

TESE DEFENDIDA POR ADRIANO VIANA
ENSINAS E APROVADA PE
COMISSÃO JULGADORA EM 11 / dez 2003

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP

Autor: **Adriano Viana Ensinas**
Orientador: **Waldir Antônio Bizzo**

12/2003

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP

Autor: Adriano Viana Ensinas
Orientador: Waldir Antônio Bizzo

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2003
S.P. - Brasil

200413921

UNIDADE	<u>En 78e</u>
Nº CHAMADA	<u>En 78e</u>
V	EX
TOMBO BC/	<u>59733</u>
PROC.	<u>B. 117.04</u>
C	☐
D	☒
PREÇO	<u>24,00</u>
DATA	
Nº CPD	

B.b Id 322224

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

En78e
En 78e

Ensinas, Adriano Viana
Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta
em Campinas - SP / Adriano Viana Ensinas. --Campinas,
SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Waldir Antonio Bizzo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Biogás. 2. Aterro sanitário. 3. Lixo. 4. Energia da
biomassa. I. Bizzo, Waldir Antonio. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP

Autor: Adriano Viana Ensinas
Orientador: Waldir Antônio Bizzo



Prof. Dr. Waldir Antônio Bizzo
Instituição: Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Caio Glauco Sanchez
Instituição: Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Josmar Davilson Pagliuso
Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

Campinas, 11 de dezembro de 2003

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais José Roberto e Maria Eurenice, à minha irmã Renata e à minha namorada Tatiana.

Agradecimentos

No decorrer desses anos foram muitas as pessoas e instituições que me ajudaram na realização deste trabalho, às quais gostaria de agradecer explicitamente:

Ao Prof. Waldir Antônio Bizzo, pela orientação e amizade durante a realização desta dissertação.

Aos Prof's. Caio Glauco Sanchez, A. Oswaldo Sevá Filho, Rosângela B. Z. L. Moreno e Josmar Davilson Pagliuso pelo auxílio e paciência na idealização, elaboração e correção deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Limpeza Urbana da Prefeitura Municipal de Campinas que colaboraram na etapa de estudo experimental.

Ao CEPEA/ESALQ pelo apoio financeiro para execução do presente trabalho.

Aos engenheiros João Wagner S. Alves e Eduardo Cardoso Filho pelas informações e apoio dispensados.

A todos os alunos, técnicos e demais funcionários do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica pela amizade e convívio ao longo destes anos.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

“Um dia é preciso parar de sonhar
e, de algum modo, partir”

Amyr Klink

Resumo

ENSINAS, Adriano Viana. *Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas SP*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 129 p. Dissertação (Mestrado)

A disposição final do lixo é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos, particularmente no Brasil onde o uso de “lixões” ainda é muito comum. A emissão descontrolada do biogás produzido na decomposição anaeróbia da matéria orgânica pode ser uma ameaça ao ambiente local causando danos à vegetação, gerando odores desagradáveis, oferecendo ainda riscos de explosão em concentrações entre 5 e 15% no ar. O biogás pode ser também um problema global pois é formado por cerca de 50% de metano que é um gás causador do efeito estufa. O uso do biogás produzido nos aterros pode promover vários benefícios para os governos locais, estimulando a adoção de práticas de engenharia que maximizam a geração e a coleta do biogás, também reduzindo os riscos de contaminação do meio ambiente. Neste estudo desenvolveram-se testes no aterro sanitário Delta na cidade de Campinas, onde foram realizadas análises da composição e medições de vazão do biogás emitido no local para avaliar o potencial de geração de energia elétrica utilizando o biogás como combustível. Também foi calculada a partir dos resultados obtidos em campo, a produção futura para o aterro, com a adoção de uma metodologia teórica presente na literatura. Concluiu-se que o aterro atingirá seu potencial máximo (4 MW) um ano após o seu fechamento que deve ocorrer em junho de 2006. A produção de biogás tende a diminuir exponencialmente até o final do consumo da matéria orgânica.

Palavras Chave:

Biogás, Aterro Sanitário, Lixo, Energia de Biomassa.

Abstract

ENSINAS, Adriano Viana. *Study of biogas generation in Delta landfill, in Campinas – SP*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 129 p. Dissertação (Mestrado)

Disposal of waste into landfills represents one of the most important problems in urban sites, particularly in Brazil where the use of “open dumps” is still very common. Uncontrolled emission of biogas produced by anaerobic decomposition of the organic matter can be a local environmental hazard causing vegetation damage, unpleasant odors and may form explosive mixtures at concentrations from 5 to 15 per cent in air. Biogas can also be a global problem, once it is constituted by at least 50% of methane, which is an aggressive greenhouse gas. The use of produced biogas can promote many benefits for the local governments, stimulating the adoption of engineering practices that maximize the biogas generation and collection efficiency, also reducing the risks of environment contamination. This study comprises field testing in Delta landfill located in Campinas city where were there performed composition analysis and flow measurements of the biogas emitted from the site to evaluate the electric power generation potential using biogas as combustible. The future biogas production was also calculated for the landfill adopting a methodology presented in the literature, using measured data as initial input. It was concluded that the landfill will achieve its maximum potential (4MW) one year after the closure of the site that is planned to happen in 2006. The production of biogas tends to decrease exponentially until the end of the organic matter consumption.

Key words:

Biogas, Sanitary Landfill, Waste, Biomass Energy.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS.....	vi
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	
REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	5
2.1.1. <i>Definição e classificação</i>	5
2.1.2. <i>Composição do lixo urbano</i>	7
2.1.3. <i>Destinação final do lixo urbano</i>	8
2.2 BIOGÁS DE ATERRO	11
2.2.1. <i>Formação do biogás de aterro</i>	12
2.2.2. <i>Mecanismos de produção do biogás de aterro</i>	16
2.2.3. <i>Variação da produção de biogás de aterro</i>	16
2.2.4. <i>Composição do biogás de aterro</i>	17
2.2.5. <i>Captação e conversão energética de biogás de aterro</i>	19
2.2.6. <i>Projetos de aproveitamento de biogás de aterro</i>	22
2.2.7. <i>Estimativas teóricas da produção de biogás de aterro</i>	26
CAPÍTULO 3	
ESTUDO DE CASO.....	39

3.1. HISTÓRICO DA LIMPEZA URBANA EM CAMPINAS-SP.....	39
3.2. ATERRO SANITÁRIO DELTA A.....	40
3.2.1. <i>Localização do aterro</i>	40
3.2.2. <i>Descrição e operação do aterro</i>	42
CAPÍTULO 4	
METODOLOGIA	51
4.1. ESTUDO EXPERIMENTAL NO ATERRO SANITÁRIO DELTA.....	51
4.1.1. <i>Determinação da vazão do biogás</i>	51
4.1.2. <i>Coleta e análise do biogás</i>	56
4.1.3. <i>Determinação do vazamento pela superfície do aterro</i>	58
4.1.4. <i>Levantamento do histórico de deposição de lixo no aterro</i>	59
4.2. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO FUTURA DE BIOGÁS.....	60
4.2.1. <i>Determinação do potencial de geração de metano (L_0) para lixo de Campinas</i>	60
4.2.2. <i>Cálculo da vida útil do aterro</i>	61
4.3. LEVANTAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO ATERRO	61
CAPÍTULO 5	
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	63
5.1. EXPERIMENTO DE CAMPO	63
5.2. LEVANTAMENTO DO HISTÓRICO DE DEPOSIÇÃO DO LIXO NO ATERRO	68
5.3. ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	76
5.4. VERIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS PELA SUPERFÍCIE	76
5.5. ESTIMATIVAS DA PRODUÇÃO FUTURA DE GÁS METANO NO ATERRO	80
5.5.1. <i>Potencial de geração de gás metano (L_0) do lixo de Campinas</i>	80
5.5.2. <i>Cálculo da vida útil do aterro</i>	82
5.5.3. <i>Curvas de produção de metano e potencial energético do aterro</i>	84
5.5.4. <i>Simulação de projeto de geração de energia elétrica no aterro Delta</i>	88
5.6. OPÇÕES DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GÁS METANO EM ATERROS.....	92
5.7. REDUÇÃO DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DO ATERRO	93

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....95

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS97

APÊNDICE A

DADOS EXPERIMENTAIS105

APÊNDICE B

CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS.....109

APÊNDICE C

ANÁLISE DE INCERTEZAS.....114

APÊNDICE D

METODOLOGIA DE MEDIÇÃO POR SUÇÃO.....120

APÊNDICE E

INSTRUMENTOS UTILIZADOS129

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. ESQUEMA DE CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO	10
FIGURA 2.2. FASES DE FORMAÇÃO DO BIOGÁS DE ATERRO.....	13
FIGURA 2.3. MODELO TRIANGULAR DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA RESÍDUOS RAPIDAMENTE DEGRADÁVEIS	33
FIGURA 2.4. MODELO TRIANGULAR DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA RESÍDUOS LENTAMENTE DEGRADÁVEIS	33
FIGURA 3.1. ENVOLTÓRIAS DE PROTEÇÃO NA ÁREA DO COMPLEXO DELTA	41
FIGURA 3.2. FOTO AÉREA DO ATERRO DELTA NO ANO 2000.....	43
FIGURA 3.3. CAMADAS DE COBERTURA DO ATERRO E DRENO DE BIOGÁS.....	47
FIGURA 3.4. DRENO DE BIOGÁS EXISTENTE NO ATERRO DELTA A.....	49
FIGURA 3.5. DRENO DE BIOGÁS DESTRUÍDO	49
FIGURA 3.6. PLANTA DO ATERRO COM O POSICIONAMENTO E A NUMERAÇÃO DOS DRENOS PRESENTES NO LOCAL.....	50
FIGURA 4.1. ESQUEMA DO EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA AS MEDIÇÕES DE VELOCIDADE E TEMPERATURA DO BIOGÁS.....	53
FIGURA 4.2. ENCAIXE DA PEÇA CÔNICA E MONTAGEM DA LONA PLÁSTICA NO DRENO Nº 94.....	54
FIGURA 4.3. MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE SAÍDA DO BIOGÁS NO DRENO Nº 53	55
FIGURA 4.4. MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE SAÍDA DO BIOGÁS NO DRENO Nº54	56
FIGURA 4.5. COLETA DE BIOGÁS NO DRENO Nº 54.....	57
FIGURA 4.6. DETALHE DO ENCHIMENTO DO “BAG” COM BIOGÁS COLETADO.....	57
FIGURA 4.7. ESQUEMA DO EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO VAZAMENTO DE BIOGÁS PELA SUPERFÍCIE DO ATERRO	59
FIGURA 5.1. DIVISÃO DO ATERRO DELTA EM ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DO LIXO.....	69
FIGURA 5.2. FOTO DO ATERRO DELTA EM SETEMBRO DE 1994 COM INDICAÇÃO DA ÁREA A1	71
FIGURA 5.3. FOTO DO ATERRO DELTA EM 1996, COM INDICAÇÃO DA ÁREA A3	72
FIGURA 5.4. FOTO DO ATERRO DELTA NO ANO 2000 COM A FORMAÇÃO DOS DOIS MACIÇOS E INDICAÇÃO DAS ÁREAS A5 E A6.....	73

FIGURA 5.5. INÍCIO DA DEPOSIÇÃO DO LIXO NA ÁREA A3.....	74
FIGURA 5.6. MODELO DO ATERRO DELTA EM ABRIL DE 2003 – VISTA LATERAL.....	75
FIGURA 5.7. MODELO DO ATERRO DELTA EM ABRIL DE 2003 – VISTA SUPERIOR.....	75
FIGURA 5.8. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS PARA A VERIFICAÇÃO DO VAZAMENTO PELA SUPERFÍCIE	77
FIGURA 5.9. TRINCA PRESENTE NO ATERRO DELTA.....	79
FIGURA 5.10. CURVA DA QUANTIDADE DE LIXO RECEBIDA PELO ATERRO DELTA	82
FIGURA 5.11. CURVA DE GERAÇÃO DE GÁS METANO PARA O ATERRO DELTA	86
FIGURA 5.12. CURVA DE POTÊNCIA ELÉTRICA OBTIDA A PARTIR DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DO ATERRO DELTA	88
FIGURA 5.13. SIMULAÇÃO DAS ETAPAS DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DO ATERRO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM MOTORES A PLENA CARGA	90
FIGURA 5.14. SIMULAÇÃO DAS ETAPAS DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DO ATERRO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM MOTORES EM CARGA PARCIAL	91
FIGURA B1. ESQUEMA DA MONTAGEM UTILIZADA PARA CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO	110
FIGURA B2. CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE	111
FIGURA B3. CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR.....	112
FIGURA D1. DISTRIBUIÇÃO DOS MEDIDORES DE PRESSÃO AO REDOR DOS POÇOS DE SUÇÃO DE BIOGÁS	121
FIGURA D2. ESQUEMA DO POÇO DE COLETA DO BIOGÁS	123
FIGURA D3. ESQUEMA DE UM MEDIDOR DE PRESSÃO	124

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. COMPOSIÇÃO PERCENTUAL MÉDIA DO LIXO DOMICILIAR EM CIDADES BRASILEIRAS	8
TABELA 2.2. COMPONENTES DO LIXO URBANO DE BIODEGRADAÇÃO RÁPIDA E LENTA	17
TABELA 2.3. COMPOSIÇÃO BÁSICA DO BIOGÁS DE ATERRO	18
TABELA 2.4. TRAÇOS DE GASES ENCONTRADOS EM ATERROS DA CALIFÓRNIA, EUA	18
TABELA 2.5. FATOR DE CORREÇÃO DE METANO PARA AS CONDIÇÕES DO ATERRO	28
TABELA 2.6. TEOR DE CARBONO ORGÂNICO DEGRADÁVEL PARA CADA COMPONENTE DO LIXO.	29
TABELA 2.7. DADOS DA COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS ELEMENTOS DO LIXO DOMÉSTICO	32
TABELA 2.8. PARÂMETROS CALCULADOS PARA OS MODELOS DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS PROPOSTOS POR OONK & BOON (1995).....	38
TABELA 3.1. CARACTERIZAÇÃO DO LIXO DOMÉSTICO DE CAMPINAS	45
TABELA 3.2. QUANTIDADE DE LIXO DEPOSITADO NO ATERRO DELTA A	45
TABELA 4.1. PARÂMETROS ADOTADOS PARA O CÁLCULO DA VIDA ÚTIL DO ATERRO	61
TABELA 5.1. VAZÃO TOTAL DE BIOGÁS E GÁS METANO DO ATERRO DELTA	63
TABELA 5.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA VÁRIOS ATERROS NO BRASIL E NO EXTERIOR	65
TABELA 5.3. COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS COLETADO NO ATERRO DELTA	67
TABELA 5.4. ÁREAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS IDENTIFICADAS	70
TABELA 5.5. INCERTEZAS CALCULADAS	76
TABELA 5.6. PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO	80
TABELA 5.7. ESTIMATIVA DAS QUANTIDADES ANUAIS DE LIXO DESTINADAS AO ATERRO	82
TABELA 5.8. SIMULAÇÃO TEMPORAL DO ESGOTAMENTO DO ATERRO	83
TABELA 5.9. ETAPAS DO PROJETO PARA O ATERRO DELTA	90
TABELA 5.10. QUANTIDADES DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE AO METANO EMITIDO PELO ATERRO	93
TABELA A1. DADOS EXPERIMENTAIS DE VELOCIDADE E TEMPERATURA DE SAÍDA DO BIOGÁS NOS DRENOS	105

TABELA A2. DADOS EXPERIMENTAIS DA ANÁLISE DO BIOGÁS COLETADO NOS DRENOS.....	106
TABELA B1. VALORES CALCULADOS PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA EFETIVA DE PASSAGEM DO FLUIDO	110
TABELA B2. AMOSTRAS UTILIZADAS NA VERIFICAÇÃO DA MÍNIMA VAZÃO DETECTADA PELO BOLHÔMETRO	113
TABELA B3. RESULTADOS FINAIS DA VERIFICAÇÃO.....	113
TABELA C1. PARÂMETRO OBTIDOS PARA O CÁLCULO DA INCERTEZA NA VAZÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO	117
TABELA C2. PARÂMETROS DE CÁLCULO DA INCERTEZA NA MEDIDA DA ÁREA EFETIVA DE PASSAGEM DO FLUIDO NO DUTO DE PVC.....	118
TABELA C3. PARÂMETROS UTILIZADOS E RESULTADO DO CÁLCULO DA INCERTEZA NA VAZÃO DE BIOGÁS	119
TABELA C4. PARÂMETROS UTILIZADOS E RESULTADO DO CÁLCULO DA INCERTEZA NA VAZÃO DE METANO	119

Capítulo 1

Introdução

A disposição final do lixo urbano é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos em todo o mundo e tende a agravar-se com o aumento do consumo de bens descartáveis, que passam cada vez mais a compor os grandes volumes de lixo gerados pela população.

Dentre as várias alternativas conhecidas, a prática de utilização de áreas para aterramento do lixo ainda é a mais comum, devido principalmente ao seu baixo custo, a facilidade de execução e a grande capacidade de absorção de resíduos quando comparada às outras formas de destinação final como a incineração, a compostagem e a reciclagem. Por outro lado a necessidade de grandes áreas próximas aos centros urbanos, de grandes quantidades de material de cobertura e os riscos de contaminação do solo, das águas e do ar, demonstram que os aterros devem ser muito bem controlados. Além disso, os aterros impossibilitam o reaproveitamento de materiais, o que poderia evitar a exploração de matéria prima virgem na produção de novos bens de consumo.

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.

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 do biogás. 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.

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, indicando que este representa não somente uma preocupação com a integridade da região onde é gerado, como também está ligado às questões ambientais globais.

Dentre os principais problemas locais decorrentes da emissão descontrolada de biogás advinda da decomposição do lixo estão prejuízos causados 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. Há ainda o risco de incêndios e explosões em instalações próximas aos aterros, uma vez que este gás é altamente inflamável. Outro efeito negativo é o inconveniente causado por odores desagradáveis que podem gerar distúrbios emocionais em indivíduos que residem em áreas próximas aos aterros, além de favorecer a desvalorização das propriedades.

A concepção de aterros sanitários que visam além do armazenamento correto do lixo, o aproveitamento do biogás gerado ao longo do tempo, possibilita uma maior eficiência na produção e captação do metano gerado na massa de lixo. Uma rede de drenos de biogás previamente instalada que atinja todas as camadas de lixo, diminui os custos da implantação de novos drenos após o encerramento do aterro.

A impermeabilização eficiente da base e da cobertura do aterro possibilita condições adequadas para a degradação da matéria orgânica, aumentando conseqüentemente a produção de biogás. Além disso a divisão do aterro em partes ainda na fase de projeto, prevendo o encerramento de uma área para o início da deposição na área subsequente permite que o biogás seja explorado antes mesmo do esgotamento da capacidade total do aterro.

Neste trabalho foram abordadas as questões que envolvem a geração e a utilização do biogás em aterros. Para isto foi realizado um estudo de caso no aterro municipal Delta de Campinas – SP, onde se desenvolveu um procedimento experimental para determinação da quantidade de gás metano gerado no aterro, visando a sua utilização como fonte de energia. Os resultados obtidos no experimento foram comparados àqueles encontrados com a aplicação de metodologias teóricas presentes na literatura. A partir disso foi gerada uma estimativa futura da produção de biogás no aterro com a proposição de um projeto de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica.

Este estudo de caso fez parte de um trabalho coordenado pelo CEPEA (CENTRO DE ESTUDO AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA), órgão vinculado à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, unidade da Universidade de São Paulo, que teve como objetivo apresentar ao Ministério do Meio Ambiente uma estimativa de Linha de Base do potencial dos aterros sanitários nas regiões metropolitanas brasileiras, quantificando o potencial total de geração de energia elétrica e de redução de emissões de gás metano.

OBJETIVO

Este trabalho procura estudar os aspectos que envolvem o biogás de aterros sanitários, tendo como objetivo principal realizar o levantamento do potencial energético do aterro sanitário Delta em Campinas, SP.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

2.1.1. Definição e classificação

A ABNT denomina resíduos sólidos 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.” (ABNT, 1987)

Segundo Calderoni (1998), na linguagem corrente o termo resíduo é considerado sinônimo de lixo; sendo lixo todo material inútil cuja existência em um dado meio é tida como nociva, devendo ser descartado e colocado em lugar público. O lixo passa assim do domínio privado, como bem de consumo particular, para o domínio público, representando um problema para toda a sociedade.

A classificação dos resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente está apresentada a seguir (ABNT 1987).

- Classe I (Perigosos): 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 (Não inertes): Podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, porém, não se enquadram como resíduos I ou III;

- Classe III (Inertes): Não têm constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas.

O lixo, segundo D'Almeida & Vilhena (2000), também pode ser classificado quanto a sua origem, sendo:

- Lixo domiciliar: originário na vida diária das residências, constituído de restos de alimentos, produtos deteriorados, jornais e revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico, fraldas descartáveis, etc;
- Lixo comercial: originário nos diversos estabelecimentos comerciais e de serviços, tais como supermercados, estabelecimentos bancários, lojas, bares, restaurantes, etc. Esse tipo de lixo possui grande quantidade de plásticos, papéis, embalagens diversas e resíduos de asseio dos funcionários, tais como papel-toalha, papel higiênico, etc;
- Lixo público: originário dos serviços de limpeza urbana, incluindo resíduos de varrição, limpeza das praias, limpeza de galerias, córregos e terrenos, restos de podas de árvores, corpos de animais, etc;
- Lixo de serviços de saúde e hospitalar: originários de hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, clínicas veterinárias, postos de saúde, etc. São resíduos sépticos, ou seja, que contêm ou potencialmente podem conter agentes patogênicos e são constituídos por agulhas, seringas, gazes, bandagens, algodões, órgãos e tecidos removidos, meios de culturas e animais usados em testes, sangue coagulado, luvas descartáveis, remédios com prazo de validade vencido, instrumentos de resina sintética, filmes fotográficos de raios X, etc;
- Lixo de portos, aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários: resíduos sépticos produzidos nos portos aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários, constituindo-se basicamente de materiais de higiene, asseio pessoal e restos de alimentos, os quais podem veicular doenças provenientes de outras cidades, estados e países;
- Lixo industrial: originário de atividade dos diversos ramos da indústria, tais como metalúrgica, química, petroquímica, papelreira, alimentícia, etc. Esse tipo de lixo é bastante variado, podendo ser representado por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos,

plásticos, papéis, madeiras, fibras, borrachas, metais, escórias, vidros e cerâmicas, etc. Classificado geralmente como resíduos classe I;

- Lixo agrícola: originário de atividades agrícolas e da pecuária. Incluem embalagens de fertilizantes e de defensivos agrícolas, rações, restos de colheita, etc;
- Entulho: originário da construção civil e composto por materiais de demolições, restos de obras, solos de escavações diversas, etc. O entulho é geralmente um material inerte, passível de reaproveitamento, porém , geralmente contém uma vasta gama de materiais que podem lhe conferir toxicidade, com destaque para restos de tintas e de solventes, peças de amianto e metais diversos.

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 (STREB,2001).

2.1.2. Composição do lixo urbano

A composição do lixo urbano acompanha diretamente as modificações econômicas e as transformações tecnológicas, que vêm influenciando o modo de vida dos centros urbanos em um ritmo cada vez mais acelerado, gerando conseqüentemente mais resíduos.

Novas matérias primas passam a integrar os processos produtivos, com novos produtos e subprodutos, alterando a composição do lixo urbano, que passa cada vez mais a ser composto por embalagens e produtos artificiais, acompanhando o desenvolvimento econômico e conseqüentemente o aumento do consumo de bens industrializados pela população.

Nos países desenvolvidos, devido ao alto grau de industrialização, nota-se uma predominância de materiais como papel, metais, plástico e vidros, característicos de produtos industrializados e suas respectivas embalagens. Além disso a quantidade de lixo gerado apresenta-se muito maior que em países em desenvolvimento, devido ao maior poder aquisitivo da população.

Segundo D’Almeida e Vilhena (2000), no Brasil nota-se que mais de 50% do lixo urbano ainda é composto por matéria orgânica, mas segundo Meldonian (1998) esse número vem baixando, o que demonstra uma mudança de hábitos do brasileiro, refletindo as mudanças econômicas que estão em curso. A Tabela 2.1 apresenta a composição do lixo urbano em diferentes cidades brasileiras.

Tabela 2.1. Composição percentual média do lixo domiciliar em cidades brasileiras

Materiais	São Paulo	Rio de Janeiro	Salvador	Porto Alegre	Fortaleza
Papel e Papelão	18,8	22,2	16,2	22,1	22,6
Plásticos	22,9	16,8	17,1	9,0	8,2
Vidro	1,5	3,7	2,9	9,2	3,3
Metal	3,0	2,8	3,7	4,7	7,3
Outros	53,8	54,6	60,2	55,0	58,6

Fonte: D’Almeida e Vilhena (2000)

2.1.3. Destinação final do lixo urbano

No Brasil, a geração de resíduos sólidos municipais é estimada em 54 mil toneladas/dia, com a geração per capita em uma cidade brasileira variando entre 0,4 e 0,7 kg de lixo/habitante/dia. Quanto à disposição final dos resíduos sólidos, a seguinte distribuição é apresentada: 76% em lixões a céu aberto, 22% em aterros controlados e sanitários e 2% com outra destinação, como usinas de compostagem e incineração (VIEIRA & ALVES, 2002).

A CETESB (COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL) vem realizando desde 1997 a avaliação dos aterros em operação e das usinas de compostagem nos mais de 500 municípios do Estado de São Paulo, atribuindo-lhes uma pontuação IQR (Índice de qualidade de resíduos) em uma escala de 0 a 10, sendo aqueles entre 0 e 6 considerados inadequados, entre 6 e 8 controlados e entre 8 e 10 adequados. A classificação analisa 41 itens, divididos em aspectos como localização, infra-estrutura e condições operacionais. Seguindo esta

metodologia e aplicando-se as medidas de adequação à legislação, observou-se melhorias nas práticas de destinação final do lixo, com uma evolução de 10,9% para 70,7% dos resíduos dispostos adequadamente e de 4,2% para 45,7% no número de municípios com aterros adequados entre 1997 a 2002 (CETESB, 2003).

Aterros

O aterro constitui uma forma de destinação final do lixo largamente utilizada nos dias atuais, em virtude de sua simplicidade de execução, seu baixo custo e capacidade de absorção diária de grande quantidade de resíduos, quando comparado às demais formas de tratamento do lixo.

Contudo existem fatores limitantes a essa prática como a redução da disponibilidade de áreas próximas aos centros urbanos, os riscos ambientais associados à infiltração do chorume e a emissão descontrolada de biogás.

A Figura 2.1 apresenta um esquema de um aterro sanitário com os diversos sistemas de controle ambiental e as etapas de operação. Um aterro sanitário segue normas técnicas de construção e deve apresentar drenagem de chorume, de biogás e de águas superficiais, impermeabilização da base do terreno e camada de cobertura final. As etapas básicas de operação são a chegada, pesagem e descarregamento do lixo na frente de descarga, seguida da compactação e da cobertura do lixo depositado, preparando assim o terreno para recebimento de uma nova camada de resíduos até que se atinja a cota final de projeto.

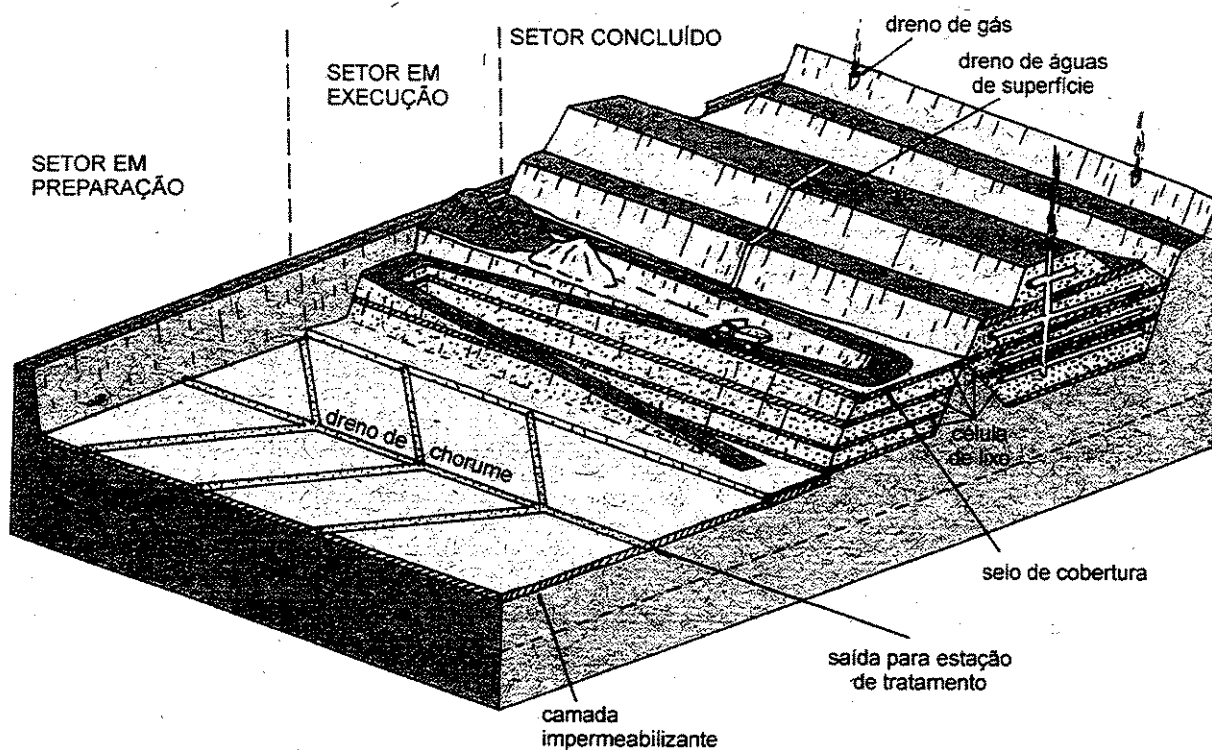


Figura 2.1. Esquema de construção e operação de um aterro sanitário

Fonte: D' Almeida e Vilhena (2000)

Segundo D' Almeida e Vilhena (2000) os aterros podem ser assim classificados em :

- *Lixões*: forma inadequada de deposição final de resíduos sólidos, que se caracteriza 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 percolato 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, minimizando os impactos ambientais.

