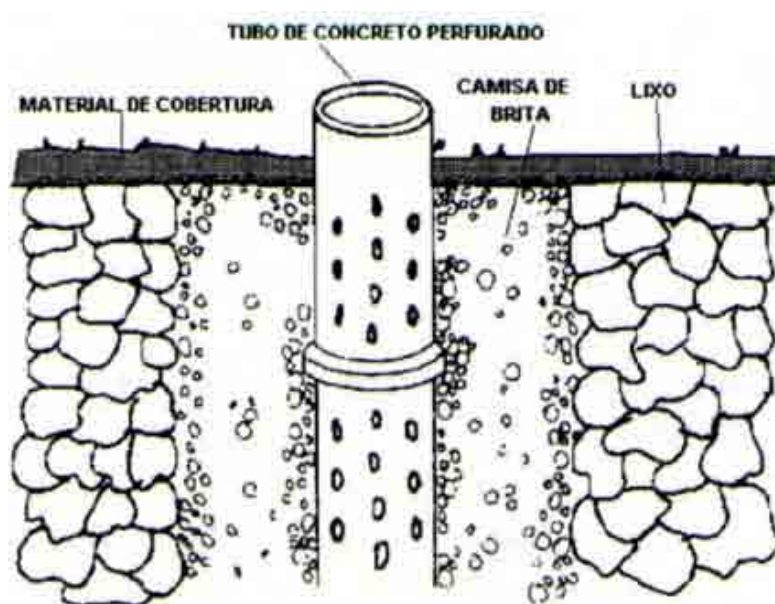


Figura 29: Detalhe de um dreno convencional de gás

Fonte: IPT/CEMPRE (2000).

Associados aos drenos verticais, projetam-se drenos horizontais que facilitam a drenagem mais eficiente pela massa de resíduo. Esses drenos podem ser interligados ao sistema de drenagem de chorume, dependendo da alternativa de solução de tratamento adotada para o aterro sanitário (IPT / CEMPRE, 1995).

A implantação dos drenos de chorume e dos drenos verticais de gases deve acompanhar a execução das camadas que, gradativamente, vão atingindo maiores cotas.

O sistema de drenagem de biogás tem a função de drenar os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, evitando sua migração através dos meios porosos que constituem o subsolo, podendo se acumular em redes de esgoto, fossas, poços e sob edificações internas e externas ao aterro sanitário (IPT / CEMPRE, 2000).

Para MANDELLI (1991), o biogás oriundo dos drenos verticais, na superfície do aterro, pode ser direcionado para pontos de coleta pré-determinados, onde pode-se tratar tais gases provisoriamente, em queimadores do tipo “*flare*”, ou, se desejado, realizar o aproveitamento energético em um sistema centralizado. Segundo TEIXEIRA (2000), a recuperação energética é conseguida quando, após a drenagem dos gases,

houver o seu aproveitamento. O sistema mais adequado para a captação do biogás e sua respectiva utilização será tratado no item 4.2 desta dissertação.

4.1.1.6 Monitoramento

Conforme MANDELLI (1991), o sistema de monitoramento do aterro sanitário consiste em uma atividade fundamental e tem como princípio o aumento da eficácia e da confiabilidade dos métodos operacionais adotados.

Para IPT / CEMPRE (2000), o sistema de monitoramento tem a função de permitir a detecção, em estágio inicial, de impactos ambientais negativos causados pelo empreendimento, permitindo a implantação de medidas mitigadoras antes que estes assumam grandes proporções e, desta forma, torne-se mais difícil sua correção. De modo geral, o monitoramento do aterro sanitário envolverá aspectos geotécnicos e ambientais.

Segundo IPT / CEMPRE (2000), o sistema de monitoramento geotécnico consiste em:

- controle de deslocamentos horizontais e verticais do maciço do aterro;
- controle do nível de chorume e pressão de biogás no maciço do aterro;
- controle da descarga de chorume através dos drenos; e,
- inspeções periódicas, buscando-se indícios de erosão e trincas entre outros.

De acordo com IPT / CEMPRE (2000), o sistema de monitoramento ambiental consiste em:

- controle da qualidade das águas subterrâneas;
- controle da qualidade das águas superficiais;
- controle da qualidade do ar;
- controle da poluição do solo;
- controle de insetos e vetores de doenças;
- controle de ruído e vibração;
- controle de poeira e material esvoaçante; e,
- controle de impactos visuais negativos.

Para IPT / CEMPRE (2000), é necessário a concepção de um plano de encerramento das atividades de recepção de resíduo sólido no aterro sanitário e de manutenção da estabilidade física, química e biológica até que o local encontre-se em condições de ser preparado para sua utilização futura. Manutenções e reparos são necessários por variadas circunstâncias, tais como, acomodações, erosão, assoreamento, dentre outros.

As drenagens que circundam a área aterrada, as vias de acesso e o sistema de monitoramento deverão ser mantidos em funcionamento após o encerramento do aterro, durante todo o tempo em que o chorume e o biogás apresentarem potencial poluidor, ou seja, até a estabilização da massa de resíduo (IPT / CEMPRE, 1995).

Segundo SEWELL (1998), muitos aterros sanitários são utilizados para fins recreacionais quando estão completos, após o encerramento.

O uso futuro de locais de aterros sanitários encerrados deve harmonizar-se com a ocupação nos entornos. Outras utilizações somente deverão ser implementadas, no entanto, se os riscos de colapsos do solo, produção de biogás e demais fatores restritivos estiverem definitivamente reduzidos a níveis aceitáveis. Essa definição deve ser avaliada cuidadosamente (IPT / CEMPRE, 2000).

4.2 ENERGIA DO BIOGÁS

4.2.1 Tecnologias para a recuperação do biogás

4.2.1.1 Poço drenante vertical

Os poços drenantes verticais são a forma de recuperação de biogás de aterro mais amplamente aplicada e utilizada (WORLD BANK, 2003). O poço drenante vertical é normalmente construído depois do encerramento das atividades no aterro e consiste de um tubo de PEAD perfurado em sua parte inferior (filtro). O tubo é colocado na célula do aterro de maneira a encontrar as camadas onde o resíduo está disposto.

Na parte superior do tubo é conectado um cabeçote o qual fará a conexão com a rede de captação de gás (tubulação).

Para a implantação do poço drenante vertical é necessário a perfuração da célula do aterro em um diâmetro de aproximadamente 1m (TNO, 1995). O espaço existente entre a célula do aterro e o poço drenante é preenchido com pedras (tipo tamanho nº4). Ainda segundo TNO (1995), para evitar a circulação de ar no poço, a coluna superior preenchida por pedras deve ser fechada com uma camada de cimento ou material similar (por exemplo argila, solo compactado).

A degradação anaeróbia do resíduo pode perdurar por vários anos após o fechamento do aterro. Devido a este fato podem ser instalados poços drenantes verticais para a recuperação do biogás existente. Tal afirmação pode ser exemplificada pela figura 30.

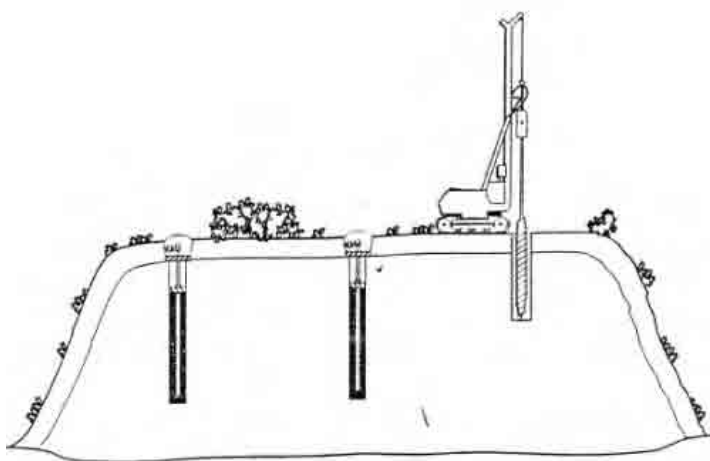


Figura 30: Instalação de poços drenantes verticais no aterro finalizado

Fonte: TNO (1995).

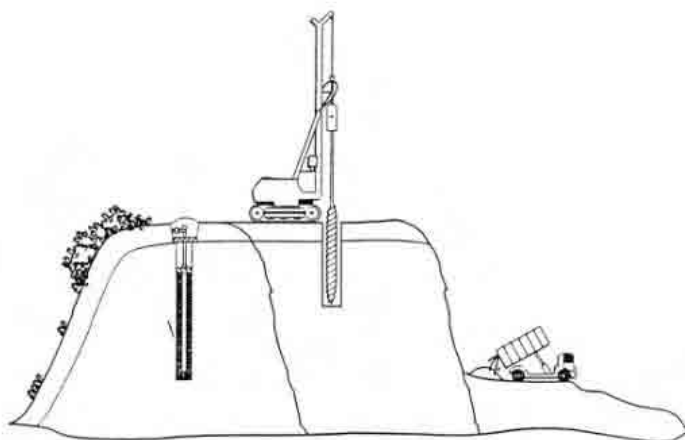
A tabela 24 apresenta algumas características que podem ser consideradas na instalação de drenos verticais.

Tabela 24: Características dos drenos verticais

Profundidade do poço	10 – 25m
Comprimento do filtro	2 – 15m
Diâmetro do poço	60 – 80 cm
Diâmetro do tubo	16 cm
Espaçamento entre os poços	50 – 120 m
Nº de poços / ha	1 – 3

Fonte: TNO (1995).

Quando um aterro é construído por compartimentos, não é preciso esperar o seu fechamento para iniciar a recuperação do biogás. Após o fechamento de uma célula do aterro a recuperação do biogás pode ser iniciada enquanto outra célula vai sendo preenchida, conforme demonstrado na figura 31.

**Figura 31: Instalação de poços drenantes verticais com o aterro em operação**

Fonte: TNO (1995).

A maior parte do custo de implantação de um poço drenante vertical está na perfuração. Este custo pode ser diminuído se todos os poços drenantes forem colocados previamente ao início da disposição de resíduos. Isto pode ser feito usando-se um cilindro metálico com aproximadamente 5 metros de altura que será colocado no local onde se instalará o poço drenante. Quando o resíduo chegar próximo ao topo do cilindro, este é retirado e o poço drenante deve ser estendido. Após o término da

disposição de resíduo, o cabeçote de drenagem é colocado no poço de drenagem e ligado à rede de captação (TNO, 1995). A desvantagem deste sistema é que a recuperação do biogás não pode ser iniciada até que as atividades no aterro sejam cessadas.

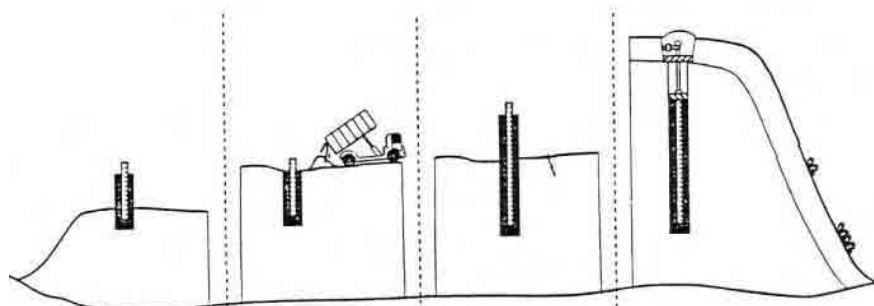


Figura 32: Instalação de poços drenantes verticais no início da operação do aterro

Fonte: TNO (1995).

Na figura 33, apresenta-se um poço drenante vertical com maiores detalhes.

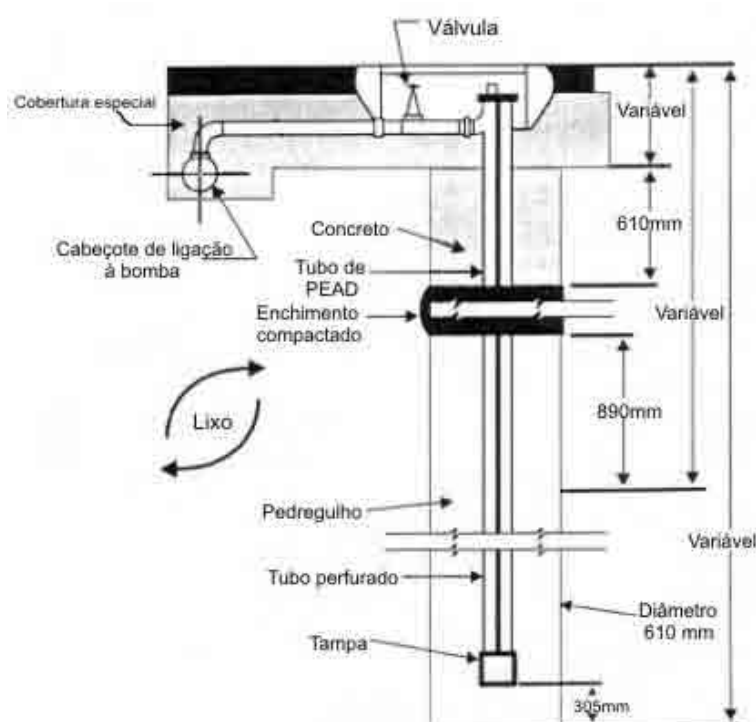


Figura 33: Detalhe do poço drenante vertical

Fonte: traduzido de EPA (1996).

4.2.1.2 Sistemas Horizontais

Tubos perfurados podem ser colocados horizontalmente na célula do aterro com a finalidade de recuperar o biogás. Estes devem ser envolvidos por uma camada de pedra para que não haja o contato direto do tubo com o resíduo.

Um aterro pode ter várias camadas de tubos horizontais e a distância vertical entre estes deve variar entre 6 a 10 m (TNO, 1995).

Este sistema é caro porque é necessária uma grande quantidade de tubos. Nas figuras 34 e 35 apresentam-se detalhes do sistema horizontal.

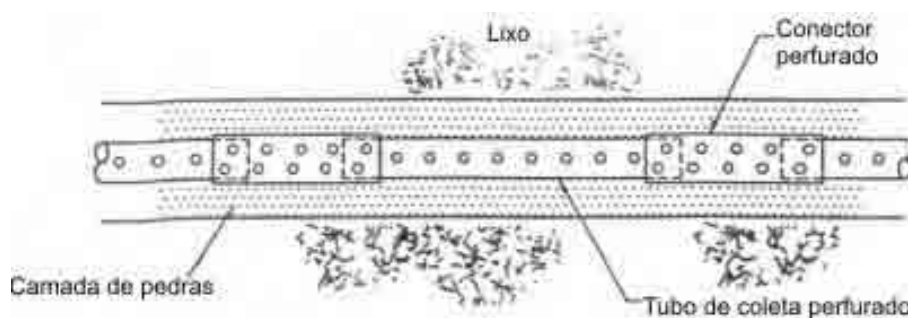


Figura 34: Visão de perfil

Fonte: traduzido de WORLD BANK (2003).



Figura 35: Corte transversal

Fonte: traduzido de WORLD BANK (2003).

4.2.1.3 Rede de coleta e bombas de sucção de gases

A rede de coleta conduz o biogás drenado dos poços para a unidade de geração de energia elétrica. A rede coletora de biogás normalmente é constituída por tubos de polietileno de alta densidade e deve ser aterrada para evitar acidentes. As bombas de sucção de gases são importantes para compensar as perdas de carga nas tubulações e garantir uma vazão regular de biogás para a unidade de geração de energia elétrica.

Deve-se equilibrar a vazão da bomba com a geração de gás para que seja evitada a infiltração de ar no sistema evitando também o risco de explosões.

4.2.1.4 Recuperação de gás na superfície

Pode-se utilizar uma manta de algum material sintético que seja permeável em sua longitude para recuperar o gás que escapa pela superfície. O gás pode ser transportado pela manta até os pontos de coleta (TNO, 1995).

Segundo TNO (1995), a maior parte do biogás fugitivo escapa por trincas e fissuras nas camadas de superfície dos aterros e entre 10 e 20% do metano produzido no aterro pode ser oxidado pela camada de superfície.

Conforme BOGNER et al. (1995), as emissões de metano pela superfície podem variar em até seis ordens de grandeza em uma faixa entre $4,186 \cdot 10^{-6}$ a $4,186 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$.

A presença de camada sintética impermeável na cobertura do aterro proporciona uma eficiência de coleta de 60 a 95% dependendo da possibilidade de migração do biogás pelo solo (TNO, 1995). TNO (1995) ainda cita que a presença de solo argiloso na cobertura do aterro proporciona uma eficiência de coleta de 60 a 75% dependendo da espessura da camada, da idade do aterro e da possibilidade de migração do biogás.

4.2.1.5 Compressor

Um compressor (ou um soprador) é necessário para puxar o gás dos poços de coleta, e este também pode ser necessário para comprimir o gás antes deste entrar no

sistema de recuperação energética. O tamanho, tipo e número de compressores necessários dependerão da taxa de compressão, do fluxo de gás e do nível desejado de compressão que tipicamente é determinado pelo equipamento de conversão energética.

Uma compressão adicional de gás pode ser necessária dependendo de como o gás será utilizado. No entanto, a quantidade de compressão requerida unicamente para retirar o gás dos poços é geralmente baixa porque somente uma pequena pressão negativa é necessária. Por exemplo, uma instalação com 2 milhões de toneladas de resíduos pode produzir 15 milhões de m³ de gás por ano, ou cerca de 28,5 m³/min (EPA, 1996). Conforme citado em EPA (1996), cerca de 0,3 a 0,8 hp por m³/min é necessário para o fluxo de gás; o total de potência mecânica necessária para o compressor (ou um soprador) varia de 36 a 95 hp.

4.2.1.6 *Flare* (Queimador)

O *flare* é um dispositivo simples para ignição e queima do biogás. *Flare* é considerado um componente de cada opção de recuperação de energia porque este pode ser necessário durante as etapas de início e manutenção do sistema. Em adição, este pode ser de maior custo-efetividade para gradualmente aumentar o tamanho do sistema de recuperação de energia e para queimar o excesso de gás entre *up-grades* de sistemas, isto é, antes da adição de um novo motor. Os projetos de *flare* incluem *flares* abertos (ou vela) e enclausurados (OLIVEIRA, 2004).

Os *flares* abertos são o tipo mais simples e apresentam alguns problemas como a instabilidade da chama, problema este que pode ser originário de uma combustão ineficiente. Estes também são mais difíceis de se realizar testes de emissões (EPA, 1996).

Flares fechados (enclausurados) são mais caros, mas podem ser preferíveis (ou requeridos) porque proporcionam testes de concentração e podem obter eficiências de combustão ligeiramente altas. Neste, a queima incompleta de hidrocarbonetos e a emissão de materiais perigosos são reduzidas (EPA, 1996). Além disto, *flares* enclausurados podem reduzir os incômodos de ruído e iluminação.

4.2.2 Purificação do biogás

O estudo da viabilidade de emprego do biogás normalmente se inicia pela avaliação de equivalência energética entre o biogás e o combustível a ser substituído (ALVES, 2000). Além do poder calorífico, é necessário que se observem outras propriedades, como presença de contaminantes, acidez e pressão. Tais considerações contribuem para uma previsão adequada das adaptações necessárias ao emprego do biogás, quer seja como único recurso energético ou como combustível complementar.

Ainda segundo ALVES (2000), a não adequação da máquina ao combustível gera um extenso histórico de motores e queimadores que não operam satisfatoriamente, especialmente em adaptações ao uso do biogás. Pode ocorrer combustão incompleta, falha de alimentação, perda de potência e corrosão precoce provocada pela presença do ácido sulfídrico (H_2S).

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono (CO_2), prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente; tais substâncias entram no lugar do combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. À medida em que se eleva a concentração das impurezas, o poder calorífico do biogás torna-se menor.

A degradação anaeróbia de resíduos orgânicos é um processo exotérmico e por isso o biogás é liberado quente, apresentando em sua composição vapor d'água saturado. O biogás (quente) produzido pelo aterro sanitário flui através do sistema de coleta e se resfria, formando um condensado. Esta alta umidade, combinada com dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S) e compostos orgânicos voláteis (VOCs – *volatile organic compounds*), representam um grande potencial de corrosão (WORLD BANK, 2003).

A presença do condensado pode bloquear o sistema de coleta e interromper o processo de geração de energia. O controle do condensado começa tipicamente no campo do sistema de coleta, onde tubos inclinados e conectores são usados para permitir a drenagem em tanques ou armadilhas de coleta. Estes sistemas são normalmente complementados por uma remoção de condensado pós-coleta.

Técnicas de desumidificação podem ser aplicadas utilizando-se separadores de umidade, eliminadores de névoa, resfriamento direto, compressão seguida de resfriamento, absorção e adsorção.

Os traços de gases geralmente removidos do biogás são compostos contendo enxofre, compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMVOCs – *non methane volatile organic compounds*) e compostos orgânicos voláteis (VOCs - *volatile organic compounds*). Estes podem ser removidos através do uso de grânulos de carbono ativado (GAC - *granular activated carbon*) e limalhas de ferro. O método mais utilizado para tratar hidrocarbonetos e VOCs é o de GAC (WORLD BANK, 2003).

A remoção do H_2S empregando-se limalhas de ferro, segundo BEDUSCHI et al. (1985), é um dos mais antigos métodos usados na remoção de compostos de enxofre de uma corrente gasosa. Tem como vantagem o baixo custo, a simplicidade da instalação e a possibilidade da completa remoção do H_2S que reage com o óxido de ferro formando sulfeto. O óxido de ferro (que pode ser palha de aço, cavacos e limalha de ferro) empregado no filtro é impregnado com aparas de madeira, que servem como leito suporte (BEDUSCHI et al., 1985).