Outro aspecto importante a ser considerado é a influencia dessa prática na dinâmica natural cíclica do planeta, uma vez que os elementos constituintes da massa de resíduos não retornam a sua origem, sendo portanto excluídos dos ciclos naturais e indisponíveis para a sociedade (FIGUEIREDO, 1995).

2.2 Biogás de aterro

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. Dentre os problemas ambientais decorrentes dessa prática encontra-se a geração de biogás a partir da decomposição dos resíduos.

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, contribuindo assim para o agravamento do efeito estufa. Segundo IPCC (1996) os aterros são responsáveis por cerca de 5 a 20% do total de metano liberado por fontes com origem em atividade humanas.

Em VIEIRA & 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.

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 controlado devidamente, 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.

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 o mesmo autor, levam a distúrbios emocionais em indivíduos que residem em áreas próximas aos aterros e favorecem a desvalorização das propriedades.

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 2.2.

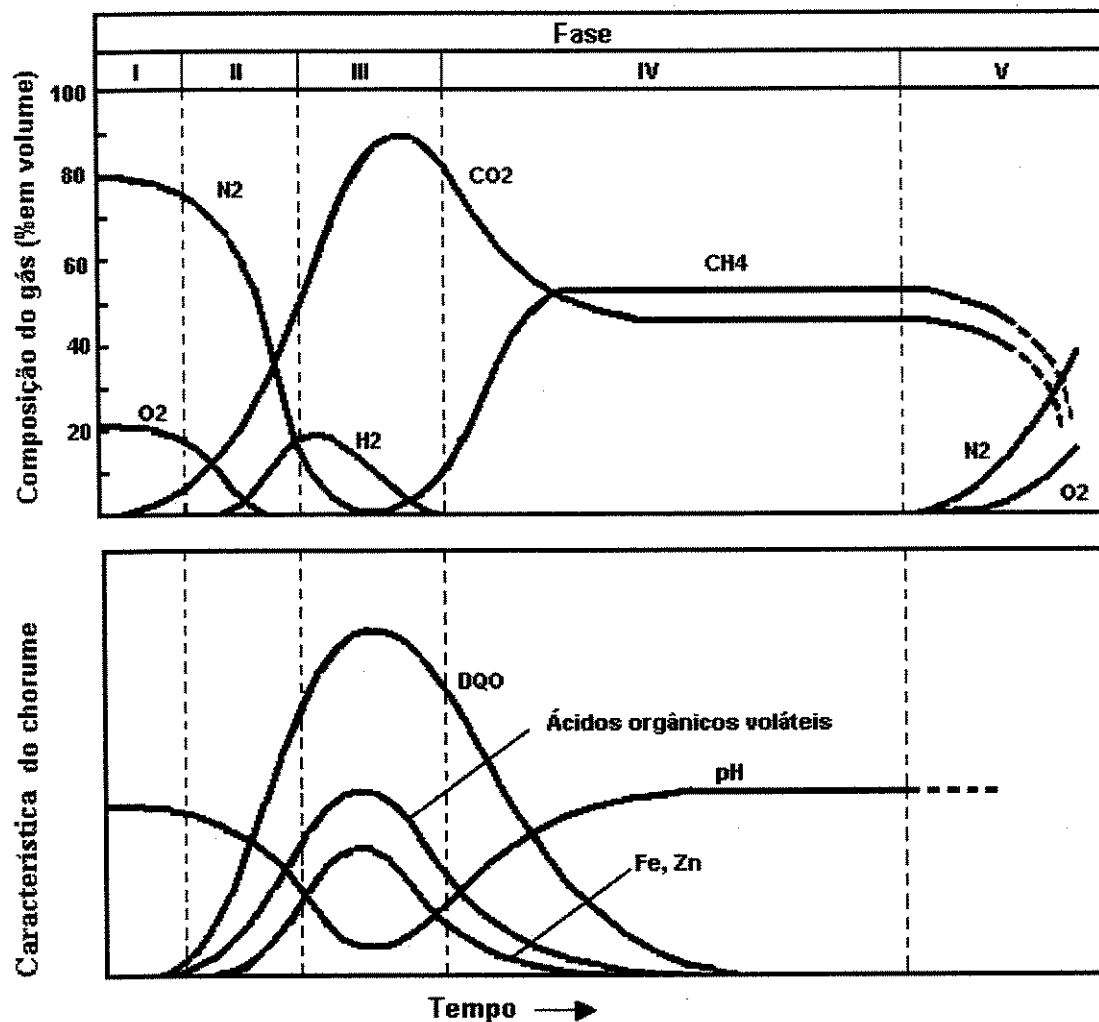


Figura 2.2. Fases de formação do biogás de aterro

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

As diversas fases apresentadas na figura anterior são descritas a seguir (TCHOBANOGLIOUS, THEISEN & VINIL, 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 que 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 a -100 milivolts para nitratos e sulfatos. A produção do metano ocorre com valores entre -150 a -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 três 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 a ser 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.

Segundo Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993) a duração de cada fase na produção do gás do aterro depende da distribuição da matéria orgânica no aterro, da disponibilidade de nutrientes, do teor de umidade do lixo e do grau de compactação inicial do lixo.

Diversos fatores influenciam a taxa de geração do gás de aterro (USEPA, 1991):

- Composição do lixo: quanto a maior a porcentagem de materiais biodegradáveis, maior a taxa de geração de gases. 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.
- Umidade do lixo: 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.
- Idade do lixo: a geração do biogás segue as fases de decomposição do lixo descritas anteriormente. A duração de cada fase e o tempo de produção de metano, dependem de condições específicas de cada aterro.
- Temperatura do aterro: 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.
- pH do aterro: o pH ótimo para a produção do metano está entre 7.0 e 7.2. Inicialmente os aterros apresentam pH ácido, que tende a aproximar-se da neutralidade a partir da fase metanogênica.

2.2.2. Mecanismos de produção do biogás de aterro

Segundo a USEPA (1991) a produção do biogás pode ser realizada a partir da vaporização, decomposição biológica e reações químicas. A vaporização é a mudança de estado líquido para gasoso que ocorre até que se atinja concentrações de equilíbrio nos gases do aterro. A decomposição biológica ocorre quando compostos orgânicos de grande massa molecular são decompostos por bactérias, gerando compostos voláteis. A reação química ocorre como resultado do contato entre o lixo e os gases reativos gerados no aterro.

Alguns fatores podem influenciar os mecanismos de produção dos gases. A vaporização depende da pressão parcial e concentração dos componentes orgânicos, além da temperatura e pressão no aterro. As reações químicas dependem da composição do lixo e da temperatura. A decomposição biológica depende da disponibilidade de nutrientes para as bactérias, da composição do lixo, da idade do aterro, da umidade, da presença de oxigênio, da temperatura e do pH do lixo no aterro (USEPA, 1991).

2.2.3. Variação da produção de biogás de aterro

Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993) classificam os resíduos orgânicos como materiais de decomposição rápida (de alguns meses a 5 anos) e degradação lenta (entre 5 e 50 anos), sendo que em condições, normais a taxa de decomposição atinge um pico entre o primeiro e o segundo ano e diminui continuamente por mais de 25 anos. A Tabela 2.2 apresenta a classificação desses resíduos normalmente encontrados no lixo urbano.

Rovers et al. (1977) apud Bingemer & Crutzen (1987) afirmam que restos de alimentos e resíduos de jardim levam de 1 a 5 anos para se decompor, papéis cerca de 5 a 20 anos e a fração de 70% da madeira que não inclui a lignina demora de 20 a 100 anos para se decompor. A fração de 30% de lignina da madeira, os plásticos e as borrachas são consideradas não biodegradáveis ou com taxas de decaimento muito lentas (KOLLMANN & COTE, 1968 apud BINGEMER & CRUTZEN, 1987).

Tabela 2.2. Componentes do lixo urbano de biodegradação rápida e lenta

Componente do lixo orgânico	Rapidamente Biodegradável	Lentamente Biodegradável
Restos de alimentos	✓	
Jornais	✓	
Papel de escritório	✓	
Papelão	✓	
Plásticos*		
Resíduos Têxteis		✓
Borrachas		✓
Couro		✓
Folhas e grama	✓	
Madeira		✓

*plásticos são geralmente considerados não-biodegradáveis

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Theisen & Vinil, 1993

2.2.4. Composição do biogás de 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 2.3 apresenta os valores típicos de sua composição.

Segundo Tabasaran (1982) e Gunnerson & Stuckey (1986) apud Bingemer & Crutzen, (1987), a pequena 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.

Em Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993) é apresentada a composição detalhada dos traços de gases presentes na maioria dos aterros de resíduos sólidos urbanos. A Tabela 2.4 mostra o resultado de análises realizadas em 66 aterros da Califórnia, EUA.

Tabela 2.3. Composição básica do biogás de aterro

Composição	Porcentagem (Base seca)
Metano	45-60
Dióxido de Carbono	40-60
Nitrogênio	2-5
Oxigênio	0,1-1,0
Enxofre, Mercaptanas	0-1,0
Amônia	0,1-1,0
Hidrogênio	0-0,2
Monóxido de Carbono	0-0,2
Gases em menor concentração	0,01-0,6

Fonte: Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

Tabela 2.4. Traços de gases encontrados em aterros da Califórnia, EUA

Composto	Concentração Máxima (ppbV)
Diclorometano	620.000
Tolueno	280.000
Acetona	240.000
Acetato de Vinila	240.000
Tetracloroetileno	180.000
Metil Etil Cetona	130.000
Etil Benzeno	87.500
Estirenos	87.000
Benzeno	39.000
Xilenos	38.000
1,1 -Dicloroetano	36.000
Tricloroetileno	32.000
Cloreto de Vinila	32.000
Cloreto de Dietileno	20.000
1,1,2,2-Tetracloroetano	16.000
1,1,1-Tricloroetano	14.500
Clorofórmio	12.000
1,1 - Dicloroetano	4.000
Dicloreto de Etileno	2.100
Clorobenzeno	1.640
Trans-1,2-Dicloroetano	850

Fonte: Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

2.2.5. Captação e conversão energética de biogás de aterro

Os projetos de recuperação do biogás de aterro têm como finalidade principal o aproveitamento da energia contida nesse produto da decomposição do lixo. A conversão desse gas pode ser feita de modo a atender diversas necessidades energéticas, como a geração de eletricidade, a geração de vapor ou mesmo o uso direto como combustível automotivo.

Cada instalação de aproveitamento dos gases em aterros tem suas particularidades, dependendo da localização, das necessidades energéticas locais, do investimento financeiro disponível e da legislação vigente, sendo importante a avaliação prévia das diversas possibilidades de aproveitamento antes de uma decisão final para o projeto.

Os aterros possuem geralmente sistemas de coleta do biogás gerado na decomposição do lixo. Existem dois tipos básicos de sistemas de coleta: passivo e ativo. O sistema passivo tem a finalidade de drenar os gases para a atmosfera evitando a emissão descontrolada pela superfície, além de impedir que haja migração dos gases para as áreas vizinhas ao aterro através do solo, evitando potencial risco de explosão. O sistema ativo inclui exaustores e compressores e é usado em projetos de aproveitamento energético do biogás.

Diversos aproveitamentos do biogás podem ser realizados para geração de calor, trabalho mecânico e eletricidade, utilizando-se caldeiras, motores de combustão interna, turbinas a gás, células combustíveis e outros conversores de energia.

O uso direto do biogás de aterro pode ser realizado para abastecimento de uma rede local de gás canalizado ou diretamente para alguma aplicação específica em processos industriais. Nesses casos o biogás serve como combustível auxiliar ou como substituto de algum derivado de petróleo.

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).

Há ainda a possibilidade do uso do gás na evaporação do chorume gerado no aterro, com sistemas de queima do gás metano e coleta do vapor de chorume resultante, que pode ainda ser aproveitado como gás combustível juntamente com o gás do aterro não usado (USEPA, 1998).

Caldeiras

Algumas considerações devem ser feitas para o uso direto do gás em caldeiras, a fim de assegurar o funcionamento adequado do sistema. 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 gás de aterro 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 metano e das flutuações na composição do gás podem ser controladas com a instalação de sensores ultravioletas 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 gás de aterro, 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 anti-corrosivo, 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).

Motores de Combustão Interna

O uso de motores de combustão interna é a alternativa mais utilizada no aproveitamento de gases de aterro pelo seu baixo custo, facilidade de operação e manutenção. São indicados para projetos em aterros com potencial acima de 800 kW (USEPA a , 2002).

Altas eficiências são obtidas principalmente em aplicação de cogeração com aproveitamento do calor perdido pelo motor no sistema de resfriamento 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.

Turbinas a Gás

As turbinas a gás são usadas em grandes aterros, com projetos de 3 a 4 MW no mínimo (USEPA, 2002a). 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 tem 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 1996a).

Microturbinas

As microturbinas são equipamentos mais recentes e menos empregados no aproveitamentos de gás de aterro. 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.

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, 2002a).

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, 2002a).

2.2.6. Projetos de aproveitamento de biogás de aterro

O uso do gás gerado em aterros sanitários apresenta-se como uma realidade, tendo aplicações diversas em cerca de 20 países do mundo, principalmente na Europa, Estados Unidos e Canadá (EUROPA, 2003).

O primeiro projeto de recuperação do gás de aterro para geração de energia foi realizado em Rolling Hills, Califórnia, no aterro Palos Verdes em 1975. O gás era coletado, purificado e vendido para a Companhia de Gás “Southern California”. Outros projetos foram implantados ainda na mesma década, como: Mountain View em 1978 e Monterey Park em 1979. O primeiro projeto com aproveitamento do gás em caldeira entrou em operação no início da década de 1980, sendo o primeiro aproveitamento do gás para geração de eletricidade realizado em Battleboro, Vermont, em 1982 (USEPA, 1996b).

A USEPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) criou em 1994 o Landfill Methane Outreach Program, que faz parte do Plano de Ação de Mudanças Climáticas e visa o incentivo à implantação de projetos de recuperação do gás de aterro como fonte de energia nos Estados Unidos. O programa procura identificar aterros com potencial de geração de energia a custos competitivos e a superação das barreiras ao uso dessa fonte de energia nas diversas esferas de governo. São fornecidas informações sobre a avaliação e a implementação de projetos aos proprietários e operadores de aterros. Segundo USEPA (2002b), até agosto de 2002, nos Estados Unidos, 325 projetos estavam em operação e outros 200 projetos em fase de avaliação ou construção.

Segundo Lagerkvist (1995), a Europa em 1995 contava com vários países que já possuíam projetos de aproveitamento energético do biogás instalados, entre eles a Alemanha com 112 plantas, a Suécia com 56 plantas, Holanda com 22 plantas além da Noruega e Dinamarca com 9 plantas cada.

No Reino Unido os projetos de aproveitamento do gás de aterro foram iniciados em 1981 com o uso comercial do biogás, substituindo combustíveis fósseis (Moss et al., 1991). Em janeiro de 1993 já existiam no país cerca de 13 projetos com uso direto do biogás e 42 instalações gerando 72 MW de eletricidade (Brown & Maunder, 1994).

Também são encontrados projetos de uso do biogás de aterros em outros países como a Lituânia (KATINA & SKEMA, 2001) e a Jordânia (AL-DABBAS, 1998), ambos buscando a redução das emissões de gases de efeito estufa e a substituição de fontes de energia fósseis.

No Brasil poucos projetos de recuperação dos gases de aterros sanitários foram implantados. Dois destes projetos são relatados por Danese (1981), sendo um deles da COMGÁS (COMPANHIA DE GÁS DA SÃO PAULO), que distribuía o gás de um aterro sanitário localizado no Km 14,5 da Rodovia Raposo Tavares para um conjunto residencial próximo ao local. O outro se refere ao aproveitamento do gás do Aterro Caju no Rio de Janeiro em 1977 pela CEG (COMPANHIA ESTADUAL DE GÁS), juntamente com a COMLURB (COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA), no qual o biogás coletado, depois de purificado, era adicionado ao gás craqueado de nafta que abastecia a cidade. A quantidade adicionada à rede era de cerca de 1000 m³/dia, com uma economia de nafta de aproximadamente 8000 L/dia. O projeto teve duração de 10 anos, sendo que em 1985 iniciou-se o aproveitamento do gás para o abastecimento da frota da COMLURB, com cerca de 150 veículos movidos a gás, além do abastecimento de taxis que utilizavam esse combustível (COMLURB, 2002).

No projeto da COMGÁS, o gás apresentou 61,9% de metano com poder calorífico de 5810 kcal/Nm³ e no projeto da CEG observou-se 59,2% de metano na composição do biogás com poder calorífico da ordem de 5640 kcal/Nm³ (COSIPA, 1980).

Segundo Cantanhade et al.(1978), o potencial teórico máximo de produção do gás baseado em experimentos realizados nos Estados Unidos é de 250 m³ por tonelada de resíduo. Em estudo de campo no Aterro Caju no Rio de Janeiro os valores variaram de 60 m³ a 190 m³ por tonelada de resíduos.

Mestriel (1991) descreve a usina de tratamento de biogás do aterro sanitário de Belo Horizonte construída pela GASMIG (COMPANHIA DE GÁS DE MINAS GERAIS) para fornecer gás purificado para o setor siderúrgico local, substituindo o GLP. Outra aplicação estudada e testada foi a utilização do biogás como combustível da frota da empresa.

Em COSIPA (1980) foi apresentado o projetos ELBRAS que visava o aproveitamento do biogás de um aterro sanitário na Baixada Santista que depois de devidamente tratado seria transportado por tubulação à COSIPA (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA), sendo usado como complemento aos derivados petróleo consumidos na empresa. O projeto em parceria com a CETESB visava além da recuperação do gás no aterro, uma melhoria na ordenação da coleta e destinação final do lixo na região, diminuindo o lançamento de resíduos sólidos a céu aberto e muitas vezes em áreas ribeirinhas ou de manguezais.

Na cidade de Campinas houve uma experiência com um projeto de aproveitamento de biogás do aterro sanitário Santa Bárbara em 1984 com a instalação de poços de drenagem e uma rede de coleta ligada a um sistema de exaustão que visava o abastecimento da frota de veículos de coleta de lixo, mas devido a problemas políticos e administrativos o projeto foi encerrado (PMC, 1996).

Mais recentemente alguns projetos foram implantados, utilizando financiamentos externos através do mercado de créditos de carbono do chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), previsto no protocolo de Kyoto. O primeiro deles refere-se ao aproveitamento do gás gerado em um aterro localizado na cidade de Tremembé, no Estado de São Paulo, onde a empresa SASA Sistemas Ambientais, que gerencia o local, utiliza o gás desde 2001, para evaporação do chorume do aterro (ESCOBAR, 2002). Um novo projeto prevê a geração de 50 a 80 mil kWh/mês de energia elétrica para suprimento do próprio aterro, que consome em média 30 mil kWh/mês, sendo o excedente vendido à distribuidora de eletricidade (JULIANI, 2002).

Na cidade de São Paulo em 2003, dois projetos encontravam-se em fase de licenciamento ambiental e de aprovação pela ANEEL. Estão previstas duas centrais com potência elétrica de 20 MW cada uma, localizadas nos aterros Bandeirantes e São João (RECICLÁVEIS, 2002).

O aterro da região metropolitana de Salvador na Bahia, também possui um projeto de aproveitamento do gás gerado na decomposição do lixo. A empresa VEGA Bahia, que tem a concessão de operação do aterro de 1999 à 2020, prevê uma usina de geração termelétrica com capacidade instalada de 45 MW no período de 2015 à 2021 (PLOTAKHINA, 2001).

Segundo um estudo encomendado pelo Ministério do Meio Ambiente à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), o Brasil possui um potencial de 300 à 400 MW através do aproveitamento do biogás de aterro sanitário das regiões metropolitanas. Foram levantados cerca de 110 municípios com mais de 300 mil habitantes, cujos aterros oferecem condições para a produção de eletricidade (RECICLÁVEIS,2002).

2.2.7. Estimativas teóricas da produção de biogás de aterro

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 que necessitam.

Em USEPA (1996a) é apresentada uma metodologia teórica denominada “Aproximação Simples” que utiliza a Equação 2.1 para estimativas de produção de gás metano em aterros , tendo como única variável, a quantidade de lixo depositado no local. São sugeridas taxas de geração de 0,312 a 1,249 m³/(kg lixo x ano) com geração média de 0,624 m³/(kg lixo x ano).

$$G_{CH_4} = Gr \times Q_L \quad (2.1)$$

Sendo:

G_{CH_4} :geração anual de gás metano (m³/ano)

Gr: geração de gás metano por quantidade de lixo depositado (m³/kg lixo x ano)

Q_L : quantidade de lixo depositada no local (kg)

Essa metodologia apresenta grande imprecisão, podendo ser usada somente para uma avaliação preliminar de um projeto de aproveitamento de gás de aterro. Como há diminuição da quantidade de gás ao longo do tempo este método só deve ser usado para o primeiro ou segundo ano após o fechamento do aterro.

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 2.2, 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.

$$E_{CH_4} = (PopUrb \times Taxa \ RSD \times RSDf \times Lo - R) \times (1 - OX) \quad (2.2)$$

Sendo:

E_{CH_4} : emissão de gás metano (t de CH_4 /ano)

PopUrb: população urbana (nº de habitantes)

Taxa RSD: taxa de geração de resíduos sólidos domésticos por habitante por ano (t de RSD/habitante x ano)

RSDf: fração de resíduos sólidos domésticos que é depositada em locais adequados de disposição final de lixo (%)

Lo: potencial de geração de metano do lixo (t de CH_4 /t de lixo)

R: metano aproveitado (t de CH_4 /ano)

OX: fator de oxidação de metano na superfície do aterro (%)

O potencial de geração de metano a partir do lixo (Lo) pode ser obtido pela metodologia apresentada em IPCC (1996), que segue a Equação 2.3.

$$Lo = FCM \times COD \times CODf \times F \times (16 / 12) \quad (2.3)$$

Sendo:

Lo: potencial de geração de metano do lixo (t de CH₄ / t de lixo);

FCM: fator de correção de metano;

COD: carbono orgânico degradável (t de C/ t lixo);

COD_f: fração de COD dissociada;

F: fração em volume de metano no biogás;

(16/12): fator de conversão de carbono em metano (t de CH₄/ t de C).

O fator de correção de carbono (FCM), que avalia a qualidade do aterramento do lixo, considera o fato do resíduo aterrado de forma inadequada produzir menor quantidade de metano em relação aquele destinado a locais adequados, onde uma maior parte do lixo é decomposta em condições anaeróbias. Os valores recomendados pelo IPCC para este fator estão apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Fator de correção de metano para as condições do aterro

Tipo de Local	FCM – Fator de correção de metano
Adequado*	1,0
Inadequado – profundo (> 5 m de lixo)	0,8
Inadequado – raso (< 5 m de lixo)	0,4

*Locais adequados devem ter deposição controlada do lixo contando com material de cobertura, compactação mecânica e nivelamento do terreno.

O cálculo da quantidade de carbono orgânico degradável (COD) segue a Equação 2.4 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 2.6 são encontrados os valores de COD para diferentes componentes do lixo.

Tabela 2.6. 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 fração de lignina que se decompõe muito lentamente.

Fonte: Birgerner & Crutzen (1987)

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,40 \times D) + (0,3 \times E) \quad (2.4)$$

Sendo:

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 Birgerner & Crutzen (1987) indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida pela Equação 2.5.

$$COD_f = 0,014 T + 0,28 \quad (2.5)$$

sendo T: temperatura na zona anaeróbia (°C)

Birgerner & Crutzen (1987) afirmam que o restante é assimilado no material celular dos microorganismos durante a degradação da matéria orgânica.

Laquidara et al. (1986) apresentam uma metodologia para estimativas das quantidade de sólidos voláteis biodegradáveis restantes no aterro. São descritos métodos de análises para levantamento de alguns parâmetros para a realização das estimativas e obtidos dados como sólidos totais, sólidos voláteis totais, teor de carbono e teor de lignina presentes em amostras de lixo coletadas para o estudo. Relações entre estes parâmetros também são apresentadas como necessárias para o cálculo da taxa de decaimento da quantidade de matéria orgânica no lixo enterrado. As Equações 2.6 e 2.7 são usadas para o estudo da quantidade de metano produzido ao longo da vida do aterro.

$$S_i = S_o e^{-kt} \quad (2.6)$$

Sendo:

S_i : quantidade de sólidos orgânicos restantes em determinado período (kg)

S_o : quantidade inicial de sólidos orgânicos restantes no fechamento do aterro (kg)

k : constante de decaimento (ano^{-1})

t : tempo (ano)

Para cálculo da quantidade de metano produzida usa-se a Equação 2.7.

$$G = C (\Delta S) \quad (2.7)$$

Sendo:

G : metano produzido (L/ano)

C : constante = 350 L de CH_4 / quantidade de matéria orgânica decomposta (kg)

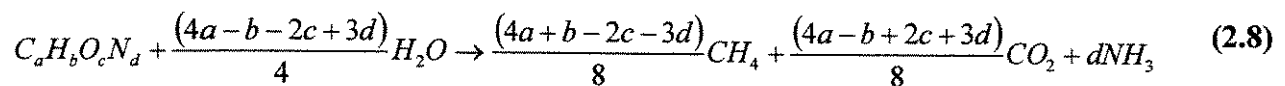
ΔS : quantidade de matéria orgânica decomposta (kg/ano)

O uso da constante “C” apresentada na Equação 2.7 admite um valor fixo para o potencial de geração de metano do lixo, o que pode ocasionar erros nas estimativas uma vez que este parâmetro depende de vários fatores. A metodologia apresentada na Equação 2.3 calcula o

mesmo termo, denominado “Lo”, de forma mais precisa, considerando a composição do lixo, as condições do aterro entre outros fatores que interferem diretamente no resultado final.

Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993) apresentam uma metodologia de avaliação da quantidade de biogás produzido em aterro sanitário a partir da composição do lixo e da constituição química de cada um de seus elementos.

A reação de decomposição do lixo pode ser encontrada usando-se a Equação 2.8:



Os índices “a”, “b”, “c” e “d” são estimados pela constituição típica de diversos componentes do lixo doméstico apresentada na Tabela 2.7. O equacionamento deve ser separado para os dois tipos de lixo classificados pelo autor: rapidamente degradável (restos de alimentos, papel, papelão, grama e folhas) e lentamente degradável (tecidos, borracha, couro e madeira).

Conhecendo a massa de gás metano e de dióxido de carbono formada, através das equações de decomposição do lixo e a densidade de cada gás, pode-se conhecer o volume de gás gerado, obtendo-se assim as quantidades volumétricas de cada gás para as massas de resíduos rapidamente e lentamente degradáveis determinadas inicialmente.

O autor assume que os resíduos rapidamente degradáveis atingem seu pico de produção de biogás ao final do segundo ano após a sua deposição, decaindo a partir deste ponto até o 6º ano, quando a produção se esgota. O primeiro ano é considerado uma fase de maturação onde a produção é nula. Para os resíduos lentamente degradáveis o pico de produção ocorre no sexto ano, com decaimento até o final do décimo sexto ano. A produção em cada ano é obtida pelas áreas sob as curvas que seguem as distribuições apresentadas nas Figuras 2.3 e 2.4.

Tabela 2.7. Dados da composição típica dos elementos do lixo doméstico

<i>Componente</i>	Porcentagem em massa (base seca)					
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinza
Orgânicos						
Restos de alimentos	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Papelão	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8			10,0
Tecidos	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Borracha	78,0	10,0	-	2,0	-	10,0
Couro	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Resíduos de jardim	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Madeira	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Inorgânicos						
Vidro	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metais	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
Diversos	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

Fonte: Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993) também assumem que respectivamente 75% e 50% dos resíduos rapidamente e lentamente degradáveis estão disponíveis, pois nem toda massa de lixo está exposta à umidade necessária para a decomposição microbiológica.