Outra alternativa para a remoção de H_2S do biogás é o método biológico desenvolvido por FERNÁNDEZ e MONTALVO⁴ (1998 apud ALVES, 2000). Este método consiste em colocar o biogás em contato com uma pequena quantidade de oxigênio em um ambiente líquido abastecido por efluentes. A eficiência de remoção de H_2S em experimento é superior a 97%, com tempo de contato entre 13 e 16h. Para um tempo de contato de 1h, a eficiência de remoção, na maioria dos casos, é de 95%.

A remoção de partículas sólidas que são carregadas pelo biogás evita causar danos nos sopradores, compressores e outros equipamentos utilizados. A maioria dos materiais particulados são carregados por pequenas gotículas presentes no biogás (WORLD BANK, 2003). A utilização de filtros para a remoção destes materiais é necessária e estes filtros devem ser freqüentemente limpos e ou trocados.

⁴ FERNÁNDEZ, E., MONTALVO, S. J., *Biological method for removal of H_2S from biogas*, in V Taller y Seminario Latino Americano. Tratamiento anaerobio de aguas residuales/Fifth Latin-American workshop seminar Wastewater anaerobic treatment, Chile, não paginado, 1998 apud ALVES, J. W. *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos*. 2000. 142 p.

O CO₂ não tem valor calorífico e forma um líquido corrosivo quando entra em contato com vapor d'água. Por meio de extração, adsorção e métodos de separação com membranas pode-se remover o CO₂ do biogás.

Segundo BEDUSCHI et al.(1985), a remoção do CO₂ do biogás dá-se pela adsorção física do CO₂ na água; este é um processo antigo que utiliza a água como adsorvente, esta pode ser regenerada por depressurização.

A tabela 25 apresenta algumas técnicas para a remoção de impurezas no biogás.

Tabela 25: Técnicas de remoção de impurezas de biogás

Alvo	Descrição geral	Detalhes
Água	Adsorção	Sílica gel
		Peneira molecular
		Alumina
	Absorção	Etileno glicol (temperatura -6,7°C)
		Selexol
	Refrigeração	Resfriamento a 2°C
Hidrocarbonos	Adsorção	Carvão ativado
	Absorção	Óleo leve
		Etileno glicol e Selexol (temperaturas: entre -6,7°C e -33,9°C)
		Refrigeração com Etileno glicol e adsorção em carvão ativado
CO ₂ e H ₂ S	Absorção	Solventes orgânicos
		Selexol
		Flúor
		Rectisol
		Soluções de sais alcalino
		Potássio quente e potássio quente inibido (talvez tamponado)
		Alcanolaminas
		Mono, di-tri-etanol amina
		deglicolamina
		Ucarsol-CR
	Adsorção	Peneiras moleculares
		Carvão ativado
	Separação por membranas	Membrana de fibra oca

Fonte: ALVES (2000).

4.3 ALTERNATIVAS DE USO DO BIOGÁS

4.3.1 Turbinas a Gás

A utilização de turbinas a gás para a geração de eletricidades pressupõe grandes fluxos de biogás, ideal para grandes aterros, com projetos de 3 a 4 MW no mínimo (USEPA, 2002). A economia na geração de energia e a eficiência do sistema aumentam de acordo com a escala do projeto, podendo ser uma alternativa mais adequada para grandes plantas de geração.

As eficiências podem ser aumentadas chegando a 40 % quando são utilizadas plantas de ciclo-combinado, com recuperação do calor perdido. No entanto, esses equipamentos têm eficiências bem reduzidas quando trabalham em carga parcial. Uma vantagem dessas turbinas é a maior resistência à corrosão quando comparadas aos motores de combustão interna, além dos custos mais baixos de operação e de manutenção (USEPA, 1996b).

4.3.2 Microturbinas

Suas aplicações são geralmente em projetos de pequeno porte com menos de 1 MW de potência, atendendo à demanda de eletricidade do próprio aterro ou de locais próximos. São equipamentos mais recentes e menos empregados no aproveitamento do biogás.

Existe a possibilidade do uso de grupos desses equipamentos com potências de 30 a 100 kW cada, flexibilizando o uso do gás da maneira mais conveniente de acordo com a necessidade local, sendo assim uma alternativa interessante quando há pequena vazão de gás e os motores de combustão interna ou turbinas a gás de grande porte são inadequados. Após a diminuição considerável da produção de biogás do aterro, as microturbinas podem ser transferidas para outro local sem grandes dificuldades por serem de pequeno porte. Em grandes projetos, onde há biogás que não está sendo consumido, microturbinas podem ser instaladas atendendo esse excedente de energia que está sendo perdido.

A presença de gases com baixo teor de metano não representa um problema pois esses equipamentos funcionam adequadamente com teores menores que 35% de metano no biogás (USEPA, 2002).

Um dos problemas das microturbinas é a sua baixa eficiência em relação a motores de combustão interna e turbinas a gás maiores, sendo seu consumo de combustível 35% maior por kWh produzido (USEPA, 2002).

4.3.3 Motores de combustão interna

O uso de motores de combustão interna (Diesel ou Otto) é a alternativa mais utilizada no aproveitamento de gases de aterro pelo seu baixo custo, facilidade de operação e manutenção.

Segundo ALVES (2000), o uso de motores ciclo Otto (gasolina / álcool) ou Diesel, tem duas aplicações principais:

- geração de energia elétrica pelo acoplamento do motor a um gerador elétrico,
- geração de energia mecânica que pode ser empregada no acionamento de bomba hidráulica, compressor ou veículo.

Altas eficiências são obtidas principalmente em aplicação de cogeração, com aproveitamento do calor perdido pelo motor para geração de água aquecida ou nos gases de exaustão para produção de vapor de baixa pressão, além da geração de eletricidade a partir do acoplamento do motor a um gerador elétrico.

Uma outra vantagem desses equipamentos é a flexibilidade na implantação do sistema de geração, que pode ser de pequeno porte e ser ampliado com o aumento da quantidade de gás produzido ao longo da vida útil do aterro, instalando-se para isso novos motores.

O uso desses equipamentos com modernos sistemas de controle de emissão de poluentes pode favorecer a instalação de grandes plantas de geração de energia em aterros localizados em áreas de restrição de emissão de poluentes.

Tanto o uso de moto geradores do ciclo Otto ou Diesel quanto turbinas a gás têm seus rendimentos em torno de 30 a 40%. Segundo SILVA⁵ (1997 apud ALVES, 2000), o uso dos gases de escape gerando vapor pode elevar a eficiência do conjunto para aproximadamente 70%..

A figura 36 mostra o calor residual presente nos gases de exaustão da turbina (ou motor) sendo aproveitado na geração de vapor, substituindo outros recursos energéticos.



Figura 36: Sistema de cogeração

4.3.4 Caldeiras

A adaptação desses equipamentos para uso do gás de aterro pode ser realizada com pequenas modificações, buscando a adequação às características do novo combustível.

Os níveis de umidade do gás devem ser controlados com a instalação de purgadores e linhas de condensado para impedir danos aos equipamentos e problemas na operação das caldeiras. A vazão de gás deve ser aumentada com a instalação de uma válvula de controle do combustível mais adequada, uma vez que o biogás possui menor quantidade de metano que o gás natural, sendo necessária uma maior quantidade de gás. A instabilidade da chama, decorrente da menor concentração de

⁵ SILVA, A.M.B. *Perspectivas de utilização da cogeração a gás em empreendimentos do setor terciário da região metropolitana do Estado do Rio de Janeiro*. COPPE, UFRJ, 1997 apud ALVES, J. W. *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos*. 2000.142 p.

metano e das flutuações na composição do gás, podem ser controladas com a instalação de sensores ultravioleta que monitoram a chama da caldeira impedindo que esta apague, com o uso de um sistema de combustível auxiliar como *back-up* em situações de variação na chama (USEPA, 2001).

A corrosão é outro problema para a adaptação de caldeira para biogás, uma vez que compostos de cloro nos gases de exaustão comprometem pré-aquecedores de ar, dutos e outros componentes do equipamento. O revestimento do pré-aquecedor e da chaminé com material anticorrosivo, o controle da temperatura dos gases de exaustão acima do ponto de orvalho e a circulação adequada da água podem reduzir os efeitos corrosivos. A formação de depósitos de sílica, ferro, enxofre e cloro que se acumulam no pré-aquecedor e dutos de exaustão pode ser evitada com uma manutenção regular (USEPA, 2001).

4.3.5 Tratamento de Chorume

No Brasil, quando se define por tratamento do chorume “*in situ*”, utiliza-se com muita frequência as lagoas biológicas que possuem a dificuldade de necessitarem de uma área muito grande em regiões com elevados índices pluviométricos e umidade. Neste sentido, muitos projetos utilizam a técnica de recirculação de chorume para diminuir a quantidade de líquidos a serem tratados, porém em épocas chuvosas o sistema pode chegar ao limite da sua capacidade. A recirculação de chorume deve ser aplicada quando se monitora a umidade ou grau de saturação do lixo, pois além de elevar seu peso específico, pode provocar inibição do processo de biodegradação (JUCÁ, 2001). Por outra parte, o sistema de tratamento por lagoas biológicas não reduz a quantidade de nitritos, nitratos e amônia presente no meio, o que pode acarretar em uma contaminação dos cursos d’água.

Neste sentido, alguns estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de se definir novas tecnologias para o tratamento eficiente e eficaz, e com custos compatíveis para o tratamento de chorume.

A utilização do biogás para o tratamento de chorume vem sendo uma boa alternativa, pois trata o chorume com o próprio biogás do aterro, não precisando de

grandes áreas e exclui os gastos com o transporte do chorume até outras áreas de tratamento. A evaporação do chorume com o aproveitamento energético do biogás está representada pela figura 37.

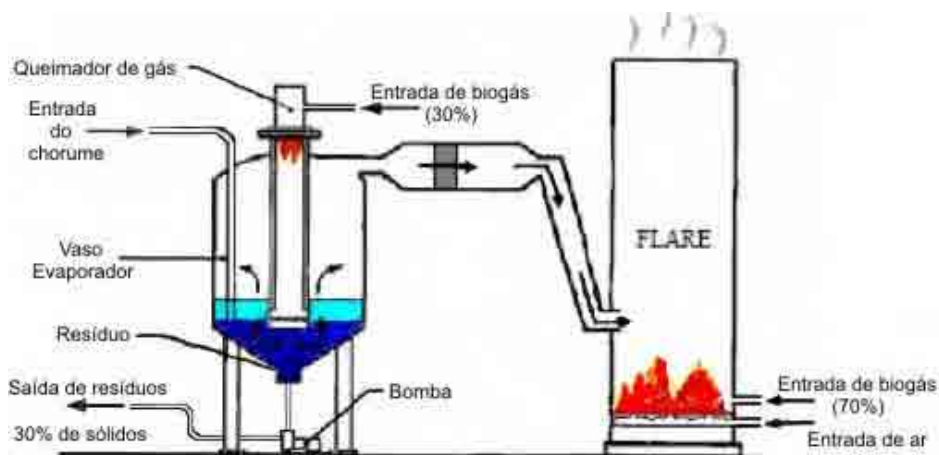


Figura 37: Evaporação do chorume com aproveitamento energético do biogás

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

Neste processo, aproximadamente 30% de resíduos sólidos são obtidos e estes são retornados para as células do aterro.

No Brasil, alguns aterros sanitários como o Aterro de Bandeirantes (São Paulo) e o Aterro Metropolitano Centro (Salvador) não fazem o tratamento do chorume “*in situ*”, e sim, destina-o a estações de tratamento de esgoto ou de resíduos industriais mais próximas. Como consequência, os custos se elevam devido ao transporte destes líquidos, bem como transferem a responsabilidade para outros, pois, em geral, as estações de tratamento de esgoto (ETE) não estão preparadas para receber um líquido com uma diversidade e altas concentrações de componentes orgânicos e inorgânicos (inclusive metais pesados).

4.3.6 Outros aproveitamentos

Outra possibilidade de aproveitamento do biogás é o seu uso em pequenas aplicações como no aquecimento de estufas, acompanhado pela recuperação do dióxido de carbono resultante da queima nas caldeiras, que pode ser reutilizado para favorecer o crescimento das plantas quando diluído à frações que não afetem o desenvolvimento dos vegetais (USEPA, 1998).

O biogás pode substituir o gás de cozinha (GLP- Gás Liquefeito de Petróleo) e ser utilizado na cocção de alimentos. Por exemplo, na cidade de Natal (RN), em 1986, o biogás foi utilizado para alimentar uma cozinha comunitária e também serviu como combustível na torrefação de castanhas de caju (TRIGÁS, 2005).

Outros aproveitamentos podem ser dados ao biogás como o uso em células combustíveis, iluminação, aquecedores de água de passagem, secadores, entre outros.

CAPÍTULO 5 ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO ATERRO EM ESTUDO

5.1 TAMANHO DO ATERRO

Para o cálculo do tamanho do aterro a ser construído na cidade de Guaratinguetá considerou-se para o período de construção o ano de 2006 e o início da deposição dos RSD no ano de 2007 (abertura). Considera-se um período de exploração do aterro de 20 anos, com isso o ano de encerramento (fechamento) das atividades para este será 2027. Como a geração de RSD é proporcional à sua população, utilizou-se valores para a taxa de crescimento populacional iguais a 1,2% ao ano para o período de 2001 a 2006 e de 1% ao ano para o período de 2006 a 2011 (ASG, 2000). Para o período de 2011 a 2027 manteve-se a taxa de crescimento populacional igual a do período anteriormente citado. O cálculo do tamanho do aterro foi realizado utilizando-se da equação (1) proposta pela USEPA e já apresentada na seção 2.3. Os valores necessários para o cálculo do tamanho do aterro são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 26: Valores necessários ao cálculo do tamanho do aterro

Parâmetro	Valor
População Urbana Média (2007-2027)(quatro municípios)	273.666 habitantes
% de Coleta	100%
Taxa RSD	182,5 kg de RSD/hab'ano
Idade	20 anos
Tamanho	998.881 t de RSD

A USEPA considera viável à exploração do biogás, aterros que tenham pelo menos 1 milhão de toneladas de resíduos sólidos dispostos. Porém, o presente estudo não segue a afirmação apresentada pela USEPA, pois alguns fatores diferenciam os aterros existentes no Brasil dos existentes nos Estados Unidos.

Um fator importante que pode ser apontado é o clima brasileiro, que tem por característica temperaturas médias mais elevadas em relação ao clima americano,

sendo esta condição mais favorável à degradação anaeróbia do resíduo orgânico. Portanto, este estudo considerará viável a exploração do biogás no início (um ano após a abertura), durante e após o fechamento do aterro (término da disposição de resíduo).

Os resíduos sólidos industriais, de serviços de saúde e inertes não são objeto do estudo e por isso não são considerados no tamanho do aterro. Os valores das taxas de crescimento populacional utilizados consideram a população total (população urbana e rural), mas neste caso considerou-se que estes valores são também válidos para a população urbana, portanto a diferença entre a população urbana e rural será sempre constante e proporcional à taxa de crescimento adotada. A quantidade de RSD gerada durante o tempo de exploração do aterro pode ser visualizada na figura 38.

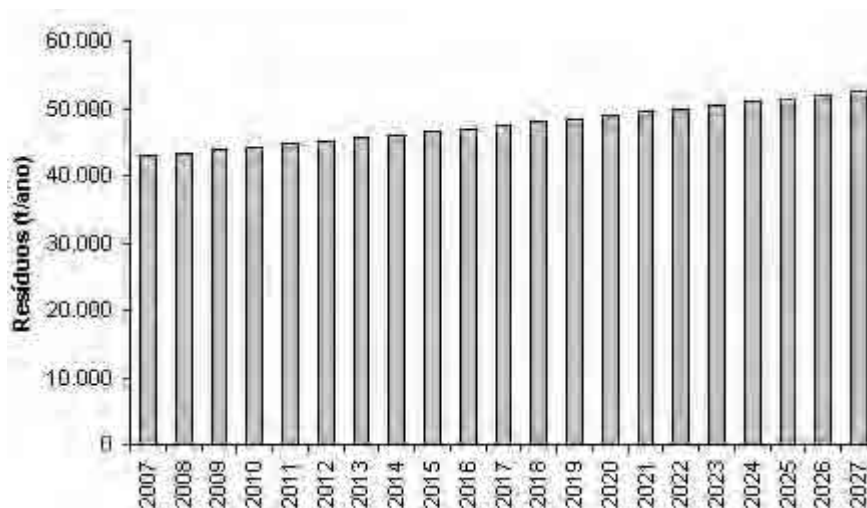


Figura 38: Distribuição da quantidade de RSD ao longo dos anos

Segundo CETESB (1997c), as dimensões do aterro dependem da vida útil que pretende-se dar à área. Como base de cálculo deve-se reservar cerca de $1 \text{ m}^2/\text{t}$ de resíduo a ser aterrada com 1 m de profundidade. Considerando uma profundidade média para o aterro de 10 m, tem-se em 1 m^2 cerca de 10 t de resíduos dispostos.

Como a quantidade encontrada para o tamanho do aterro é bem próxima a 1 milhão de toneladas de resíduos, pode-se dizer que a área necessária à disposição dos resíduos é de 100.000 m^2 .

5.2 PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO (L_0)

O valor adotado para o fator de correção de metano (FCM) baseia-se nas características apresentadas para a construção de um aterro sanitário, portanto conta-se com os fatores operacionais adequados à disposição dos resíduos como formação de células de lixo cobertas com terra, impermeabilização do solo, drenagem de gás e outros dispositivos característicos de um aterro sanitário adequado (ver seções 4.1 e 4.1.1). O valor adotado para o FCM de um aterro sanitário é 1, conforme o já exposto na tabela 8.

Devido ao fato de não ser encontrado na literatura um estudo sobre a composição do lixo nas cidades de Aparecida, Lorena e Roseira adota-se os valores de um estudo realizado sobre a composição do lixo na cidade de Guaratinguetá. Tal medida pode ser justificada devido ao fato das quatro cidades serem vizinhas e pertencerem à mesma região do país, o que pode indicar uma composição de lixo semelhante. Portanto, o cálculo do carbono orgânico degradável (COD) pode ser baseado na tabela a seguir.

Tabela 27: Composição percentual em peso dos RSD em Guaratinguetá

Especificação dos RSD	% em peso
Matéria orgânica	58,45%
Papel e papelão	17,29%
Vidro	2,81%
Plástico e material têxtil	12,18%
Metal	4,31%
Outros materiais finos até 8 mm	2,49%
Outros materiais finos até 16 mm	2,47%

* a fração orgânica é composta por 80% de restos de cozinha e 20% de restos de jardins.

Fonte: MARQUES⁶ (1991 apud MARQUES, 2001).

⁶ MARQUES, A.L. de P. *Estudo da produção de resíduos sólidos nos bairros de Guaratinguetá*, Relatório Interno, SAAEG, 1991 apud MARQUES, A.L. de P. *Proposta de um processo inovativo de tratamento de resíduos sólidos domiciliares, por fermentação anaeróbia, para a cidade de Guaratinguetá*. Tese (doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. 2001.249p.

Para o cálculo do COD não foi considerada a fração de madeira devido ao fato da mesma não ter nenhum valor presente na tabela 28. A fração de matéria orgânica apresentada considera que 20% do seu valor representa restos de jardins e 80% restos de comida, logo os valores para os mesmos em termos percentuais são respectivamente 11,69% e 46,76% do total em massa da matéria orgânica.

Com relação à composição de material plástico e têxtil, considerou-se para a obtenção do material têxtil (utilizado no cálculo) a metade da composição total apresentada, portanto o seu valor é de 6,09% em massa .

Com o emprego da equação (4) obteve-se o valor do COD.

O valor de COD encontrado foi de 183,5 kg de C/ t de resíduo e está dentro do esperado para os padrões brasileiros. ENSINAS (2003) determinou em seu estudo um valor um pouco superior (198,9 kg de C/ t de resíduo) para a cidade de Campinas.

O valor apresentado está acima de valores encontrados em alguns países, como é o caso da Alemanha (138,0 kg de C/t de resíduo) (ENSINAS, 2003). Isto pode ser explicado pelo fato de que naquele país, o resíduo sólido apresenta maiores quantidades de plásticos, metais e outros materiais que degradam lentamente ou não degradam.

Para o cálculo da fração de carbono orgânico degradável (COD_f) aplicou-se para a temperatura de digestão anaeróbia o valor de 35°C conforme citado em BINGEMER e CRUTZEN (1997 apud IPCC, 1996).

Ao empregar a equação (5), o valor de COD_f obtido foi de 0,77. O valor encontrado para o COD_f é igual ao recomendado pelo IPCC.

A fração considerada de metano presente no biogás (F) é de 50% e está dentro da faixa apresentada na tabela 4. Este valor é considerado padrão para aterros sanitários, porém, deve-se considerar que a composição do biogás pode variar de acordo com a composição do resíduo e o local em que o mesmo é disposto e por isso, é importante que sejam feitas medições em campo para que possa ser determinada a real composição e a fração de metano existente no biogás, minimizando assim, possíveis erros na quantificação do mesmo.

5.3 CÁLCULO DO L_0

O potencial de geração de metano é função da concentração de matéria orgânica degradável no resíduo, podendo atingir valores de 125 a 310 m³ de CH₄/kg de RSD (WORLD BANK, 2003). Segundo o mesmo autor, o valor de L_0 é estimado com base no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e num fator de conversão estequiométrico.

O valor de L_0 foi calculado através da equação (3) obtendo-se uma quantidade igual a 94,2 kg de CH₄/t de RSD ou 131,4 m³ de CH₄/t de RSD. O valor em m³ de CH₄ foi obtido considerando-se a densidade do metano, que é igual a 0,7167 kg/m³ (TCHOBANOGLOUS et al., 1993). O valor calculado de L_0 e os parâmetros necessários a esse cálculo estão apresentados na tabela 28.

Tabela 28: Valores encontrados para o cálculo de L_0

Parâmetros	Valores
FCM	1,0
COD	183,5 kg de C/t de RSD
COD _f	0,77
F	50% de CH ₄ no biogás
L_0	94,2 kg de CH ₄ /t de RSD ou 131,4 m ³ de CH ₄ /t de RSD

Como pode ser observado, o valor de L_0 obtido está dentro da faixa apresentada pelo manual do WORLD BANK (2003) e não muito distante do valor padrão utilizado pela USEPA, que é de 170 m³ de CH₄/t de RSD.

5.4 CONSTANTE DE DECAIMENTO (K)

A constante de decaimento é função de fatores como disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e principalmente umidade.

Pelo apresentado na tabela 10, pode-se verificar que o valor de k vai de 0,01 ano⁻¹ a 0,09 ano⁻¹.

O valor padrão de k utilizado pela USEPA⁷ (1994 apud WORLD BANK, 2003) para lugares com precipitação acima de 635 mm por ano é $0,05 \text{ ano}^{-1}$; este valor é utilizado para produzir uma estimativa razoável de geração de metano em certas regiões demográficas e sob certas condições locais.

Guaratinguetá, local escolhido para a construção do aterro, apresenta índice pluviométrico de 1.262 mm/ano (PMG, 2005); isso possibilita, baseado na tabela 10, trabalhar com valores para k entre $0,02 \text{ ano}^{-1}$ e $0,09 \text{ ano}^{-1}$. Decidiu-se adotar um valor intermediário a essa faixa ($k=0,05 \text{ ano}^{-1}$) devido ao fato de este também ser um valor considerado como padrão pela USEPA, embora o índice pluviométrico da cidade de Guaratinguetá possibilite valores de k diferentes ao considerado.

Um estudo realizado na cidade de São Paulo para o aterro Bandeirantes obteve um valor de k igual a $0,0395 \text{ ano}^{-1}$ (USEPA, 1997c), portanto um pouco inferior ao valor adotado para o k da cidade de Guaratinguetá.

5.5 ESCOLHA DO MÉTODO E OBTENÇÃO DAS CURVAS DE GERAÇÃO DE METANO

Algumas metodologias para a estimativa teórica da produção de gás metano em locais de disposição de resíduos sólidos (LDRS) foram apresentadas nos capítulos precedentes. Todas estas metodologias variam em suas considerações, em sua complexidade e na quantidade de dados de que necessitam.

Após avaliar cada uma das metodologias concluiu-se que o Método de Decaimento de Primeira Ordem I (equação 9) é o mais completo e o que mais se aproxima da realidade, visto que este leva em consideração a emissão de gás metano em longos períodos de tempo, considerando vários fatores que influenciam a taxa de geração do mesmo. Outro fator que favorece a sua escolha é a disponibilidade de dados para a sua aplicação, tais como a composição e a quantidade do RSD local.

⁷ USEPA, *Recommended Changes to the Proposed Municipal Solid Waste Landfill New Source Performance Standards and Emission Guidelines*, presented at SWANA Landfill Gas Symposium, 1994 apud World Bank. *Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean*. World Bank. October. 2003. 125p.

Todos os parâmetros presentes no método escolhido dependem de fatores que são variáveis como por exemplo as condições climáticas, a umidade, a composição do RSD, a fração de metano no biogás, entre outros.

Deparando-se com tal dificuldade, pois todos estes fatores podem mudar anualmente, decidiu-se adotar como valor oficial para L_0 e k os valores já apresentados nas seções 5.3 ($L_0=131,4 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4/\text{t de RSD}$) e 5.4 ($k=0,05 \text{ ano}^{-1}$), porém, com o objetivo de se fazer uma análise mais ampla e cuidadosa resolveu-se variar os valores de k e L_0 , possibilitando assim o surgimento de possíveis cenários para a geração de metano.

Decidiu-se variar os valores de k e L_0 devido ao fato de estes englobarem um maior número de fatores mutáveis.

Dois fatores importantes a serem utilizados na equação (9) que não variaram e permaneceram comuns à elaboração de todos os cenários foram F e R_x .

O valor da fração de metano no biogás (F) já foi apresentado e é considerado um valor padrão para aterros (50% de CH_4 no biogás).

O resíduo disposto anualmente (R_x) é variável e depende de fatores como a taxa de crescimento populacional, taxa de RSD produzido por habitante ao ano e da porcentagem de resíduos que é coletada e disposta no aterro.

A multiplicação de todos estes fatores geram valores para R_x . Estes valores estão apresentados na tabela 29.

Tabela 29: Valores para R_x

Anos	População [hab.]	Taxa Crescimento Populacional ⁸ [% ao ano]	Taxa RSD [kg/hab·ano]	% coleta	R_x [t/ano]
2007	235.521	1	182,5	100%	42.983
2008	237.877	1	182,5	100%	43.412
2009	240.255	1	182,5	100%	43.847
2010	242.658	1	182,5	100%	44.285
2011	245.084	1	182,5	100%	44.728
2012	247.535	1	182,5	100%	45.175
2013	250.011	1	182,5	100%	45.627
2014	252.511	1	182,5	100%	46.083
2015	255.036	1	182,5	100%	46.544
2016	257.586	1	182,5	100%	47.009
2017	260.162	1	182,5	100%	47.480
2018	262.764	1	182,5	100%	47.954
2019	265.391	1	182,5	100%	48.434
2020	268.045	1	182,5	100%	48.918
2021	270.726	1	182,5	100%	49.407
2022	273.433	1	182,5	100%	49.902
2023	276.167	1	182,5	100%	50.401
2024	278.929	1	182,5	100%	50.905
2025	281.718	1	182,5	100%	51.414
2026	284.535	1	182,5	100%	51.928
2027	287.381	1	182,5	100%	52.447

Os valores sugeridos de k para a elaboração dos cenários são baseados na tabela 10, na qual consta, para o caso de Guaratinguetá, cuja pluviosidade é superior a 1.000 mm/ano, valores de $0,02 \text{ ano}^{-1}$ e $0,09 \text{ ano}^{-1}$ que são, respectivamente, os valores de mínimo e máximo k considerados na construção dos cenários (curvas).

Para L_0 utilizaram-se os valores $0,1250$ e $0,3100 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg}$ de RSD. Estes são considerados valores padrões (WORLD BANK, 2003) e neste caso serão utilizados para a obtenção das curvas de mínima e máxima geração de metano, respectivamente.

O valor de $0,1314 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg}$ de RSD para o L_0 já foi apresentado e será utilizado para obter a principal e mais provável curva de geração de metano.

Apresentados os valores a serem utilizados, obteve-se a figura 39 que propõe possíveis cenários de geração de metano no aterro considerado no estudo.

8

$$P_f = P_a \cdot (1 + j)^{(f-a)}$$

P_f : população futura calculada [habitantes]

P_a : população atual [habitantes]

j : taxa de crescimento populacional [ano^{-1}]

f : ano futuro [ano]

a : ano atual [ano]

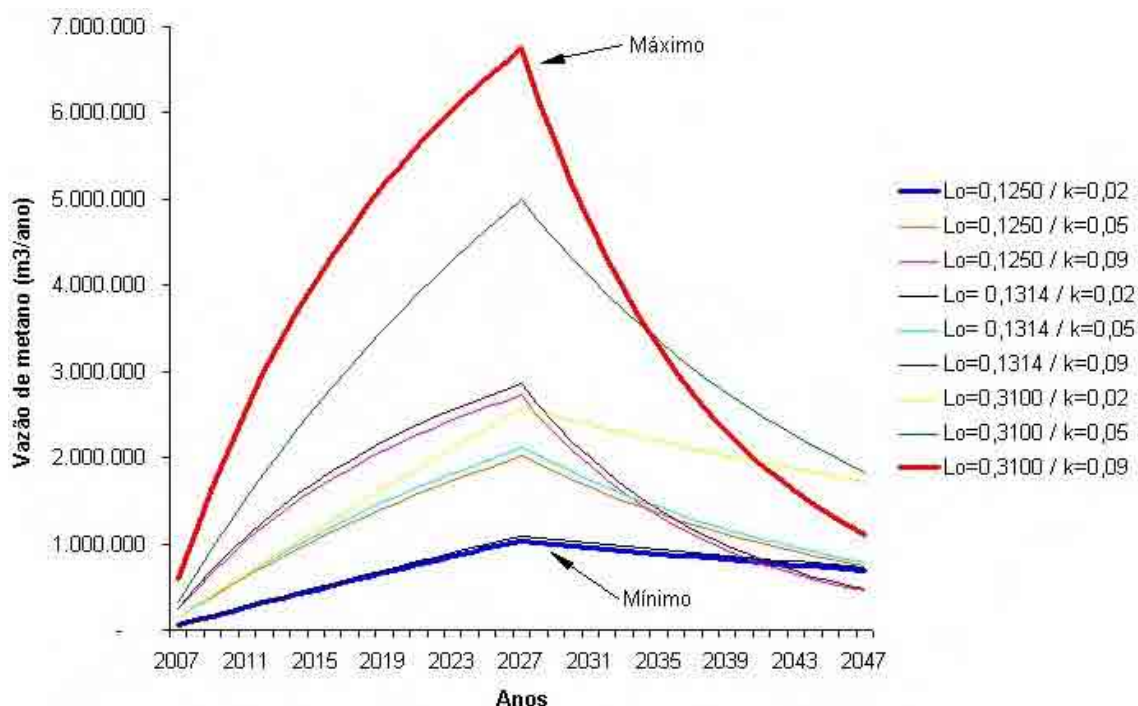


Figura 39: Curvas de geração de metano

De acordo com a figura 39 apresentada, pode-se observar que a produção máxima de metano ocorre no ano de fechamento do aterro (2027) e pode variar entre 1 a 7 milhões de m^3 de metano.

Um outro fator interessante a ser observado é que altos valores de L_0 e k apresentam grandes vazões anuais de metano originando em curvas com inclinações mais acentuadas, tanto durante a vida útil do aterro quanto após seu fechamento, e valores de L_0 e k mais baixos, geram uma quantidade menor de metano, porém por um maior período de tempo.

TOWNSEND et al. (1996) apresenta um estudo que comprova a aceleração da degradação de resíduos através da recirculação do chorume no aterro; isto pode ser interessante para projetos desta ordem, pois a viabilidade da recuperação energética do metano está atrelada à produção do mesmo no aterro.

Diversas possibilidades de geração de metano foram apresentadas, conforme demonstrado na figura 39, no entanto fará parte do estudo somente o valor considerado como principal e já calculado para L_0 ($131,4 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t RSD}$).

A figura 40 apresenta o a geração de metano ao longo do tempo no aterro ($L_0=131,4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t RSD}$).

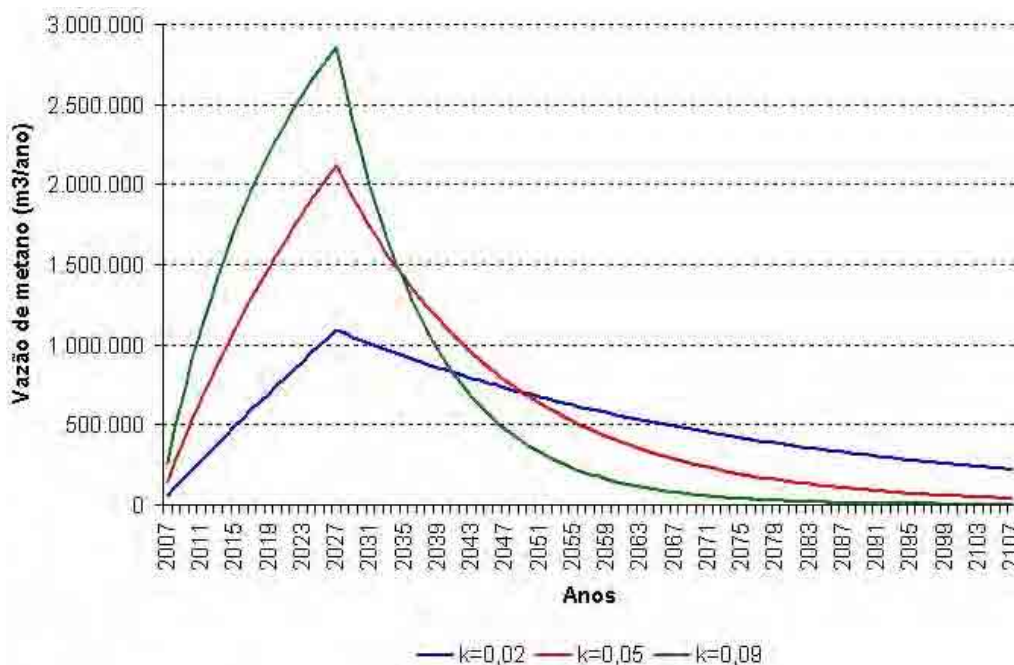


Figura 40: Estimativas de gerações de metano no aterro

Observa-se que a produção de metano permanece por muitos anos após o fechamento do aterro.

5.6 EFICIÊNCIA DE COLETA E EMISSÕES FUGITIVAS

Quanto mais alta a eficiência na coleta do biogás, maior será a vazão de biogás disponível para os projetos de utilização do mesmo.

Para alcançar uma eficiência de coleta a mais próxima possível de 100% deve-se tomar algumas medidas, tais como implantar um sistema de coleta eficiente que maximize a sucção do biogás sem a penetração de ar no interior da massa do resíduo, implantar uma camada espessa de solo argiloso ou manta sintética de PEAD (maior eficiência) para que esta impeça a penetração de ar no aterro e dificulte a saída do biogás, implantar poços drenantes verticais projetados para a recuperação de biogás ou

ainda monitorar as vazões e verificar possíveis vazamentos nos dutos condutores de biogás.

Considerando que o aterro a ser construído terá todas as medidas necessárias para uma boa recuperação do biogás presumiu-se que o sistema de coleta de gás instalado terá uma eficiência de 85%. Portanto, 15% do biogás continuará a escapar como emissões voláteis (emissões fugitivas).

A eficiência de coleta escolhida está acima da considerada como típica, um valor de 75% (WORLD BANK, 2003), porém é igual a eficiência utilizada no Projeto de Aproveitamento de Biogás do Aterro Sanitário – Novagerar (ECOSECURITIES, 2004).

Considerando a eficiência, uma geração de metano mais próxima do real pode ser observada na figura 41.

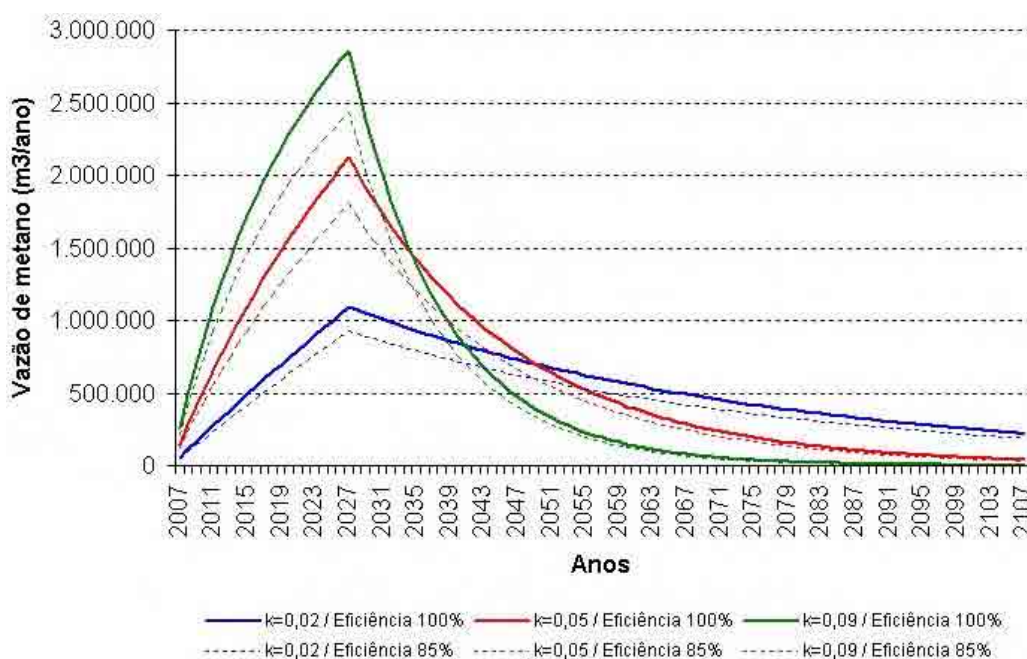


Figura 41: Aplicação da eficiência de coleta à geração de metano

5.7 ESCOLHA DO GRUPO MOTO GERADOR

Empresas sediadas em países como Estados Unidos, Alemanha, Inglaterra e Holanda exibem farta experiência e fornecimento de tecnologia de recuperação de

biogás. No entanto, nos tempos atuais, o número de empresas fornecedoras de equipamentos vêm se ampliando no mercado nacional. Baseado em fatores importantes como a geração de empregos, incentivo à tecnologia nacional e menor custo, determinou-se que seja dada a preferência às empresas existentes no mercado nacional. Para isso, não desprezando as demais empresas do mercado nacional, apresentam-se dados de moto geradores das empresas TRIGÁS e BRASMETANO.

Os motores de combustão interna são o tipo de tecnologia de conversão mais utilizados em projetos de recuperação de biogás. Existem motores estacionários similares ao motor convencional de um automóvel, sendo que estes também vem sendo utilizados para a geração de energia elétrica com biogás. A tabela 30 apresenta as especificações técnicas de um grupo gerador de energia elétrica a gás da empresa nacional TRIGÁS.

Tabela 30: Especificações técnicas do grupo gerador de energia elétrica

Grupo gerador de energia elétrica a gás (Especificações Técnicas)					
GERADOR					
Modelo	GT 20	GT 25	GT 30	GT 40	GT 50
Potência	20 kva	25 kva	30 kva	*40 kva	*50 kva
Tensão	127/220/380/440				
Fase	Monofásico/Trifásico				
Sistema de Partida	Manual/Automático				
Acoplamento	Monobloco				
Bateria	12V - 56A				
MOTOR					
Motor	1.0	1.8	2.0	4.0	4.0
Potência	35CV	45CV	50CV	65CV	90CV
Rotação - RPM	3.600	3.600	3.600	1.800	3.600
Nº de cilindros	4	4	4	6	6
Vol. de Óleo no Carter (s/ filtro)	3 litros	3 litros	3 litros	4 litros	4 litros
Sistema de Refrigeração	Radiador/Trocador de Calor**				
Combustível	GN/GLP				
Sistema de Controle	Microprocessado				
Comprimento	1.400mm	1.400mm	1.400mm	1.900mm	1.900mm
Altura	1.000mm	1.000mm	1.000mm	1.000mm	1.000mm
Largura	750mm	750mm	750mm	750mm	750mm
Peso	150kg	200kg	250kg	600kg	600kg

* Ainda não disponível para venda

** Biogás - Sob Consulta

Fonte: TRIGÁS (2005).

Os motores de combustão interna apresentam uma boa relação custo-benefício e são, especialmente em pequenos aterros, apontados como a única opção viável.

Existe no mercado nacional a opção de motores que podem ser instalados em áreas cobertas e ou já instalados em contêineres, conforme demonstra a figura 42.



Figura 42: Moto geradores em contêineres

Fonte: BRASMETANO (2005).

Esta opção é oferecida pela empresa nacional BRASMETANO, que oferece motores com três capacidades, 60 kW, 150 kW e 200 kW, cujos conjuntos poderão operar 24 horas por dia (BRASMETANO, 2005). Os investimentos necessários à aquisição e implantação desses equipamentos são variáveis em função da potência, aplicação, localidade e instalações e se situam entre R\$ 1.400 e R\$ 3.000 por kW instalado. Segundo a BRASMETANO, a eficiência dos conjuntos varia em função da preparação do motor, que pode ser apenas aspirado, turbinado ou turbo *intercooler*.

Nestas situações, o rendimento pode variar entre 30 e 42% (BRASMETANO, 2005).

A mesma empresa oferece conjuntos que permitem a utilização do calor do gás de escape e do sistema de refrigeração para a evaporação de chorume, nos aterros, ou

tratamento térmico e secagem de lodos biológicos das estações de tratamento de efluentes - ETE.

Ainda segundo a BRASMETANO (2005), a qualidade das manutenções e o acompanhamento adequado da máquina poderão lhe render uma vida útil entre 40.000 e 80.000 horas.

Esta variação se dá em função não só da manutenção mas da qualidade do gás, das trocas de óleo, da qualidade dos filtros, dentre outros.

Os equipamentos fornecidos pela BRASMETANO apresentam a seguinte composição:

- Motor em ciclo Otto a biogás, opcionalmente a gás natural, com opções para turbo alimentado e *intercooler* com várias opções de potência de até 300 CV (220 kW), 6 ou 12 litros de cilindrada, de fabricação brasileira;
- Sistema de alimentação e ignição gerenciadas eletronicamente;
- Geradores sem escovas com potência de até 250 kW;
- Aspiração do biogás feita pelo conjunto motor-compressor, dispensa unidade central para a sucção e bombeamento do biogás;
- Unidade de tratamento do biogás;
- Unidade independente de resfriamento e controle de temperatura;
- Árvore de válvulas seccionadoras e de segurança, na rede de alimentação de biogás;
- Painel de comando manual opcionalmente integrado para paralelismo com a rede de distribuição do Sistema Nacional;
- Instalação disponível em contêineres de 20 e 40 pés;
- Garantia de 1 ano ou 5.000 horas; e,
- Vida útil de 40.000 a 80.000 horas.

5.8 ESTIMATIVA DA POTÊNCIA ELÉTRICA

Para a realização da estimativa da potência elétrica disponível para o biogás, considerou-se que este passará por um processo de separação e purificação para que somente o gás metano seja aproveitado, fornecendo assim um combustível de PCI de $35,53 \text{ MJ/m}^3$ (8.500 kcal/m^3).

Fatores como custo, eficiência, tecnologia mais comum e necessidade de menor vazão de metano levaram, entre outras opções, à escolha do motor de combustão interna acoplado ao gerador elétrico.