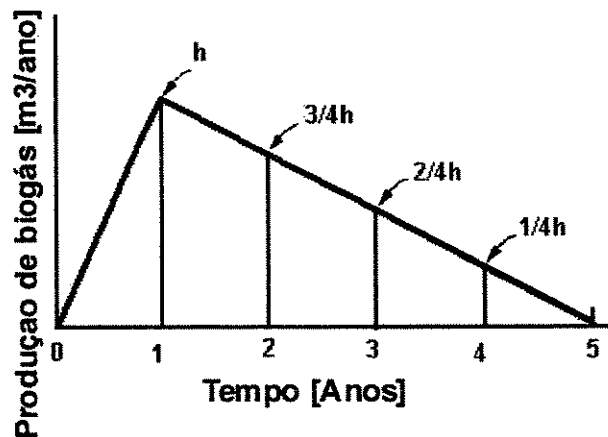


Figura 2.3. Modelo triangular de produção de biogás para resíduos rapidamente degradáveis

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

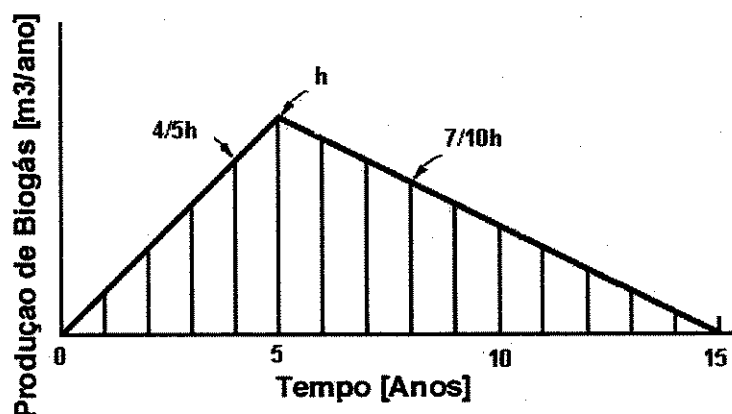


Figura 2.4. Modelo triangular de produção de biogás para resíduos lentamente degradáveis

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

Um outro método, denominado “Método de Decaimento de Primeira Ordem”, é apresentado em USEPA (1991), no qual é considerado o fato do gás metano ser emitido por longos períodos de tempo, considerando assim vários fatores que influenciam a taxa de geração do mesmo. Esse método, que pode ser usado para estimativas de casos individuais ou para regiões e países inteiros está apresentado na Equação 2.9.

$$Q = L_o R (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (2.9)$$

Sendo:

Q: geração de metano no ano (m^3/ano)

L_o : Potencial de geração de metano do lixo (m^3/t de lixo)

R: média anual de deposição do lixo durante a vida útil do aterro (t/ano)

k: constante de decaimento (ano^{-1})

c: tempo desde o fechamento do aterro (anos)

t: tempo de desde a abertura do aterro (anos)

Segundo USEPA (1991) o fator “ L_o ” depende da composição do lixo e das condições do aterro para o processo de metanização, estando os valores encontrados na literatura entre 6,2 e 270 m^3 de CH_4/t de lixo para aterros americanos.

A constante de decaimento (k) está relacionada com o tempo necessário para a fração de carbono orgânico degradável (COD) do lixo, decair para metade de sua massa inicial, podendo ser obtida por processo iterativo quando são conhecidas a vazão de gás metano do aterro, o valor de “ L_o ” e a quantidade e o tempo de deposição do lixo no local..

Segundo IPCC (1996) esta constante é estabelecida seguindo a Equação 2.10:

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (2.10)$$

Sendo:

k: constante de decaimento (ano^{-1})

$t_{1/2}$: tempo para a fração de COD decair pela metade em massa (anos)

O valor de “k” segundo USEPA (1991), depende de vários fatores como o teor de umidade do lixo, a disponibilidade de nutrientes para a metanogênese e o pH. Em geral, teores de umidade até 60% e pH entre 6.6 e 7.4 promovem o aumento da taxa de geração de metano. Os valores encontrados na literatura encontram-se dentro de uma faixa de 0,003 a 0,21/ano (USEPA, 1991).

Quanto há dados suficientes quanto a disposição dos resíduos sólidos urbanos nos locais de destinação, uma derivação da Equação 2.9 pode ser empregada, considerando a quantidade de lixo depositada em cada ano (IPCC, 1996). A variável t é substituída por T-x na Equação 2.11, representando o número de anos que o lixo esteve depositado.

$$Q_{T,x} = k R_x L_o e^{-k(T-x)} \quad (2.11)$$

Sendo:

$Q_{T,x}$: quantidade de metano gerado no ano em vigência “T” pelo resíduos “ R_x ” (m^3 /ano)

k: constante de decaimento (ano^{-1})

R_x : quantidade de lixo depositado no ano x (t)

L_o : potencial de geração de metano do lixo (m^3 /t de lixo)

T: ano em vigência

x: ano de deposição do lixo no aterro

Para estimar a emissão total de metano pelo lixo depositado no aterro durante todos os anos deve ser usada a Equação 2.12 (IPCC, 1996):

$$Q_T = \sum Q_{T,x} \quad (2.12)$$

Para x = ano inicial até T

Sendo:

Q_T : quantidade total de gás metano gerado (m^3 /ano)

Oonk & Boom (1995) apresentam os métodos de estimativas de produção de biogás em aterros descritos nas Equações 2.13 a 2.16:

$$\text{Modelo ordem zero} \quad \alpha_t = \xi \, 1,87 \, k_o \, A \quad (2.13)$$

$$\text{Modelo de primeira ordem} \quad \alpha_t = \xi \, 1,87 \, A \, C_o \, k_1 \, e^{-k_1 t} \quad (2.14)$$

$$\text{Modelo multi-fase} \quad \alpha_t = \xi \sum_{j=1}^3 1,87 \, A \, C_{o,i} \, k_{1,i} \, e^{-k_{1,i} t} \quad (2.15)$$

$$\text{Modelo de segunda ordem} \quad \alpha_t = \xi \, 1,87 \, A \, k_2 \, (C_o / k_2 C_{ot+1})^2 \quad (2.16)$$

Sendo:

α_t : formação do gás (m³/ano)

ξ : fator de geração que indica a fração do lixo que é convertida em biogás.

k_n : parâmetros do modelo

A: quantidade de lixo depositada no local (kg)

C_o : quantidade de carbono orgânico degradável no lixo (kg de C/ kg de lixo)

$C_{o,i}$: quantidade de carbono nas frações de degradação rápida, moderada e lenta (kg de C/kg de lixo)

t: tempo desde a deposição do lixo (anos)

A constante 1,87 é sugerida indicando o volume de biogás gerado por um kg de lixo em m³.

Oonk & Boon (1995) estimaram os parâmetros ξ e k_n presentes nas Equações 2.13 a 2.16 para nove aterros da Alemanha adotando dados de quantidade, idade e composição do lixo disponibilizados pelos operadores dos aterros, além da produção de biogás nos projetos implantados nos locais. A eficiência de coleta dos sistemas de aproveitamento do biogás foram

adotadas baseadas na experiência dos especialistas, que consideraram fatores como o projeto do aterro e do sistema de drenagem, a profundidade da camada de lixo, inclinação dos taludes e o material de cobertura.

Segundo Oonk & Boon (1995) em geral um aterro projetado com drenos de biogás verticais ou horizontais, com espaçamento inferior a 70 m entre os drenos e camada de cobertura de solo argiloso ou manta sintética impermeável tem eficiência de coleta de aproximadamente 55%, sendo este valor adaptado para cada caso de acordo com os seguintes itens:

- Presença de camada sintética impermeável na cobertura proporciona uma eficiência de coleta de 60 a 95% dependendo da possibilidade de migração do biogás pelo solo;
- Presença de solo argiloso na cobertura proporciona eficiência de coleta de 60 a 75% dependendo da espessura da camada, da idade do aterro e da possibilidade de migração do biogás;
- Distâncias entre os drenos maiores que 100 m reduzem de 5 a 10 % a eficiência do sistema de coleta;
- Taludes com mais de 40° de inclinação reduzem de 5 a 10% a eficiência do sistema de coleta;
- Camada de lixo maior que 20 metros aumenta a eficiência de 5 a 10 %.
- Espessura da camada de lixo menor que 10 m reduz a eficiência em 5 %.

Oonk & Boon (1995) que aplicaram os modelos em aterros na Holanda e compararam os resultados teóricos com medições de emissão de biogás na superfície dos aterros, obtiveram a maioria dos resultados com erros relativos menores que 30% e atribuíram os desvios encontrados nas comparações às incertezas nas quantidades de lixo e nas eficiências de coletas adotadas. O modelo de ordem zero apresentou maior erro, em torno de 44%. Os métodos de primeira e segunda ordem tiveram erros de 22% e o modelo multi-fase erro de 18 %. Foi constatado que a diferença entre os modelos multi-fase, primeira e segunda ordem são relativamente pequenas e que o uso do modelo de primeira ordem, mais simplificado que os demais, pode fornecer resultados confiáveis em muitos casos.

A Tabela 2.8 apresenta os resultados obtidos por Oonk & Boon (1995) nas estimativas dos parâmetros das Equações 2.13 a 2.16 para aterros na Alemanha.

Tabela 2.8. Parâmetros calculados para os modelos de geração de biogás em aterros propostos por Oonk & Boon (1995)

Modelo	Parâmetros
Ordem zero	$\xi k_0 = 2,4 \text{ kg/ t ano}$
Primeira ordem	$\xi = 0,58$ $k_1 = 0,094 / \text{ano}$
Multi-fase	$\xi = 0,58$ $k_{1,1} = 0,185 / \text{ano}$ $k_{1,2} = 0,100 / \text{ano}$ $k_{1,3} = 0,030 / \text{ano}$
Segunda ordem	$\xi = 0,65$ $k_2 = 0,0012 \text{ t /kg ano}$

Segundo Oonk & Boon (1995) os parâmetros calculados que estão apresentados na Tabela 2.8 são específicos para o caso de aterros alemães ou que possuam composição do lixo e clima regional semelhantes aos casos estudados.

Capítulo 3

Estudo de Caso

3.1. Histórico da limpeza urbana em Campinas-SP

Segundo a Prefeitura Municipal de Campinas (PMC, 1996), na década de 1960, quando Campinas ainda era uma cidade de porte médio, a limpeza urbana consistia basicamente na coleta dos resíduos e na varrição de ruas, sendo estes destinados para recuperação de áreas públicas que apresentavam processos avançados de erosão. O aumento acelerado da população e da industrialização que ocorreu na região na década seguinte, ocasionou um crescimento rápido do volume e da complexidade dos resíduos gerados pela cidade.

O primeiro local que centralizou o recebimento do lixo de Campinas foi o denominado “Lixão da Pirelli”, iniciado em 1972, com o objetivo de recuperação da topografia do local. A deposição desordenada de lixo no local levou à poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas da área, que foi desativada em 1984. A massa de lixo depositada foi coberta superficialmente com solo em espessura que variou de 10 a 60 cm. Durante nove anos não foram tomadas medidas para recuperação da área que ainda contou com a ocupação parcial da mesma por famílias, que passaram a morar na própria área do lixão (PMC, 1996). Em 1993 iniciou-se um projeto de caracterização do risco ambiental e recuperação da área afetada.

A partir do ano de 1984, os resíduos passaram a ser depositados no aterro sanitário Santa Bárbara que recebeu aproximadamente 1.260.000 toneladas, em uma área de 420.000 m². O aterro contou com um sistema de aproveitamento do biogás gerado que visava o abastecimento da frota de caminhões da coleta do lixo municipal, mas devido a fatores políticos e administrativos, o projeto foi encerrado. O adensamento populacional nas áreas próximas ao

aterro, pela inexistência de medidas restritivas à ocupação e ao uso do solo, ocasionou forte pressão popular para o fechamento do aterro, que ocorreu em setembro de 1992 (PMC, 1996).

Com o encerramento precoce do antigo aterro Santa Barbara, foi implantado em caráter emergencial o aterro sanitário Delta A em setembro de 1992, enquanto se elaborava o Estudo de Impacto Ambiental.

3.2. Aterro sanitário Delta A

3.2.1. Localização do aterro

O Aterro Delta A, de responsabilidade da Prefeitura Municipal de Campinas, faz parte do denominado Complexo Delta e está localizado numa área da região oeste de cidade de Campinas, próxima à rodovia dos Bandeirantes. A escolha da área acompanhou a elaboração do plano diretor da cidade, procurando-se considerar características de uso e ocupação do solo, infraestrutura e aspectos ambientais. Foi implantada primeiramente uma área denominada Delta A, que deveria ser seguida pelo aterro Delta B, com acesso a partir do primeiro aterro.

O Complexo Delta pertence à denominada Área de Recuperação Urbana – AREC, localizada na área de planejamento AP-27, região do Campo Grande/ Parque Valença, classificada no Plano Diretor do Município de Campinas. Essa região é considerada intensamente degradada, com carências de infra-estrutura, áreas verdes, lazer, atividades comerciais e serviços. Não há também continuidade da área urbanizada, com muitos lotes vagos. Há problemas no sistema viário com transporte coletivo deficiente e congestionamentos e lentidão nas vias principais (PMC, 1996).

A bacia do rio Capivarí, na qual se localiza o Aterro, apresenta degradação ambiental, principalmente pelo grande volume de esgotos que recebe, além de atividades predatórias de retirada de argila e de areia, em áreas de mata ciliar (PMC, 1996).

O córrego Piçarrão, que recebe o chorume do aterro Delta A, encontra-se em estado de degradação avançado pois serve também como receptor de esgoto da cidade que é despejado sem tratamento. No entanto, está em construção uma estação de tratamento de esgotos nesta bacia.

Embora a região apresente ainda baixa densidade populacional, esta se caracteriza pelo rápido adensamento da população, principalmente na região do Campo Grande. Tendo em vista os problemas advindos da implantação do Complexo Delta na região, envoltórias de proteção foram delimitadas, buscando isolar a área urbana em um raio de 500 m. . A Figura 3.1 apresenta a indicação das áreas restritas.

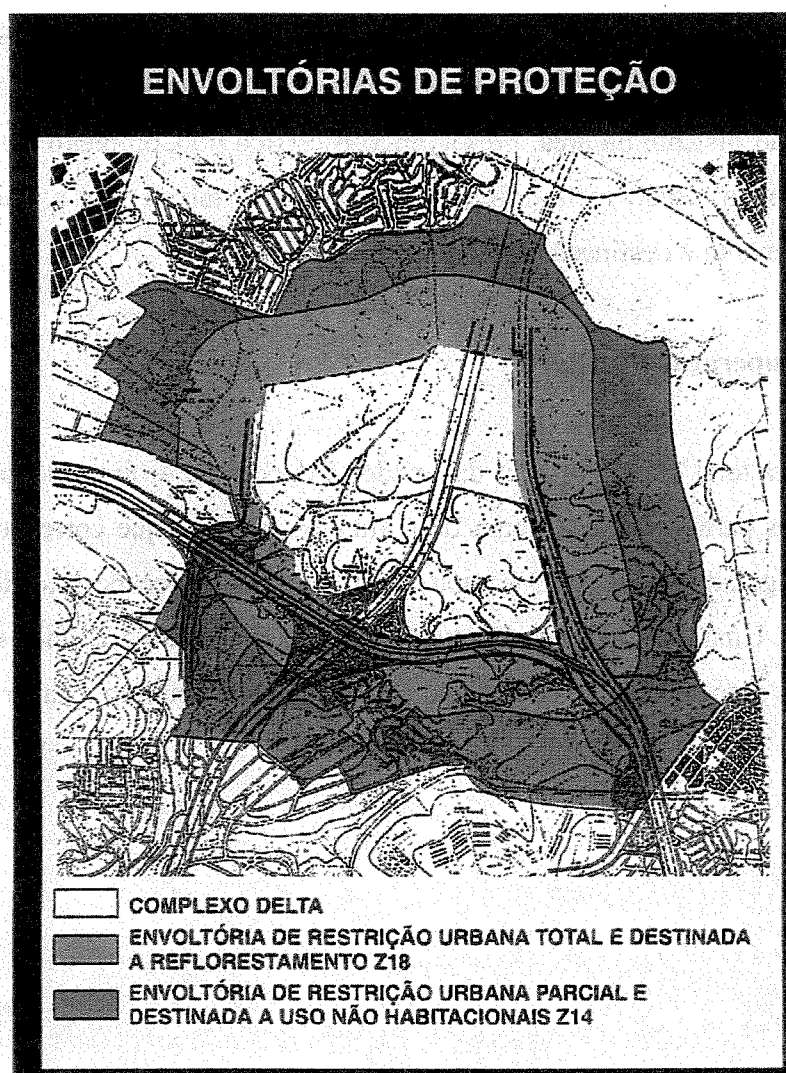


Figura 3.1. Envoltórias de proteção na área do Complexo Delta

Fonte: PMC (1996)

Está prevista uma primeira envoltória com permissão para atividades de plantio de árvores e recuperação de mata nativa. Uma outra área em seguida seria destinada a atividades industriais não incômodas, atividades de estocagem, com empreendimentos de grande porte, mas com baixa intensidade de uso do solo. Não serão permitidas indústrias alimentícias, de bebidas e laboratórios de transformação de produtos químicos, veterinários e farmacêuticos (PMC, 1996).

O isolamento da área urbana possibilita a prevenção de acidentes, principalmente pela migração de gases e de chorume pelo solo do aterro, além de reduzir a quantidade de vetores biológicos transmissores de doenças e odores desagradáveis prejudiciais à saúde. Também mantém a população distante da área, preservando o espaço do Complexo Delta, que devido ao grande crescimento da região metropolitana de Campinas, talvez seja a única área adequada existente para tratamento e destinação final de resíduos urbanos.

3.2.2. Descrição e operação do aterro

Com uma área total de 257.000 m² destinados à deposição do lixo, o empreendimento está subdividido em três partes, contando com dois grandes maciços que correspondem as áreas de deposição do lixo gerado desde 1993 e uma faixa central que recebe lixo desde dezembro de 2001 (PMC, 2001). Uma foto do Aterro Delta é mostrada na Figura 3.2, onde se pode observar a disposição dos dois grandes maciços e a região central que recebeu lixo a partir de 2002.



Figura 3.2. Foto aérea do Aterro Delta no ano 2000

No projeto do aterro foi prevista a disposição do lixo por células de 3 a 5 m de altura, da cota 590 m até a cota 620 m, com uma altura máxima de projeto de 30 m. Segundo PMC (2003b), existe a possibilidade de um prolongamento da vida do aterro com o aumento da altura considerada máxima atualmente, caso não se consiga implantar a nova área de disposição do lixo da cidade antes de ser atingida a capacidade máxima do aterro atual.

O Aterro conta com os seguintes sistemas de controle ambiental :

- sistema de drenagem superficial;
- sistema de drenagem e remoção de percolados;
- sistema de drenagem de gases;
- sistema de impermeabilização inferior;
- sistema de tratamento de líquidos percolados.

Para impermeabilização do solo na construção do aterro foi utilizado solo argiloso compactado com espessura de 1 m, proctor normal 95% e coeficiente de permeabilidade $k=10^{-7}$ cm/s (SÃO PAULO, 1996).

Ao longo de sua vida útil foram destinados ao aterro resíduos de classe II e III, que compreendiam o lixo residencial do município de Campinas, o lixo comum proveniente de estabelecimentos comerciais e algumas indústrias, os resíduos dos serviços de poda de árvores e capinação, os materiais diversos como entulho de construção que eram encaminhados pelas Administrações Regionais da Prefeitura de Campinas, além do lixo hospitalar inertizado após ser tratado em aparelho de microondas localizados no próprio aterro.

A caracterização do lixo doméstico da cidade de Campinas realizada pelo Departamento de Limpeza Urbana da Prefeitura Municipal no período de 20 de março a 9 de junho de 1995, está apresentada na Tabela 3.1.

O aterro iniciou o recebimento de resíduos a partir de setembro de 1992, contando na época com o serviço de duas empresas privadas contratadas, além de caminhões da prefeitura para a realização da coleta do lixo. Ao longo da vida útil do aterro outras empresas foram contratadas para o serviço de coleta do lixo, sendo a Prefeitura Municipal de Campinas a responsável pelos serviços de operação do aterro até o ano 2000.

Desde 2001 um consórcio, contratado pela prefeitura, executa os serviços operacionais do aterro e realiza os serviços de coleta do lixo hospitalar e residencial, inclusive dos materiais recicláveis que são coletados nas residências em dias separados e destinados às cooperativas de catadores de lixo que foram formadas na cidade de Campinas. Os refugos do processo de separação realizado nas cooperativas também são destinados ao aterro Delta. O controle e gerenciamento dos serviços é feito pelo DLU (DEPARTAMENTO DE LIMPEZA URBANA).

Segundo PMC (2003a), o aterro Delta A recebeu até o mês de setembro de 2002, as quantidades de resíduos sólidos domésticos apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1. Caracterização do lixo doméstico de Campinas

Componentes	% (Peso úmido)
Papel	21,50
Papelão	8,26
Plástico	13,21
Metal	4,86
Vidro	3,36
Matéria orgânica	39,55
Madeira, tecidos e similares	6,71
Terra, entulho e similares	2,55

Fonte: PMC (1995)

Tabela 3.2. Quantidade de lixo depositado no aterro Delta A

Ano de operação do aterro	Período	Quantidade (t)
1º	09/1992 à 08/1993	177.205,3
2º	09/1993 à 08/1994	184.068,4
3º	09/1994 à 08/1995	208.602,2
4º	09/1995 à 08/1996	235.104,2
5º	09/1996 à 08/1997	252.429,6
6º	09/1997 à 08/1998	261.031,6
7º	09/1998 à 08/1999	264.776,0
8º	09/1999 à 08/2000	267.010,1
9º	09/2000 à 08/2001	268.367,7
10º	09/2001 à 08/2002	279.310,2
11º Parcial	09/2002 à 04/2003	188.272,5
Total	09/1992 à 04/2003	2.586.177,6

Fonte: PMC (2003a)

Durante a vida útil do aterro constatou-se um aumento da quantidade de lixo destinada ao local. Essa tendência crescente acompanha o crescimento populacional da cidade e o aumento na geração de lixo per capita que acontece em todos os grandes centros urbanos do mundo, com aumento do consumo de bens industrializados e descartáveis.

A operação do aterro é realizada 6 dias por semana, 24 horas por dia e segue uma seqüência de etapas na deposição do lixo. Primeiramente, após a entrada do caminhão de coleta no aterro, é feita a pesagem do mesmo em uma balança onde é contabilizada a quantidade de carga contida e registrado o tipo de resíduo. Somente a partir do mês de março de 2002 começou-se a discriminar os resíduos de podas e árvores e capinação que chegam no aterro. Anteriormente estes eram considerados como resíduos diversos, e eram contabilizados juntamente com o entulho que era destinado ao aterro. Esses resíduos passaram a ser utilizados separadamente em um processo de compostagem a partir de 2000, onde são transformados em material para a cobertura do aterro (“terra vegetal”). Os galhos menores depois de triturados em uma máquina, que opera desde setembro de 2002, são misturados aos resíduos de capinação. Devido às limitações do Picador os galhos maiores acabam sendo enterrados por inteiro no aterro.

Após a pesagem, o caminhão destina-se à área denominada frente de descarga, onde despeja o lixo, que é posteriormente compactado por tratores com esteiras que se deslocam sobre o lixo. Quando a célula atinge o tamanho desejado, é aplicada terra como material de cobertura. As células são construídas umas sobre as outras até que o maciço atinja a altura de projeto. A camada final é composta de 20 cm de terra, 60 cm de argila compactada e 20cm de “terra vegetal” como mostra a Figura 3.3. Atualmente, somente alguns taludes contam com essa camada final.

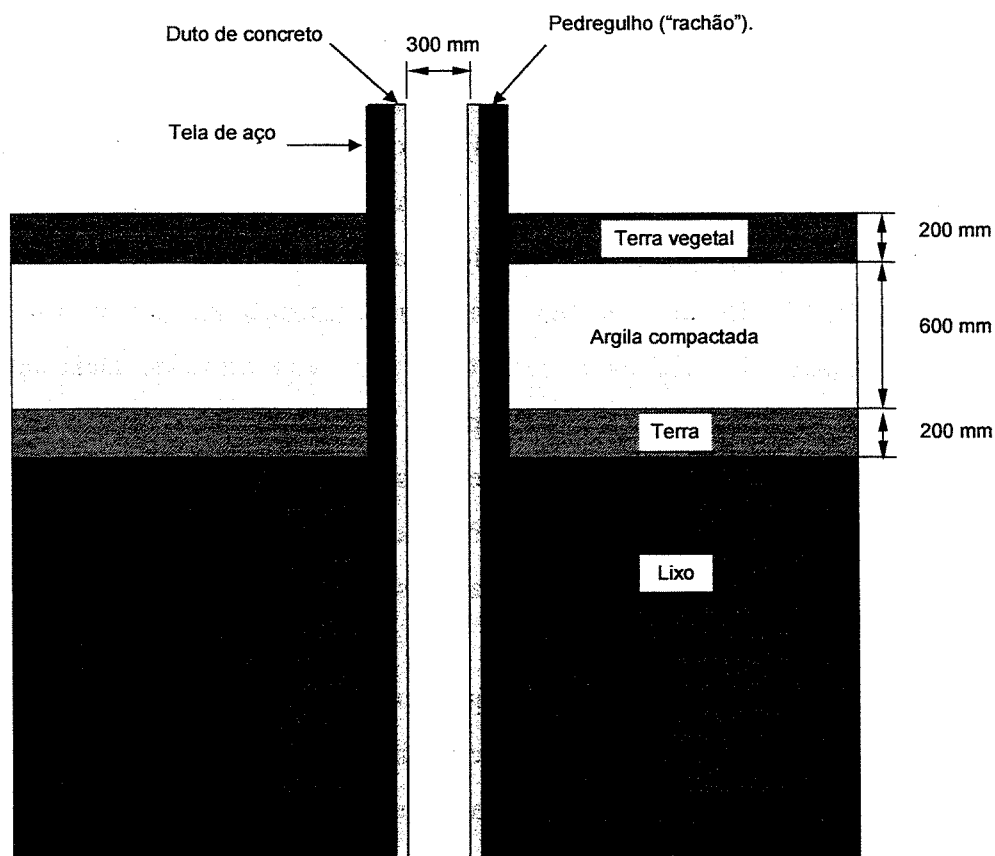


Figura 3.3. Camadas de cobertura do aterro e dreno de biogás

O chorume do aterro era destinado a duas lagoas de armazenamento que se localizavam na parte baixa do terreno. Durante 8 anos foi realizada a recirculação parcial do chorume no próprio aterro, o que ocasionou instabilidade em sua estrutura. Todo o chorume passou, a partir de então, a ser despejado no pequeno córrego, denominado “Ribeirão das Cobras” que contorna o aterro e segue até o córrego Piçarrão.

No mês de outubro de 2002, foi concluída a Estação de Tratamento de Chorume no Aterro Delta A, que passa a ser responsável pelo tratamento de todo o chorume originário da massa de lixo. A instalação possui um tratamento primário anaeróbio em uma piscina de decantação, um

tratamento secundário aeróbio em duas piscinas com aeradores de superfície e sistema de lodo ativado, além de leitos de secagem do lodo, que é destinado em seguida ao próprio aterro. O chorume tratado acaba sendo bombeado através de um emissário até o Córrego Piçarrão.

O aterro possui 106 dutos verticais de captação dos gases do tipo “Ranzine”, constituídos por um duto principal de concreto perfurado de 300 mm de diâmetro interno e furos de cerca de 20 mm de diâmetro. O duto principal é envolto por pedregulhos (“Rachão”) com dimensões aproximadas de 15 x 15 x 15 cm e uma tela de aço para contenção das pedras como mostrado na Figura 3.4. Uma parte dos drenos é constituída em suas camadas mais profundas pelo denominado dreno “cego” que era formado apenas por pedregulhos. Muitos drenos possuem ligações horizontais com os drenos de chorume, mas devido à falta de registro, não é possível afirmar com exatidão a localização dessas ligações, bem como a localização de alguns drenos de gás verticais que acabaram sendo soterrados pela massa de lixo ao longo do tempo.

Os queimadores, que tem a função de queimar os gases do aterro, são o prolongamento dos dutos de gás “Ranzine”. A queima do gás é realizada de forma muito precária, com muitos queimadores apagados e outros destruídos pela alta temperatura da chama, que acaba danificando a estrutura metálica e desmontando a parte do dreno que sai pela superfície do aterro, como mostra a Figura 3.5. O acendimento é feito manualmente posicionando-se um objeto em chama na saída do queimador quando se verifica que este está apagado.

A distribuição dos drenos no aterro com a numeração presente no local durante o período de realização do estudo está apresentada na Figura 3.6.

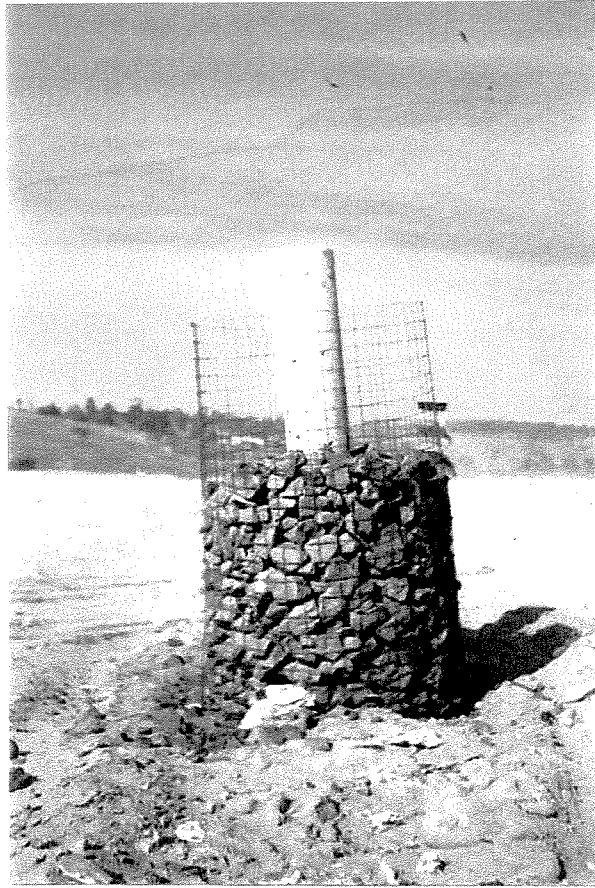


Figura 3.4. Dreno de biogás existente no aterro Delta A



Figura 3.5. Dreno de biogás destruído

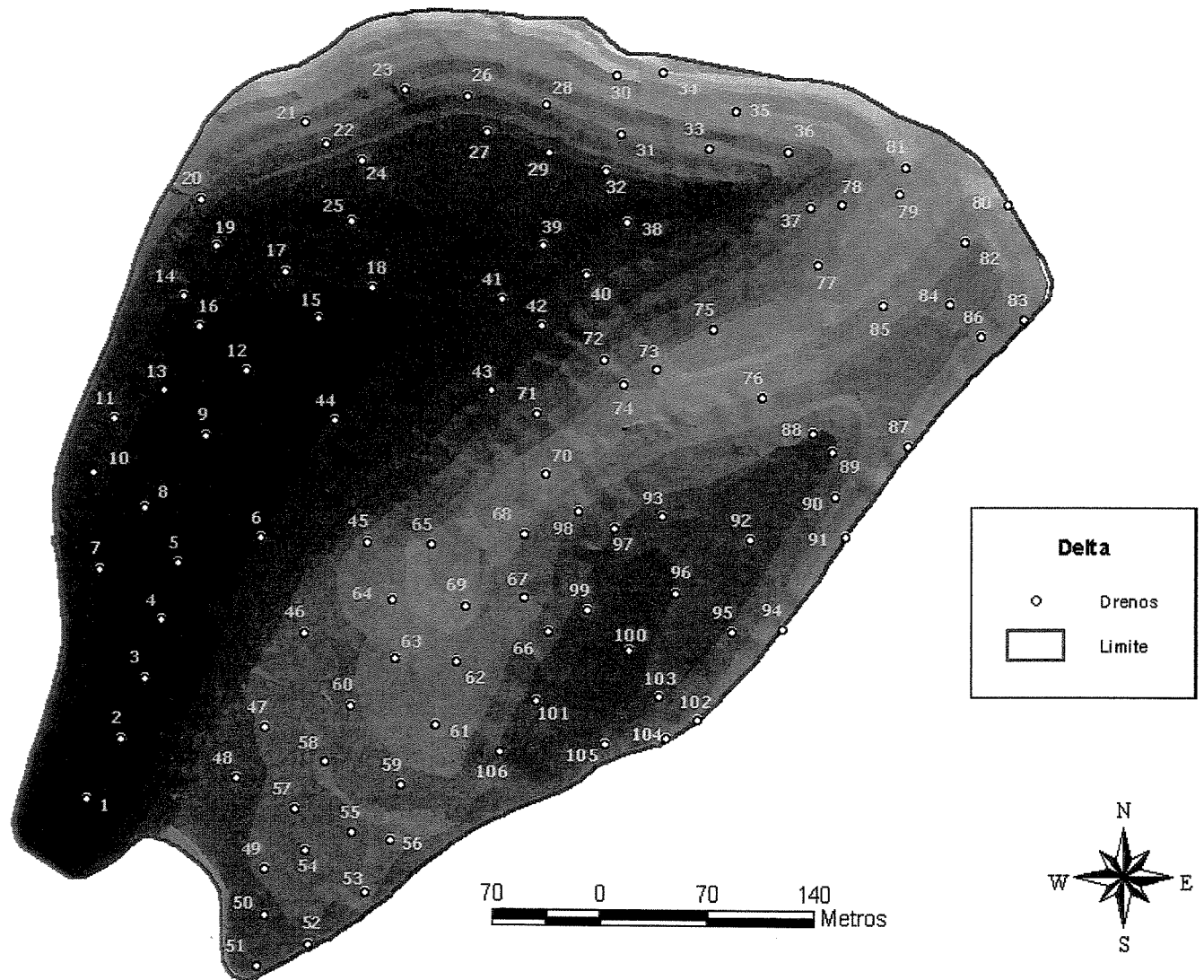


Figura 3.6. Planta do aterro com o posicionamento e a numeração dos drenos presentes no local

Capítulo 4

Metodologia

4.1. Estudo experimental no aterro sanitário Delta

O estudo experimental procurou avaliar a geração de biogás no aterro determinando-se para isso a vazão e a composição do biogás proveniente de cada dreno de biogás do aterro.

4.1.1. Determinação da vazão do biogás

Assumindo que o biogás apresenta comportamento termodinâmico de um gás ideal, calculou-se a vazão volumétrica, corrigida para as Condições Normais de Temperatura e Pressão (0°C e 1 bar) recomendadas pela *INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY* (MILLS et al. 1993), em cada dreno seguindo a Equação 4.1:

$$\dot{Q} = (V \times A) \times \frac{273,15}{273,15 + T} \times P \quad (4.1)$$

Sendo:

Q: vazão de biogás (Nm³/s)

V: velocidade de saída do biogás (m/s)

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

T: temperatura de saída do biogás (°C)

P: pressão atmosférica (bar)

Foram realizadas medidas de velocidade e temperatura do biogás provenientes de cada dreno, buscando assim determinar a vazão a partir de uma seção conhecida. A pressão barométrica nos momentos das medidas foi obtida através de registros da estação meteorológica automática do CEPAGRI (CENTRO DE ENSINO E PESQUISA EM AGRICULTURA DA UNICAMP) que registra dados de pressão a cada 10 minutos e se localiza numa cota de 640 metros acima do nível do mar, muito próxima daquela encontrada no aterro, que varia de 590 a 624 m. Como as medidas foram realizadas entre as 9:00 e 12:00h da manhã durante vários dias entre o mês de janeiro e maio de 2003, adotou-se as pressões fornecidas pela estação meteorológica às 10:30 h nos dias das medidas.

Para realização das medidas de vazão no Aterro Delta foi projetado e construído um equipamento para canalização do biogás a partir dos drenos do tipo “Ranzine” existentes no local de estudo, visando uma homogeneização do fluxo e aumento da velocidade na saída do biogás.

O equipamento foi constituído por uma peça cônica de chapa galvanizada que possibilitou a redução da área de passagem do biogás, com o intuito de aumentar sua velocidade de saída, que após uma avaliação inicial, foi considerada muito baixa, o que dificultaria as medições. Um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro e dois metros de comprimento foi encaixado à peça cônica na posição horizontal a partir de um “cotovelo” também de PVC. O posicionamento horizontal do tubo buscou a diminuição do efeito do vento no momento das medições. A Figura 4.1 apresenta um esquema do equipamento usado para a medição da vazão dos gases.

As medidas de velocidades foram realizadas com um anemômetro de fio quente que foi instalado perpendicularmente ao fluxo de biogás, na metade do tubo de PVC, a uma distância de 1 m da saída da peça cônica.

Foram também realizadas medidas de temperatura do gás utilizando-se um termopar do tipo K, que era introduzido no tubo de PVC, no mesmo ponto de medição da velocidade.

A montagem também contava com uma lona plástica que envolvia todo o dreno, com o objetivo de diminuir a fuga de biogás pelos pedregulhos (“Rachão”), direcionando o fluxo em

direção a entrada da peça cônica. Outra função da lona plástica era impedir a entrada do vento, que influenciava consideravelmente as medições de velocidade, produzindo resultados incorretos.

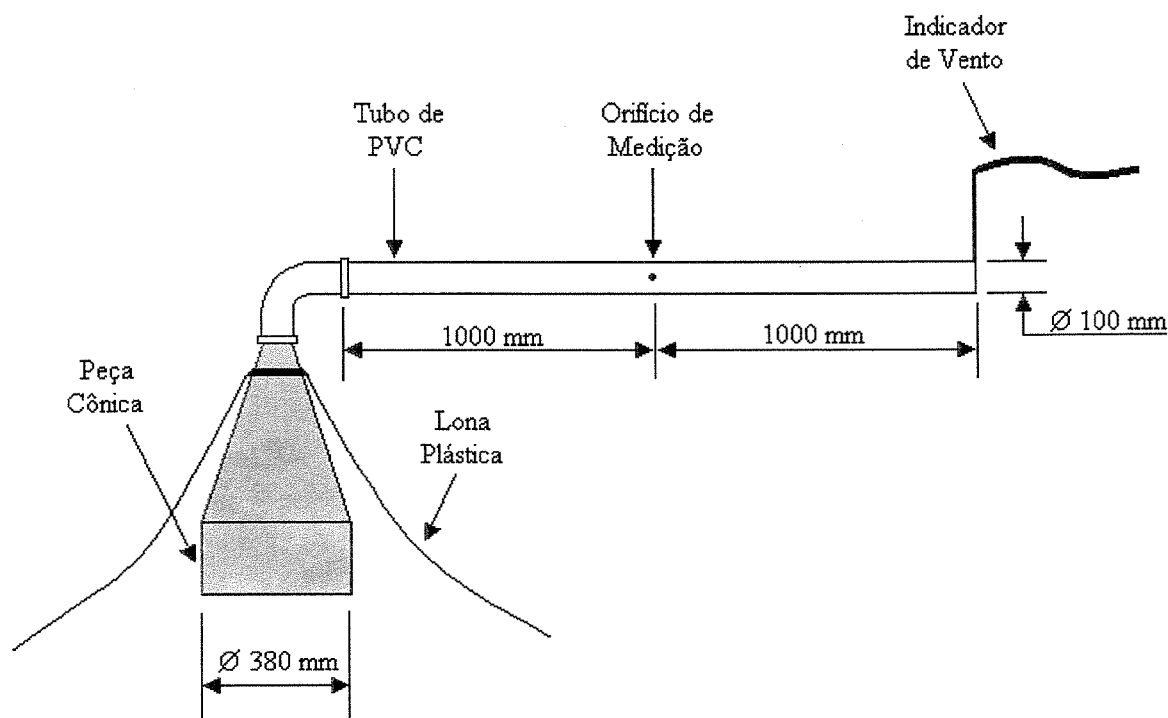


Figura 4.1. Esquema do equipamento utilizado para as medições de velocidade e temperatura do biogás

Antes da montagem do equipamento em cada dreno de gás era feita uma avaliação da direção do vento, para que a saída do duto de PVC durante as medições não ficasse posicionada na direção oposta ao vento, o que poderia ocasionar medidas incorretas, com a penetração de ar no sentido contrário ao fluxo do biogás.

Para a leitura da velocidade do biogás, após a montagem do equipamento introduzia-se o anemômetro no orifício do tubo de PVC destinado às medições e realizava-se a leitura no

aparelho, buscando sempre os valores que correspondiam aos momentos de vento quase nulo, para que as medidas não fossem influenciadas por efeitos de arraste do gás na saída do tubo.

Para a determinação do momento ideal para a realização das medidas foi instalado na ponta do tubo de PVC um indicador de presença de vento, composto por uma fita plástica fina de comprimento aproximado 200 mm, presa por uma haste. Após as medidas de velocidade, introduzia-se o termopar no mesmo orifício para a realização das medidas de temperatura. As Figuras 4.2 ,4.3, e 4.4 apresentam fotos das medições realizadas em campo.



Figura 4.2. Encaixe da peça cônica e montagem da lona plástica no dreno nº 94



Figura 4.3. Medição da velocidade de saída do biogás no dreno nº 53

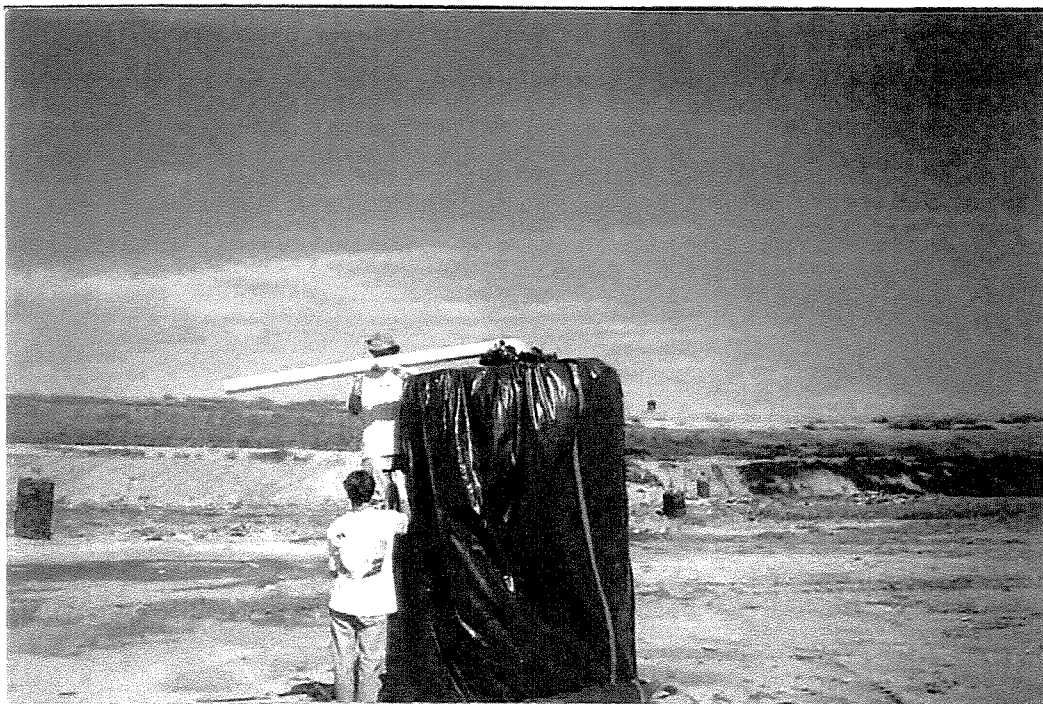


Figura 4.4. Medição da velocidade de saída do biogás no dreno nº54

4.1.2. Coleta e análise do biogás

A coleta dos gases foi feita utilizando-se uma mangueira de silicone ligada a uma pêra insufladora que enchia “bags” para amostra de gás.

Antes da coleta do gás, o dreno era todo envolvido com lona plástica para evitar contaminação do ar externo na amostra recolhida. Foi estabelecido um tempo de 5 minutos para enchimento da lona com o biogás proveniente do dreno, sendo em seguida realizada a coleta com a introdução da mangueira de silicone no duto principal do dreno, através de um orifício na lona plástica. As Figuras 4.5. e 4.6. mostram fotos do procedimento de coleta de biogás realizado no experimento.

As amostras recolhidas eram encaminhadas ao laboratório para serem analisadas em um cromatógrafo a gás, onde foram determinadas as concentrações de H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 e H_2S .



Figura 4.5. Coleta de biogás no dreno nº 54



Figura 4.6. Detalhe do enchimento do “bag” com biogás coletado

4.1.3. Determinação do vazamento pela superfície do aterro

A determinação do vazamento pela superfície do aterro foi realizada usando-se uma peça para coleta do biogás, direcionando o fluxo a uma saída na parte superior que era ligada, por uma mangueira de silicone a um medidor de vazão.

Para a coleta do biogás uma peça retangular de alumínio, de dimensões 610 x 410 x 80 mm, era colocada na superfície do aterro, tendo 40 mm de suas laterais enterrados no material de cobertura do aterro. Buscava-se assim captar o biogás proveniente daquela parte do aterro e direcioná-lo ao orifício de saída na parte superior da peça que era ligada a um bolhômetro de 10 ml. A Figura 4.7 apresenta um esquema da montagem utilizada nestas medições.

Foram amostrados cinco pontos do aterro sendo três no maciço maior, um no maciço menor e um na região central.

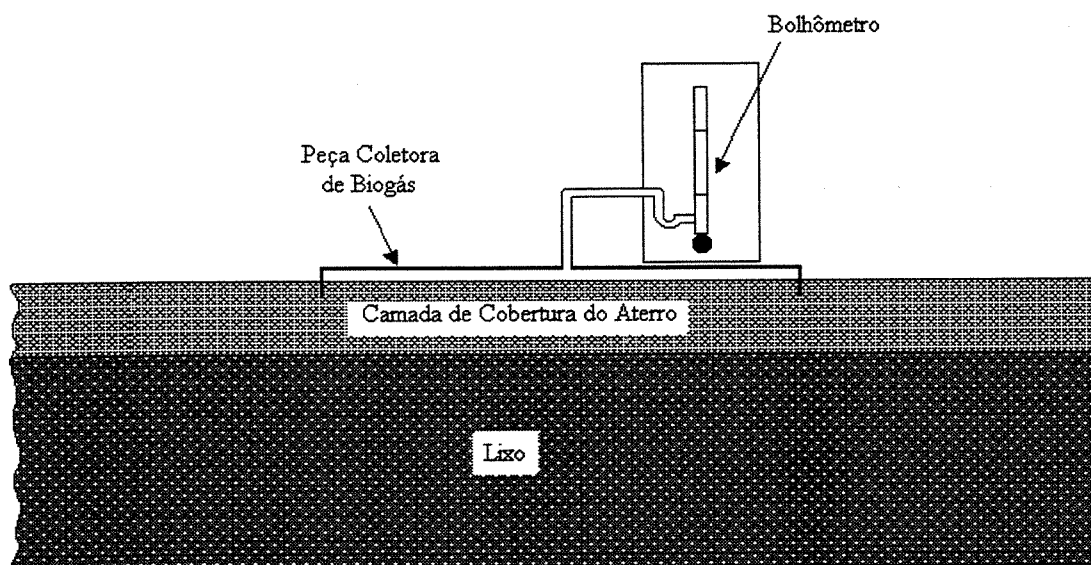


Figura 4.7. Esquema do equipamento utilizado para determinação do vazamento de biogás pela superfície do aterro

4.1.4. Levantamento do histórico de deposição de lixo no aterro

Como já citado anteriormente, o aterro recebeu apenas resíduos de Classe II e III ao longo de sua vida útil, portanto, a hipótese de inibição da atividade microbiológica que algumas substâncias presentes em resíduos Classe I poderiam causar foi desconsiderada para o estudo.

Tendo em vista a falta de informação sobre o tipo de resíduo disposto em cada área e considerando que os resíduos domésticos constituem a maior parte do lixo depositado no local, assumiu-se uma disposição homogênea de resíduos quanto a sua composição.

A análise das diversas áreas de deposição de lixo foi baseada em material fotográfico datado, levantamentos planaltimétricos e informações dos operadores do aterro, buscando-se assim identificar a sequência de preenchimento das camadas de lixo.

4.2. Estimativa da produção futura de biogás

Após a avaliação das metodologias teóricas para estimativas de produção de gás metano encontradas na literatura, concluiu-se que a Equação 2.11 é a mais completa e realista, visto que esta considera a quantidade de carbono do lixo que é transformada em metano representado pelo termo " L_0 " e a cinética química com a velocidade de degradação da matéria orgânica representada pelo termo " k ". Além disso dispunha-se dos dados necessários para sua aplicação, como as quantidades anuais de lixo depositadas no local, a caracterização do lixo e a vazão de biogás no aterro medida no experimento descrito na Seção 4.1.

Foi calculada a geração de gás metano, e estimada a curva de produção do aterro ao longo do tempo. A constante de geração de metano (k) foi estimada a partir de processo iterativo, com o conhecimento das demais variáveis e o adoção de diversos valores de " k " até que o resultado calculado pelo modelo coincidissem com o resultado obtido nas medições de campo.

4.2.1. Determinação do potencial de geração de metano (L_0) para lixo de Campinas

O potencial de geração de metano a partir do lixo foi obtido com a aplicação da Equação 2.3.

A partir dos valores da Tabela 2.6 e da composição do lixo de Campinas apresentada na Tabela 3.1 realizou-se o cálculo para a quantidade de carbono orgânico degradável (COD) para o lixo de Campinas utilizando-se a Equação 2.4. O valor da fração de carbono orgânico dissociado (COD_f) foi obtido através da Equação 2.5 com os dados de temperatura interna do aterro recomendados na literatura.

4.2.2. Cálculo da vida útil do aterro

Foi realizado o cálculo da vida útil do aterro para a aplicação da metodologia escolhida, visando uma estimativa das quantidades anuais de lixo que ainda poderiam ser depositadas até o esgotamento da capacidade do aterro. Para isso foram utilizados os valores de densidade das células de lixo, volume final de projeto do aterro e volume da camada de lixo em abril de 2003, determinados em estudo no local e apresentados em PMC (2003b). Além disso foi gerada a curva de crescimento da quantidade de lixo destinado anualmente ao aterro Delta baseada nos valores da Tabela 3.2.

Através da diferença entre o volume final e aquele ocupado pela massa de lixo, determinou-se o volume ainda disponível no aterro. A partir da divisão das quantidades anuais de lixo que ainda devem ser depositadas pela densidade das células de lixo foi estimado o volume ocupado cada ano. Determinou-se então o tempo necessário para ocupação do volume disponível no local. Os valores adotados para o cálculo estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Parâmetros adotados para o cálculo da vida útil do aterro

Parâmetro	Valor
Densidade da célula de lixo	0,609 (t de lixo/m ³)
Volume ocupado até abril de 2003	4.516.552 (m ³)
Volume total de projeto do aterro	6.060.340 (m ³)

4.3. Levantamento do potencial energético do aterro

O levantamento do potencial energético do aterro foi realizado com base na curva de produção de gás metano descrita na Seção 4.2. Foi estimada a curva do potencial de geração de energia elétrica para o aterro Delta adotando-se que todo o biogás fosse coletado, o poder calorífico inferior do gás metano de 35,9 MJ/Nm³ e a conversão do combustível em motores de combustão interna acoplados a geradores elétricos com eficiência total de conversão de 33%.

Foi proposto em seguida um projeto de aproveitamento considerando várias etapas de produção com grupos geradores modulares que seriam arranjados de acordo com a produção de biogás no aterro.

Capítulo 5

Apresentação e análise dos resultados

5.1. Experimento de campo

A partir das medições de velocidade e temperatura para determinação da vazão e da coleta de amostras de biogás para obtenção do teor de metano, foi possível calcular a vazão de biogás e gás metano para o sistema de coleta presente no aterro Delta. A Tabela 5.1 apresenta estes resultados.

Tabela 5.1. Vazão total de biogás e gás metano do aterro Delta

Vazão total de biogás (Nm³/h)	1.649,70
Vazão total gás de metano (Nm³/h)	930,72
Vazão média de biogás por dreno (Nm³/h)	15,56
Vazão média de gás metano por dreno (Nm³/h)	8,78

Nas medições realizadas foram constatadas grandes variações na vazão de biogás de drenos próximos, o que indica a existência de rotas preferenciais de escoamento possivelmente devido ao rompimento ou entupimento de dutos e às ligações horizontais com os drenos de chorume, que não foram localizadas devido à falta de documentação.

O dreno de número 26 apresentou vazão de biogás de 66,83 Nm^3/h , 430% acima da média do aterro que foi de 15,56 Nm^3/h . Há ainda o fato de drenos como os de número 21 e 28 que se localizam ao redor do anterior mas que apresentaram vazões abaixo da média com 9,01 e 9,89 Nm^3/h respectivamente. Constatou-se o mesmo fato em outro ponto do aterro como nos drenos 25 e 18 que apresentaram vazões de biogás de 57,22 e 61,17 Nm^3/h enquanto drenos próximos como o 39 e o 41 tiveram vazões de apenas 7,49 Nm^3/h cada.

Esses resultados mostram que a vazão de biogás depende não só dos fatores que promovem a biodegradação adequada da matéria orgânica, como também das condições do sistema de drenagem que passa a ser uma variável de influência muito importante. A ineficiência do sistema de coleta apresentada em alguns drenos pode promover tanto a migração de biogás para regiões fora do aterro como um aumento da pressão interna do aterro, levando à instabilidade do maciço de lixo, rompimento da camada de cobertura do aterro e conseqüentemente perda de biogás que poderia ser aproveitado com um sistema mais eficiente.

A razão da quantidade de biogás medido no aterro pela quantidade de lixo presente no local na época das medições está apresentada na Tabela 5.2, juntamente com cálculo feito para outros aterros com dados encontrados na literatura.

As produções de biogás dos aterros Bandeirantes e Metropolitano de Salvador foram obtidas por testes de sucção realizados nos locais e apresentados em USEPA (1997b) e VEGA Salvador (2002) respectivamente. Os dados de produção de biogás utilizados nos cálculos dos aterros da Alemanha e da Holanda apresentados na Tabela 5.2 foram obtidos em Oonk & Boon (1995) e se referem às vazões de biogás consumidas nos sistemas de recuperação em operação ou às vazões de biogás medidas em estudos de emissão pela superfície do aterro para aqueles casos sem o sistema de recuperação.

Tabela 5.2. Comparação dos resultados obtidos para vários aterros no Brasil e no exterior

Nome do aterro / País onde se localiza	Possui recuperação de biogás ?	Condição do aterro	Produção de biogás por tonelada de lixo no aterro ($10^{-4} \text{ m}^3/\text{h t de lixo}$)
<i>Delta / Brasil</i>	<i>Não</i>	<i>Em operação</i>	<i>6,345</i>
Bandeirantes / Brasil	Não	Em operação (até 1997)	7,160
Metropolitano de Salvador (Células 1 a 4) / Brasil	Não	Em operação (até 2002)	7,254
Veendam 2 / Alemanha	Sim	Encerrado em 1993	3,857
Schinnen / Alemanha	Sim	Encerrado em 1993	4,755
Schyndel / Alemanha	Sim	Encerrado em 1992	8,443
Bavel 3 / Alemanha	Sim	Encerrado em 1992	3,158
*Landfill 1 / Holanda	Sim	Em operação (até 1995)	2,070
*Landfill 2 / Holanda	Sim	Em operação (até 1995)	4,410
*Landfill 3 / Holanda	Não	Em operação (até 1995)	6,194
*Landfill 5 / Holanda	Não	Em operação (até 1995)	3,180
*Landfill 6 / Holanda	Sim	Em operação (até 1995)	1,540
*Landfill 7 / Holanda	Não	Em operação (até 1995)	15,690
*Landfill 8 / Holanda	Não	Em operação (até 1995)	3,612
*Landfill 11 / Holanda	Sim	Encerrado em 1993	1,500
*Landfill 12 / Holanda	Sim	Encerrado em 1991	1,080
*Landfill 13 / Holanda	Sim	Encerrado em 1990	3,205

* os nomes dos aterros seguem a denominação apresentada em Oonk & Boon (1995)

Analisando os resultados da Tabela 5.2 observa-se que o aterro Delta em Campinas apresenta produção de biogás por tonelada de lixo no local cerca de 12,8 e 14,3 % menor que nos aterros Bandeirantes e Metropolitano de Salvador respectivamente. Considerando que a metodologia de análise da quantidade de biogás no aterro Delta difere daquela adotada nos outros dois casos, em vista da dificuldade de quantificação dos gases emitidos por trincas, fissuras e outras imperfeições na camada de cobertura do aterro, estima-se que uma parte do biogás não tenha sido considerada no resultado final, sendo bem provável portanto que a diferença encontrada seja devido a este fato.

Nos aterros Bandeirantes e Metropolitano foram realizados teste de sucção dos drenos que possibilitam a avaliação do raio de coleta dos drenos e da máxima vazão de biogás possível até o limite que provoca a penetração de ar através da camada de superfície devido à pressão negativa imposta ao interior do aterro. Essa metodologia está descrita em detalhes no Apêndice D.

A comparação com os resultados dos aterros Alemães e Holandeses por outro lado mostra que para a maioria dos casos o resultado do aterro Delta foi superior, o que era esperado uma vez que a composição do lixo nesses países apresenta menores teores de matéria orgânica que aquele encontrado no Brasil, causando uma menor produção de biogás com a mesma quantidade de lixo. Há também o fato do clima daqueles países proporcionar uma taxa de degradação mais lenta nos aterros, prolongando o tempo de geração de biogás mas com vazões mais baixas que no caso brasileiro principalmente nos primeiros anos após o fechamento.