Para o cálculo da potência utilizou-se a seguinte equação:

$$\text{Pot}_{\text{ano}} = \frac{Q_{\text{metano}} \cdot \text{PCI}_{\text{metano}} \cdot E}{31.536.000} \quad (11)$$

Sendo:

Pot_{ano} : potência disponível a cada ano [kW]

Q_{metano} : vazão do metano a cada ano [$\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{ano}$]

$\text{PCI}_{\text{metano}}$: poder calorífico inferior [$\text{kJ/m}^3 \text{ CH}_4$]

E: eficiência de coleta de gases [%]

31.536.000: fator de conversão [s/ano]

Aplicando a equação (11) e utilizando a vazão de metano obtida a cada ano pode-se estimar a potência correspondente para cada ano.

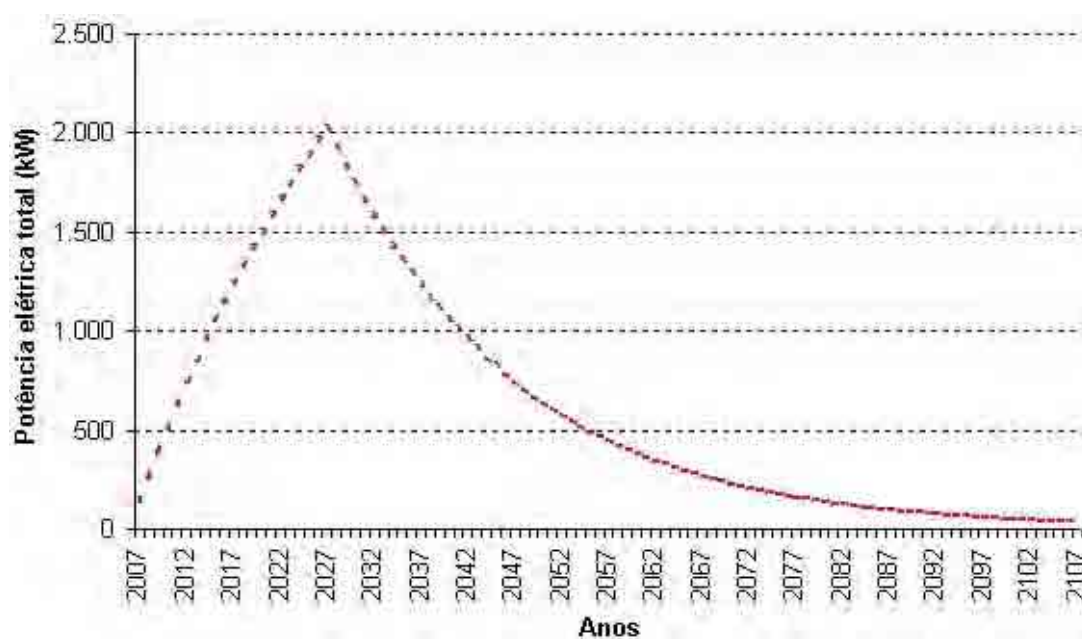


Figura 43: Estimativa de Potência disponível no aterro

A eficiência adotada para o motor de combustão interna foi de 33%. Aplicando o valor da eficiência adotada obteve-se a figura 44.

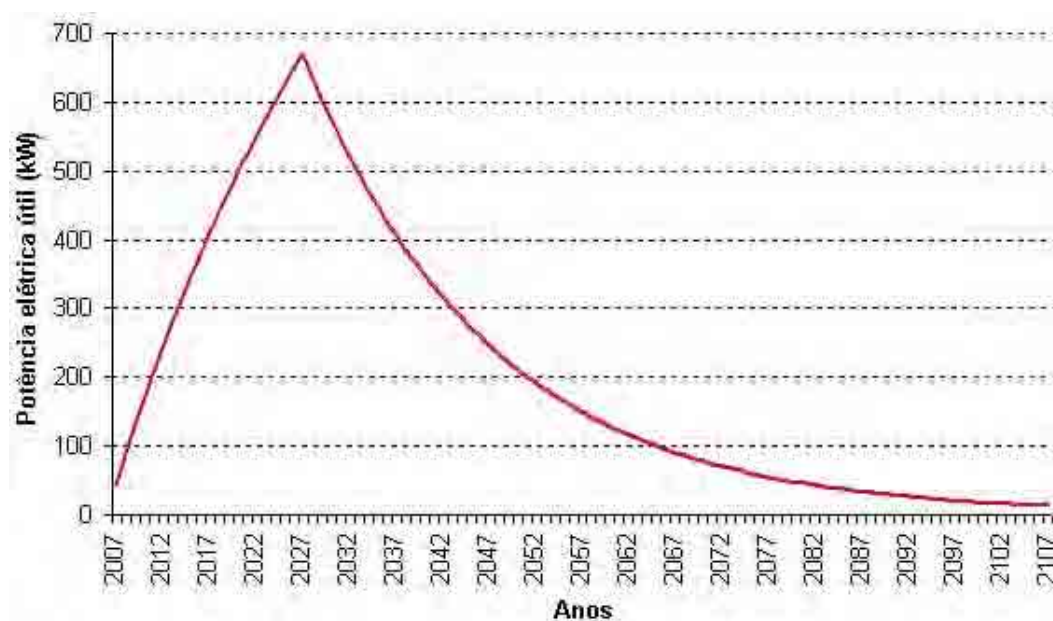


Figura 44: Potência elétrica útil

O projeto de aproveitamento de biogás em aterros com o objetivo de gerar energia elétrica deve considerar o fato da produção de biogás ser variável ao longo do tempo, buscando assim uma maximização da produção de energia e do uso do biogás, considerando-se também possíveis penalidades previstas em contrato por interrupções na geração de energia, se esta for fornecida para a região (ENSINAS, 2003).

Uma proposta mais adaptada ao projeto é a instalação de uma usina modular de geração de energia elétrica. As unidades modulares do sistema gerador tornam possíveis a adaptação do equipamento para os volumes de gás específicos do local. Conforme os volumes de gás diminuem com o tempo, os módulos podem ser recolocados em outros locais.

Para que o biogás seja aproveitado ao máximo, considerou-se que há a recuperação do biogás do início (2007) ao fechamento do aterro (2027) e nos períodos após o seu fechamento.

A figura 45 propõe várias etapas de aproveitamento de metano para geração de energia elétrica utilizando grupos moto geradores adaptados à vazão de metano local.

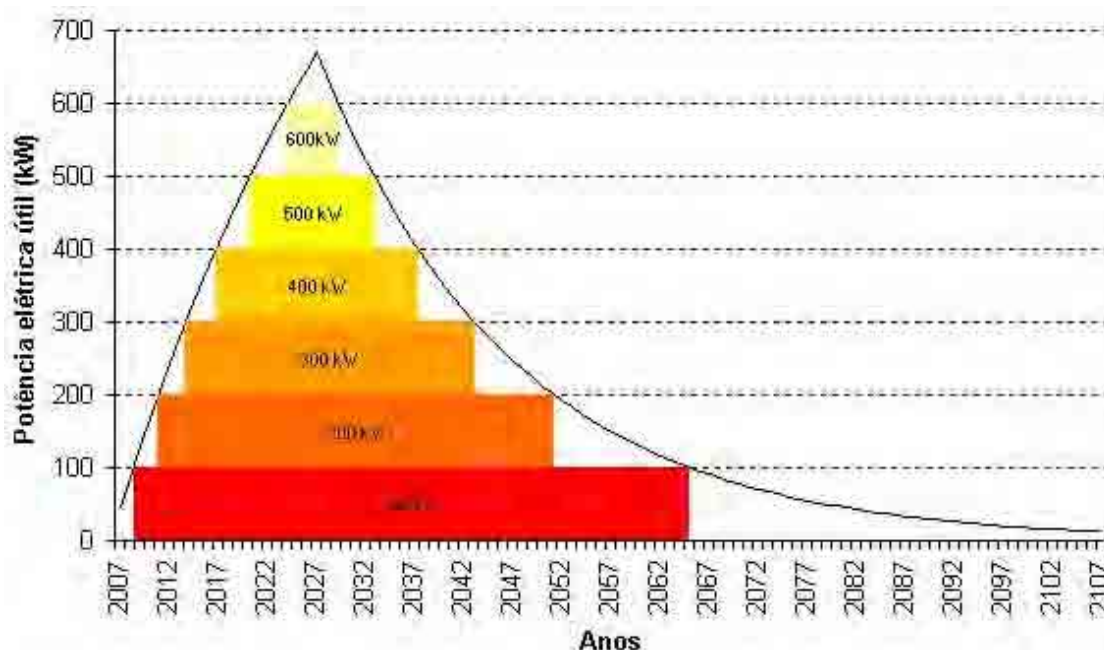


Figura 45: Simulação de grupos moto geradores

5.9 ETAPAS DO PROJETO

O projeto apresentado prevê a recuperação do biogás durante e após as atividades no aterro. O projeto foi dividido em cinco etapas, nas quais serão utilizados grupos moto geradores produzindo eletricidade.

As etapas do projeto e a potência instalada para cada etapa podem ser visualizadas na figura 46.

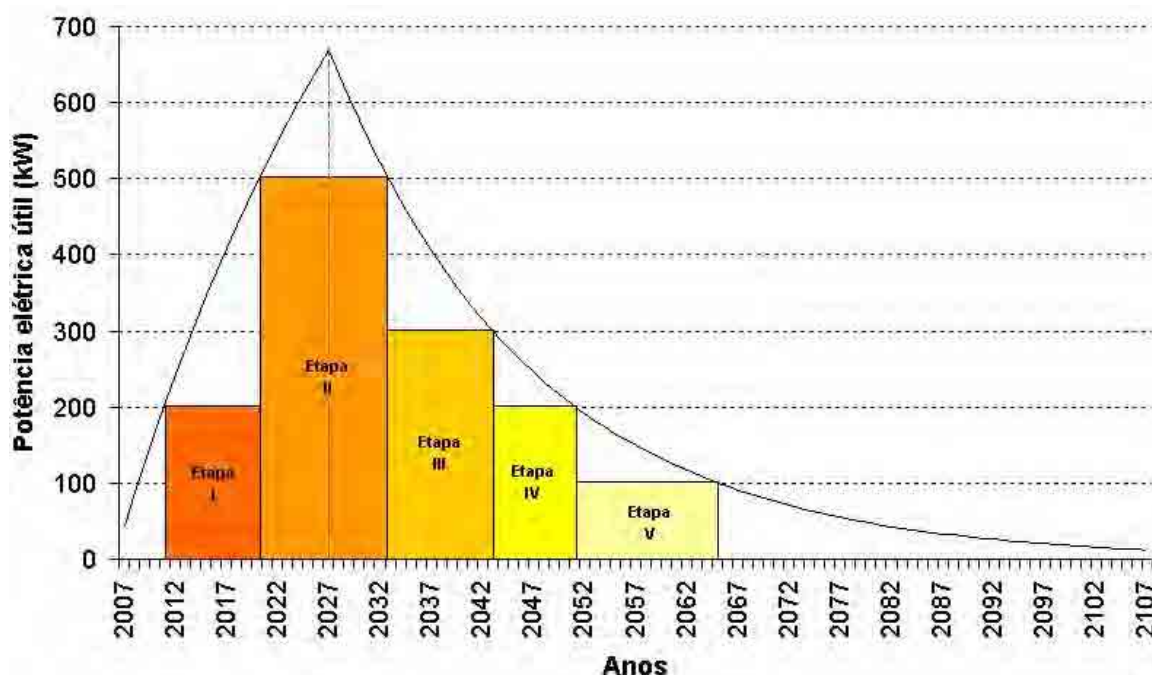


Figura 46: Etapas de aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica com motores de combustão interna

Para que possam ser obtidos os dados necessários ao projeto de recuperação de biogás proposto, estipulou-se o ano de 2011 como a data inicial de aproveitamento energético do biogás (visando a geração de energia elétrica) e para o encerramento do mesmo, o ano de 2065.

A tabela 31 apresenta as etapas do projeto com o seu respectivo período de operação.

Tabela 31: Etapas do projeto e período de operação

Etapas	Período
Etapa I (200 kW)	2011 – 2019
Etapa II (500 kW)	2020 – 2032
Etapa III (300 kW)	2033 – 2043
Etapa IV (200 kW)	2044 – 2051
Etapa V (100 kW)	2052 – 2065

O projeto considera que o total de 1 milhão de resíduos dispostos ao longo de 20 anos ocuparão uma área de 100.000 m² a uma profundidade média de 10 m.

O raio do dreno de biogás considerado para o projeto é de 50 m, o que resulta em um espaçamento de 100 m entre os drenos.

É necessário saber o número de drenos que serão colocados no aterro, pois estes também serão incluídos na análise dos custos do sistema de coleta. A equação (12) é utilizada para encontrar o número de drenos necessários ao projeto.

$$N_D = \frac{A_A}{A_D} \quad (12)$$

Sendo:

N_D : número de drenos

A_A : área do aterro [m²]

A_D : área do dreno [m²]

A vazão de metano necessária para a obtenção da potência considerada em cada etapa pode ser obtida através da equação (13).

$$Q_{CH_4} = \frac{Pot_{etapa} \cdot 31.536.000}{PCI_{CH_4} \cdot \eta_{motor}} \quad (13)$$

Sendo:

Q_{CH_4} : vazão do metano na etapa [m³ CH₄/ano]

Pot_{etapa} : potência útil disponível a cada etapa [kW] [300, 600, 400, 200, 100 kW]

31.536.000: fator de conversão [s/ano]

PCI_{CH_4} : poder calorífico inferior [$\text{kJ/m}^3 \text{CH}_4$]

η_{motor} : rendimento do motor de combustão interna [%]

O valor obtido com o cálculo da vazão de biogás em cada etapa é importante, pois com este pode-se determinar o valor dos recursos obtidos na venda de CERs. Este cálculo também será importante na determinação das dimensões e custos dos equipamentos (por exemplo, sopradores e compressores), custos com o tratamento e o condicionamento do gás.

A quantidade de resíduo disposta na etapa I é de 593.561 t (2007 a 2019). Esta primeira etapa ocupará 59.356 m^2 dos 100.000 m^2 totais. O número de drenos necessários para esta etapa é 6. Considerou-se também que 700 m de tubos serão implantados no sistema de coleta.

A vazão necessária para a obtenção da potência da etapa inicial (200 kW) é de $537.932 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ano}$.

Na etapa II serão dispostos 405.320 t de resíduos (2020 a 2027). Esta etapa caracteriza-se pela finalização das atividades no aterro e pela recuperação do biogás após o seu fechamento. Serão acrescentados mais 4 drenos totalizando em 10 o número de drenos necessários a todas as etapas.

Será necessária a colocação de mais 300 m de tubos. Estes tubos são interligados com os tubos já existentes na etapa I configurando ao sistema de coleta um total de 1.000 m de tubos dispostos.

A etapa II terá uma potência instalada de 500 kW e a sua vazão será de $1.344.830 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ano}$.

Na etapa III e nas demais etapas, excluem-se os custos com a perfuração de novos poços, novos cabeçotes e nova tubulação, pois estes já estão implantados desde a etapa II. Entretanto, consideram-se os custos com a operação e manutenção destes equipamentos. A vazão de $806.898 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ano}$ é suficiente para a potência desta etapa (300 kW).

A etapa IV apresenta a vazão de $537.932 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ano}$ e a etapa V a vazão de $268.966 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ano}$.

5.10 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

O gás metano possui um potencial de aquecimento global (GWP - *Global Warning Power*) 21 vezes maior que o dióxido de carbono considerando-se um período de 100 anos. A implantação de projetos de aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário ajuda na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), pois a queima do biogás transforma o metano em dióxido de carbono e vapor d'água. Essa redução do potencial de efeito estufa possibilita que projetos como este se enquadre como candidato ao financiamento externo do chamado mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) previsto no Protocolo de Kyoto.

O valor utilizado como referência para o certificado de redução de emissão no mecanismo citado é de US\$ 5/t CO₂ (UNFCCC, 2005).

A tonelada de CO₂ equivalente pode ser obtida pela equação (14).

$$\text{CO}_2 \text{ Eq.} = Q_{\text{CH}_4} \cdot d_{\text{CH}_4} \cdot \text{GWP} \quad (14)$$

Sendo:

CO₂ Eq.: quantidade de CO₂ equivalente [t de CO₂]

Q_{CH₄}: volume de metano [m³]

d_{CH₄}: densidade do metano [t/m³]

GWP: potencial de aquecimento global [CO₂/CH₄]

A densidade de metano utilizada nos cálculos é de $0,7167 \cdot 10^{-3} \text{ t/m}^3$ (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

Para o período de 2007 a 2107 tem-se uma produção total de 66.523.414 m³ de CH₄, que equivale a 1.001.224 t CO₂.

No período de 2011 a 2065 a quantidade de metano lançado à atmosfera será de aproximadamente 59.737.327 m³ de CH₄ se não for aplicado nenhum tipo de tratamento, em termos de dióxido de carbono, esta quantidade equivale a 899.088 t de CO₂.

Neste mesmo período, se todo biogás coletado for utilizado, serão lançados à atmosfera (emissões fugitivas) somente 134.863 t de CO₂ equivalente. Os cálculos para a obtenção do CO₂ equivalente estão apresentados na tabela 32.

Tabela 32: Quantidade equivalente de CO₂ ao CH₄ emitido pelo aterro

Período	Emissão Total		Coleta com eficiência de 85%		Emissões fugitivas (15%)	
	CH ₄ (t)	CO ₂ (t)	CH ₄ (t)	CO ₂ (t)	CH ₄ (t)	CO ₂ (t)
2011 a 2065	42.814	899.088	36.392	764.232	6.422	134.863

O valor que pode ser obtido com a venda de CERs no período apresentado na tabela é de US\$ 3.821.160. Este valor só será obtido se for dada uma utilização para todo o biogás gerado.

Uma outra consideração importante é que a existência do Protocolo de Kyoto está prevista até o ano de 2012, portanto o valor obtido com a venda de CER será possível somente se o protocolo for estendido ao período considerado .

CAPÍTULO 6 ANÁLISE ECONÔMICA

6.1 CUSTOS DAS TECNOLOGIAS

Para os custos da recuperação do biogás de aterro devem ser considerados o número de poços drenantes de biogás requeridos, a área em que o biogás é inicialmente coletado, o fluxo de biogás existente, a pressão em que o sistema vai operar, entre outros.

Segundo a USEPA (1996a), os custos de construção do sistema de recuperação variam entre US\$ 100.000 a US\$ 200.000 por quilômetro, dependendo de vários fatores incluindo o fluxo de gás, diâmetro e material da tubulação, capacidade do compressor e do local onde passará os sistemas de coleta (gasoduto).

Cada equipamento para a utilização do biogás, assim como uma caldeira ou motor, possuem custos unitários e são dependentes do tamanho do projeto.

Equipamentos para a geração de eletricidade incluem o sistema para a purificação do biogás, o compressor, o gerador e equipamentos auxiliares .

O custo de capital para estes componentes pode variar amplamente de acordo com o fluxo de biogás, capacidade de geração, tipo de compressor e outros fatores. Para motores de combustão interna, excluindo o custo de outros componentes, são estimados valores entre US\$ 350 e US\$ 500 por kW (USEPA, 1996a).

O custo de capital típico para um sistema completo, incluindo os equipamentos necessários para conectar o projeto à rede, está em torno de US\$ 1.200 por kW de capacidade de geração. Este custo inclui também o compressor, o gerador, a preparação do local e equipamentos auxiliares.

Em adição aos custos de capital, pode-se adicionar o custo da instalação das linhas de eletricidade. O custo da operação para a geração de eletricidade pode ser estimado em US\$ 0,01 a US\$ 0,025 por kWh de eletricidade produzida (USEPA, 1996a). O valor preciso para este custo dependerá do custo da mão de obra e dos materiais utilizados, bem como o tipo de equipamento utilizado.

A tabela 33 apresenta alguns valores que podem ser utilizados para se determinar os custos de capital decorrentes de um projeto de recuperação de biogás visando a geração de eletricidade.

Tabela 33: Custos do sistema de recuperação de biogás em aterros sanitários

SISTEMA DE COLETA	
Componentes	Custo
Poços	US\$ 262 / m de profundidade
Cabeçotes	US\$ 750 a unidade
Tubulação	US\$ 115 / m
Soprador	US\$ 706 / m ³ / min.
Remoção de condensado	US\$ 8.000 a unidade
Sistema de monitoramento	US\$ 1.000 a unidade
Instalação do sistema de coleta e outros custos	Os valores apresentados acima já incluem os custos da instalação
O&M do sistema de coleta	US\$ 1.000 / poço / ano
SISTEMA DE COMPRESSÃO	
Componentes	Custo
Compressor	US\$ 1.350 / hp
O&M do sistema de compressão	US\$ 12.000 / unidade / ano
FLARE (QUEIMADOR)	
Componentes	Custo
Flare	US\$ 75.000 a unidade
Instalação do Flare	O valor acima já inclui este custo
O&M do sistema Flare	US\$ 2.000 / ano
CONDICIONAMENTO DO GÁS / TRATAMENTO	
Componentes	Custo
Lavador	US\$ 530 / m ³ / min.
Dessecador	US\$ 353 / m ³ / min.
Refrigeração	US\$ 2.118 / m ³ / min.
Filtros	US\$ 3.200 a unidade
Instalação de tratamento do gás e outros custos	US\$ 530 / m ³ / min.
O&M do tratamento do gás	US\$ 10.000 / ano
CUSTOS DA INTERCONEXÃO	
Componentes	Custo
Subestação	US\$ 60 / kW
Chave	US\$ 10 / kW
Sistema de desconexão	US\$ 20 / kW
Instalação da interconecção	US\$ 20 / kW
O&M (variável)	US\$ 0,20 / MWh / ano
O&M (fixo)	US\$ 2.000 / ano
GERAÇÃO DE ELETRICIDADE	
Componentes	Custo
Custos dos sistemas de controle	US\$ 150 / kW
Instalação da geração de eletricidade e outros custos	US\$ 400 / kW
Grupo moto-gerador (baixa e alta pressão)	US\$ 450 / kW
O&M (variável)	US\$ 10 / MWh / ano
O&M (fixo)	US\$ 75.000 / MW / ano

Fonte: USEPA (1997b).