Para a análise da composição do biogás no aterro Delta foi assumida a hipótese de que devido ao sistema de coleta presente no local, constituído por drenos passivos, a pressão no interior na massa de lixo permanece positiva. O envolvimento dos drenos com lona plástica no momento da coleta do biogás buscou impedir a penetração de ar externo no interior do duto, permitindo que o biogás gerado no aterro escoasse pela tubulação do dreno sem fluxo de ar no sentido contrário.

Devido à baixa vazão que ocasiona uma deficiência do sistema de coleta de biogás do aterro, foi detectada a presença de ar nas amostras de gás coletadas no interior dos dutos, indicada pelos altos teores de N_2 e O_2 em algumas amostras. Concluiu-se que o tempo adotado para que o fluxo de biogás ocupasse todo o interior do duto no momento da coleta, não foi suficiente para expulsar a massa de ar presente no local. Segundo USACE (1995) os sistemas de coleta de biogás passivos dependem da pressão interna do aterro para a exaustão dos gases, tendo portanto uma maior eficiência nas regiões do aterro com alta produção de biogás

Segundo USDOE (1983) a constatação da existência de N_2 e O_2 nas amostras indica a presença de ar no material coletado, não sendo estes componentes esperados na composição do

biogás. Portanto para o cálculo da composição do biogás de cada dreno foi adotada uma correção dos valores encontrados, considerando apenas a presença de CH₄, CO₂, CO e H₂ nas amostras, excluindo-se conseqüentemente os teores de N₂ e O₂.

Após as correções devido à presença de ar nas amostras, as análises realizadas mostraram a composição média do biogás apresentada na Tabela 5.3. Foram desconsideradas as amostras que não indicaram presença de CH₄ ou CO₂, assumindo-se que a grande diluição de ar prejudicou a análise da fração de biogás.

Para o cálculo da vazão de metano nos drenos que tiveram suas amostras de biogás prejudicadas pela grande diluição devido à presença de ar no interior do duto foi adotada a média geral de teor de metano no biogás.

Tabela 5.3. Composição média do biogás coletado no aterro Delta

Componente	Teor (%)
CH ₄	55,13
CO ₂	44,16
H ₂	0,71

*** não foi detectada a presença de monóxido de carbono em nenhuma das amostras**

O teor de metano médio encontrado nas amostras do biogás do aterro Delta sem a presença de ar está próximo daqueles encontrados em aterros na cidade de São Paulo como o São João, com 60,9%, o Santo Amaro com 59,9%, o Bandeirantes 59,5% e o Vila Albertina com 57,2 a 62,4% (USEPA, 1997b).

Os valores do teor de metano variaram entre 50,78 e 67,43 % quando consideradas as amostras na fase metanogênica, ou seja, aquelas com teores CH₄ maiores que os de CO₂ e presença de gás hidrogênio abaixo de 1 %.

As amostras de número 22, 24, 53, 55, 64, 80 e 94 apresentaram teores de gás hidrogênio variando entre 2,64 a 12,44 % e concentração de gás metano menor que de dióxido de carbono. Essa é a composição típicas da chamada fase ácida e início da fase metanogênica da degradação da matéria orgânica que ocorre em biogás proveniente de resíduos dispostos até 2 anos no aterro (VEGA Salvador, 2002).

A operação do aterro de forma aleatória com deposição diária de lixo em diversas partes do aterro promove a sobreposição de camadas de lixo com idades muito diferentes, sendo o biogás resultante uma mistura de diversas fases de degradação. Isso pode promover um aproveitamento do biogás em uma área maior do aterro no futuro, mas dificulta que o aproveitamento do biogás antes do encerramento do aterro, pois praticamente todas as áreas continuam em operação por longos períodos.

As análises de H_2S realizadas em 18 drenos de biogás não detectaram a presença deste composto em nenhuma das amostras, para um limite de detecção mínimo de 10 ppm.

Esse resultado se assemelha aquele encontrado no aterro Metropolitano Centro de Salvador onde foram detectadas amostras com 6 e 14 ppm de H_2S (VEGA Salvador, 2002). No entanto difere dos teores detectados nos aterros Vila Albertina, Santo Amaro e Bandeirantes na cidade de São Paulo que apresentaram teores máximos de H_2S de 39, 29 e 30 ppm respectivamente (USEPA, 1997b).

5.2. Levantamento do histórico de deposição do lixo no aterro

A partir das fotografias e levantamentos planaltimétricos pesquisados foi possível identificar regiões distintas deposição de lixo no aterro. A Figura 5.1 mostra a distribuição destas áreas na planta do aterro e a Tabela 5.4 apresenta a divisão do aterro em áreas com os seus respectivos drenos de biogás, valores médios de vazão de biogás, teor e vazão de metano.

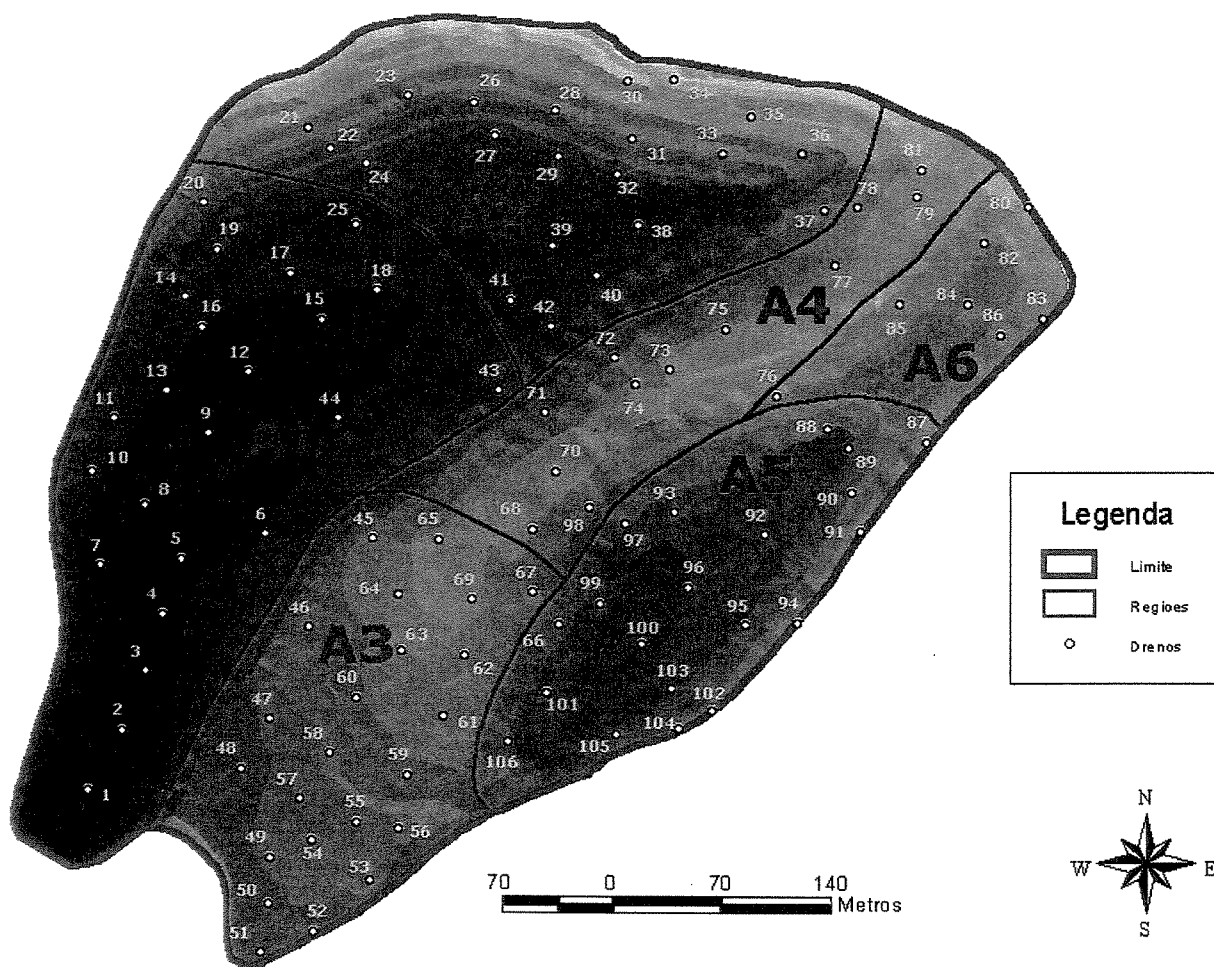


Figura 5.1. Divisão do aterro Delta em áreas de deposição do lixo

Tabela 5.4. Áreas de produção de biogás identificadas

Área	Vazão média de biogás (Nm ³ /h)	Teor médio de metano (%)	Vazão média de metano (Nm ³ /h)	Densidade de drenos N° drenos /m ²	Provável início de operação	Drenos correspondentes
A1	19,56	58,66	12,76	$3,25 \times 10^{-4}$	Setembro 1992	1-20, 25, 43, 44
A2	19,20	56,09	10,57	$3,25 \times 10^{-4}$	1996	21-24, 26-42
A3	11,41	49,58	5,96	$4,98 \times 10^{-4}$	Dezembro 2001	45-65, 67,69
A4	16,18	55,60	9,63	$3,26 \times 10^{-4}$	Base: Setembro 1992 Topo:Dezembro 2001	68,70-75, 77-79, 81, 98
A5	13,17	57,28	8,37	$5,55 \times 10^{-4}$	Não identificado	66,87-97, 99-106
A6	17,01	54,07	9,44	$3,08 \times 10^{-4}$	2000	76,80,82-85

A análise estatística realizada para comparação das médias obtidas para cada área utilizando-se uma distribuição de t-Student para nível de significância de 95% não indicou diferença significativa entre os valores encontrados.

Portanto considera-se que todas as áreas estejam produzindo biogás de forma equivalente, independentemente do início da operação identificado para cada local, sendo portanto possível o aproveitamento do biogás em toda a extensão do aterro. Isso se deve principalmente pela operação aleatória, sem que haja encerramento de uma área para deposição do lixo em outra, formando assim maciços de lixo com camadas em fases de degradação variadas.

A Figura 5.2 mostra uma foto do aterro Delta em setembro de 1994 e indica que a área A1 foi à primeira área de deposição de resíduos com a formação do primeiro maciço de lixo concentrado na parte central do aterro e com a parte do talude lateral externo ainda sem receber lixo.

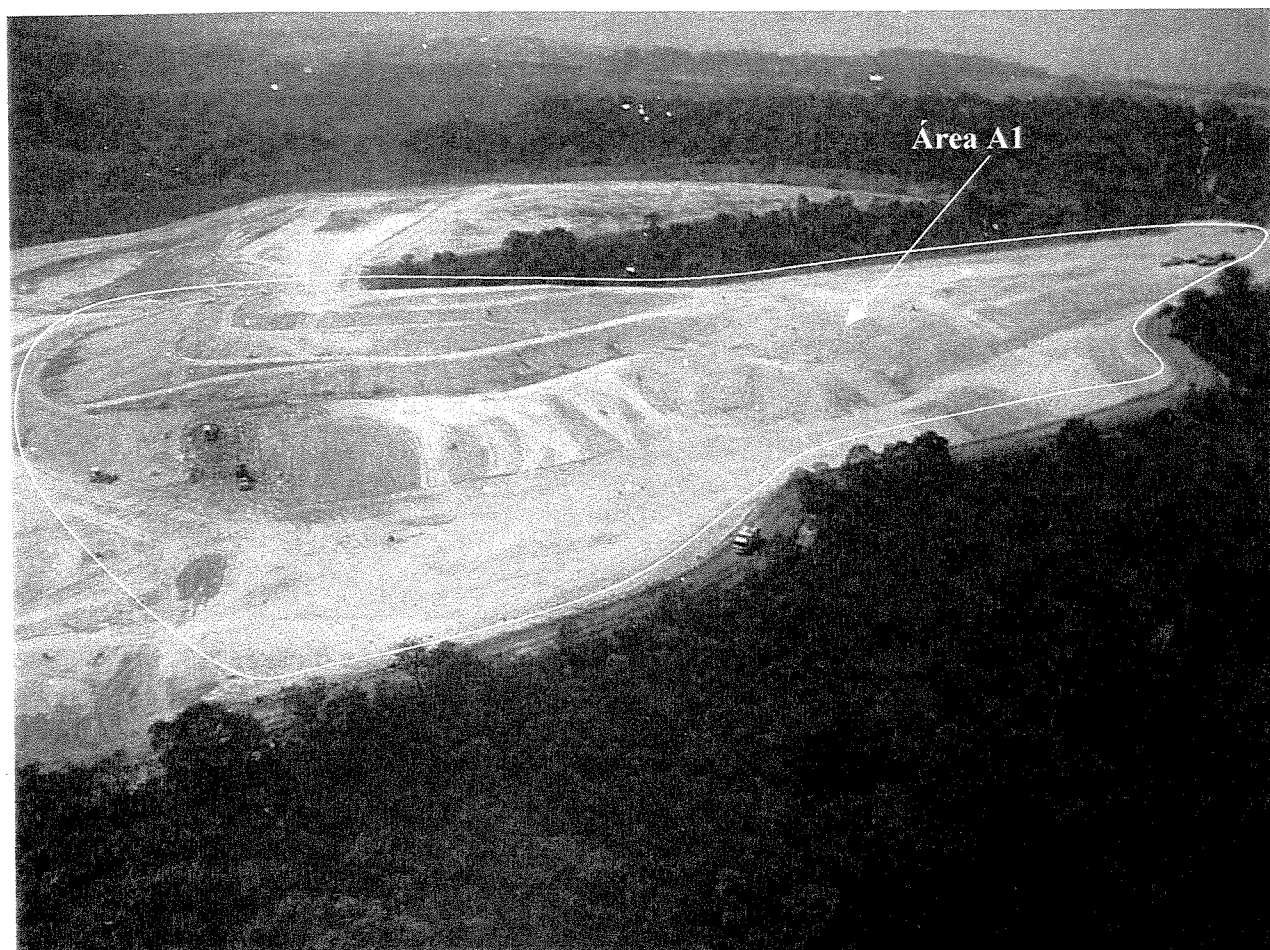


Figura 5.2. Foto do aterro Delta em setembro de 1994 com indicação da área A1

A área A2, apesar de pertencer ao mesmo maciço da área A1 teve seu início de operação a partir de 1996 como pode ser constatado em fotografia do local em 1996 apresentada na Figura 5.3. Além disso, segundo informações de funcionários do aterro, nesta área foi implantada uma manta de PEAD de 2mm de espessura na base do terreno, o que visava conter a percolação de chorume no solo. Além disso esse material também permite a diminuição da fuga de gases pelas camadas subterrâneas do aterro, o que não ocorre nas demais áreas.

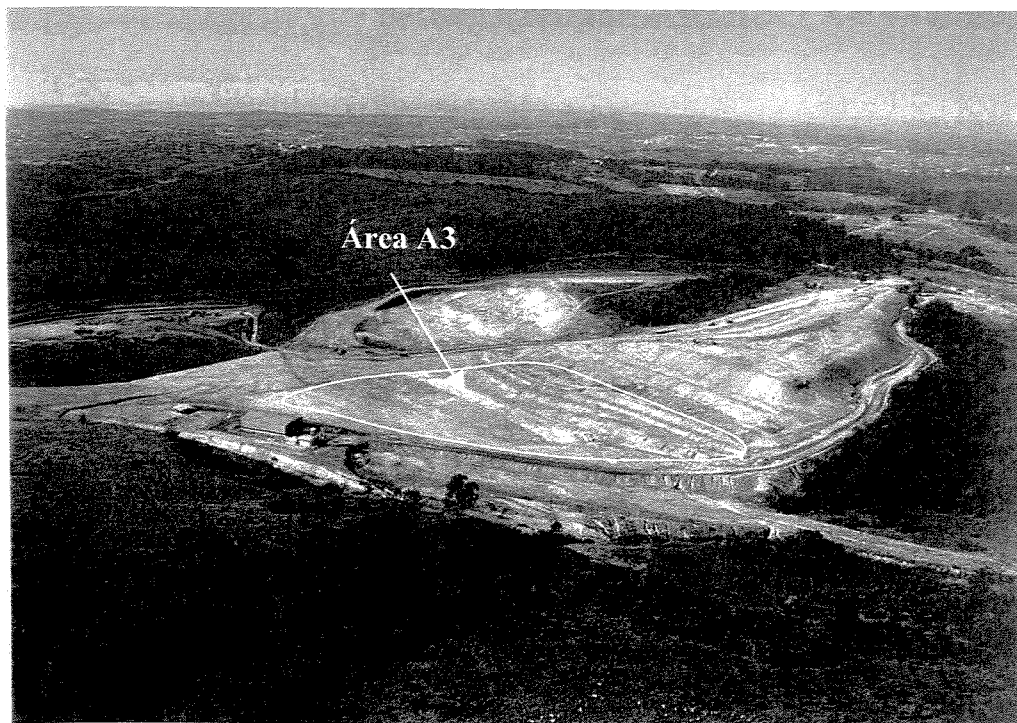


Figura 5.3. Foto do aterro Delta em 1996, com indicação da área A3

No maciço menor, foram duas áreas distintas de deposição identificadas na Figura 5.4. A área A5 não teve seu início de operação identificado mas segundo informações dos operadores do aterro esta serviu ao longo dos anos como área de deposição alternativa em períodos de chuva intensa quando as áreas A1 e A2 tinham seus acessos dificultados. A área A6 foi preenchida somente a partir de 2000 sendo portanto uma área com grande potencial de produção de biogás no futuro.

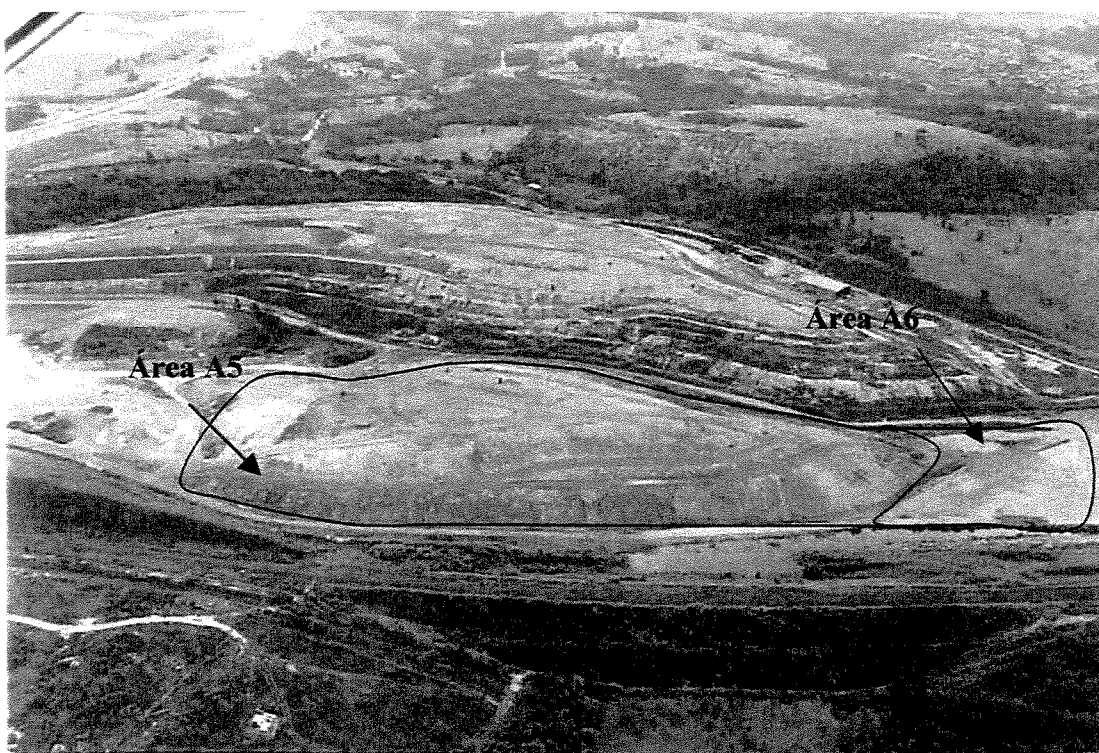
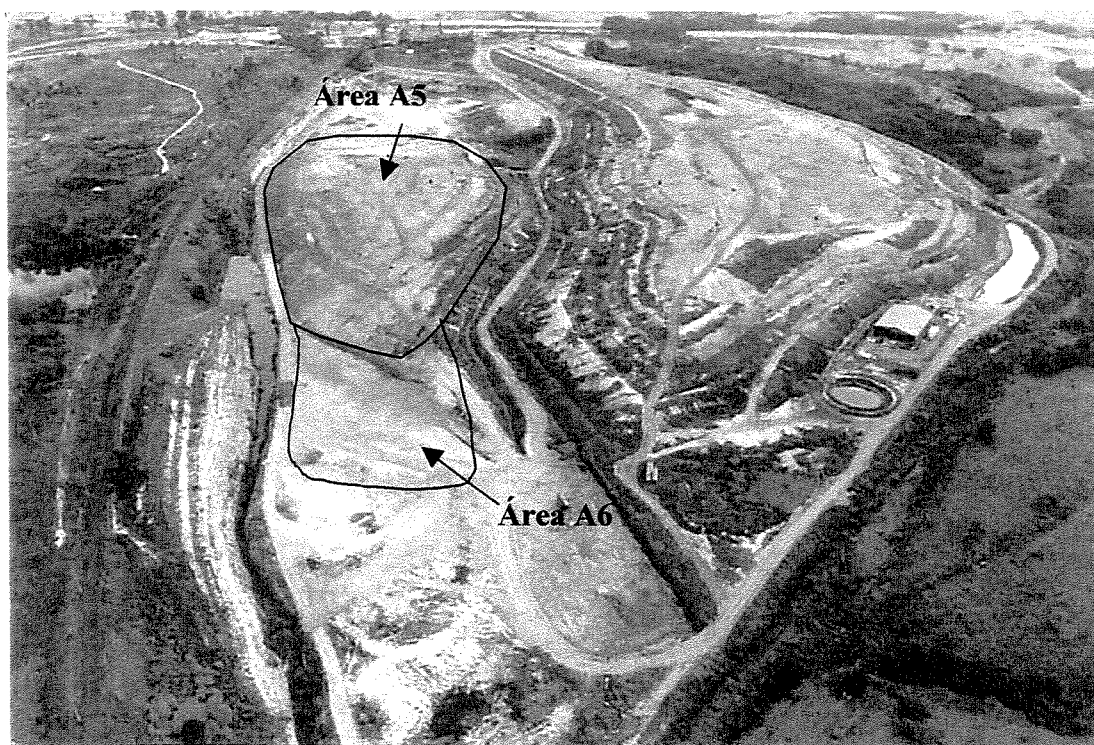


Figura 5.4. Foto do aterro Delta no ano 2000 com a formação dos dois maciços e indicação das áreas A5 e A6

Foram identificadas também as áreas de deposição A3 e A4 que compõem a parte central do aterro entre os dois maciços. A área A3 teve seu início de operação em dezembro de 2001 como documentado em PMC (2001) e a área A4, possui camadas de lixo mais antigas, compostas pelas bases dos dois maciços e lixo mais recente em suas camadas superiores que representam o prolongamento da área A3. A Figura 5.5 mostra o início da deposição do lixo na área A3.



Figura 5.5. Início da deposição do lixo na área A3

A maioria das áreas do aterro contará com camadas novas de lixo até que a cota final seja alcançada, o que favorece a produção do biogás em toda a extensão da massa de lixo.

O aterro apresenta grande parte de sua área de deposição ainda em operação, contando com uma camada de cobertura de terra intermediária que possibilita o vazamento de biogás pela superfície. Somente os taludes externos do aterro encontram-se com a camada final que reduz os vazamentos.

A partir de levantamento planaltimétrico realizado no aterro em abril de 2003, período em estava sendo realizado estudo de produção de biogás, foi gerado um modelo em 3D do local, que

mostra o estágio de formação dos maciços de lixo e a posição dos drenos de biogás. As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam imagens geradas a partir deste modelo.

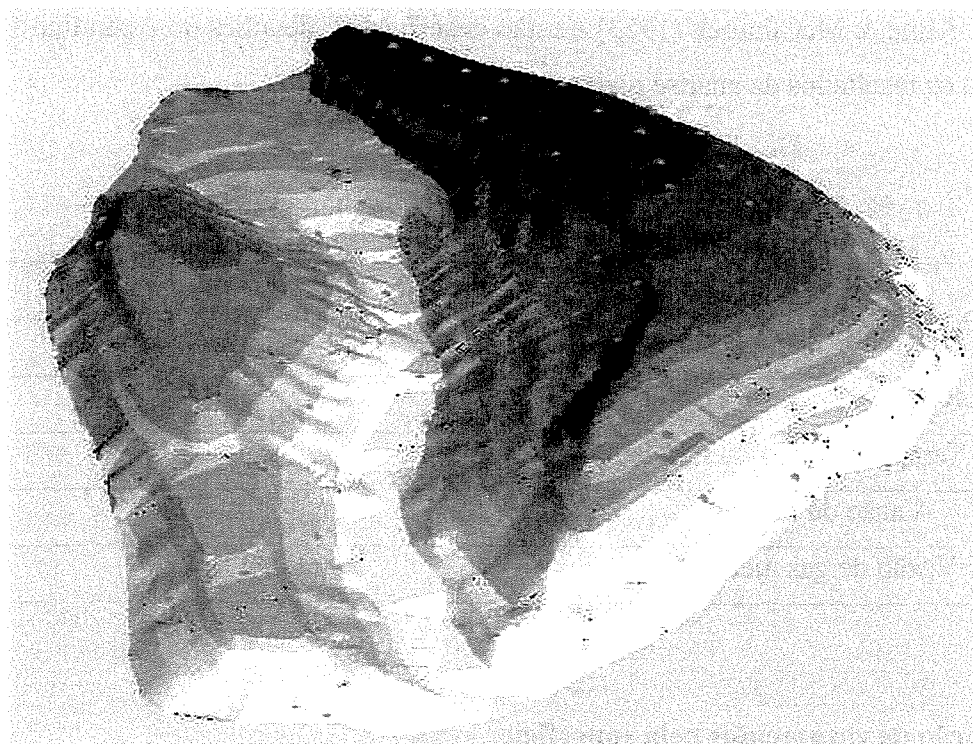


Figura 5.6. Modelo do aterro Delta em abril de 2003 – vista lateral



Figura 5.7. Modelo do aterro Delta em abril de 2003 – vista superior

5.3. Análise de Incertezas

A análise de incertezas nas medidas realizadas em campo foram baseadas em método proposto por Kline & McClintock (1953) e estão descritas em detalhes no Apêndice B. A Tabela 5.5 apresenta os resultados da análise realizada.

Tabela 5.5. Incertezas calculadas

Parâmetros	Incerteza
Vazão da placa de orifício	0,6 %
Área efetiva de passagem do fluido	0,03 %
Temperatura do fluido	0,4%
Vazão de biogás	12%
Vazão de gás metano	12%

5.4. Verificação de vazamentos pela superfície

A verificação de vazamentos pela superfície não detectou fluxo de biogás em nenhum dos pontos do aterro amostrados. Os pontos de medição escolhidos estão apresentados na Figura 5.8. e constituem regiões sem trincas com cobertura homogênea. Os pontos 1, 2 e 4 são áreas planas com cobertura intermediária de terra que ainda receberão lixo e os pontos 3 e 5 são áreas já na cota final de projeto e formadas por taludes com cobertura final.