6.2 ESTIMATIVA DE CUSTOS

A atratividade de um projeto pode ser avaliada por um estudo de viabilidade econômica. Dentro deste estudo podem ser analisados os custos com a operação, manutenção, taxas, juros, impostos, seguro, licenças, investimento necessário para a realização do projeto, entre outros. Estes estudos dependem da disponibilidade de dados e da complexidade pretendida à análise econômica.

Para o projeto proposto determinou-se os custos de cada etapa, nos quais foram considerados o sistema de coleta, *flare*, condicionamento e tratamento do gás, interconexão e equipamentos necessários para a geração da eletricidade. Todos estes custos somados possibilitaram a obtenção do valor do investimento para cada etapa.

Também foram considerados os custos de operação e manutenção (O&M) dos sistemas existentes em cada etapa.

Baseado nas informações apresentadas na tabela 33 (seção 6.1) pode-se determinar os custos da recuperação de biogás em todo o projeto.

Inicialmente, apresentam-se na tabela 34 os custos da etapa I.

Tabela 34: Custos da Etapa I

ETAPA I (2011-2019)	
Sistema de Coleta	US\$ 116.223
O&M	US\$ 6.000 ao ano
<i>Flare</i>	US\$ 75.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Condicionamento do gás/ tratamento	US\$ 61.325
O&M	US\$ 10.000 ao ano
Interconexão	US\$ 22.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Equipamento para a geração de eletricidade	US\$ 200.000
O&M	US\$ 15.000 ao ano
Total anual O&M	US\$ 35.000
Total O&M para a etapa	US\$ 315.000
Investimento inicial	US\$ 414.256
Investimento da etapa	US\$ 474.548

Nas etapas I e II são considerados além dos custos de O&M os custos com a perfuração de poços, instalação de cabeçotes e a colocação dos tubos da rede de coleta.

A tabela 35 apresenta os custos da etapa II.

Tabela 35: Custos da Etapa II

ETAPA II (2020-2032)	
Sistema de Coleta	US\$ 80.680
O&M	US\$ 10.000 ao ano
<i>Flare</i>	US\$ 75.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Condicionamento do gás/ tratamento	US\$ 159.050
O&M	US\$ 10.000 ao ano
Interconexão	US\$ 55.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Equipamento para a geração de eletricidade	US\$ 500.000
O&M	US\$ 37.500 ao ano
Total anual O&M	US\$ 61.500
Total O&M para a etapa	US\$ 799.500
Investimento inicial	US\$ 701.238
Investimento da etapa	US\$ 869.730

A partir da etapa III desconsideram-se os custos com a implantação de cabeçotes, tubulação e perfuração de novos poços. Nesta etapa não há mais a disposição de resíduos sólidos e os sistemas citados acima já encontram-se dispostos desde a etapa II. Os custos existentes na etapa III podem ser observados na tabela 36.

Tabela 36: Custos da Etapa III

ETAPA III (2033-2043)	
Sistema de Coleta	US\$ 20.922
O&M	US\$ 10.000 ao ano
<i>Flare</i>	US\$ 75.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Condicionamento do gás/ tratamento	US\$ 94.828
O&M	US\$ 10.000 ao ano
Interconexão	US\$ 33.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Equipamento para a geração de eletricidade	US\$ 300.000
O&M	US\$ 22.500 ao ano
Total anual O&M	US\$ 46.500
Total O&M para a etapa	US\$ 511.500
Investimento inicial	US\$ 426.705
Investimento da etapa	US\$ 523.751

A etapa IV, que está prevista no período de 2044 a 2051 tem os seus custos apresentados na tabela 37.

Tabela 37: Custos da Etapa IV

ETAPA IV (2044-2051)	
Sistema de Coleta	US\$ 14.781
O&M	US\$ 10.000 ao ano
<i>Flare</i>	US\$ 75.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Condicionamento do gás/ tratamento	US\$ 54.511
O&M	US\$ 10.000 ao ano
Interconexão	US\$ 22.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Equipamento para a geração de eletricidade	US\$ 200.000
O&M	US\$ 15.000 ao ano
Total anual O&M	US\$ 39.000
Total O&M para a etapa	US\$ 312.000
Investimento inicial	US\$ 313.536
Investimento da etapa	US\$ 366.291

A etapa V é caracterizada pelo encerramento da recuperação do biogás no projeto e tem os seus custos demonstrados na tabela 38.

Tabela 38: Custos da Etapa V

ETAPA V (2052-2065)	
Sistema de Coleta	US\$ 14.058
O&M	US\$ 10.000 ao ano
Flare	US\$ 75.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Condicionamento do gás/ tratamento	US\$ 70.097
O&M	US\$ 10.000 ao ano
Interconexão	US\$ 11.000
O&M	US\$ 2.000 ao ano
Equipamento para a geração de eletricidade	US\$ 100.000
O&M	US\$ 7.500 ao ano
Total anual O&M	US\$ 31.500
Total O&M para a etapa	US\$ 441.000
Investimento inicial	US\$ 200.368
Investimento da etapa	US\$ 270.155

Baseando-se na vazão de metano necessária a cada etapa (calculada na seção 5.9) pode-se obter os valores dos recursos anuais e totais (considerando o período de cada etapa) que podem ser conseguidos com a venda de CERs (participação no MDL). A tabela 39 apresenta estes valores.

Tabela 39: Recursos obtidos com a venda de CERs

Venda de CER					
	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Etapa V
Valor	US\$ 40.481/ano	US\$ 101.203/ano	US\$ 60.722/ano	US\$ 40.481/ano	US\$ 20.241/ano
Total	US\$ 364.331	US\$ 1.315.641	US\$ 667.941	US\$ 323.850	US\$ 283.369

* Considerando o valor de US\$ 5 t/CO₂

Para verificar a viabilidade de cada etapa pode-se determinar o custo da produção de eletricidade. A determinação do custo da eletricidade pode ser obtido pela equação (15) (FEG, 2004) .

$$C_{el} = \frac{Inv_{etapa} \cdot f}{H \cdot E_p} + C_{O\&M} \quad (15)$$

Sendo:

C_{el}: custo da eletricidade produzida [US\$/kWh]

Inv_{etapa} : investimento inicial da etapa [US\$]

f : fator de anuidade [ano^{-1}]

$C_{O\&M}$: custo da operação e manutenção da etapa [US\$/kWh]

H : número de horas de operação ao longo do ano [h/ano]

E_p : potência elétrica instalada na etapa [kW]

Os números de horas de operação utilizados nos cálculos foram 6.000, 7.000 e 8.000 h/ano.

O fator de anuidade pode ser obtido pela seguinte equação:

$$f = \frac{q^i \cdot (q - 1)}{q^i - 1} \quad (16)$$

Onde:

i = “pay back” ou período de amortização do capital investido (anos)

O período de amortização do capital investido (“pay back”) varia de 1 a 8 anos.

A variável q pode ser definida pela equação (17).

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (17)$$

Onde:

r = taxa anual de juros (%/ano)

As taxas de juros aplicadas foram de 5%, 10%, 15% e 20% ao ano.

As tabelas com os custos da geração de eletricidade em relação ao “pay back” adotado, número de horas de operação e venda de CER (abatimento no custo da eletricidade) estão apresentadas no APÊNDICE.

Segundo a empresa BANDEIRANTE (2005), o valor aplicado à tarifa convencional de energia elétrica é de R\$ 190,87/MWh (R\$ 0,19087/kWh). Segundo as informações no *site* da empresa, esta é uma tarifa convencional para média e alta tensão. O seu valor equivalente na moeda americana é de US\$ 0,07953 /kWh.

O valor pago pela operadora local define a viabilidade ou não da geração elétrica pela recuperação de biogás. Da mesma maneira, o custo de combustíveis convencionais é o que define o uso do biogás para a geração de energia mecânica ou calor (ALVES, 2000). Entretanto, a produção de energia elétrica para suprir a demanda interna do aterro e de possíveis sistemas de tratamento existentes neste, permite que seja comparado o preço da energia elétrica gerada com o cobrado pela concessionária local.

Com base no valor aplicado no mercado para o custo da eletricidade pode-se verificar qual o tempo de retorno adquirido para cada etapa.

As figuras a seguir apresentam o tempo de retorno (“pay back”) em função do custo da eletricidade para todas as etapas do projeto. Neste caso, são apresentadas apenas as taxas de juros de 5% por serem estas mais próximas das taxas de juros aplicadas para as fontes alternativas de energia, no qual é utilizada uma taxa de juros de 3,5% ao ano (BNDES, 2005).

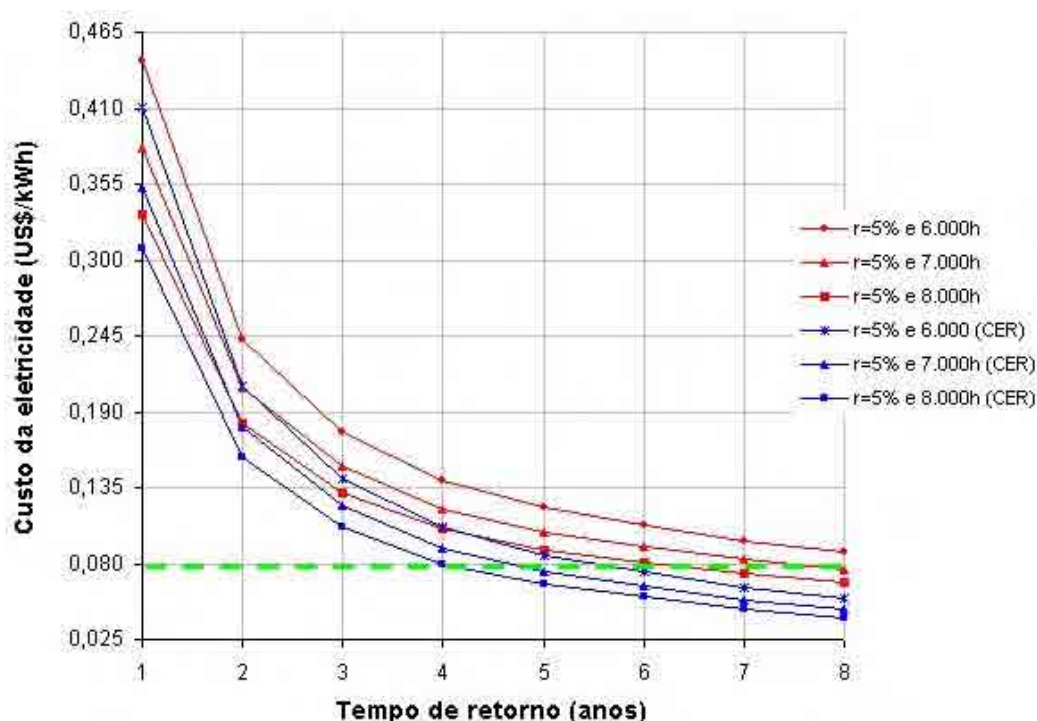


Figura 47: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa I)

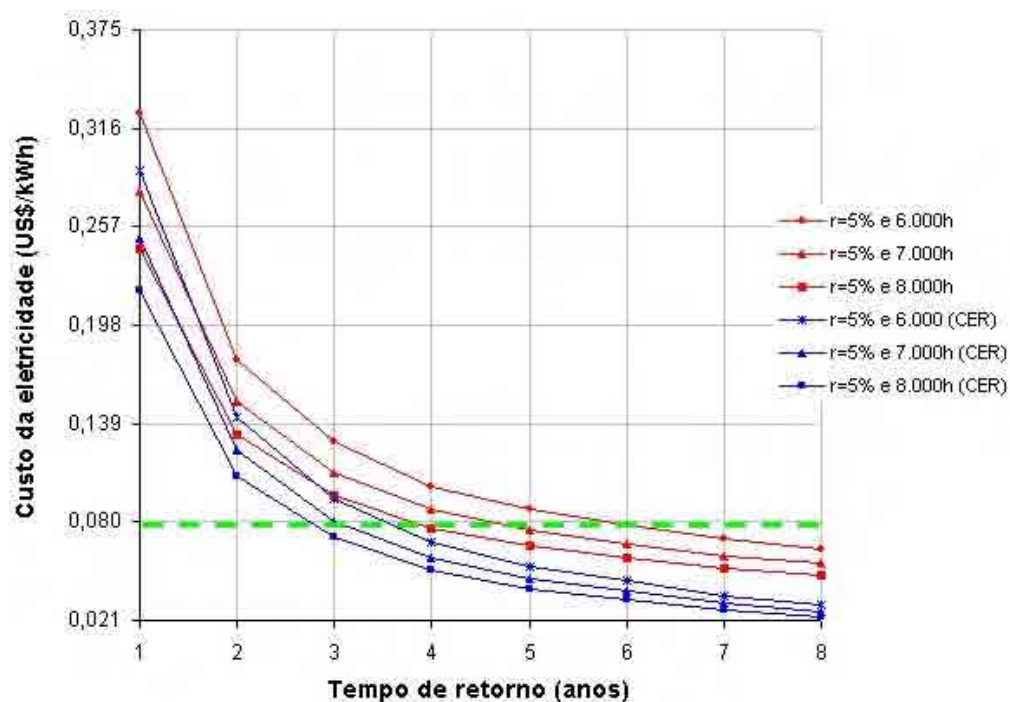


Figura 48: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa II)

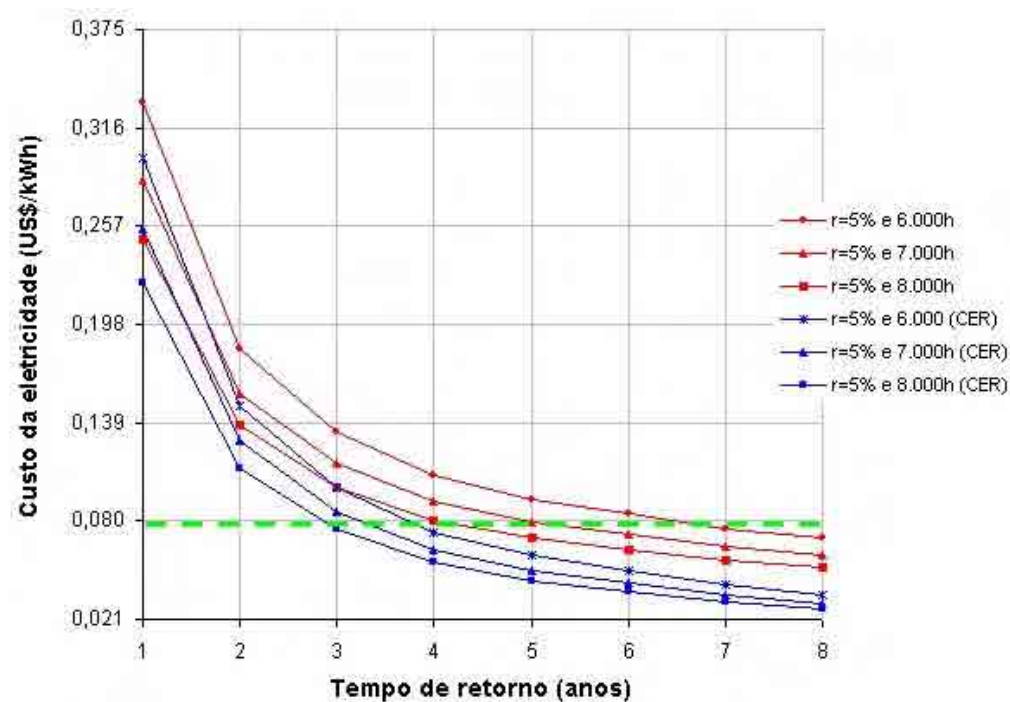


Figura 49: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa III)

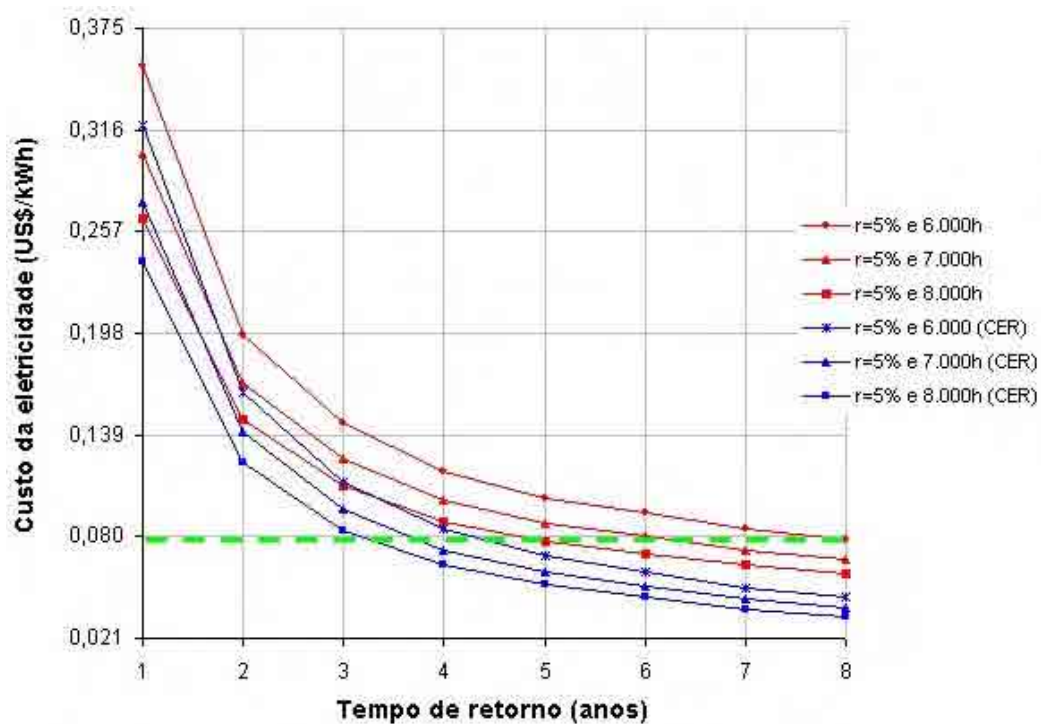


Figura 50: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa IV)

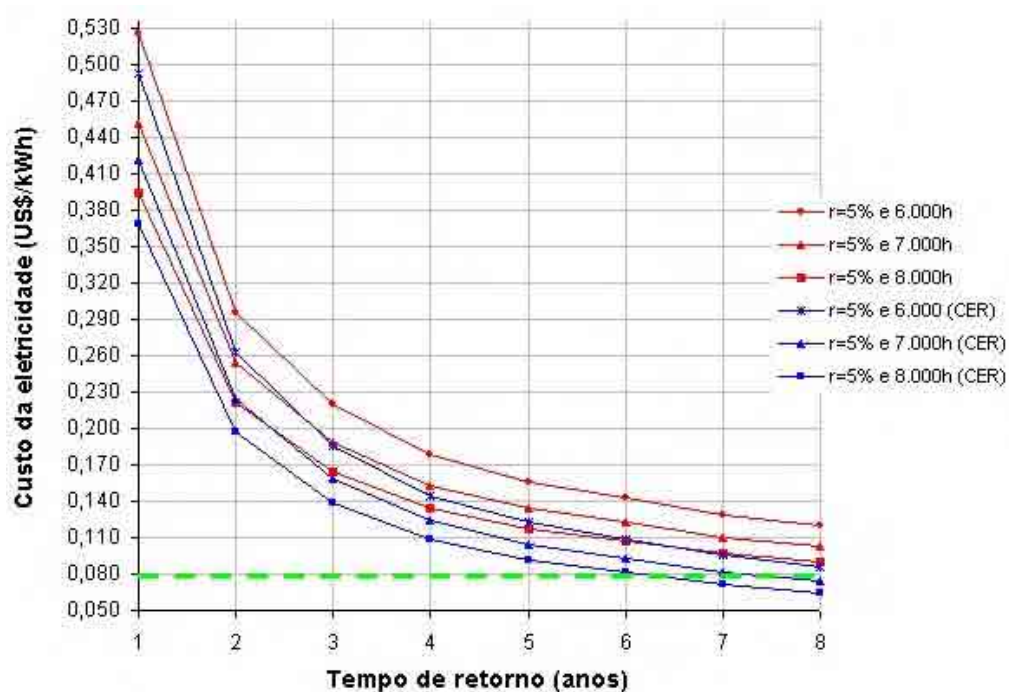


Figura 51: Custo de produção de eletricidade em função do tempo de retorno (Etapa V)

6.3 RECURSOS FINANCEIROS

6.3.1 Linhas de financiamento internacional

Os países desenvolvidos têm o compromisso de destinar 0,7% do seu Produto Nacional Bruto - PNB para a assistência oficial ao desenvolvimento (UNCED, 1997).

Apresenta-se abaixo, algumas fontes internacionais oficiais de cooperação técnica, científica e tecnológica ou financeira que podem vir a financiar projetos ligados à melhoria ambiental, redução de emissão de GEE e uso racional de recursos naturais (ALVES, 2000):

- Administração para o Desenvolvimento Ultramarino (*Overseas Development Agency - ODA*).
- Agência Canadense para o Desenvolvimento Internacional (*Canadian International Development Agency - CIDA*).
- Agência de Cooperação Técnica Internacional do Japão (*Japan International Cooperation Agency - JICA*).
- Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (*United Nations Development Program - UNDP*).
- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (*United Nations Environment Program - UNEP*).
- Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (*United Nations Industrial Development Organization - UNIDO*).
- Instituto Francês de Pesquisa para o Desenvolvimento em Cooperação (*L'institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération - ORSTOM*).
- Agência Alemã de Apoio a Projetos de Cooperação Técnica (*Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit - GTZ*).
- Banco Interamericano de Desenvolvimento (*Interamerican Development Bank - IBD*).
- Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento (*International Bank for Reconstruction and Development (IRDB)*).

- EXIMBANK do Japão (*Export Import Bank of Japan - EXIMBANK*).
- KFW (*Kreditanstalt Für Wiederaufbau - KFW*).
- Fundo Mundial para o Meio Ambiente (*Global Environmental Facility - GEF*).

Deve-se chamar atenção para o fato de que a clientela destas instituições de cooperação normalmente é composta pelo Estado, por organizações não governamentais ou por instituições sem fins lucrativos, o que indica a impossibilidade ou o difícil acesso a esses créditos pelas empresas.

6.3.2 MDL

O Protocolo de Kyoto define quatro mecanismos de flexibilização (ALVES, 2000):

- Comércio de emissões (*emissions trading*), definido no artigo 17, onde cada parte pode comprar reduções de outros países do Anexo I da UNFCCC (apresentado na tabela 3 desta dissertação), e usar essas reduções para cumprir seus próprios compromissos de redução;
- Bolhas (*bubbles concept*), definidas no artigo 4, onde os países do Anexo I da UNFCCC podem cumprir seus objetivos de redução em conjunto;
- Implementação conjunta (*joint implementation*), definida no artigo 6, onde países do Anexo I da UNFCCC podem desenvolver projetos de mitigação em conjunto, gerando créditos que podem ser usados para o cumprimento do compromisso assumido de redução;e
- Mecanismo de desenvolvimento limpo - MDL (*CDM- clean development mechanism*) definido no artigo 12 do Protocolo de Kyoto, onde países não-Anexo I da UNFCCC desenvolvem projetos de mitigação gerando certificados de emissões reduzidas - CERs (*certified emissions reduction*) ou RCEs (certificados de redução de emissão) que podem ser usados pelas partes do Anexo I da UNFCCC para cumprir seus compromissos e ajudar os países não-Anexo I a alcançar o desenvolvimento sustentado.

Dentre estes mecanismos, o MDL é o único que permite a participação de países em desenvolvimento, como o Brasil.

O propósito do MDL é prestar assistência às “Partes” não-Anexo I da CQNUMC para que viabilizem o desenvolvimento sustentável através da implementação da respectiva atividade de projeto e contribuam para o objetivo final da Convenção e, por outro lado, prestar assistência às Partes Anexo I para que cumpram seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões de gases de efeito estufa (MDL, 2002).

Os CDMs ou MDLs, em síntese, são alternativas que implicam em assumir uma responsabilidade para reduzir as emissões de poluentes e promover o desenvolvimento sustentável. Trata-se de um mecanismo de investimentos, pelo qual países desenvolvidos podem estabelecer metas de redução de emissões e de aplicação de recursos financeiros em projetos como reflorestamentos e produção de energia limpa. As empresas, por exemplo, ao invés de utilizarem combustíveis fósseis, que são altamente poluentes, passariam a utilizar energia produzida em condições sustentáveis, como é o caso da biomassa.

De acordo com o MDL, os países em desenvolvimento não têm compromisso de abatimento ou redução. Este mecanismo permite que países em desenvolvimento desenvolvam projetos de mitigação de GEE e que estes, uma vez certificados, possam ser comercializados em um mercado de créditos de carbono, por meio dos quais países industrializados possam beneficiar-se comprando o abatimento certificado e utilizando-o em seu balanço de emissões de GEE (ALVES, 2000).

Para que se tenha uma idéia do volume de recursos envolvido no MDL, considerando-se que as emissões totais anuais são da ordem de 6 bilhões de toneladas de CO₂, uma redução de 5% das emissões implica em cerca de 300 milhões de toneladas ao ano a US\$10/t de CO₂.

Basicamente há dois tipos de projetos a serem financiados pelo MDL. O primeiro inclui eficiência energética e substituição de combustíveis fósseis por renováveis. O segundo refere-se aos meios de seqüestrar carbono da atmosfera (IPI, 1998).

A emissão dos CERs leva em conta:

- Participação voluntária;

- Benefícios reais mensuráveis e de longo prazo; e,
- Redução de emissões adicionais às que ocorreriam na ausência do CDM.

Para efeitos do MDL, entende-se por atividades de projeto (*project activities*) as atividades integrantes de um empreendimento que tenham por objeto a redução de emissões de gases de efeito estufa e/ou a remoção de CO₂. As atividades de projeto devem estar exclusivamente relacionadas a determinados tipos de gases de efeito estufa e aos setores/fontes de atividades responsáveis pela maior parte das emissões, conforme previsto no Anexo A do Protocolo de Kyoto.

Para que resultem em CERs, as atividades de projeto do MDL devem, necessariamente, passar pelas etapas do Ciclo do Projeto, quais sejam:

- (1) Elaboração do Documento de Concepção do Projeto - DCP;
- (2) Validação/Aprovação;
- (3) Registro;
- (4) Monitoramento;
- (5) Verificação/Certificação;
- (6) Emissão e aprovação das CERs/RCEs.

A figura 52 ilustra uma hipótese de funcionamento na qual o mercado para a comercialização destes CERs deve permitir que os projetos certificados recebam recursos financeiros.

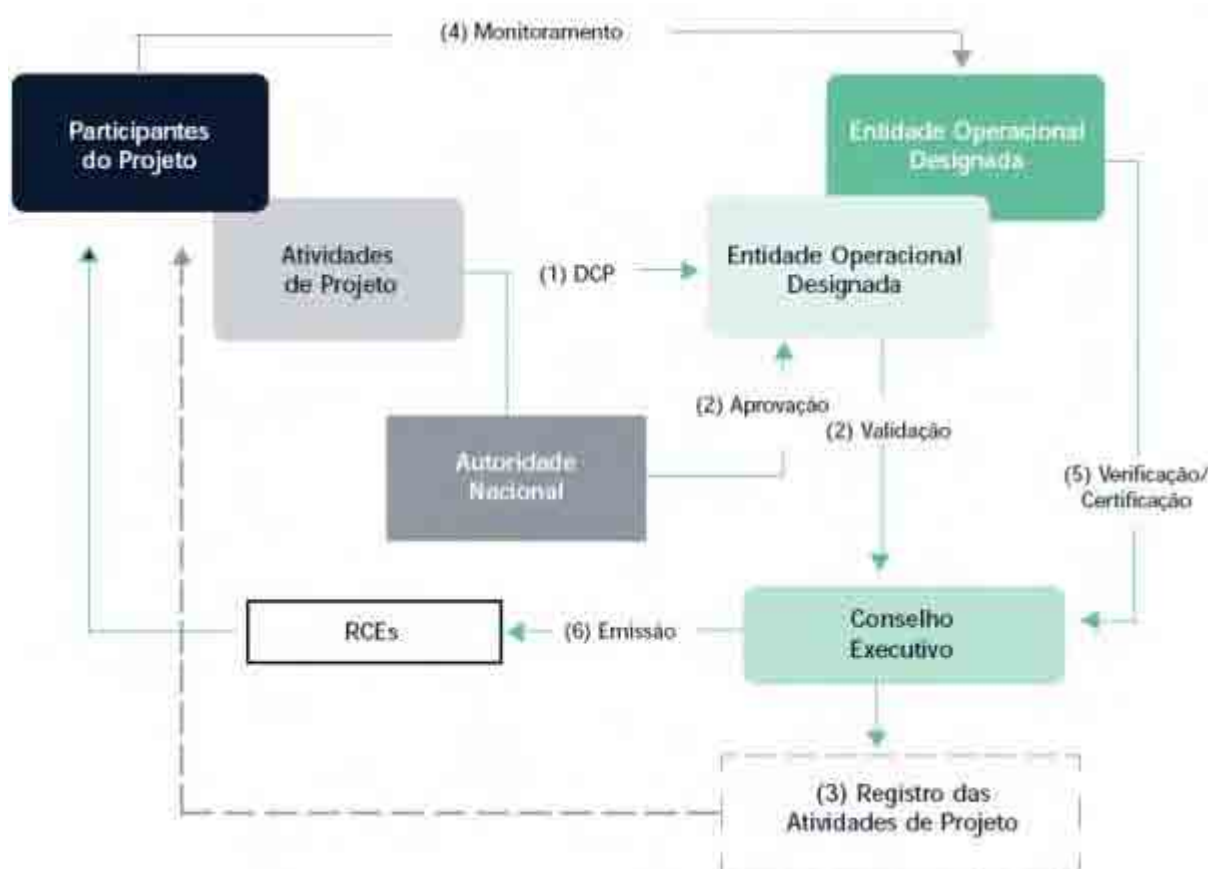


Figura 52: Ciclo do Projeto

Fonte: MDL (2002).

Este mesmo mecanismo deve permitir que países Anexo I da UNFCCC sejam beneficiados pelas reduções de emissões estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto. Também compõem este mercado as instituições certificadoras - as nacionais e internacionais, as primeiras preservando os interesses do país hospedeiro do projeto e as outras garantindo a aceitação pela UNFCCC e adicionando a credibilidade necessária aos CERs.

A origem dos recursos, como é de se esperar, vem dos países Anexo I. Os mecanismos de obtenção desses recursos dependem de que cada país.

6.3.3 BNDES

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES, ex-autarquia federal criada pela Lei nº 1.628, de 20 de junho de 1952, foi enquadrado como uma empresa pública federal, com personalidade jurídica de direito privado e patrimônio próprio, pela Lei nº 5.662, de 21 de junho de 1971 (BNDES, 2005).

O BNDES é um órgão vinculado ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior e tem como objetivo apoiar empreendimentos que contribuam para o desenvolvimento do país.

Desde a sua fundação, o BNDES vem financiando os grandes empreendimentos industriais e de infra-estrutura, tendo marcante posição no apoio aos investimentos na agricultura, no comércio e serviço e nas micro, pequenas e médias empresas, e aos investimentos sociais, direcionados para a educação e saúde, agricultura familiar, saneamento básico e ambiental e transporte coletivo de massa (BNDES, 2005).

Suas linhas de apoio contemplam financiamentos de longo prazo e custos competitivos, para o desenvolvimento de projetos de investimentos e para a comercialização de máquinas e equipamentos novos, fabricados no país, bem como para o incremento das exportações brasileiras.

O BNDES observa o conceito de desenvolvimento ambientalmente sustentável e provendo principalmente as empresas de pequeno e médio porte com recursos financeiros para crédito ambiental e fomentando iniciativas inovadoras que maximizem a eficácia da aplicação dos recursos, em projetos de preservação, conservação e recuperação ambientais.

O critério de aprovação de projetos do BNDES destaca os projetos de modernização produtiva que utilizam tecnologias, processos e procedimentos que visam reduzir a geração de resíduos, aumentar a eficiência energética e evitar utilização de insumos tóxicos (BNDES, 2005).

Os recursos do BNDES podem financiar:

- Obras civis e instalações
- Máquinas e equipamentos novos
- Avaliação de impacto ambiental

- Análises de risco e auditorias ambientais
- Programa de capacitação profissional e de educação nas áreas ambiental e de segurança do trabalho
- Assistência técnica
- Projetos de monitoramento ambiental

6.3.4 FNMA

O Fundo Nacional de Meio Ambiente - FNMA do Ministério do Meio Ambiente - MMA, foi instituído pela lei número 7.797 de julho de 1989 e visa a manutenção da qualidade ambiental.

A obtenção de recursos financeiros do FNMA está condicionada à apresentação de proposta que delimite ações para o aproveitamento do potencial natural de uma região ou que contribua para solucionar ou minimizar problemas ambientais relevantes (MMA, 2005).

Conforme MMA (2005), podem concorrer aos recursos do FNMA:

- Instituições públicas pertencentes à administração direta ou indireta, em seus diversos níveis (federal, estadual e municipal); ou
- Instituições privadas brasileiras sem fins lucrativos, que possuam atribuições estatutárias para atuar em áreas do Meio Ambiente, identificadas como:
- Organização Não Governamental (ONG); ou
- Organização da Sociedade Civil de Interesse Público (OSCIP); ou
- Organização de Base (associações de produtores, de bairro ou outras).

O FNMA financia despesas com obras e instalações, equipamentos e material permanente além de diárias, material de consumo, locomoção, serviços de consultoria e serviços de terceiros, sejam eles pessoas físicas ou pessoa jurídica (ALVES, 2000).

6.3.5 Ministério das Cidades

Os financiamentos em nível federal são coordenados pelo Ministério das Cidades e são provenientes de duas fontes orçamentárias, a saber:

- orçamento geral da união; e
- as emendas parlamentares.

A liberação dos recursos é feita através da Caixa Econômica Federal – CAIXA que é subordinada ao Ministério da Fazenda.

A Caixa aprova projetos que incentivam o crescimento, o fortalecimento de capital de giro e o programa de saneamento através do Programa Pro-Saneamento (MCIDADES, 2005).

O Programa Pro-Saneamento concede financiamento aos estados, distrito federal e municípios ou empresas estatais não dependentes, utilizando recursos provenientes do Fundo de Garantia - FGTS.

Este Programa Pro-Saneamento atende financiamentos relativos à (MCIDADES, 2005):

- Serviços de coleta, tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos;
- Estudos, concepção e projetos nas modalidades de água, esgoto, drenagem urbana e resíduos sólidos.

O Ministério das Cidades também está implantando um projeto para aplicação do Mecanismo de Desenvolvimento do Limpo (MDL) na redução de emissões em aterros de resíduos sólidos (MCIDADES, 2005).

Este projeto prevê o financiamento de até 30 estudos de viabilidade para projetos para gestão tecnológica do biogás proveniente de aterros de resíduos sólidos, no contexto dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL). Os créditos do carbono serão utilizados como alavanca estratégica de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos, seguindo o objetivo governamental de erradicar os lixões abertos, a inclusão social dos catadores e promover soluções sustentáveis para o problema do lixo no Brasil. Em outras palavras trata-se de implementar uma política que visa além do

aproveitamento energético do biogás, uma melhoria ambiental nos locais contaminados por lixões, com um ganho significativo dos aspectos sociais envolvidos, de forma a se promover o desenvolvimento sustentável das comunidades envolvidas.

O projeto está focado nos 200 maiores municípios brasileiros, onde residem 51% da população e se geram cerca de 96 mil toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos, que corresponde a 64% do total gerado no País (MCIDADES, 2005).

O processo de seleção será baseado em critérios técnicos e institucionais que vão ser estabelecidos pelo Ministério das Cidades e o Ministério do Meio Ambiente. Prioridade será dada a aqueles municípios que ainda operam lixões ou aterros pouco adequados do ponto de vista ambiental e social para a destinação final de seus resíduos ou então que tenham instalado recentemente uma solução de destinação final adequada por meio de aterro sanitário, dispondo ainda de locais em que operavam na forma anteriormente descrita e que ainda não a remediaram sócio-ambientalmente.

6.3.6 PROINFA

Programa de Apoio Financeiro a Investimentos em Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA, instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 e revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, tem como objetivo a diversificação da matriz energética brasileira e a busca por soluções de cunho regional com a utilização de fontes renováveis de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis, a partir do aumento da participação da energia elétrica produzida com base naquelas fontes, no Sistema Elétrico Interligado Nacional – SIN (ELETROBRÁS, 2005).

O SIN é o principal sistema de produção e transmissão de energia elétrica do país. É formado por empresas da região, Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico mostram que apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do Brasil está fora do SIN, em pequenos sistemas isolados.

O Programa promoverá a implantação de 3.300 MW de capacidade, em instalações de produção com início de funcionamento previsto para até 30 de

dezembro de 2006, sendo assegurada, pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A - ELETROBRÁS, a compra da energia a ser produzida, no período de 20 anos, dos empreendedores que preencherem todos os requisitos de habilitação descritos nos guias e que tiverem seus projetos selecionados de acordo com os procedimentos da Lei 10.438/02 (ELETROBRÁS, 2005).

A Eletrobrás, no contrato de compra de energia de longo prazo, assegurará ao empreendedor uma receita mínima de 70% da energia contratada durante o período de financiamento e proteção integral quanto aos riscos de exposição do mercado de curto prazo.

Os investidores terão que garantir 30% do projeto com capital próprio. As condições do financiamento serão TJLP (taxa de juros à longo prazo) mais 2% de spread básico e até 1,5% de spread de risco ao ano, carência de seis meses após a entrada em operação comercial, amortização por dez anos e não-pagamento de juros durante a construção do empreendimento (ENERGIABRASIL, 2005).

Ainda segundo ENERGIABRASIL (2005), com a implantação do PROINFA, estima-se que serão gerados 150 mil empregos diretos e indiretos durante a construção e a operação dos empreendimentos. Os investimentos previstos do setor privado são da ordem de R\$ 8,6 bilhões. Uma das exigências da Lei nº 10.762 é a obrigatoriedade de um índice mínimo de nacionalização de 60% do custo total de construção dos projetos. O Brasil detém as tecnologias de produção de maquinário para uso em Pequenas Centrais Hidroelétricas - PCHs e usinas de biomassa e está avançando na tecnologia eólica, com duas fábricas instaladas, uma no Sudeste e outra no Nordeste.

Os critérios de regionalização, previstos na Lei nº 10.762, estabelecem um limite de contratação por Estado de 20% da potência total destinada às fontes eólica e biomassa e 15% para as PCHs, o que possibilita a todos os Estados que tenham vocação e projetos aprovados e licenciados a oportunidade de participarem do programa. A limitação, no entanto, é preliminar, já que, caso não venha a ser contratada a totalidade dos 1.100 MW destinados a cada tecnologia, o potencial não-contratado será distribuído entre os Estados que possuírem as licenças ambientais mais antigas (ENERGIABRASIL, 2005). Para participarem do Programa, os empreendimentos terão de ter licença prévia de instalação.

Em relação ao abastecimento de energia elétrica do país, o PROINFA será um instrumento de complementaridade energética sazonal à energia hidráulica, responsável por mais de 90% da geração do país. Na região Nordeste, a energia eólica servirá como complemento ao abastecimento hidráulico, já que o período de chuvas é inverso ao de ventos. O mesmo ocorrerá com a biomassa nas regiões Sul e Sudeste, onde a colheita de safras propícias à geração de energia elétrica (cana-de-açúcar e arroz, por exemplo) ocorre em período diferente do chuvoso.

A produção de 3,3 mil MW a partir de fontes alternativas renováveis dobrará a participação na matriz de energia elétrica brasileira das fontes eólica, biomassa e PCH, que atualmente respondem por 3,1% do total produzido e, em 2006, podem chegar a 5,9% (ENERGIABRASIL, 2005).

No Brasil, 41% da matriz energética é renovável, enquanto a média mundial é de 14% e nos países desenvolvidos, de apenas 6%, segundo dados do Balanço Energético Nacional - edição 2003 (ENERGIABRASIL, 2005). A entrada de novas fontes renováveis evitará a emissão de 2,5 milhões de toneladas de gás carbônico/ano, ampliando as possibilidades de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Kyoto. O Programa também permitirá maior inserção do pequeno produtor de energia elétrica, diversificando o número de agentes do setor (ENERGIABRASIL, 2005).

O PROINFA busca atingir a meta de operação de 3.300 megawatts até 2008 de fontes eólica, biomassa. Dos projetos financiados pelo BNDES até agora, R\$ 718 milhões são destinados a pequenas centrais elétricas, R\$ 509 milhões à biomassa e R\$ 463 milhões à geração de energia eólica (FOLHA, 2005).

6.3.7 PROCOP

Para a questão de poluentes industriais, como efluentes líquidos, gasosos e resíduos sólidos industriais, é ofertada linha de financiamento através do Programa de Controle de Poluição - PROCOP.

O PROCOP foi criado pelo Decreto 14.806 de 1980 e destina-se a financiar e fornecer apoio técnico aos projetos de controle, preservação e melhoria das condições ambientais no Estado de São Paulo.

Destina-se às pessoas jurídicas de direito privado cuja maioria do capital social com direito a voto pertença direta ou indiretamente a pessoas físicas residentes ou domiciliadas no Brasil e as pessoas jurídicas de direito público ou entidades direta ou indiretamente por elas instituídas (PROEMA, 2004).

Assim, podem se beneficiar do PROCOP empresas que possuam fontes significativas de poluição, empresas e consórcios para tratamento de efluentes líquidos e empresas e consórcios para tratamento de resíduos sólidos industriais.

O PROCOP financia a:

- Implantação de sistemas de controle de material particulado, dióxido de enxofre, odores, resíduos sólidos industriais, ruídos de origem industrial e sistemas de pré-tratamento ou tratamento completo de afluentes líquidos.
- Modificação de processos produtivos que cumpram os objetivos de controle de poluição aprovados ou recomendados pela CETESB.
- Relocalização de estabelecimentos industriais.

Os recursos do PROCOP podem ser aplicados na elaboração de projetos, tais como:

- Compra e instalação de sistemas de controle de poluição (inclusive máquinas e equipamentos importados);
- Fretes e seguros respectivos;
- Obras civis relacionadas à implantação dos sistemas de controle;
- Instalações elétricas e hidráulicas e na operação e manutenção dos sistemas implantados.

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES

Para que os municípios abordados no estudo sigam o caminho do desenvolvimento sustentável, é vital que sejam valorizadas as fontes de energia renováveis e menos poluidoras. Desta forma, a utilização do gás metano para a geração de energia enquadra-se nos quesitos de desenvolvimento sustentável, tendo em vista a grande quantidade de emissões de metano que deixariam de ser lançadas na atmosfera.

Somente com a geração de energia elétrica, proposta em todas as etapas do projeto, que perfazem 54 anos, deixam de ser lançadas na atmosfera 59.737.327 m³ de CH₄.

As idéias apresentadas e a metodologia adotada neste trabalho podem ser aplicadas ou sugeridas à outros municípios que, independentemente do seu porte, planejem realizar ações conjuntas que visem dar uma solução adequada aos resíduos sólidos urbanos e algum destino útil ao biogás por este produzido.