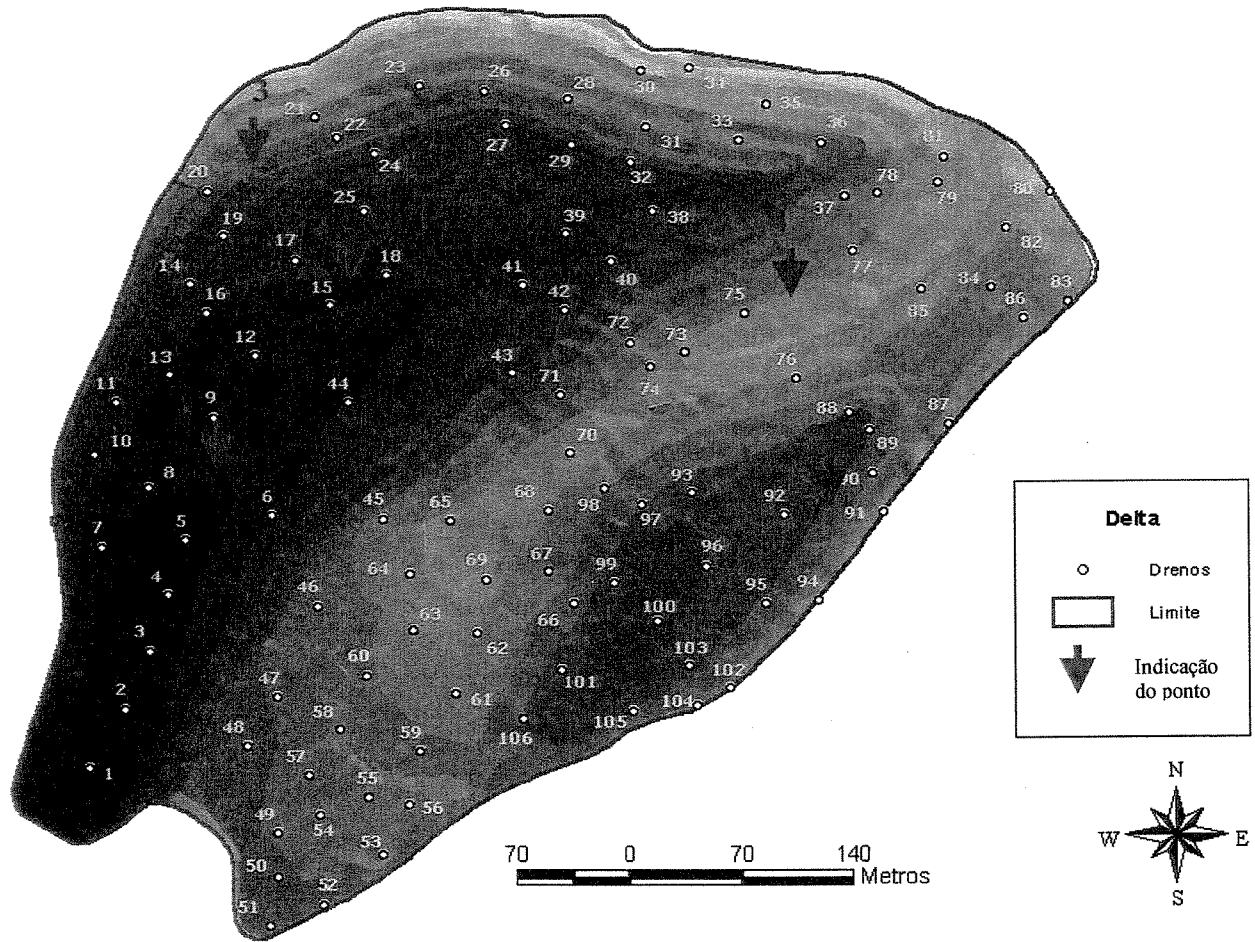


Figura 5.8. Localização dos pontos amostrados para a verificação do vazamento pela superfície

A partir da verificação do fluxo mínimo detectado pelo instrumento utilizado para medição da vazão apresentada em detalhes no Apêndice B, constatou-se que a máxima vazão de metano que poderia estar sendo emitida pela superfície do aterro sem trincas é de $0,0057 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$, considerando que o metano represente 50 % do biogás em volume.

Bogner et al. (1988) apud Meadows (1996) encontrou emissão de metano de $1,556 \text{ Nm}^3/\text{m}^2\text{dia}$ em aterro com cobertura de solo arenoso sem aproveitamento de biogás. Mosher (1996) mediu emissões de metano médias de $0,063 \text{ Nm}^3/\text{m}^2\text{dia}$ em aterro com cobertura de solo argiloso. Segundo Bogner et al. (1995) as emissões de metano pela superfície podem variar em até seis ordens de grandeza em uma faixa entre $4,186 \times 10^{-6}$ a $4,186 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$.

Os valores máximos esperados para o vazamento de biogás pela superfície do aterro estão abaixo daqueles encontrados por Mosher (1996), mas dentro da faixa encontrada por Bogner et al. (1995), sendo portanto necessária a continuidade de estudos nesta área com a utilização de um instrumento de medição que detecte faixas de vazão menores que o bolhômetro aqui empregado para que seja comprovada a real vazão de biogás pela superfície do aterro.

Acredita-se que parte do fluxo de biogás que escapa pela superfície esteja escoando por trincas e fissuras na camada de cobertura. A Figura 5.9 mostra uma destas trincas no aterro Delta. Outra via para possíveis vazamentos de biogás são os drenos horizontais de chorume que são interligados aos drenos verticais de biogás e têm saídas ligadas ao sistema de tratamento de líquidos percolados presentes no local.



Figura 5.9. Trinca presente no aterro Delta

Segundo Oonk & Boom (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.

As áreas com cobertura de terra ainda receberão outras camadas de resíduos no futuro e portanto só contarão com a cobertura final quando atingirem a cota de projeto do aterro. Em casos como este, onde a camada final não pode ser colocada devido à continuidade das operações de deposição de resíduo no local, uma alternativa para captação do biogás é a instalação de

drenos horizontais como descrito em Oonk & Boon (1995) para que todas as camadas de resíduos tenham sua produção de biogás aproveitada, não dependendo do fechamento do aterro.

5.5. Estimativas da produção futura de gás metano no aterro

Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.2 que aplica a Equação 2.11 foram estimados os valores de produção de gás metano no aterro Delta ao longo dos anos. Para isso foram calculados o potencial de geração de metano do lixo de Campinas e a vida útil do aterro.

5.5.1. Potencial de geração de gás metano (L_0) do lixo de Campinas

A Tabela 5.6 apresenta os diversos parâmetros que envolvem o cálculo do potencial de geração de gás metano para o lixo da cidade de Campinas .

Tabela 5.6. Parâmetros para o cálculo do potencial de geração de metano

Parâmetro	Valor
FCM	1,00
COD	198,8 (kg de C / t de lixo)
COD _f	0,77
F	0,55
L_0^*	112,5 (kg de CH ₄ /t de lixo) ou 156,9 (Nm ³ de CH ₄ /t de lixo)

*densidade do gás metano 0,7167 Kg/Nm³ (TCHOBANOGLIOUS, THEISEN & VINIL, 1993)

O fator de correção de metano (FCM) foi estimado a partir dos critérios estabelecidos na metodologia, pois o aterro Delta tem características de aterro sanitário, contando com as medidas operacionais recomendadas para confinamento adequado do lixo, como drenagem de biogás e chorume, impermeabilização do solo, formação de células de lixo cobertas com terra.

Para o cálculo do parâmetro COD não foram considerados os resíduos de parques e jardins devido à falta de registro das quantidades destes materiais que foram encaminhadas ao aterro, uma vez que estes são coletados separadamente e não foram incluídos na caracterização do lixo disponível em PMC (1995), que se concentrou em resíduos domiciliares.

Como a fração de madeira e tecidos foi classificada em um subgrupo comum na caracterização do lixo de Campinas, adotou-se a metade do valor percentual para cada um, sendo 3.36% para madeira e 3.36% para os tecidos. Segundo Kollmann & Coté, (1968) citado por Birgemer & Crutzen (1987) somente 70% da madeira é passível de ser bio-degradada, pois os 30% restantes são compostos por lignina que não degrada ou degrada a taxas muito pequenas. Portanto adotou-se que a quantidade de madeira degradável no lixo de Campinas representaria 2,35% do total em massa do lixo.

O valor calculado de 198,8 kg COD/ t de lixo é superior àquele apresentado por Oonk & Boom (1998) que encontrou o valor de 138 kg de Carbono Orgânico Degradável por tonelada de lixo doméstico na Alemanha. O valor aqui encontrado está dentro do esperado pois naquele país a quantidade de material orgânico nos resíduos domésticos é menor que em Campinas, contando com maiores quantidades de plástico, metais e outros materiais que não se degradam ou o fazem a taxas muito lentas.

O valor de COD_f foi estimado para uma temperatura no interior do aterro de 35°C, como recomendam Gunnerson & Stuckey (1986) citado por Birgemer & Crutzen (1987). Segundo Rettenberger & Tabasaran (1980) citado por Birgemer & Crutzen (1987), a temperatura no interior do aterro depende da atividade microbiológica e é independente da temperatura ambiente para profundidades maiores que 2 m. Em IPCC (1996) o valor de 0,77 para o COD_f é considerado padrão quando não é incluída a fração de lignina da madeira.

Adotando-se uma fração em volume do metano no biogás de 55 % como mostrado nas análises realizadas com o biogás no aterro Delta, obteve-se um valor de L₀ para o lixo de Campinas de 156,9 m³/t que está dentro da faixa de 140 a 180 m³/t de lixo recomendada por USEPA (1996a).

5.5.2. Cálculo da vida útil do aterro

A vida útil do aterro foi estimada baseado na curva de crescimento das quantidades de lixo recebidas no aterro apresentada na Figura 5.10 e no volume final de projeto e na densidade das células de lixo apresentados em PMC (2003b).

Após a subtração do volume total de projeto do aterro pelo volume ocupado em abril de 2003 obteve-se um volume restante de 1.543.818 m³ que comporta 940.185,16 toneladas de lixo, adotando-se a densidade da célula de lixo de 0,609 t de lixo/m³ (PMC, 2003b).

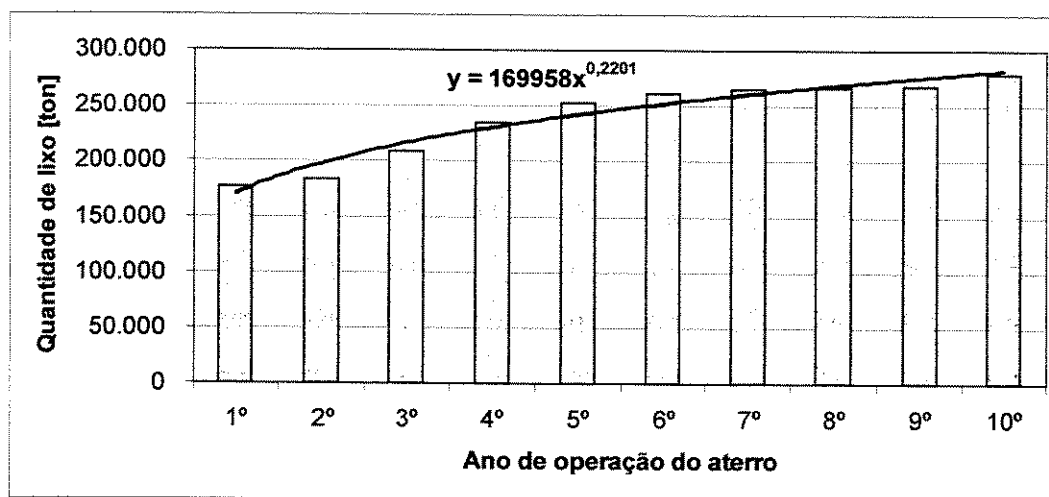


Figura 5.10. Curva da quantidade de lixo recebida pelo aterro Delta

Na Tabela 5.7 são encontradas as quantidades de lixo destinadas ao aterro Delta previstas para os próximos anos até o seu fechamento, calculadas pela curva da Figura 5.10.

Tabela 5.7. Estimativa das quantidades anuais de lixo destinadas ao aterro

Ano de operação do aterro	Ano	Quantidade de lixo (t)
11º	2003	288.105,89
12º	2004	293.676,64
13º	2005	298.896,30
14º	2006	303.811,63

Foi realizada a simulação das quantidades de lixo recebidas apresentadas na Tabela 5.7 obtendo-se assim a data do provável esgotamento do aterro com mostra a Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Simulação temporal do esgotamento do aterro

Data	Capacidade de recebimento de lixo restante (toneladas)
Abril/2003	940185,162
Agosto/2003	840.351,77
Agosto/2004	546.675,13
Agosto/2005	247.778,82
Setembro/2005	222.461,19
Outubro/2005	197.143,55
Novembro/2005	171.825,92
Dezembro/2005	146.508,28
Janeiro/2006	121.190,65
Fevereiro/2006	95.873,01
Março/2006	70.555,37
Abril/2006	45.237,74
Maio/2006	19.920,10
Junho/2006	0

Para os meses a partir de agosto de 2005 foram adotados os valores mensais de recebimento de lixo obtidos pela média mensal do 14º ano de operação que foi de 25.314,64 toneladas, totalizando 253.176,36 toneladas de lixo recebido de neste ano.

Portanto a vida útil do aterro Delta foi estimada até junho de 2006 quando o volume disponível para recebimento de lixo terá sua capacidade esgotada. Uma vez fechado o aterro este tende a atingir seu pico de produção de biogás dentro de poucos anos e continuará produzindo a taxas cada vez menores por um longo período de tempo.

5.5.3. Curvas de produção de metano e potencial energético do aterro

Como descrito anteriormente, a existência de vazamentos na superfície do aterro, principalmente em trincas e fissuras presentes na camada de cobertura, dificultam a avaliação da eficiência do sistema de coleta de biogás presente no aterro e consequentemente a quantificação do total de biogás produzido pelo aterro.

A comparação da produção de biogás pela quantidade de lixo entre vários aterros apresentada na Tabela 5.2 mostrou que o índice encontrado no aterro Delta é respectivamente 12,8% e 14,3% menor que outros dois aterros brasileiros, Bandeirantes e Metropolitano de Salvador. Portanto para que fosse estimado um valor da taxa de decaimento do aterro Delta, fator este que depende da produção total medida no local em determinada época, adotou-se o valor médio entre os outros dois aterros brasileiros estudados, chegando a uma estimativa de que 13,6 % do biogás passível de ser coletado estaria sendo perdido por outras vias de emissão além dos drenos do sistema de coleta. Com isso a vazão total de biogás do aterro Delta passa a ser de 1874,06 Nm³/h e a vazão total de gás metano de 1057,30 Nm³/h.

A fração de biogás que se estima estar sendo perdida representa uma vazão de 224,36 Nm³/h. Devido as limitações no método adotado para a verificação de vazamentos realizada no local não foi possível realizar a confirmação desse resultado, mas a ausência de fluxo nos pontos amostrados mostra que uma pequena parte dos vazamentos ocorre devido a permeabilidade do solo, sendo portanto o restante devido aos vazamentos por trincas ou pelas saídas do sistema de coleta de chorume. De acordo com os testes realizados, a mínima vazão de biogás que poderia ser detectada pelo medidor seria de 124,55 Nm³/h para todo o aterro que possuía uma área superficial de 262.202 m² na época das medições. Isso representa cerca de 7 % do total de biogás medido nas saídas dos drenos de coleta do aterro.

Sendo assim, foi obtido o valor de “k” de 0,0283/ano para o aterro Delta por processo iterativo até a obtenção do valor de produção de metano medido no décimo primeiro ano de operação do aterro. Pode-se assim gerar a curva de produção de gás metano ao longo do tempo apresentada na Figura 5.11.

Segundo USEPA (1997a) são recomendados valores de “k” de 0,04/ano para locais com índice pluviométrico acima de 635 mm/ano, como é o caso de Campinas com índice médio de 1430 mm/ano (CEPAGRI, 2003).

O valor de “k” encontrado para o aterro Delta é inferior àquele obtido no aterro Bandeirantes na cidade de São Paulo que foi de 0,0395/ano (USEPA, 1997b). Essa diferença se deve principalmente ao baixo potencial de geração de metano (“Lo”) adotado no aterro Bandeirantes, que foi de 125 m³CH₄/t de lixo, sendo este inferior àquele calculado para o aterro Delta com 157 m³CH₄/t de lixo, como apresentado na Seção 5.4.1. Uma diferença no fator “Lo” acaba provocando uma variação significativa no valor final de “k” quando é realizado o processo de iteração.

Estima-se que o aterro Bandeirantes possua constante de decaimento semelhante àquele do aterro Delta, devido ao fato de ambos os aterros apresentarem características construtivas comuns, como a formação das camadas de lixo em células de 5 m de altura com cobertura intermediária de 30 cm de terra, a presença de sistemas passivos de captação de biogás e com sistema coleta de chorume interligado. Há também o fato dos dois aterros estarem localizados em cidades da mesma região do país e com alto índice de urbanização, o que indica que possuam composições de lixo similares, além de climas característicos da região Sudeste.

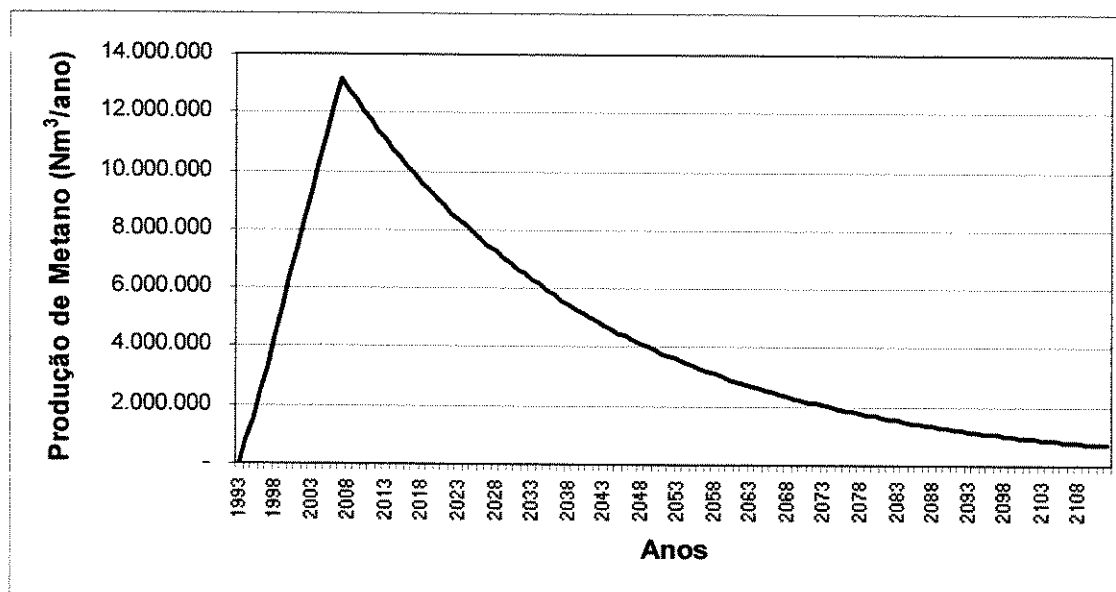


Figura 5.11. Curva de geração de gás metano para o aterro Delta

Observa-se que a produção de metano é prolongada para constantes de decaimento menores, podendo perdurar por até mais de 100 anos após o fechamento do aterro. O aproveitamento energético do metano gerado em aterros requer valores mínimos de produção para que seja viável economicamente, portanto muitas vezes é interessante que as taxas de degradação do material sejam aumentadas, o que pode ser realizado, por exemplo, com a re-injeção do chorume no aterro, que aumenta o teor de umidade da massa de lixo e acelera as reações de degradação. Em Pohland & Al-Yousfi (1994) e Townsend et al.(1996) são apresentados estudos que comprovam a aceleração no processo de biodegradação do aterro com o uso da técnica de recirculação de chorume.

Dependendo da finalidade do uso do biogás, a produção mais prolongada é mais interessante, tendo assim uma produção menor, mas que assegura o fluxo de metano por mais tempo. Aplicações como a evaporação de chorume ou mesmo o fornecimento de energia para o próprio aterro se enquadram neste caso.

Não foi possível realizar separadamente o levantamento da geração de metano em cada uma das áreas identificadas na Seção 5.2 pois não há registros da quantidade de resíduos e do

tempo de deposição de cada camada de lixo nas diversas áreas, o que impossibilita a aplicação da metodologia adotada para o aterro como um todo.

A partir dos valores de produção de metano encontrados foi gerada uma curva de potência elétrica fornecida pelo biogás do aterro Delta apresentada na Figura 5.12 considerando uma eficiência de coleta do biogás próxima de 100%. Assumiu-se que o biogás passa por um processo de separação para que somente o gás metano seja aproveitado fornecendo assim um combustível de PCI de 35,9 MJ/Nm³. Foi adotada uma eficiência de conversão em motor de combustão interna acoplado a um gerador elétrico de 33% e uma capacidade de geração de eletricidade anual de 88% devido às perdas e paradas para manutenção dos equipamentos (USEPA, 1996a).

Para a eficiência de coleta de biogás de 100% devem ser realizadas diversas melhorias no aterro Delta visando a implantação de um sistema de coleta ativo eficiente, que maximize a sucção do biogás sem a penetração de ar no interior da massa de lixo. Dentre as medidas que devem ser tomadas estão:

- implantação de uma camada espessa de cobertura de solo argiloso ou manta sintética de PEAD que impeça a penetração de ar no aterro;
- redimensionamento da rede de coleta de biogás com perfuração de novos drenos de biogás, garantindo assim que todas as camadas de lixo sejam atendidas e o escoamento do biogás realize-se sem obstruções;
- modificações no sistema atual de coleta com fechamento de drenos não utilizados no sistema ativo e melhoria dos demais para funcionem como extratores de biogás e não simplesmente como dutos de alívio da pressão interna do aterro;
- instalação de uma rede de dutos que interliguem os drenos ao sistema de exaustão.

Segundo Oonk & Boom (1995), que realizou estudos em aterros na Alemanha, sistemas ativos de aproveitamento do biogás, com cobertura de terra, atingem entre 50 e 75% de eficiência de coleta e aqueles com camadas de solo argiloso ou mantas de PEAD como cobertura podem chegar próximo de 100% de coleta de biogás.

5.5.4. Simulação de projeto de geração de energia elétrica no aterro Delta

O dimensionamento de um projeto de aproveitamento de biogás em aterros para geração de 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. Além disso, devem ser considerados fatores como os custos dos equipamentos necessários, o preço de venda da eletricidade e as penalidades previstas em contrato por interrupções na geração de energia.

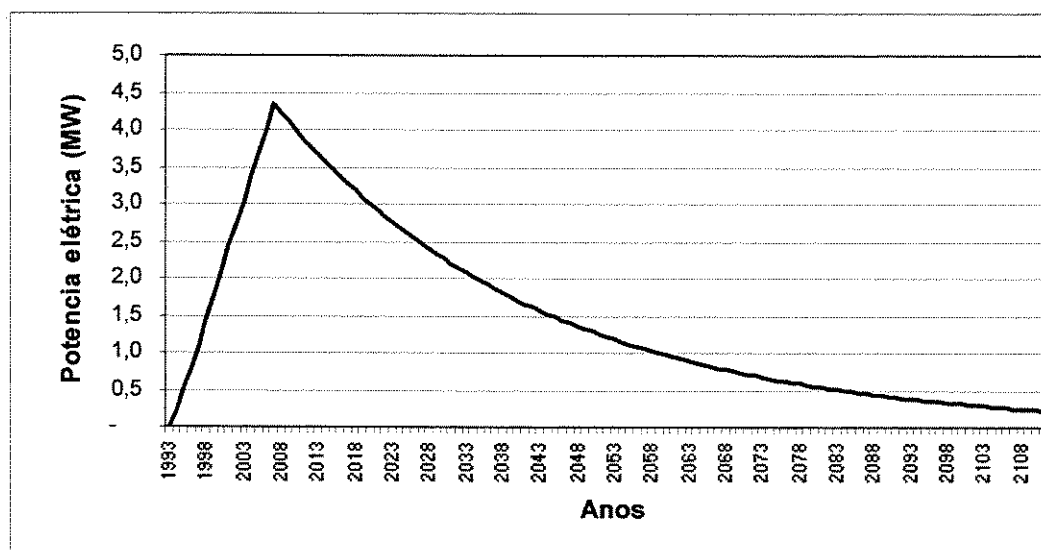


Figura 5.12. Curva de potência elétrica obtida a partir do aproveitamento do biogás do aterro Delta

Segundo USEPA (1996a) dois cenários de produção opostos podem ser usados para dimensionamento do projeto. O primeiro prevê equipamentos que atendam um fluxo mínimo de biogás, garantindo o abastecimento de combustível e promovendo o funcionamento da planta a

plena carga por mais tempo. Por outro lado isso ocasiona a perda de parte do biogás em momentos de produção acima da capacidade de projeto. O segundo cenário prevê equipamentos dimensionados para o máximo fluxo de biogás, considerando assim que a planta funcione em carga parcial e consuma todo o biogás gerado pelo aterro, mas com o risco de insuficiência de combustível e interrupção na geração de eletricidade. Neste segundo caso o uso de motores de combustão interna é preferível em relação às turbinas a gás, pois funcionam melhor em carga parcial.

Uma outra alternativa no dimensionamento de projetos de biogás é o uso de unidades de geração de eletricidade menores que possam ser instaladas ou removidas de acordo com a produção de biogás no aterro. Isso favorece a maximização do uso do biogás e da geração de energia, embora leve ao aumento dos custos de instalação em relação aos projetos não modulares (USEPA, 1996a).

Para o caso do aterro Delta foi prevista uma instalação com unidades de geração de 1 MW modulares que podem ser arranjadas de acordo com a produção de biogás do aterro. Devido à seqüência de deposição do lixo aleatória com várias partes do aterro ainda em operação e com a necessidade de algumas medidas para maximização da coleta de biogás, o funcionamento de uma planta de geração só poderia ocorrer após o fechamento do local.

Sendo assim para que o biogás seja aproveitado ao máximo, o projeto deve ter início em 2007, um ano após o fechamento do aterro que ocorreria em 2006, atingindo assim a máxima vazão de biogás. A Figura 5.13 apresenta as etapas de aproveitamento considerando um projeto que utilize grupos moto-geradores que operem a plena carga enquanto houver produção de biogás suficiente.

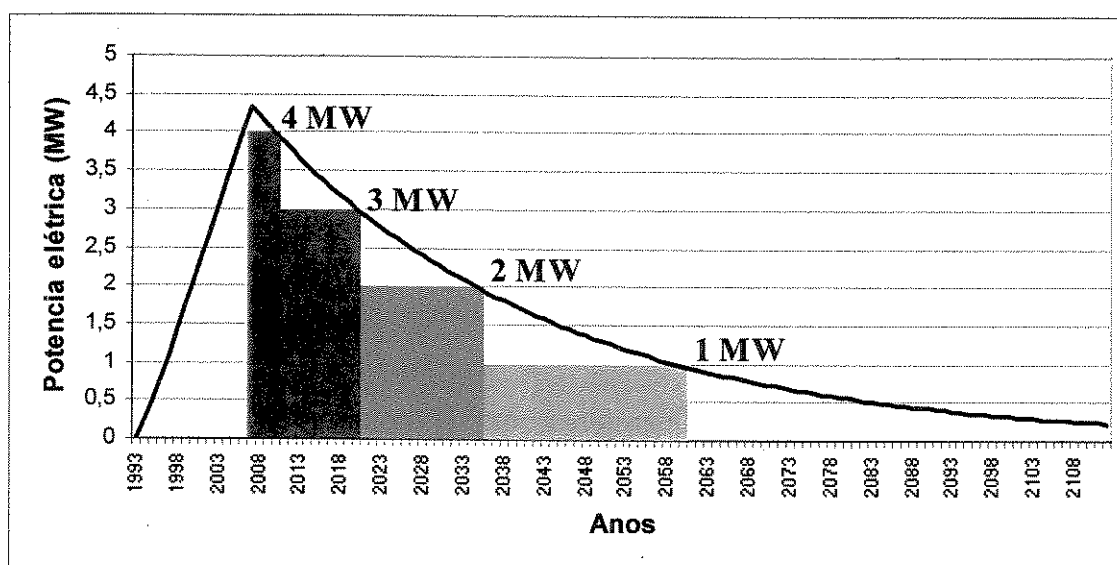


Figura 5.13. Simulação das etapas de aproveitamento do biogás do aterro para geração de energia elétrica com motores a plena carga

Como a previsão da produção de biogás ao longo do tempo apresenta muitas incertezas quanto ao fluxo de biogás gerado, um cenário conservador como este pode garantir o fornecimento de energia elétrica de forma constante por longos períodos. A Tabela 5.9 mostra as etapas do projeto desse tipo com o período de operação de cada uma.

Tabela 5.9. Etapas do projeto para o aterro Delta

Etapas	Período
4 MW	2007-2010
3 MW	2011-2020
2 MW	2021-2035
1 MW	2036-2060

A energia elétrica fornecida pelo aterro em um projeto como este seria suficiente por exemplo para abastecer 8.200 residências com um consumo médio de 350 kWh/mês durante os quatro primeiros anos de funcionamento da planta. Para uma média de 4 a 5 pessoas/residência,

o aproveitamento do biogás do aterro poderia atender a uma população de 32.800 à 41.000 pessoas em sua primeira etapa, sendo este número reduzido posteriormente com a queda na produção de energia no aterro.

Segundo a previsão aqui apresentada, cerca de 2.000 residências poderiam ter sua demanda de eletricidade atendida pela energia gerada no aterro durante 58 anos caso as condições de degradação do lixo se mantenham ao longo deste período.

Uma outra simulação foi realizada com o uso dos motores funcionando em carga parcial para que o máximo de biogás seja aproveitado. Assim teríamos uma produção de energia elétrica variável ao longo do tempo, dependendo da produção do aterro em cada momento. A Figura 5.14 mostra as etapas de funcionamento dos motores para a curva de produção de biogás.