A metodologia adotada para a quantificação do biogás é amplamente utilizada em projetos de recuperação por se aproximar das condições reais, pois esta leva em conta a emissão do biogás em longos períodos de tempo e considera os vários fatores que influenciam a taxa de geração do mesmo.

A eficiência do sistema de coleta de biogás vai depender de como foi feita a cobertura final da célula, da estabilidade do aterro, da distribuição eficiente dos drenos e da sua montagem.

A construção de um aterro sanitário com o planejamento prévio do sistema de coleta de gases possibilita uma melhor adaptação dos equipamentos e diminui os custos necessários ao projeto.

Segundo ALVES (2000), há uma forte tendência por parte dos projetistas em privilegiar a geração elétrica para a recuperação do biogás. Isto se baseia no fato de que qualquer que seja o aproveitamento do biogás este será feito pela sua queima e esta queima seria mais proveitosa em uma máquina de combustão interna que ainda dispõe de calor residual.

Todavia, cada instalação de aproveitamento de biogás em aterros têm as suas particularidades, dependendo da localização e principalmente das necessidades energéticas locais.

O valor máximo da potência elétrica determinado no estudo, foi obtido no ano de encerramento da disposição de resíduos sólidos no aterro e apresentou um valor em torno de 650 kW. As necessidades energéticas do aterro devem ser supridas e, havendo excedentes desta energia, esta poderá ser vendida à empresas e residências vizinhas ao aterro.

Construir uma usina em um aterro sanitário para produzir energia pode ser mais caro do que a implantação de outros projetos, mas pode ser a solução para dois problemas: dar um destino útil ao biogás gerado pelo resíduo (geração de energia elétrica) e conseqüentemente reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Com a resolução destes problemas poderão ainda ser obtidos recursos com a venda da energia elétrica e CERs.

Dentre as quatro cidades escolhidas, Guaratinguetá é a que dispõe a maior quantidade de resíduos sólidos inadequadamente, por isso e por motivos econômicos (custo do transporte dos resíduos por exemplo) esta cidade foi escolhida como o local para a construção do aterro sanitário.

Fatores como a flutuação cambial, incentivos fiscais, variação de juros, preço dos CERs, qualidade do biogás (principalmente a porcentagem de metano presente) e outros fatores podem influenciar nos resultados da análise econômica.

A venda de CERs é muito importante, pois nas etapas I, II, III e IV do projeto os custos com O&M são totalmente anulados pela venda de CERs, havendo ainda excedentes. Na etapa V os custos com O&M são reduzidos em 64,26% com a venda de CERs. Com isso, pode-se observar nitidamente que o custo da energia elétrica gerada considerando a venda de CERs é mais barata e por conseqüência trará um maior aumento na competitividade.

Outra consideração a ser feita é que se o biogás excedente nas etapas for utilizado em sistemas de tratamento (por exemplo o tratamento de chorume) e ou vendido à vizinhança (à empresas por exemplo) os benefícios ambientais e financeiros poderão ser ainda mais incrementados, pois, com todo biogás sendo consumido menor será a

emissão de gases de efeito estufa e mais recursos poderão ser obtidos com a venda de CERs.

É importante salientar que o “pay back” obtido nas etapas do projeto são baseados no preço da energia elétrica do ano de 2005, pois as incertezas de mercado impossibilitam estipular um valor ou um percentual adequado para o preço da energia para os anos futuros. O atual preço da energia elétrica pago pelas distribuidoras pode não viabilizar o projeto, porém, acontecimentos como a época do “apagão”, em que chegou a ser oferecido R\$ 500,00/MWh, viabilizariam o projeto.

Os tempos de retorno (“pay back”) obtidos nas etapas variam de 3 a 8 anos. É importante salientar que em empreendimentos públicos esta faixa é aceitável, entretanto pode-se dizer que para o setor privado um “pay back” acima de 2 anos poderia inviabilizar o projeto. Outro fator importante a ser observado é que os custos dos equipamentos praticados no estudo são baseados no mercado americano que difere do brasileiro, portanto acredita-se que a utilização de equipamentos nacionais, com custos costumeiramente inferiores, poderá implicar em um tempo de retorno menor nas etapas.

A implantação do projeto trará benefícios sócio-ambientais às cidades do estudo e conseqüentemente à região do Vale do Paraíba.

Dentre estes benefícios podem ser apontados a geração de empregos diretos e indiretos, desenvolvimento tecnológico de empresas, redução de odores, iluminação, melhor gestão dos resíduos sólidos, mitigação de gases de efeito estufa entre outros.

A forma de cooperação que foi sugerida é a do consórcio intermunicipal, entretanto, as demais formas de cooperação existentes devem ser estudadas e avaliadas pois, a aplicabilidade de uma ação conjunta, independente da forma, vai depender da necessidade local e do interesse dos municípios envolvidos.

É evidente que para um projeto em que é considerada a ação conjunta faz-se necessária a cooperação por parte dos prefeitos na busca de solução para seus problemas e conflitos político-partidários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10.004: classificação de resíduos sólidos: procedimento*. Rio de Janeiro, set. 1987.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 1265. Incineração de resíduos sólidos perigosos: padrões de desempenho*. São Paulo. 1989.

ALVES, J. W. *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos*. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000. 142 p.

ALVES, J. W. S., VIEIRA, S. M. M. *Inventário Nacional de emissões de metano gerado pelos resíduos no Brasil – Enabling Brazil to fulfill its commitments to the United Nations on Climate Change*, Relatório de atividades do projeto Bra/95/G31, CETESB, São Paulo, 1998, 88 p.

ASG - Aterro Sanitário de Guaratinguetá. *Projeto Básico*. Abril. 2000. 60p.

BANDEIRANTE - Empresa Bandeirante de Energia. *Site* disponível em: <<http://www.bandeirante.com.br>>. Acesso em: 06 jun. 2005.

BEDUSCHI, L. C., ORTOLANI A. F. e COAN, O. *Considerações gerais sobre a estação da UNESP de biogás automotivo a baixa pressão, in II encontro sobre biogás automotivo - Coletânea dos trabalhos apresentados, EMBRATER, Serviço de extensão rural, EMBRATER/UNESP, Jaboticabal, 1985.*

BEZERRA, M.O., PINTO, T.M. *Rússia ratifica o Protocolo de Quioto*, CEPEA. 2004. Disponível em: < http://cepea.esalq.usp.br/pdf/artigo_economiaambiental.pdf >. Acesso em: fev. 2005.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. *Resíduos Sólidos Urbanos*. Rio de Janeiro: AI/GESIS, jan. 1998. Cadernos de Infra-Estrutura, nº 6, Saneamento Ambiental.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. *Site do BNDES*. Disponível em: < <http://www.bndes.gov.br> >. Acesso em: 06 abr. 2005.

BRASMETANO. *Site da empresa BRASMETANO*. Disponível em: <<http://www.brasmetano.com.br>> Acesso em: 10 maio 2005.

BOGNER, J., SPOKAS, K., BURTON, E., SWEENEY, R., CORONA, V. *Landfill as atmospheric methane sources and sinks*. Chemosphere. v.31, nº 9, 1995.

CALDERONI, S. *Os Bilhões Perdidos no Lixo*. 2º ed. São Paulo. Ed. Humanitas FFLCH / Universidade de São Paulo. 1998. 343p.

CAPODAGLIO, A.G., BACCHI, P., CLAUS, E., OLMO, M., NETTUNO, L. *Leachate Generation in Landfills: Model Sensitivity and Case Studies In: International Waste Management and Landfill Symposium, 7, v. II, 1999, Caligari, Sardinia, Italy. Proceedings*. Caligari: CISA, 1999.

CENAMO, M.C. *Avanços na COP-10 e suas implicações para o Brasil*, CEPEA - mudanças climáticas, Dez. 2004a. Disponível em:< <http://www.cepea.esalq.usp.br> >. Acesso em: fev. 2005.

CENAMO, M.C. *Mudanças Climáticas, o Protocolo de Quioto e Mercado de Carbono*, Fev. 2004b. 20p. Disponível em:

<http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/protocolo_quioto.pdf >. Acesso em: 30 jan. 2005.

CENTRO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO - Universidade Federal de Santa Catarina. *Meio Ambiente: Dicas Sobre o Lixo*. Disponível em:

< <http://www.ced.ufsc.br/meioambiente/dicalixo.htm> >. Acesso em: 21 nov. 2003.

CEPAM - Centro de Estudos e Pesquisas da Administração Municipal. *Consórcio: uma forma de cooperação intermunicipal*. São Paulo: Fundação Prefeito Faria Lima – Cepam. Unidade de Políticas Públicas – UPP, v.1, n.2, 2001. 307p.

CETESB/SMA - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental & SMA-SP – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. *Relatório técnico n.º 2 do convênio SMA/MCT n.º 01.0052.00/2001 - aterros*, São Paulo, SP, 2003. 349 p.

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. *Resíduos sólidos domiciliares e de serviços de saúde: tratamento e disposição final – texto básico*, São Paulo, CETESB 1997a. 34p.

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. *Caracterização de Resíduos*. Apostilas Ambientais, São Paulo, CETESB, 1997b, 21p.

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. *Aterros Sanitários em Valas*, Apostilas Ambientais, São Paulo, CETESB, 1997c. 34p.

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. *Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares : relatório de 2002 – versão 2 incluindo atualizações de dezembro de 2002 a janeiro de 2003/CETESB*. São Paulo: CETESB, 2003. 42p.

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. *Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares: relatório de 2003*. CETESB. São Paulo: CETESB, 2004. 45p.

CRUZ, M.C.M.T. *Consórcios intermunicipais de integração regional ascendente*. São Paulo. Polis; Programa Gestão Pública e Cidadania / EAESP / FGV, 2001. 96p.

CUNHA, M.E.G. *Análise do setor de saneamento ambiental no aproveitamento energético de resíduos: o caso do município de Campinas – SP*. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Energia da UNICAMP. São Paulo. 2002. 125p.

DADOS da estação meteorológica da Escola de Especialistas de Aeronáutica trabalhados pela UNESP através do professor João Ubiratan. não datado. Acesso aos dados em: 25 ago. 2005.

DERISIO, J.C. *Introdução ao Controle de Poluição Ambiental*. São Paulo: CETESB, 1992.

ECOSECURITIES. *Projeto de Aproveitamento do Biogás de Aterro Sanitário - NovaGerar – Documento de Concepção do Projeto*. Preparado para a Unidade de Financiamento de Carbono (PCF-Prototype Carbon Fund) do Banco Mundial. fev. 2004. 51p.

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Ministério de Minas e Energia - MME. Disponível no *site*:

< http://www.eletronbras.com.br/EM_Programas_Proinfa/default.asp >. Acesso em: 12 mar. 2005.

EPA - Environmental Protection Agency. *A guide for methane mitigation projects. Gas to energy at landfills and open dumps*. Ed. Mark Orlic and Tomkerr. v.2. November. 1996. 85p.

ENERGIABRASIL. Ministério de Minas e Energia - Programa PROINFA. Disponível no *site*: < <http://www.energiabrasil.gov.br/proinfa/default.asp> >. Acesso em: 14 abr. 2005.

ENSINAS, A.V. *Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas - SP*. Campinas. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 2003. 129p.

FEG - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. *Disciplina Centrais Hidro e Termoelétricas*. 2004.

FOLHA - *Site* do jornal Folha de São Paulo Online. Disponível no *site*: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u94711.shtml>>. Acesso em: 19 abr. 2005.

GOOGLE. *Programa Google Earth*. Disponível em < <http://www.google.com.br>>. Acesso em : 17 ago. 2005.

GROSSI, M.G.L., VALENTE, J.P.S. *Educação Ambiental: Lixo Domiciliar*. São Paulo: UNESP / Botucatu, 2001.

GUNNERSON, C.G., STUCKEY, D.C. *Anaerobic digestion*. Tech. Pap. 49, World Bank. Washington, D.C. 1986.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000*. IBGE. Rio de Janeiro. 2000a.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Atlas de Saneamento*. IBGE. 2000b. Disponível em: < http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/pdfs/mappag59.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2005.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo IBGE (2000)*. 2000c. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br> >. Acesso em: 21 out. 2004.

IPCC - International Panel On Climate Change. *Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual (Vol.3)*. 1996. Disponível no site: < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6> >. Acesso em: 20 ago. 2004.

IPI - Institute for Policy Implementation. *Post Kyoto Strategies - The CDM, International cooperation and private sector participation - A report based on the proceedings of The Brazil - U.S. Aspen Global Forum*, IPI, Graduate School of Public Affairs, University of Colorado at Denver and American Chamber of Commerce / São Paulo, Denver, 1998, 38 pg.

IPT / CEMPRE. *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. 1ª ed., São Paulo: Publicação IPT, 1995.

IPT / CEMPRE. *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. 2ª ed., São Paulo: Publicação IPT, 2000. 370p.

JUCÁ, J.F.T., Mariano, M.O.H., Cavalcanti, R.C, Sobreira, A. *Diagnóstico de Resíduos Sólidos no Estado de Pernambuco*. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa - PB. Setembro. 2001.

JUNQUEIRA, A.T.M et al. *Cooperação Intermunicipal na Federação Brasileira: os consórcios intermunicipais e as associações de municípios*. São Paulo. Brasil. Maio de 2002. 36p.

LIMA, L.M.Q. *Tratamento de Lixo*. São Paulo: Hemus, 2ª ed., 1991.

MANDELLI, S.M. de C. *Tratamento de Resíduos Sólidos: Compêndio de Publicações*. Caxias do Sul. 1991.

MANSUR, G.L. *O que é Preciso Saber Sobre Limpeza Urbana*. Rio de Janeiro: IBAM/MBES, 1993.

MARQUES, A.L. de P. *Proposta de um processo inovativo de tratamento de resíduos sólidos domiciliares, por fermentação anaeróbia, para a cidade de Guaratinguetá*. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. 2001. 249p.

MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. *Tabelas do Anexo A e B*. 2002. Disponível em: < <http://www.mct.gov.br/clima/quioto/protocol.htm#tabela> >. Acesso em: 31 jan. 2005.

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. *Guia de orientação*. Coordenação – geral Ignez Vidigal Lopes. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas - FGV. 2002. 90 p.

MCIDADES - Ministério das Cidades. *Site do Ministério das Cidades*. Disponível em:< <http://www.cidades.gov.br> >. Acesso em: 11 abr. 2005 e 19 maio 2005.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Fundo Nacional de Meio Ambiente (FNMA). *Site do MMA*. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/fnma/> >. Acesso em: 29 mar. 2005.

MOTTA, F. S. *Produza sua energia – biodigestores anaeróbios*. Recife: Gráfica Editora, 1986. 144 p.

OLIVEIRA, L.B. *Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil*. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado) – Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, COPPE. 2004. 237p.

PEREIRA NETO, J.T. *Manual de Compostagem: Processo de Baixo Custo*. Belo Horizonte, Minas Gerais: UNICEF, 1996.

PEREIRA NETO, J.T. *Quanto Vale Nosso Lixo: Projeto Verde Vale*. Viçosa, Minas Gerais: UNICEF, 1999.

PINTO, M.S. *A Coleta e Disposição do Lixo no Brasil*. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1979. 227p.

PLANALTO, Presidência da República Federativa do Brasil. Casa Civil. *Site* disponível em: < <https://www.planalto.gov.br/> > Acesso em: 26 ago. 2005.

PMG - Prefeitura Municipal de Guaratinguetá. *Site* da Prefeitura Municipal. Disponível em : < <http://www.guaratingueta.sp.gov.br/> > Acesso em: 13 abr. 2005.

PROEMA. Engenharia e Serviços S/C Ltda. *Avaliação da situação dos resíduos sólidos no Brasil, no Estado de São Paulo, na Região Metropolitana de São Paulo e no Município de São Paulo*. São Paulo, mar. 2004.

SCHNEIDER, V. E., REGO, R. de C.E., CALDART, V. *Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde*. São Paulo: CLR Balieiro, 2001.

SEADE - Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. *Site* disponível em: < <http://www.seade.gov.br/produtos/perfil/> >. Acesso em: 8 set. 2004.

SEWELL, G.H. *Administração e Controle da Qualidade Ambiental*. São Paulo: E.P.U., 1998.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. *Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2002*. Programa de Modernização do Setor de Saneamento – PMSS. Ministério das Cidades. Brasília. nov. 2004. Disponível em: < www.snis.com.br >. Acesso em : 22 set. 2005.

TAUK-TORNISIELO, S.M., GOBBI, N., FORESTI,C., LIMA,S.T., *Análise Ambiental: Estratégias e ações*. ed: UNESP. São Paulo, 1995. 354p.

TCHOBANOGLIOUS, G.,THEISEN, H., VIGIL, S. *Integrated solid waste managements: engineering, principles and management issues*. New York: McGraw-Hill, ISBN 0-07- 063237-5. 1993. 978p.

TEIXEIRA, E.N. *Resíduos sólidos: minimização e reaproveitamento energético*. In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, ago. 2000, São Paulo. Anais... São Paulo: SEMA, 2000.

TEIXEIRA, E.N., NUNES, C.R., OLIVEIRA, S. *Revisão Crítica das Normas Sobre Resíduos Sólidos*. Parte 1. Saneamento Ambiental. set. 1991.

TNO - Institute of Environmental and Energy Technology. *Landfill gas formation, recovery and emissions*. The Netherlands, 1995. 103p.

TOWNSEND, T.G., MILLER, W.L. EARLE, J. *Acceleration of landfill stabilization using leachate recycle*, Journal of Environmental Engineering. 1996.

TRIGAS. *Site da empresa Trigás*. Disponível em: <<http://www.trigas.com.br>> Acesso em: 10 maio 2005.

UNCED - United Nations Conference about Environment and Development – Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, Agenda 21,

tradução da Agenda 21 da (UNCED), Reprodução da Agenda 21 publicada no Diário Oficial da União, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 1997, 383 pg.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. *Site* disponível em: < <http://cdm.unfccc.int/> > Acesso em: 11 set. 2005.

USEPA - United States Environment Protection Agency. *Adapting boilers to utilize landfill gas: Feasible and cost-effective*. Office of Air and Radiation. EPA 430-F-01-006. Jan. 2001.

USEPA - United States Environment Protection Agency. *Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills – Background Information for Proposed Standards and Guidelines*. Emission Standards Division. EPA-450/3-90-011a. March 1991.

USEPA - United States Environment Protection Agency. *A guide for methane mitigation projects – Gas to energy at landfills and open dumps*, Draft jan/96, USEPA - Office of air and radiation, editors: Mark Orlic and Tom Kerr, 1996a, 67 p.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. *Turning liability into an asset: A landfill gas-to-energy project development handbook*. EPA430-B-96-0004. Sep. 1996b. 139p.

USEPA - United States Environment Protection Agency. *Characterization of landfill sites in Brazil for landfill gas recovery – Business focus series, prepared by United States Agency International Development, Office of Energy and Technology Center for Environment*, Bureau for Global Programs, Field Support and research. 1997a.

USEPA - United States Environment Protection Agency. *Emerging technologies for the management and utilization of landfill gas*. Office of Research and Development. EPA 68-D30035. January. 1998.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Energy Project Landfill Gas Utilization Software (E-PLUS) User's Manual*. EPA-30-B-97-006. 1997b.

USEPA - United States Environmental Protection Agency, *Feasibility assessment for gas-to-energy at landfills in São Paulo – Brazil*. Public review draft, USEPA – Methane Branch, Washington, 1997c.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. *Methane Branch; Feasibility assessment for gas-to-energy at selected landfills in São Paulo, Brazil*. Washington D.C., 1997d. 120 p.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. *Powering microturbines with landfill gas*, EPA430-02-012 DRAFT. Mar. 2002.

VIEIRA, S.M.M., ALVES, J.W.S. *Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*. Relatório de Referência. Emissão de Metano no Tratamento e na Disposição de Resíduos. São Paulo. CETESB. 2002. 86p.