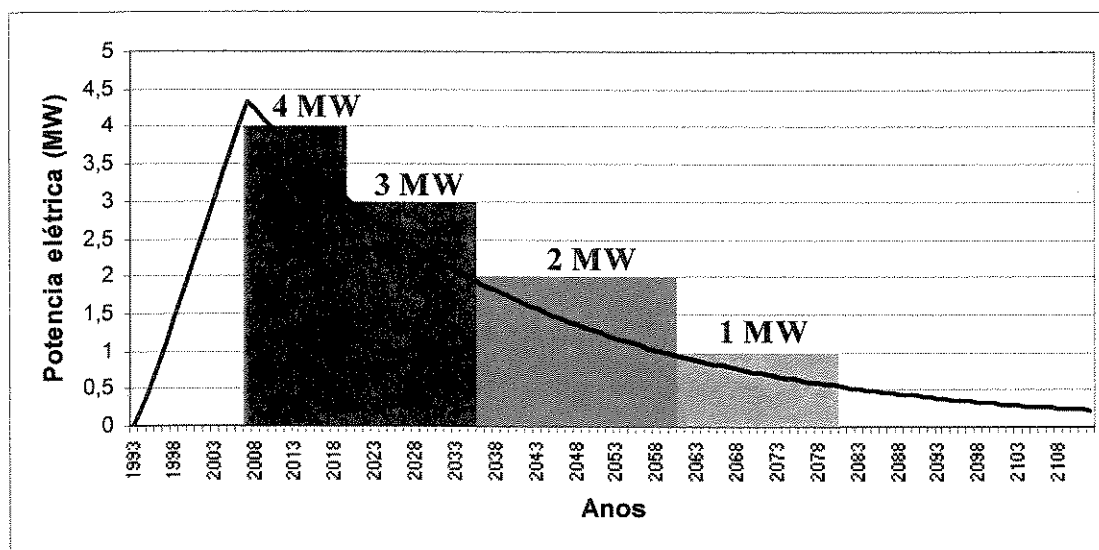


Figura 5.14. Simulação das etapas de aproveitamento do biogás do aterro para geração de energia elétrica com motores em carga parcial

Esta simulação também contou com o uso de motores de 1 MW prevendo que o último estágio opere com até 50% de sua carga total. Segundo as previsões fornecidas pela curva de produção, em 2080 se atingiria uma produção insuficiente para funcionamento do motor.

Realizando-se a integração da curva entre 2007 e 2080 obteve-se uma produção total de 412.710.034 Nm³ de CH₄ o que equivale a 327.649 tep (1 tonelada equivalente de petróleo = 45,22 GJ) .

5.6. Opções de redução de emissões de gás metano em aterros

A redução da emissão de gás metano em aterros pode ocorrer com a adoção de algumas medidas práticas, evitando assim o agravamento do efeito estufa e a melhoria nas condições do ambiente local.

Primeiramente a minimização de resíduos orgânicos destinados aos aterros deve ser um objetivo em todo o mundo, buscando-se uma destinação final mais nobre do ponto de vista ambiental, que promova a reutilização e a reciclagem dos resíduos, diminuindo o uso de aterros que por mais adequados que possam ser do ponto de vista de engenharia e normas técnicas de construção e operação, sempre geram riscos de contaminação do meio ambiente e do próprio homem.

Um outro ponto importante para redução das emissões de metano é a aplicação de medidas de controle do biogás gerado nos aterros existentes fechados ou em operação, que ainda produzirão metano por longos períodos. A implantação de projetos de aproveitamento do biogás promove a adoção dessas medidas, uma vez que a condição física adequada dos aterros é fator crucial para a maximização da produção e coleta do gás metano gerado na biodegradação da matéria orgânica do lixo.

Dentre estas medidas necessárias para a implantação de um projeto de biogás pode ser citado o uso da camada de cobertura adequada que promove a redução da emissão descontrolada pela superfície do aterro seja pela própria permeabilidade ao biogás do material de cobertura, seja pela constituição não homogênea dessa camada que ocasiona a ocorrência de trincas e fissuras. O solo argiloso compactado e a manta sintética de PEAD são os materiais considerados mais adequados para esta finalidade.

A implantação e a operação adequada de um sistema de coleta eficiente promove a redução das fugas de gás metano pelas laterais ou pela camada superficial do aterro, possibilitando o direcionamento de grande parte do biogás para os sistemas de geração de energia implantados ou para os equipamentos de queima controlada que convertem o gás metano em dióxido de carbono, reduzindo assim o agravamento do efeito estufa.

5.7. Redução do potencial de aquecimento global do aterro

A implantação de um projeto de aproveitamento energético do biogás no aterro sanitário Delta pode promover a redução do potencial de aquecimento global decorrente da emissão descontrolada de gás metano.

Como o gás metano possui um potencial de aumento do efeito estufa 23 vezes maior que o dióxido de carbono considerando um período de referência de 100 anos (IPCC, 2001) a conversão desse gás em dióxido de carbono em sua combustão em motores ou outro conversor de energia, ocasiona uma redução no potencial de aquecimento global do aterro. Isso possibilita que o uso energético ou mesmo uma queima controlada do biogás no aterro Delta seja um projeto que se enquadre como possível candidato a um financiamento externo do chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) previsto no Protocolo de Kyoto.

Sendo assim, calculou-se a equivalência em toneladas equivalentes de dióxido de carbono para o uso energético do biogás do aterro Delta prevendo o aproveitamento total do biogás. Os resultados estão mostrados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Quantidades de dióxido de carbono equivalente ao metano emitido pelo aterro

Período	Quantidade de CH₄ (t)	Quantidade Equivalente de CO₂ (t)
2007-2080	295.789	6.803.153

Capítulo 6

Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

O estudo mostrou que o aterro Delta possui um potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 3 MW em 2003 podendo chegar a 4 MW um ano após o seu encerramento que foi previsto para 2006.

A metodologia de medição adotada demonstrou ser eficiente para a determinação da produção do biogás coletado no sistema existente no local de estudo, mas a dificuldade de medição das outras vias de emissão, como a superfície do aterro e a drenagem de chorume, geram incertezas na quantificação total do biogás gerado pelo aterro.

O alto teor de metano encontrado nas amostras demonstrou que grande parte do aterro se encontra em fase de produção de biogás avançada, mas devido à sequência de deposição aleatória do lixo em diversas partes do aterro, grande parte do biogás será perdida até que se possa implantar um projeto de aproveitamento, o que possivelmente só ocorrerá após o esgotamento de sua capacidade total de recebimento de lixo.

A divisão do aterro em partes ainda na fase de projeto, prevendo o encerramento de uma área para o início da deposição na área subsequente permite que o biogás seja explorado antes mesmo do esgotamento da capacidade total do aterro. Uma alternativa também possível para acelerar o uso do biogás é a instalação de drenos horizontais que atendam cada camada de lixo após a sua cobertura com terra.

A metodologia utilizada para a previsão da geração futura de gás metano no aterro utilizada mostrou-se adequada pois considera vários fatores importantes como as quantidades anuais de

lixo recebido, o potencial de produção de metano de acordo com a composição do lixo, além da taxa de decaimento da matéria orgânica, que é fator crucial para a previsão futura de biogás.

Apesar do enfoque de aproveitamento energético do biogás aqui demonstrado, devem ser ressaltadas outras vantagens importantes do uso desse combustível, como a redução da emissão de gases de efeito estufa que a conversão do gás metano proporciona e a melhoria das condições sanitárias dos aterros onde se pretenda implantar um projeto de aproveitamento de biogás, uma vez que são necessárias diversas modificações para o controle de emissões e maior eficiência de coleta.

Outros estudos podem ser realizados para confirmação dos resultados aqui apresentados como a realização de medições de geração de biogás com a utilização de teste de sucção conforme metodologia descrita no Apêndice D e a verificação do vazamento pela superfície do aterro de forma mais acurada.

Referências bibliográficas

AL-DABBAS, Moh'd, A.F. Reduction of methane emissions and utilization of municipal waste for energy in Amman. **Renewable Energy**, v.14, n° 1-4, pp. 427-434, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: resíduos sólidos. 1987. 48 p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **ASME MFC-14M-2001**: Measurement of fluid flow using small bore precision orifice meters. 2001.

BIRGEMER, H.G. & CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. **Journal of geophysical research**, v. 92, n° D2, pp 2181-2187. 1987.

BOGNER, J; VOGT, MOORE, C. & GARTMAN, D. Proceedings GRCDA 10 th International landfill gas symposium. GRCDA, 1988. apud MEADOWS, M. Estimating landfill methane emissions, **Energy Convers. Mgmt.** v. 37, n° 6-8, pp 1099-1104. 1996.

BOGNER, J. et al. Landfill as atmospheric methane sources and sinks. **Chemosphere**. v. 31, n° 9, pp 4119-4130, 1995.

BROWN, K.A. & MAUNDER, D.H. Exploitation of landfill gas: a UK perspective. **Water Science & Technology**. v. 30, n°12, pp 143-151. 1994.

CALDERONI, S. **Os Bilhões Perdidos no Lixo**. 2° ed. São Paulo. Ed. Humanitas FFLCH/Universidade de São Paulo. 1998. 343p.

CANTANHEDE, L.G.; GIMENO, A.; GOMES, A.P.; LEITE, L. E. H. B.; MOREIRA, M.R. & HEYNEMANN, P. U. Aproveitamento de Potencial Energético de Resíduos Sólidos no Rio de Janeiro. In: Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária Y Ambiental, 16. 19 a 24 fev 1978. Santo Domingo, República Dominicana.

CENTRO DE ENSINO E PESQUISA EM AGRICULTURA DA UNICAMP (CEPAGRI). Dados da estação meteorológica do CEPAGRI. 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares. Relatório 2002, incluindo atualizações de dezembro de 2002 a janeiro de 2003. Redação: André Luis Ferreira, Antônio Vicente Novaes Jr., Aruntho Savastano Neto e Manuel Carlos de Souza. São Paulo 2003. 42p.

COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA (COMLURB). Potencial Energético do biogás de Aterros. Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/comlurb/potencail_bio_gas.htm Acesso em 18 dez. 2002

COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA (COSIPA). Energia de Lixo na Baixada Santista. Projeto “ELBAS”. Texto Básico. 1980.

D’ALMEIDA, M.L.O. & VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2º ed. São Paulo: IPT/CEMPRE. 2000. 370 p.

DANESE, Modesto. Geração e Utilização de Biogás. Associação Brasileira de Conservação de Energia. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo. 1981.

ESCOBAR, Herton. No combate ao efeito estufa, Brasil sai na frente. **O Estado de São Paulo**, 08 set. 2002.

EUROPA, Portal da União Européia. Disponível no site: <http://europa.eu.int>. Acesso em 20 mai 2003.

FIGLIOLA, Richard S. & BEASLEY, Donal E. **Theory and Design for Mechanical Measurements**. 3º ed. New York : John Wiley & Sons, Inc. 2000. 536p.

FIGUEIREDO, P.J.M. **A Sociedade do Lixo. Os resíduos, a questão energética e a crise ambiental**. 2ºed.. Piracicaba: *UNIMEP*. 1995. 240 p.

GUNNERSON, C.G. & STUCKEY, D.C.. **Anaerobic digestion**. Tech. Pap. 49, World Bank. Washington, D.C. 1986. apud BIRGEMER, H.G. & CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. **Journal of geophysical research**, v. 92, nº D2, pp 2181-2187. 1987.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **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 fev. 2003

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2001: A Scientific Basis (Chapter 6)**. Disponível no site: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/. Acesso em: 15 jan. 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDS (ISO). **ISO 5167-1-1991**. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices, Part 1: Orifice plates, nozzles, and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full., 1991.

JULIANI, Denise. Brasileiras competem em concorrência holandesa. **Gazeta Mercantil**. 2 de setembro 2002.

KATINAS, Vladislovas & SKEMA, Romualdas. Renewable energy in Lithuania. **Energy Police** 29, pp. 811-816, 2001.

KLINE, S.J. & MACCLINTOCK, F.A., Describing Uncertainties in Single Sample Experiments, **Mechanical Engineering**, v. 75, pp3-8, Jan. 1953

KOLLMANN, F.F.P. & COTÉ Jr., W.A. **Principles of wood science technology**, Springer, Berlin v. 1, 592 p. 1968. apud BIRGEMER, H.G. & CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. **Journal of geophysical research**. v. 92, n° D2, pp 2181-2187. 1987.

LAGERKVIST, A. The landfill gas activity of the IEA bioenergy agreement. **Biomass and Bioenergy**, v.9 n° 1-5, pp 399-413. 1995.

LAQUIDARA, M.J.; LEUSCHNER, A.P. & WISE, D.L. Procedure for determining potential gas quantities in an existing sanitary landfill. **Water Science Technology**. vl. 18 n° 12 pp. 151-162, 1986.

MEADOWS, M. Estimating landfill methane emissions, **Energy Convers. Mgmt.** v. 37, n° 6-8, pp 1099-1104. 1996.

MELDONIAN, N. **Alguns aspectos do lixo urbano no estado de São Paulo e considerações sobre a reciclagem do alumínio e do papel**. 1998. 196p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MESTRINEL, Reinaldo. Energia da boa e sem poluição, uai! **IPESI: Química & Petróleo**. 11: 23-27, fev-mar, 1991.

MILLS, Ian et al. **Quantities, units and symbols in physical chemistry**. Oxford: Blackwell Science Publications. 1993. 166p.

MOSHER, W.Byard et al. Mitigation of methane emissions at landfill sites in New England, USA. **Energy Convers. Mgmt** v 37. n° 6-8, pp 1093-1098, 1996.

MOSS, H.D.T. The commercial use of landfill gas in the United Kingdom. In: Proceedings of the institution of mechanical engineers. 15-17 april 1991. Dusseldorf. Engineering for profit from waste. European Conference.

OONK, J. & BOON, A. Landfill gas formation, recovery and emissions. – INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL AND ENERGY TECHNOLOGY (TNO). R95-203. Apeldoorn, The Netherlands, 1995.

POUTAKHINA, Marina. Case Study #6: Vega Landfills Assessment, Bahia, Brazil. Technical Report. FI/GLO/99/H06/11-51. United Nations Industrial Development Organization. Vienna. 2001.

POHLAND, F.G. & AL-YOUSFI, B. Design and operation of landfill for optimum stabilization and biogas production. **Water Science Technology**. v. 30, nº 12, pp 117-124. 1994.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS (PMC). Secretaria de Serviços Públicos. Departamento de Limpeza Urbana (DLU). Caracterização de resíduos sólidos. Relatório Técnico. Campinas. 1995.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS (PMC). Secretaria de Serviços Públicos/ Secretaria de Administração. **Campinas: a gestão dos resíduos sólidos urbanos**. Concepção, Coordenação Técnica e Supervisão Geral: Ernesto Dimas Paulella e Clair de Oliveira Scapim. Campinas. 1996. 224 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS (PMC). Departamento de Limpeza Urbana (DLU). Monitoramento Geotécnico e Ambiental. 2º Relatório Mensal. Dez. 2001.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS (PMC). Departamento de Limpeza Urbana (DLU). Informações técnicas obtidas junto a funcionário do departamento, 2003 a.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS (PMC). Departamento de Limpeza Urbana (DLU). *Estimativa de cálculo da vida útil do aterro sanitário municipal Delta A*, Relatório Técnico, Maio de 2003 b.

RECICLÁVEIS. Brasil poderia gerar até 400 MW com biogás. **Notícias e Destaques**. Disponível em: www.reciclaveis.com.br . Acesso em 10 dez. 2002.

RETTENBERGER, G. & TABASARAN, O. Untersuchungen zur Entstehung, Austbreitung und Ableitung von Zersetzungsgasen in Abfallablagerungen. Rep. 103 02 207, 249pp., Umweltbundesamt, Berlin, 1980. apud BIRGEMER, H.G. & CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. **Journal of geophysical research**, v. 92, n° D2, pp 2181-2187. 1987.

ROVERS, F.A., TREMBLAY, J.J. & MOOIJ, H.; Procedures for landfill gas monitoring and control, Proceedings of an international seminar, Rep. Eps 4-EC-77-4, Fish and Environ. Can., Waste Manage. Br., Ottawa, Ontario, 1977. apud BIRGEMER, H.G. & CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. **Journal of geophysical research**, v. 92, n° D2, pp 2181-2187. 1987.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA). Parecer técnico referente à análise do EIA/RIMA do Aterro Sanitário Delta –IA de Campinas. CPRN/DAIA n° 037/96, mai. 1996.

STREB, C.S. **A Coleta Informal de Lixo no Município de Campinas-SP: Uma análise na perspectiva das questões energéticas e da qualidade de vida**. 2001. 85p. Dissertação (Mestrado) - Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TABASARAN, O. **Abfallbeseitigung und abfallwirtschaft**. VDI Verlag, Dusseldorf, 280 p. 1982. apud BIRGEMER, H.G. & CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. **Journal of geophysical research**, v. 92, n° D2, pp 2181-2187. 1987.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H. & VINIL, S. **Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues**. Irwin MacGraw-Hill. 1993. 978p.

TOWNSEND, T.G. et al. Acceleration of landfill stabilization using leachate recycle, **Journal of Environmental Engineering**. pp. 263-268. 1996.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Department of the Army. Engineering and Design, Landfill off-gas collection and treatment systems. Technical Letter n° 1110-1-160. april 1995.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (USDOE). Feasibility Study: Utilization of landfill gas for a vehicle fuel system – Rossmam's Landfill, Clackamas County, Oregon. Assistant secretary, conservation and renewable energy. Office of renewable technology. Washington, D.C. 1983. DOE/RA/50366-1

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills – Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Emission Standards Division. March 1991. EPA-450/3-90-011a.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Turning a liability into an asset: A landfill gas-to-energy project development handbook. Sep. 1996 a, EPA 430-B-96-0004. 139p

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Renewable energy annual. Chapter 10. 1996 b.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Emissions factor documentation for municipal solid waste landfills revised. AP-42 Section 2.4. August, 1997a.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Feseability assessment for gas-to-energy at selected landfills in São Paulo, Brazil. Public Review Draft. EPA 68-W6-004. January 1997b.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Emerging technologies for the management and utilization of landfill gas. Office of Research and Development. January, 1998. EPA 68-D30035.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Adapting boilers to utilize landfill gas: Feasible and cost-effective. Office of Air and Radiation. Jan. 2001. EPA 430-F-01-006.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Powering microturbines with landfill gas, Mar. 2002 a, EPA430—02-012 DRAFT

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **About LMOP**. Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop/about.htm>. Acesso em 21 nov. 2002 b.

VEGA Salvador. Reporting pumping trial Landfill Metropolitano Centro Salvador. Nov. 2002. 42p

VIEIRA, Sônia Maria Manso & ALVES, João Wagner Silva. 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.

Apêndice A

Dados experimentais

Neste apêndice estão apresentados nas Tabelas A1 e A2 os dados experimentais obtidos nas medições de campo para cada dreno de biogás estudado.

Tabela A1. Dados experimentais de velocidade e temperatura de saída do biogás nos drenos

Nº do Dreno	Velocidade Medida (m/s)	Temperatura Termopar (°C)	Nº do Dreno	Velocidade Medida (m/s)	Temperatura Termopar (°C)
1	0,10	37	54	0,15	37
2	0,15	37	55	0,10	40
3	0,30	36	56	0,10	48
4	0,35	31	57	0,10	37
5	0,40	29	58	0,10	37
6	0,20	37	59	0,15	37
7	0,25	39	60	0,10	31
8	0,15	37	61	0,20	38
9	0,35	25	62	0,50	37
10	0,25	38	63	0,35	37
11	0,30	38	37	0,25	32
12	0,25	36	37	0,30	34
13	0,18	37	36	0,25	32
14	0,25	38	31	0,25	39
15	0,45	25	29	0,70	32
16	0,50	47	37	0,20	35
17	0,45	25	39	0,50	35
18	1,70	28	37	0,12	35
19	0,50	32	25	0,35	34
20	0,65	35	73	0,25	47
21	0,18	32	74	0,06	34
22	0,35	41	75	0,40	36
23	0,65	37	76	0,70	36
24	0,35	37	77	0,50	39
25	1,60	36	78	0,20	43
26	2,30	42	79	0,40	33
27	0,50	37	80	0,20	43
28	0,20	35	81	0,25	41

29	0,55	37	82	0,45	35
30	0,60	34	83	0,10	37
31	0,40	41	84	0,20	37
32	0,60	38	85	0,55	30
33	0,40	37	86	0,55	34
34	0,25	28	87	0,20	30
35	0,50	28	88	0,50	35
36	0,65	45	89	0,50	35
37	0,06	27	90	0,50	41
38	0,20	36	91	0,25	37
39	0,15	37	92	0,25	37
40	0,40	36	93	0,15	37
41	0,15	37	94	0,25	37
42	0,10	37	95	0,30	38
43	0,30	37	96	0,50	26
44	0,65	37	97	0,20	37
45	0,40	33	98	0,40	23
46	0,35	43	99	0,18	37
47	0,25	34	100	0,18	37
48	0,20	32	101	0,10	37
49	0,30	33	102	0,20	30
50	0,20	37	103	0,50	38
51	0,15	37	104	0,18	37
52	0,15	37	105	0,10	45
53	0,12	47	106	0,25	25

Tabela A2. Dados experimentais da análise do biogás coletado nos drenos

Nº do Dreno	% CH ₄	% CO ₂	% H ₂	% O ₂	% N ₂	%N ₂ /%O ₂
1	-	-	-	19,54	80,46	4,12
2	-	-	-	19,74	80,26	4,07
3	1,32	1,17	-	18,91	78,61	4,16
4	5,48	3,59	-	18,64	72,29	3,88
5	2,66	1,26	0,02	20,42	75,63	3,70
6	6,30	4,44	0,04	18,36	70,86	3,86
7	34,34	22,44	0,03	8,38	34,80	4,15
8	-	-	0,02	21,25	78,73	3,71
9	0,28	0,24	0,02	21,09	78,36	3,72
10	16,14	12,36	0,07	13,07	58,36	4,47
11	10,25	6,66	0,03	16,36	66,71	4,08
12	16,27	10,35	-	14,98	58,40	3,90
13	0,27	0,39	-	19,19	80,15	4,18
14	4,69	3,00	0,04	18,19	74,07	4,07
15	31,43	20,18	-	10,22	38,17	3,73
16	55,62	36,22	0,01	1,77	6,38	3,61
17	15,51	10,14	-	15,81	58,53	3,70
18	59,03	38,21	-	0,73	2,03	2,78
19	48,74	33,83	0,02	3,53	13,88	3,93
20	53,80	36,64	-	2,01	7,55	3,76
21	4,37	2,76	0,02	19,50	73,35	3,76

22	0,18	0,46	0,04	20,79	78,53	3,78
23	31,62	21,84	-	9,14	37,39	4,09
24	0,12	0,15	0,02	21,05	78,66	3,74
25	57,47	38,24	0,01	1,04	3,24	3,10
26	33,49	24,36	-	8,93	33,22	3,72
27	55,23	39,80	0,23	0,91	4,04	4,47
28	11,35	7,24	-	17,16	64,26	3,75
29	49,25	36,01	-	2,67	12,06	4,51
30	25,87	17,95	0,02	11,87	44,28	3,73
31	24,95	16,95	-	12,27	45,83	3,73
32	56,79	41,14	0,01	0,43	1,63	3,82
33	31,99	22,41	0,01	9,58	36,02	3,76
34	23,23	15,36	-	12,87	48,54	3,77
35	31,62	21,84	-	9,14	37,39	4,09
36	56,54	38,71	0,01	1,06	3,69	3,49
37	2,16	1,50	0,03	20,24	76,08	3,76
38	3,10	1,89	0,02	20,06	74,93	3,74
39	10,25	6,83	0,03	16,20	66,69	4,12
40	39,59	27,17	-	6,86	26,38	3,85
41	3,30	2,76	-	18,41	75,52	4,10
42	0,75	0,77	-	19,32	79,17	4,10
43	19,70	12,64	0,02	14,10	53,53	3,80
44	58,58	39,05	-	0,51	1,86	3,66
45	10,24	7,72	0,05	16,70	65,29	3,91
46	40,17	42,67	0,36	2,24	14,55	6,50
47	7,28	5,78	-	18,00	68,95	3,83
48	26,40	24,51	-	7,50	41,58	5,54
49	0,17	0,52	-	19,57	79,74	4,08
50	3,00	3,01	0,03	17,95	76,01	4,23
51	0,68	0,76	-	19,32	79,23	4,10
52	4,39	3,27	-	18,05	74,29	4,12
53	6,90	32,40	3,74	10,59	46,37	4,38
54	6,80	4,96	0,03	17,34	70,87	4,09
55	0,12	0,15	0,04	20,88	78,81	3,77
56	-	-	0,03	21,43	78,54	3,67
57	1,59	1,52	0,03	20,17	76,69	3,80
58	25,14	20,03	0,04	11,24	43,55	3,88
59	13,79	11,60	-	15,38	59,22	3,85
60	13,99	11,07	0,05	15,55	59,34	3,82
61	43,35	34,54	0,08	4,41	17,61	3,99
62	19,18	14,62	0,07	13,84	52,28	3,78
63	14,54	11,92	0,01	15,43	58,54	3,79
64	0,64	1,02	0,05	20,47	77,79	3,80
65	35,45	28,53	0,05	7,30	30,87	4,23
66	26,44	18,85	-	10,87	43,84	4,03
67	-	-	-	21,49	78,51	3,65
68	53,81	37,13	0,02	1,99	7,04	3,53
69	5,32	4,23	-	18,82	71,63	3,81
70	47,92	35,55	0,03	3,20	13,30	4,15
71	10,57	7,47	0,06	17,02	64,89	3,81
72	40,06	26,53	-	6,95	26,46	3,81
73	9,60	8,38	0,07	17,06	64,90	3,80
74	0,20	-	0,04	21,30	78,46	3,68
75	19,98	17,31	0,10	12,93	49,68	3,84

76	48,86	35,48	-	3,22	12,43	3,86
77	30,57	29,33	0,30	8,19	31,57	3,86
78	16,03	11,06	0,02	15,37	57,51	3,74
79	40,34	46,07	0,63	2,31	10,65	4,61
80	0,25	0,30	0,03	20,80	78,62	3,78
81	14,83	11,98	0,23	15,34	57,62	3,76
82	15,21	11,57	-	13,97	59,25	4,24
83	4,84	4,33	-	18,42	72,41	3,93
84	12,66	9,05	-	16,12	62,17	3,86
85	39,54	31,27	0,02	5,98	23,19	3,87
86	29,65	20,79	0,02	9,66	39,87	4,13
87	5,15	3,03	0,02	19,00	72,80	3,83
88	11,52	7,94	-	17,05	63,49	3,72
89	7,30	4,95	-	18,55	69,20	3,73
90	55,91	39,18	-	1,08	3,82	3,54
91	0,55	0,47	0,02	20,69	78,27	3,78
92	0,04	-	0,04	20,86	79,06	3,79
93	3,28	2,35	0,04	19,44	74,89	3,85
94	0,28	0,55	0,02	20,63	78,52	3,81
95	37,85	25,87	-	7,46	28,82	3,86
96	-	-	-	21,46	78,54	3,66
97	1,00	0,79	0,02	20,27	77,92	3,84
98	51,17	35,85	0,02	2,72	10,24	3,76
99	-	-	-	21,52	78,49	3,65
100	0,12	-	0,02	20,91	78,95	3,78
101	0,61	-	0,02	20,98	78,39	3,74
102	3,14	1,78	0,04	19,88	75,16	3,78
103	13,25	8,79	0,03	16,35	61,58	3,77
104	1,70	0,90	0,02	20,53	76,85	3,74
105	-	-	0,02	21,00	78,98	3,76
106	0,46	-	-	21,24	78,30	3,69

Apêndice B

Calibração de instrumentos

Neste apêndice estão apresentadas os procedimentos e as curvas de calibração dos instrumentos utilizados nos experimentos.

Calibração do anemômetro de fio quente

A calibração do anemômetro de fio quente foi realizada usando-se como instrumento de referência três placas de orifício adequadas à faixa de vazão das medidas do experimento.

Duas placas foram fabricadas de acordo com a Norma ASME MFC-14M-2001 (ASTM, 2001), sendo uma placa com diâmetro interno do orifício de 7,80 mm para vazões entre 5 e 17 m³/h e outra placa com diâmetro interno do orifício de 12,78 mm que atendia vazões entre 15 e 45 m³/h. Uma terceira placa de 32,00 mm de diâmetro do orifício fabricada seguindo a Norma ISO 5167-1-1991 (ISO, 1991) foi utilizada para vazões entre 45 a 100 m³/h e

Comparou-se a velocidade indicada pela sonda do anemômetro posicionado no centro do tubo de PVC com a velocidade média obtida pela divisão da vazão das placas de orifício pela área da seção de passagem do fluido. Para a simulação das condições de medição do aterro foi construída uma bancada experimental com a peça cônica e o tubo de PVC utilizados nos experimentos de campo, com entrada do fluxo por uma peça cilíndrica como mostrado na Figura B1.