WORLD BANK. *Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean*. World Bank. October. 2003. 125p.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Custo da eletricidade na Etapa I

Pay Back (i) [anos]			Custo da eletricidade sem venda de CER			Custo da eletricidade com venda de CER		
			Horas de operação [h/ano]			Horas de operação [h/ano]		
i=1			6.000	7.000	8.000	6.000	7.000	8.000
r	q	f						
5	1,05	1,05	0,44440	0,38091	0,33330	0,41066	0,35200	0,30800
10	1,10	1,10	0,46417	0,39786	0,34813	0,43043	0,36894	0,32283
15	1,15	1,15	0,48394	0,41481	0,36296	0,45021	0,38589	0,33766
20	1,20	1,20	0,50371	0,43176	0,37779	0,46998	0,40284	0,35248
i=2								
5	1,05	0,54	0,24271	0,20804	0,18203	0,20898	0,17912	0,15673
10	1,10	0,58	0,25853	0,22160	0,19390	0,22480	0,19268	0,16860
15	1,15	0,62	0,27435	0,23516	0,20576	0,24062	0,20624	0,18046
20	1,20	0,65	0,28621	0,24533	0,21466	0,25248	0,21641	0,18936
i=3								
5	1,05	0,37	0,17549	0,15042	0,13161	0,14175	0,12150	0,10631
10	1,10	0,40	0,18735	0,16059	0,14051	0,15361	0,13167	0,11521
15	1,15	0,44	0,20317	0,17414	0,15238	0,16943	0,14523	0,12707
20	1,20	0,47	0,21503	0,18431	0,16127	0,18130	0,15540	0,13597
i=4								
5	1,05	0,28	0,13989	0,11991	0,10492	0,10616	0,09099	0,07962
10	1,10	0,32	0,15571	0,13347	0,11678	0,12198	0,10455	0,09148
15	1,15	0,35	0,16758	0,14364	0,12568	0,13384	0,11472	0,10038
20	1,20	0,39	0,18339	0,15720	0,13755	0,14966	0,12828	0,11225
i=5								
5	1,05	0,23	0,12012	0,10296	0,09009	0,08639	0,07405	0,06479
10	1,10	0,26	0,13199	0,11313	0,09899	0,09825	0,08422	0,07369
15	1,15	0,30	0,14780	0,12669	0,11085	0,11407	0,09777	0,08555
20	1,20	0,33	0,15967	0,13686	0,11975	0,12593	0,10794	0,09445
i=6								
5	1,05	0,20	0,10826	0,09279	0,08119	0,07452	0,06388	0,05589
10	1,10	0,23	0,12012	0,10296	0,09009	0,08639	0,07405	0,06479
15	1,15	0,26	0,13199	0,11313	0,09899	0,09825	0,08422	0,07369
20	1,20	0,30	0,14780	0,12669	0,11085	0,11407	0,09777	0,08555
i=7								
5	1,05	0,17	0,09639	0,08262	0,07230	0,06266	0,05371	0,04699
10	1,10	0,20	0,10826	0,09279	0,08119	0,07452	0,06388	0,05589
15	1,15	0,24	0,12408	0,10635	0,09306	0,09034	0,07744	0,06776
20	1,20	0,28	0,13989	0,11991	0,10492	0,10616	0,09099	0,07962
i=8								
5	1,05	0,15	0,08849	0,07584	0,06636	0,05475	0,04693	0,04106
10	1,10	0,19	0,10430	0,08940	0,07823	0,07057	0,06049	0,05293
15	1,15	0,22	0,11617	0,09957	0,08713	0,08243	0,07066	0,06182
20	1,20	0,26	0,13199	0,11313	0,09899	0,09825	0,08422	0,07369

APÊNDICE B – Custo da eletricidade na Etapa II

Pay Back (i) [anos]			Custo da eletricidade sem venda de CER			Custo da eletricidade com venda de CER		
			Horas de operação [h/ano]			Horas de operação [h/ano]		
i=1			6.000	7.000	8.000	6.000	7.000	8.000
r	q	f						
5	1,05	1,05	0,32491	0,27849	0,24368	0,29117	0,24958	0,21838
10	1,10	1,10	0,33940	0,29092	0,25455	0,30567	0,26200	0,22925
15	1,15	1,15	0,35390	0,30334	0,26542	0,32016	0,27442	0,24012
20	1,20	1,20	0,36839	0,31576	0,27629	0,33466	0,28685	0,25099
i=2								
5	1,05	0,54	0,17705	0,15176	0,13279	0,14332	0,12284	0,10749
10	1,10	0,58	0,18865	0,16170	0,14149	0,15491	0,13278	0,11619
15	1,15	0,62	0,20024	0,17164	0,15018	0,16651	0,14272	0,12488
20	1,20	0,65	0,20894	0,17909	0,15671	0,17521	0,15018	0,13141
i=3								
5	1,05	0,37	0,12777	0,10951	0,09583	0,09403	0,08060	0,07052
10	1,10	0,40	0,13646	0,11697	0,10235	0,10273	0,08805	0,07705
15	1,15	0,44	0,14806	0,12691	0,11105	0,11433	0,09799	0,08574
20	1,20	0,47	0,15676	0,13436	0,11757	0,12302	0,10545	0,09227
i=4								
5	1,05	0,28	0,10167	0,08715	0,07626	0,06794	0,05823	0,05096
10	1,10	0,32	0,11327	0,09709	0,08495	0,07954	0,06817	0,05965
15	1,15	0,35	0,12197	0,10454	0,09148	0,08823	0,07563	0,06618
20	1,20	0,39	0,13356	0,11448	0,10017	0,09983	0,08557	0,07487
i=5								
5	1,05	0,23	0,08718	0,07473	0,06538	0,05344	0,04581	0,04008
10	1,10	0,26	0,09588	0,08218	0,07191	0,06214	0,05326	0,04661
15	1,15	0,30	0,10747	0,09212	0,08060	0,07374	0,06320	0,05530
20	1,20	0,33	0,11617	0,09957	0,08713	0,08244	0,07066	0,06183
i=6								
5	1,05	0,20	0,07848	0,06727	0,05886	0,04475	0,03836	0,03356
10	1,10	0,23	0,08718	0,07473	0,06538	0,05344	0,04581	0,04008
15	1,15	0,26	0,09588	0,08218	0,07191	0,06214	0,05326	0,04661
20	1,20	0,30	0,10747	0,09212	0,08060	0,07374	0,06320	0,05530
i=7								
5	1,05	0,17	0,06978	0,05982	0,05234	0,03605	0,03090	0,02704
10	1,10	0,20	0,07848	0,06727	0,05886	0,04475	0,03836	0,03356
15	1,15	0,24	0,09008	0,07721	0,06756	0,05634	0,04829	0,04226
20	1,20	0,28	0,10167	0,08715	0,07626	0,06794	0,05823	0,05096
i=8								
5	1,05	0,15	0,06399	0,05485	0,04799	0,03025	0,02593	0,02269
10	1,10	0,19	0,07558	0,06479	0,05669	0,04185	0,03587	0,03139
15	1,15	0,22	0,08428	0,07224	0,06321	0,05055	0,04333	0,03791
20	1,20	0,26	0,09588	0,08218	0,07191	0,06214	0,05326	0,04661

APÊNDICE C – Custo da eletricidade na Etapa III

Pay Back (i) [anos]			Custo da eletricidade sem venda de CER			Custo da eletricidade com venda de CER		
			Horas de operação [h/ano]			Horas de operação [h/ano]		
i=1			6.000	7.000	8.000	6.000	7.000	8.000
r	q	f						
5	1,05	1,05	0,33135	0,28402	0,24852	0,29762	0,25510	0,22322
10	1,10	1,10	0,34590	0,29649	0,25943	0,31217	0,26757	0,23413
15	1,15	1,15	0,36045	0,30896	0,27034	0,32672	0,28004	0,24504
20	1,20	1,20	0,37500	0,32143	0,28125	0,34127	0,29251	0,25595
i=2								
5	1,05	0,54	0,18296	0,15682	0,13722	0,14922	0,12791	0,11192
10	1,10	0,58	0,19460	0,16680	0,14595	0,16086	0,13788	0,12065
15	1,15	0,62	0,20624	0,17677	0,15468	0,17250	0,14786	0,12938
20	1,20	0,65	0,21497	0,18426	0,16122	0,18123	0,15534	0,13592
i=3								
5	1,05	0,37	0,13349	0,11442	0,10012	0,09976	0,08551	0,07482
10	1,10	0,40	0,14222	0,12190	0,10667	0,10849	0,09299	0,08137
15	1,15	0,44	0,15386	0,13188	0,11540	0,12013	0,10297	0,09010
20	1,20	0,47	0,16259	0,13936	0,12194	0,12886	0,11045	0,09664
i=4								
5	1,05	0,28	0,10731	0,09198	0,08048	0,07357	0,06306	0,05518
10	1,10	0,32	0,11894	0,10195	0,08921	0,08521	0,07304	0,06391
15	1,15	0,35	0,12767	0,10943	0,09576	0,09394	0,08052	0,07045
20	1,20	0,39	0,13931	0,11941	0,10448	0,10558	0,09050	0,07918
i=5								
5	1,05	0,23	0,09276	0,07951	0,06957	0,05902	0,05059	0,04427
10	1,10	0,26	0,10149	0,08699	0,07611	0,06775	0,05807	0,05081
15	1,15	0,30	0,11313	0,09696	0,08484	0,07939	0,06805	0,05954
20	1,20	0,33	0,12185	0,10445	0,09139	0,08812	0,07553	0,06609
i=6								
5	1,05	0,20	0,08403	0,07202	0,06302	0,05029	0,04311	0,03772
10	1,10	0,23	0,09276	0,07951	0,06957	0,05902	0,05059	0,04427
15	1,15	0,26	0,10149	0,08699	0,07611	0,06775	0,05807	0,05081
20	1,20	0,30	0,11313	0,09696	0,08484	0,07939	0,06805	0,05954
i=7								
5	1,05	0,17	0,07530	0,06454	0,05647	0,04156	0,03563	0,03117
10	1,10	0,20	0,08403	0,07202	0,06302	0,05029	0,04311	0,03772
15	1,15	0,24	0,09567	0,08200	0,07175	0,06193	0,05308	0,04645
20	1,20	0,28	0,10731	0,09198	0,08048	0,07357	0,06306	0,05518
i=8								
5	1,05	0,15	0,06948	0,05955	0,05211	0,03574	0,03064	0,02681
10	1,10	0,19	0,08112	0,06953	0,06084	0,04738	0,04061	0,03554
15	1,15	0,22	0,08985	0,07701	0,06739	0,05611	0,04810	0,04208
20	1,20	0,26	0,10149	0,08699	0,07611	0,06775	0,05807	0,05081

APÊNDICE D – Custo da eletricidade na Etapa IV

Pay Back (i) [anos]			Custo da eletricidade sem venda de CER			Custo da eletricidade com venda de CER		
			Horas de operação [h/ano]			Horas de operação [h/ano]		
i=1			6.000	7.000	8.000	6.000	7.000	8.000
r	q	f						
5	1,05	1,05	0,35300	0,30258	0,26475	0,31927	0,27366	0,23945
10	1,10	1,10	0,36827	0,31566	0,27620	0,33453	0,28674	0,25090
15	1,15	1,15	0,38353	0,32874	0,28765	0,34979	0,29982	0,26235
20	1,20	1,20	0,39879	0,34182	0,29909	0,36506	0,31291	0,27379
i=2								
5	1,05	0,54	0,19733	0,16914	0,14800	0,16360	0,14023	0,12270
10	1,10	0,58	0,20954	0,17961	0,15716	0,17581	0,15069	0,13185
15	1,15	0,62	0,22175	0,19007	0,16631	0,18802	0,16116	0,14101
20	1,20	0,65	0,23091	0,19792	0,17318	0,19717	0,16901	0,14788
i=3								
5	1,05	0,37	0,14544	0,12466	0,10908	0,11171	0,09575	0,08378
10	1,10	0,40	0,15460	0,13251	0,11595	0,12086	0,10360	0,09065
15	1,15	0,44	0,16681	0,14298	0,12511	0,13307	0,11406	0,09980
20	1,20	0,47	0,17596	0,15083	0,13197	0,14223	0,12191	0,10667
i=4								
5	1,05	0,28	0,11797	0,10112	0,08848	0,08423	0,07220	0,06318
10	1,10	0,32	0,13018	0,11158	0,09763	0,09644	0,08267	0,07233
15	1,15	0,35	0,13933	0,11943	0,10450	0,10560	0,09051	0,07920
20	1,20	0,39	0,15154	0,12990	0,11366	0,11781	0,10098	0,08836
i=5								
5	1,05	0,23	0,10271	0,08803	0,07703	0,06897	0,05912	0,05173
10	1,10	0,26	0,11186	0,09588	0,08390	0,07813	0,06697	0,05860
15	1,15	0,30	0,12407	0,10635	0,09305	0,09034	0,07743	0,06775
20	1,20	0,33	0,13323	0,11420	0,09992	0,09950	0,08528	0,07462
i=6								
5	1,05	0,20	0,09355	0,08018	0,07016	0,05981	0,05127	0,04486
10	1,10	0,23	0,10271	0,08803	0,07703	0,06897	0,05912	0,05173
15	1,15	0,26	0,11186	0,09588	0,08390	0,07813	0,06697	0,05860
20	1,20	0,30	0,12407	0,10635	0,09305	0,09034	0,07743	0,06775
i=7								
5	1,05	0,17	0,08439	0,07234	0,06329	0,05066	0,04342	0,03799
10	1,10	0,20	0,09355	0,08018	0,07016	0,05981	0,05127	0,04486
15	1,15	0,24	0,10576	0,09065	0,07932	0,07202	0,06173	0,05402
20	1,20	0,28	0,11797	0,10112	0,08848	0,08423	0,07220	0,06318
i=8								
5	1,05	0,15	0,07829	0,06710	0,05871	0,04455	0,03819	0,03341
10	1,10	0,19	0,09050	0,07757	0,06787	0,05676	0,04865	0,04257
15	1,15	0,22	0,09965	0,08542	0,07474	0,06592	0,05650	0,04944
20	1,20	0,26	0,11186	0,09588	0,08390	0,07813	0,06697	0,05860

APÊNDICE E – Custo da eletricidade na Etapa V

Pay Back (i) [anos]			Custo da eletricidade sem venda de CER			Custo da eletricidade com venda de CER		
			Horas de operação [h/ano]			Horas de operação [h/ano]		
i=1			6.000	7.000	8.000	6.000	7.000	8.000
r	q	f						
5	1,05	1,05	0,52527	0,45023	0,39395	0,49154	0,42132	0,36865
10	1,10	1,10	0,54778	0,46953	0,41084	0,51405	0,44061	0,38554
15	1,15	1,15	0,57030	0,48883	0,42772	0,53656	0,45991	0,40242
20	1,20	1,20	0,59281	0,50812	0,44461	0,55908	0,47921	0,41931
i=2								
5	1,05	0,54	0,29564	0,25341	0,22173	0,26191	0,22449	0,19643
10	1,10	0,58	0,31365	0,26884	0,23524	0,27992	0,23993	0,20994
15	1,15	0,62	0,33166	0,28428	0,24875	0,29793	0,25536	0,22344
20	1,20	0,65	0,34517	0,29586	0,25888	0,31143	0,26694	0,23358
i=3								
5	1,05	0,37	0,21910	0,18780	0,16432	0,18536	0,15888	0,13902
10	1,10	0,40	0,23260	0,19937	0,17445	0,19887	0,17046	0,14915
15	1,15	0,44	0,25061	0,21481	0,18796	0,21688	0,18590	0,16266
20	1,20	0,47	0,26412	0,22639	0,19809	0,23039	0,19747	0,17279
i=4								
5	1,05	0,28	0,17857	0,15306	0,13393	0,14484	0,12415	0,10863
10	1,10	0,32	0,19658	0,16850	0,14744	0,16285	0,13958	0,12214
15	1,15	0,35	0,21009	0,18008	0,15757	0,17636	0,15116	0,13227
20	1,20	0,39	0,22810	0,19551	0,17108	0,19437	0,16660	0,14577
i=5								
5	1,05	0,23	0,15606	0,13377	0,11704	0,12232	0,10485	0,09174
10	1,10	0,26	0,16957	0,14534	0,12718	0,13583	0,11643	0,10187
15	1,15	0,30	0,18758	0,16078	0,14068	0,15384	0,13187	0,11538
20	1,20	0,33	0,20109	0,17236	0,15081	0,16735	0,14344	0,12551
i=6								
5	1,05	0,20	0,14255	0,12219	0,10691	0,10882	0,09327	0,08161
10	1,10	0,23	0,15606	0,13377	0,11704	0,12232	0,10485	0,09174
15	1,15	0,26	0,16957	0,14534	0,12718	0,13583	0,11643	0,10187
20	1,20	0,30	0,18758	0,16078	0,14068	0,15384	0,13187	0,11538
i=7								
5	1,05	0,17	0,12904	0,11061	0,09678	0,09531	0,08169	0,07148
10	1,10	0,20	0,14255	0,12219	0,10691	0,10882	0,09327	0,08161
15	1,15	0,24	0,16056	0,13762	0,12042	0,12683	0,10871	0,09512
20	1,20	0,28	0,17857	0,15306	0,13393	0,14484	0,12415	0,10863
i=8								
5	1,05	0,15	0,12004	0,10289	0,09003	0,08630	0,07398	0,06473
10	1,10	0,19	0,13805	0,11833	0,10354	0,10431	0,08941	0,07824
15	1,15	0,22	0,15156	0,12991	0,11367	0,11782	0,10099	0,08837
20	1,20	0,26	0,16957	0,14534	0,12718	0,13583	0,11643	0,10187

ANEXO

ANEXO I - Enquadramento dos municípios do Vale do Paraíba na disposição de RSD (1997 a 2003)

MUNICÍPIO	Agência CETESB	Lixo [t/dia]	INVENTÁRIO																		Enquadramento e observação	TAC	Nºde Catadores		Área ocupada [m²]	LI	LO
			1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003												
			IQR	IOC	IQR	IOC	IQR	IOC	IQR	IOC	IQR	IOC	IQR	IOC	IQR	IOC											
			Total	≤ 14 anos																							
Aparecida	Aparecida	13,8	4,0		4,2		3,6		3,5		4,2		4,4		3,4		30	0	3.865	Sim	Não						
Araçá	Aparecida	0,8	2,6		1,5		1,9		1,7		1,5		2,4		2,3		0	0	300	Não	Não						
Areias	Aparecida	1,0	2,5		3,5		3,2		9,2		8,5		8,5		8,4		0	0	270	Sim	Sim						
Bananal	Aparecida	3,0	2,1		0,0		0,0		5,5		5,5		5,9		6,1		0	0	2.700	Sim	Não						
Caçapava	Taubaté	28,0	9,3		9,3	9,7	10,0		10,0		9,8		10,0		10,0		0	0		Sim	Sim						
Cachoeira Paulista	Aparecida	9,0	5,2		5,2		5,1		3,9		3,2		3,5		3,5		4	0	10.000	Não	Não						
Campos do Jordão	Taubaté	19,4	10,0		10,0		10,0		10,0		9,8		10,0		10,0		0	0		Sim	Sim						
Canas	Aparecida	1,3	1,5		1,2		1,5		1,5		9,3		8,9		8,0		0	0	180	Sim	Sim						
Caraguatatuba	Ubatuba	32,5	5,4		5,0		4,1		4,5		3,0		3,8		3,6		0	0	80.000	Não	Não						
Cruzeiro	Aparecida	28,7	3,1		3,2		1,9		1,8		3,8		6,0		5,8		15	0	5.000	Sim	Sim						
Cunha	Aparecida	4,6	2,2		1,2		0,3		0,0		0,2		5,4		8,7		2	0	200	Sim	Não						
Guaratinguetá	Aparecida	50,9	1,2		2,8		1,4		0,9		1,5		5,3		6,0		0	0	6.000	Não	Não						
Igaratá	Jacareí	2,7	7,8		8,2		10,0		8,3		8,0		8,3		7,0		0	0	126.459	Sim	Sim						
Ilhabela	Ubatuba	10,3	6,3		2,8		3,8		3,9		3,9		3,8		3,7		0	0	65.000	Não	Não						
Jacareí	Jacareí	98,0	7,8		8,2		7,9		6,3		6,5		9,3		9,6		0	0	681.145	Sim	Sim						
Jambeiro	Jacareí	0,8	9,3		9,3	9,7	9,6		10,0		8,5		8,6		9,3		0	0	30.000	Sim	Sim						
Lagoinha	Taubaté	1,1	5,9		8,0		8,4		10,0		10,0		10,0		10,0		0	0	10.569,14	Sim	Sim						
Lavrinhas	Aparecida	2,2	6,1		7,2		6,5		6,0		4,2		6,3		6,2		0	0	2.000	Não	Não						
Lorena	Aparecida	30,9	1,8		2,0		1,6		1,9		1,8		1,8		5,7		30	0	30.000	Não	Não						
Monteiro Lobato	Taubaté	0,6	3,5		8,2		6,9		7,0		8,3		10,0		10,0		0	0	5.000	Sim	Sim						
Natividade da Serra	Taubaté	1,2	3,2		6,8		4,9		5,3		6,0		6,3		3,6		0	0	5.000	Sim	Sim						
Paraibuna	Jacareí	2,3	9,3	9,9	9,3	9,7	9,6		10,0		9,2		9,6		9,6		0	0		Sim	Sim						
Pindamonhangaba	Taubaté	62,4	8,8		9,5		9,2		9,4		9,8		9,6		9,2		0	0	21.800	Sim	Sim						
Piquete	Aparecida	5,7	2,0		3,6		5,5		5,3		5,2		5,2		10,0		5	0	5.000	Sim	Não						
Potim	Aparecida	5,4	1,2		2,8		1,4		9,6		9,8		9,9		9,8		0	0	510	Sim	Sim						
Queluz	Aparecida	3,3	2,0		0,9		6,0		6,0		4,5		6,2		6,5		2	2	5.000	Não	Não						
Redenção da Serra	Taubaté	0,7	1,5		3,1		8,4		8,9		8,5		8,2		6,6		0	0	10.000	Sim	Sim						
Roseira	Aparecida	3,4	3,0		3,3		3,1		2,5		2,0		1,3		1,3		4	0	1.000	Não	Não						
Santa Branca	Jacareí	3,8	7,8		8,8		7,9		6,3		6,5		9,3		9,6		0	0		Sim	Sim						
Santo Antônio do Pinhal	Taubaté	1,3	10,0		10,0		10,0		10,0		9,0		10,0		10,0		0	0		Sim	Sim						
São Bento do Sapucaí	Taubaté	2,0	1,6		1,0		1,8		10,0		9,8		10,0		10,0		0	0	45.000	Sim	Sim						
São José do Barreiro	Aparecida	1,0	2,0		1,8		1,9		1,6		1,8		1,8		1,8		0	0	500	Não	Não						
São José dos Campos	Taubaté	392,4	9,3	9,9	9,3	9,7	9,6	9,6	9,4	8,9	9,2	8,9	9,6	9,7	9,6	9,6	0	0	32.000	Sim	Sim						
São Luis do Paraitinga	Taubaté	2,5	1,4		8,2		3,4		7,1		8,6		10,0		10,0		0	0	5.000	Sim	Sim						
São Sebastião	Ubatuba	26,3	4,0		3,2		3,9		3,8		4,7		5,2		5,2		0	0	91.923	Não	Não						
Silveiras	Aparecida	1,0	1,7		2,8		4,3		9,2		9,2		9,2		9,2		0	0	500	Sim	Sim						
Taubaté	Taubaté	145,2	3,8		8,7		9,6		9,5		9,5		8,1		8,7		0	0	181.660,4	Não	Não						
Tremembé	Taubaté	12,4	10,0		10,0		10,0		10,0		9,8		10,0		10,0		0	0		Sim	Sim						
Ubatuba	Ubatuba	28,5	5,1		6,2		6,2		5,5		5,8		5,8		5,8		0	0	25.900	Não	Não						