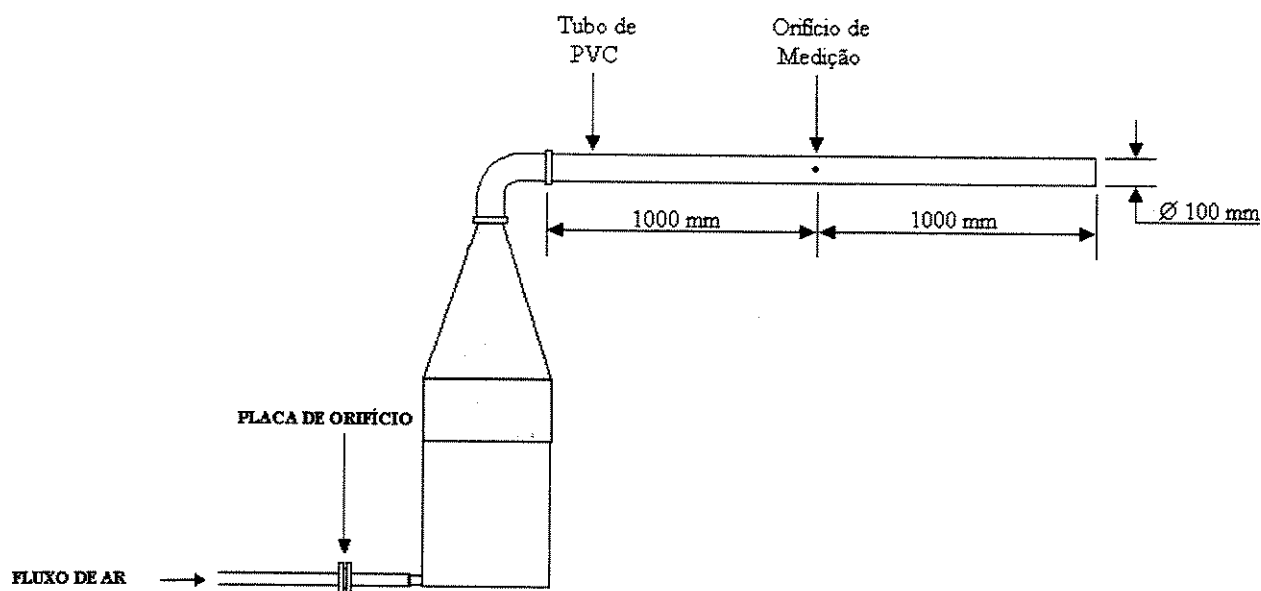


Figura B1. Esquema da montagem utilizada para calibração do anemômetro

A área da seção transversal onde efetivamente ocorria a passagem do fluido tanto nas medições de campo como na calibração do anemômetro foi obtida com o cálculo da área total da seção transversal do tubo de PVC utilizado e subtraindo-se a área frontal da aste do anemômetro que era introduzida no tubo para posicionamento da sonda. A Tabela B1 mostra os valores encontrados nos cálculos

Tabela B1. Valores calculados para determinação da área efetiva de passagem do fluido

<i>Áreas</i>	<i>Valores calculados</i>
Área frontal da aste do anemômetro introduzida no tubo de PVC	322,50 mm ²
Área total da seção transversal do tubo de PVC	7703,68 mm ²
Área efetiva de passagem do fluido	7377,50 mm²

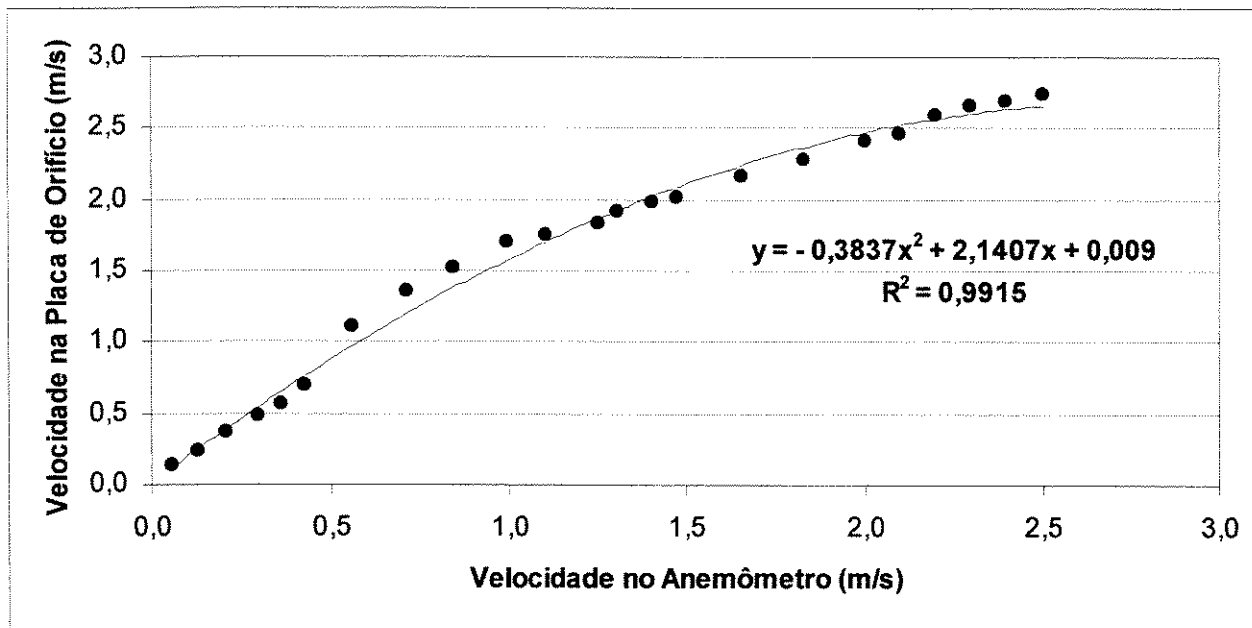


Figura B2. Curva de calibração do anemômetro de fio quente

A Figura B2 mostra a curva de calibração obtida para o anemômetro de fio quente utilizado nas medições de velocidade dos experimentos de campo.

Calibração do termopar tipo K

A Figura B3 mostra a curva de calibração do termopar tipo K que foi realizada utilizando-se como padrão um termômetro de coluna de mercúrio.

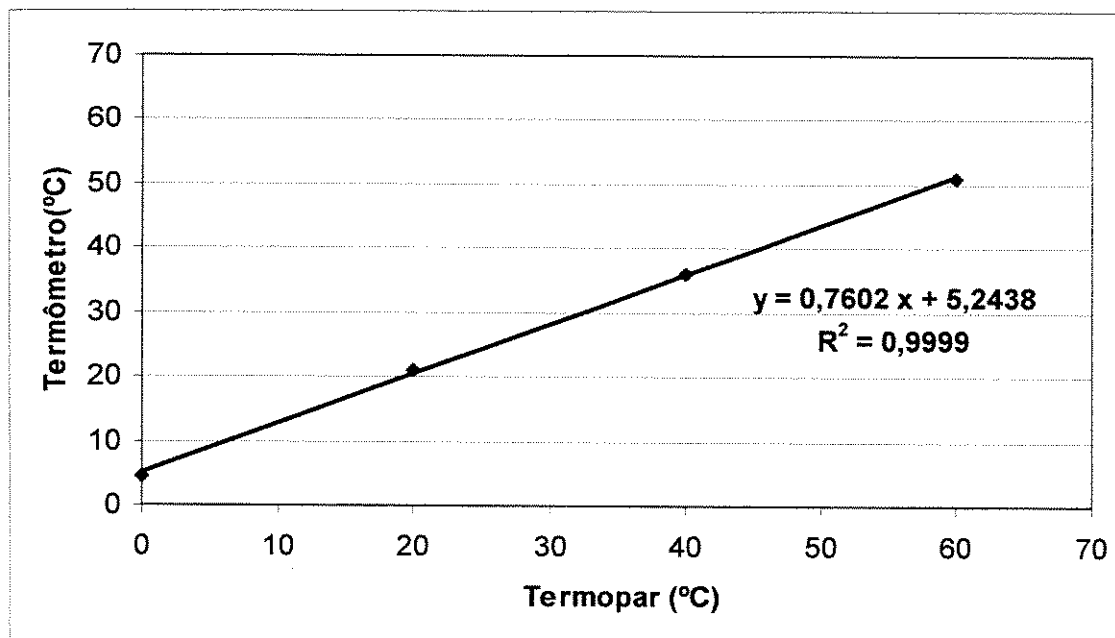


Figura B3. Curva de calibração do termopar

Determinação da sensibilidade mínima do bolhômetro

Como não foi detectada vazão de biogás na superfície do aterro com a utilização da montagem descrita na Seção 4.1.3 procurou-se determinar a mínima vazão que poderia ser detectada com o bolhômetro utilizado no experimento. Buscou-se assim encontrar o fluxo máximo de biogás que poderia estar escoando nos locais amostrados tendo em vista a instrumentação utilizada.

Para a verificação da vazão mínima detectada pelo bolhômetro, o instrumento foi ligado a uma rede de ar comprimido e o fluxo controlado por uma válvula agulha que era aberta até a constatação visual da formação de bolha no interior do duto de entrada de ar no aparelho. A partir disso o fluxo era mantido constante e era medido o tempo necessário para a bolha de sabão percorrer o curso delimitado no instrumento que indicava um volume deslocado de 10 ml.

Após a adoção de um procedimento estatístico descrito em Figliola & Beasley (2000) para determinação do tamanho da amostra, realizou-se 20 repetições do experimento atingido um grau de confiabilidade de 95% seguindo uma distribuição de t-Student. A Tabela B2 apresenta os valores de tempo medidos no experimento e a Tabela B3 os resultados da verificação.

Tabela B2. Amostras utilizadas na verificação da mínima vazão detectada pelo bolhometro

Amostra	Tempo (s)	Amostra	Tempo (s)
1	238,87	11	280,15
2	240,93	12	320,88
3	283,98	13	293,93
4	304,00	14	183,00
5	242,56	15	208,12
6	278,75	16	289,00
7	278,32	17	166,95
8	341,46	18	278,70
9	280,07	19	130,37
10	252,89	20	274,97

Tabela B3. Resultados finais da verificação

Tempo médio para deslocar 10 ml (s)	Vazão de ar média(Nm³/dia)
258,40	0,0029

Apêndice C

ANÁLISE DE INCERTEZAS

A análise da propagação de incertezas do cálculo dos parâmetros utilizados neste trabalho foi estimada baseado em método proposto por Kline e McClintock (1953).

Seja R o resultado de cálculo em função das variáveis independentes $x_1, x_2, \dots, x_n$:

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

e $(w_1, w_2, \dots, w_n)$ as incertezas nas medidas das variáveis independentes.

A incerteza do resultado R é calculada com a Equação C.1:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.1})$$

Incerteza na vazão da placa de orifício

O Equação C.2 foi utilizada para o cálculo da incerteza da vazão em massa das placas de orifício utilizadas como padrão para a calibração do anemômetro de fio quente.

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \left[\left(\frac{\delta \alpha}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{2\delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p}{2\Delta p} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_1}{2\rho_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.2})$$

Sendo:

δq_m : incerteza na vazão em massa da placa de orifício;

q_m : vazão em massa da placa de orifício;

α : coeficiente de vazão;

$\delta \alpha$: incerteza no coeficiente de vazão;

ε : fator de expansibilidade;

$\delta \varepsilon$: incerteza no fator de expansibilidade ;

d : diâmetro do orifício da placa;

δd : incerteza no diâmetro do orifício da placa;

Δp : diferencial de pressão na placa de orifício;

$\delta \Delta p$: incerteza no diferencial de pressão na placa de orifício;

ρ_1 : densidade do fluido na tomada de pressão a montante da placa;

$\delta \rho_1$: incerteza na densidade do fluido na tomada de pressão a montante da placa.

A vazão volumétrica é obtida com a divisão da vazão mássica pela densidade do fluido. Com isso a incerteza da vazão volumétrica é obtida pela equação C.3.

$$\frac{\delta q_v}{q_v} = \left[\left(\frac{\delta q_m}{q_m} \right)^2 + \left(- \frac{\delta \rho_1}{\rho_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.3)$$

Sendo:

δq_v : incerteza na vazão volumétrica da placa de orifício;

q_v : vazão volumétrica da placa de orifício;

A Tabela C1 mostra os valores calculados para cada termo das equações C.2 e C.3 baseados na máxima velocidade medida em campo com o anemômetro correspondente a uma vazão da placa (q_v) de 70,51 m³/h a uma temperatura de 26,5°C e uma pressão barométrica de 708,8 mmHg que fornece a maior incerteza na vazão da placa de orifício.

Tabela C1. Parâmetros obtidos para o cálculo da incerteza na vazão da placa de orifício

Termo	Valor
$\delta\alpha/\alpha$	0,00015
$\delta\varepsilon/\varepsilon$	0,00028
δd	0,05 mm
d	32 mm
$\delta\Delta p$	0,5 mmca
Δp	131 mmca
$\delta\rho_l$	0,0066 kg/m ³
ρ_l	1,5434 kg/m ³
$\delta q_m/ q_m$	0,4%
$\delta q_v/ q_v$	0,6%

Incerteza na medida da área efetiva de passagem do fluido

A incerteza na medida da área efetiva de passagem do fluido (δA_3), que compreende a área da seção transversal do duto menos a área ocupada pela aste do anemômetro está apresentada na Tabela C2, juntamente com os parâmetros utilizados no cálculo.

Tabela C2. Parâmetros de cálculo da incerteza na medida da área efetiva de passagem do fluido no duto de PVC

Área da seção transversal do duto (A1)	$7700 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
Incerteza na área da seção transversal do duto ($\delta A1$)	$7,77 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
Área frontal ocupada pela aste do anemômetro (A2)	$322 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
Incerteza na área frontal ocupada pela aste do anemômetro ($\delta A2$)	$2,52 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
Área efetiva de passagem do fluido (A3)	$7377 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
Incerteza na área efetiva de passagem do fluido $\delta A3$	$2,52 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ou 0,03%

Incerteza na velocidade média fornecida pela placa de orifício

A velocidade média no duto de PVC foi obtida pela divisão da vazão da placa de orifício pela área efetiva de passagem do fluido. A incerteza no cálculo da velocidade média de 2,6 m/s no duto de PVC obtida com a máxima vazão da placa de orifício foi de **0,6 % do valor medido**.

Incerteza na vazão de biogás

Após a calibração do instrumento de medida (anemômetro de fio quente) com um instrumento padrão (placa de orifício) foi efetuado o cálculo da vazão de biogás no duto de PVC nas CNTP (1 bar e 0°C) multiplicando-se a velocidade do anemômetro corrigida com a curva de

calibração pela área efetiva de passagem do biogás. A incerteza neste cálculo e os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela C3.

Tabela C3. Parâmetros utilizados e resultado do cálculo da incerteza na vazão de biogás

Incerteza do anemômetro de fio quente (δv_1)	0,005 m/s
Desvio Padrão da curva de calibração do anemômetro	0,24 m/s
t- student (95% de confiança)	2,074
Incerteza na medida de temperatura (δT)	0,4 %
Incerteza na velocidade corrigida com a calibração (δv_2)	12%
Incerteza na vazão de biogás à CNTP (δQ_v)	12 % do valor medido

Incerteza na vazão de gás metano

A vazão de metano nos drenos de biogás foi calculada multiplicando-se a vazão de biogás pela concentração de metano nas amostras. A incerteza neste cálculo está apresentada na Tabela C4.

Tabela C4. Parâmetros utilizados e resultado do cálculo da incerteza na vazão de metano

Incerteza na vazão de biogás (δQ_v)	12%
Incerteza do teor de metano (δT_{CH_4})	0,05%
Incerteza na vazão de metano (δQ_{CH_4})	12 % do valor medido

Apêndice D

Metodologia de medição por sucção

A metodologia de medição da vazão de biogás por sucção forçada apresentada neste apêndice é denominada “*Method 2E. Determination of landfill gas production flow rate*” (USEPA, 1991) e é utilizada para dimensionamento de projetos de aproveitamento de biogás em aterros sanitários, pois possibilita a obtenção do fluxo de biogás e da taxa de decaimento da matéria orgânica que são parâmetros necessários para aplicação da “equação de decaimento de primeira ordem” (Equação 2.9) que prevê as quantidades de gás metano gerado no aterro ao longo do tempo.

Primeiramente devem ser perfurados poços na camada de lixo com diâmetro de aproximadamente 60 cm e que atinjam até 75% da profundidade do aterro, não devendo ultrapassar a camada de base ou o nível de líquido do local. Esses poços devem ser interligados a um exaustor que promova a sucção do biogás e direcione o fluxo a um queimador. A montagem conta ainda com um medidor de vazão devidamente calibrado.

Existem duas opções para arranjo dos poços:

- Grupos de três: Neste caso devem ser conhecidas a composição, a idade e a profundidade da camada de lixo da área estudada. A localização do grupo deve ser próxima ao perímetro do aterro com uma profundidade maior ou igual a média do aterro, sendo a idade média do lixo entre 2 e 10 anos. Áreas com lixo não degradável como resíduos de construção civil devem ser evitadas.
- Espaçados em cinco locais diferentes: Deve ser feita a divisão do aterro em áreas que tenham pelo menos 2 anos de deposição localizando um poço no centro de cada área.

Os dutos de extração do biogás podem ser de PVC, HDPE, fibra de vidro ou aço e devem ter no mínimo 10 cm de diâmetro. Estes devem ter os 2/3 de sua parte inferior perfurados com furos de 13 mm de diâmetro e espaçamento de 90° a cada 10 ou 20 mm.

O duto deve ser posicionado no centro do poço e envolto por várias camadas como apresentado na Figura D1.

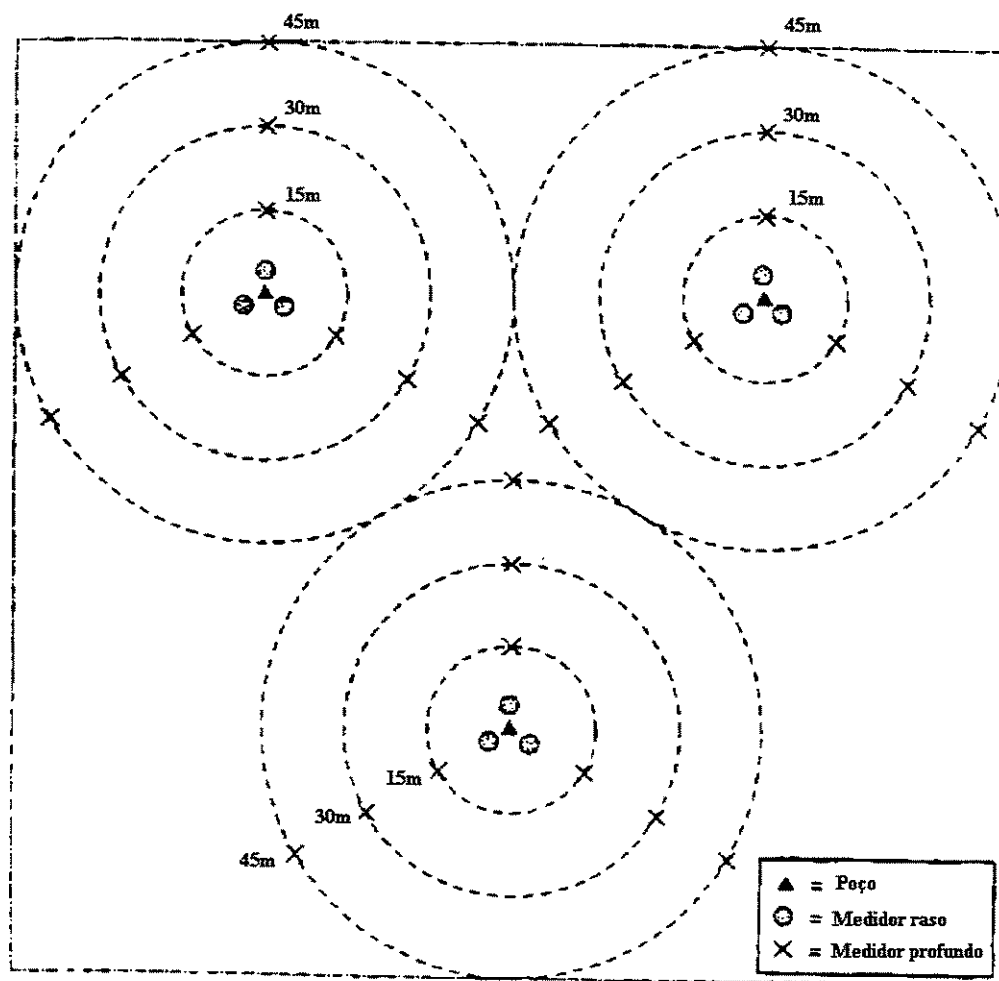


Figura D1. Distribuição dos medidores de pressão ao redor dos poços de sucção de biogás

Devem ser instalados medidores profundos de pressão localizados ao longo de diferentes distâncias radiais sendo estas 3, 15, 30 e 50 metros em relação ao poço de extração de biogás. Para cada distância três medidores como aquele mostrado na Figura D2, devem ser dispostos com

um intervalo de 120° entre si. Se necessário podem ser instalados poços além do raio de 50 m em relação ao poço de amostragem.

Outros medidores denominados rasos devem ser instalados próximos aos poços de extração de biogás com metade da profundidade dos medidores profundos.

Os medidores devem possuir um diâmetro de 15 a 23 cm e ter 2/3 de sua parte inferior perfurados, sendo o diâmetro mínimo dos furos de 6 mm e o espaçamento de 90° a cada 15 cm. A profundidade desses medidores deve ser equivalente aquela do topo da parte perfurada do duto de extração do biogás.

Assim como nos dutos de extração, os medidores de pressão devem ser localizados no centro do poço e envoltos por diversas camadas de material como apresentado na Figura D3.

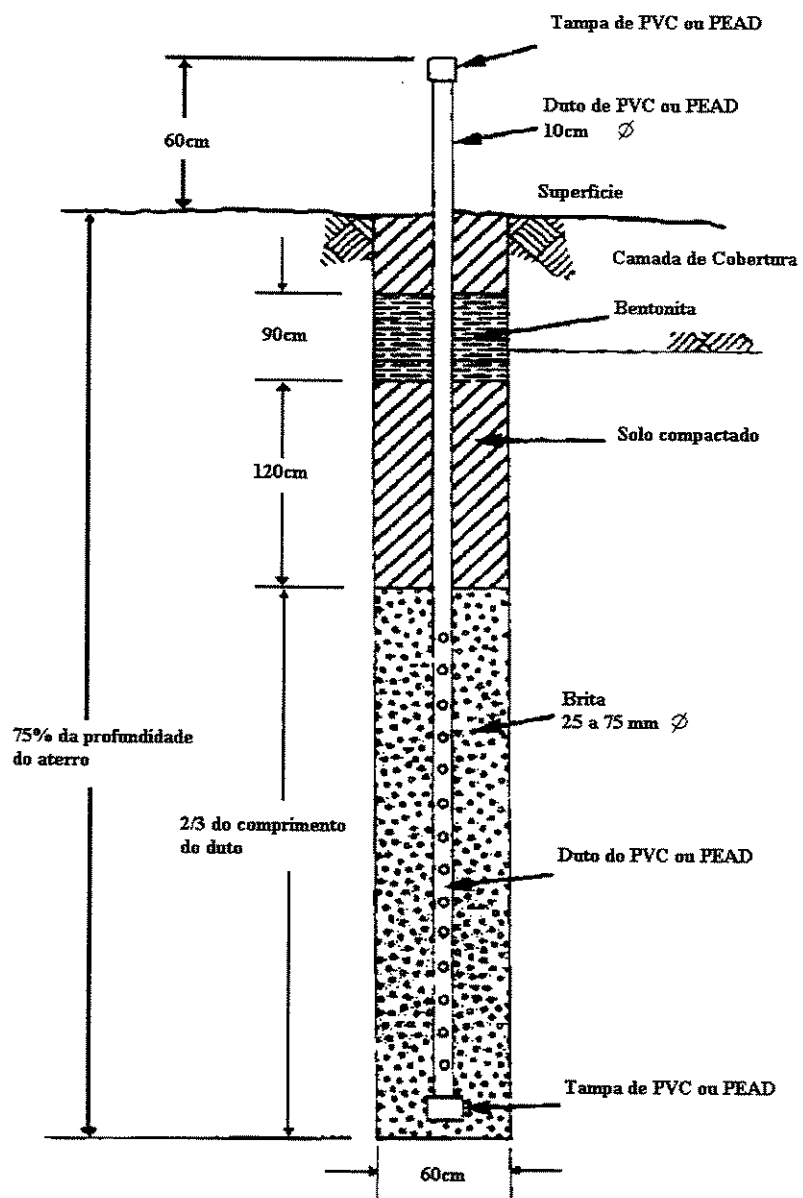


Figura D2. Esquema do poço de coleta do biogás

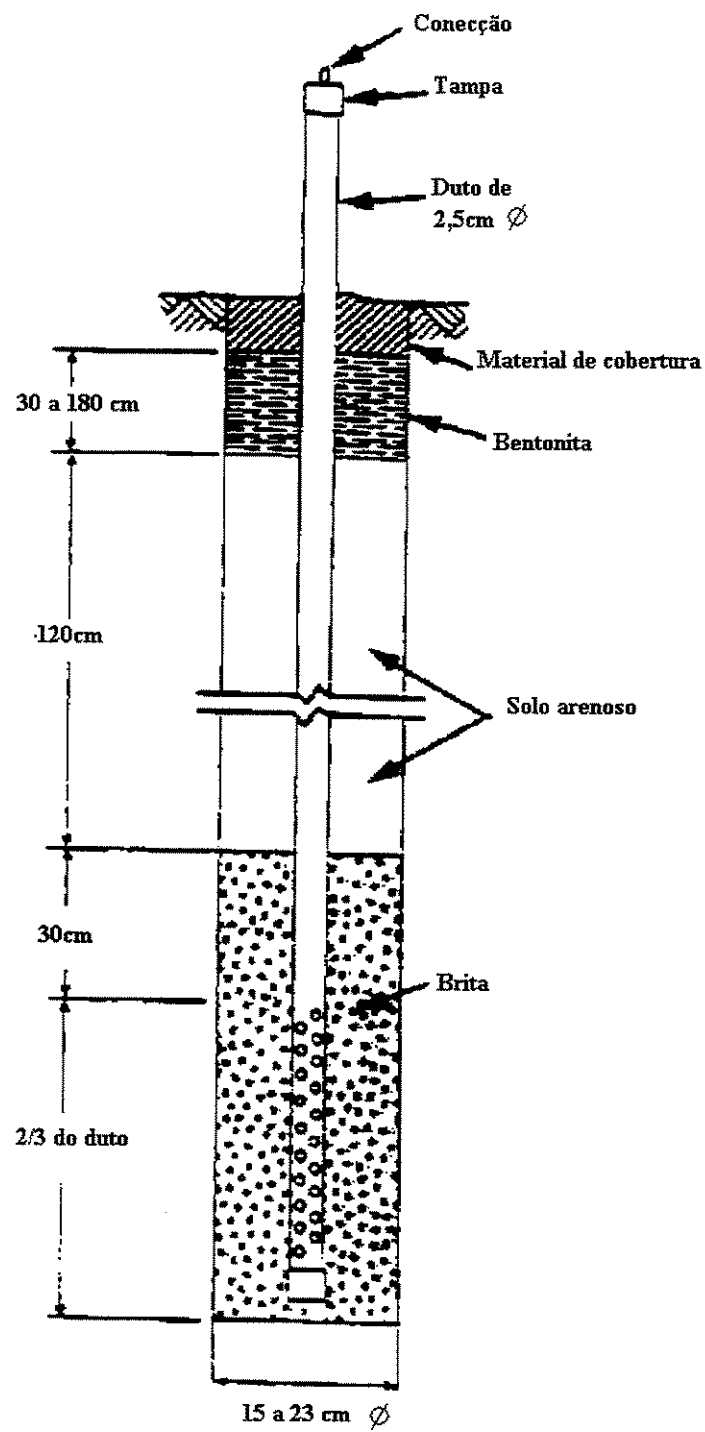


Figura D3. Esquema de um medidor de pressão

Os poços devem ser interligados para que um único exaustor e um único medidor de vazão sejam usados. A rede coleta deve contar ainda com um sistema de verificação de vazamentos com pontos de amostragem de gás na saída do poço e após a passagem pelo exaustor, controlando-se assim o nível de N_2 no biogás coletado. Para diferenças menores que 10.000 ppm o sistema é considerado sem vazamentos.

Os testes devem ser realizados em três etapas distintas:

Teste estático:

As válvulas de controle em cada poço devem ser fechadas e é realizada a medição da pressão manométrica de cada medidor profundo e barométrica a cada 8 horas por 3 dias. Deve ser obtida a média das medidas em cada medidor (P_{ia}) que será usada para o cálculo do raio de influência. Em seguida deve ser medida a vazão natural de biogás em cada poço com abertura das válvulas.

Teste de curta duração:

Este teste visa a obtenção da máxima vazão que pode ser imposta a cada poço sem a infiltração de ar no interior do aterro pela pressão negativa imposta. Deve ser realizado em um poço por vez, impondo-se o dobro da vazão obtida no teste estático. O teste deve ter duração de 24 horas para estabilização o sistema.

O teste de infiltração de ar no aterro deve ser feito medindo-se o teor de N_2 no biogás coletado. Caso menos de 1 % de N_2 seja detectado e a pressão nos medidores rasos seja positiva então o vácuo no exaustor deve ser aumentado em 50 mmca. O mesmo procedimento deve ser repetido a cada 24 horas até que o teor de N_2 seja maior que 1 % ou algum dos medidores de pressão rasos indique valor negativo.

Com a pressão no exaustor definida para o limite de penetração de ar no aterro, devem ser realizadas medições de pressão barométrica, vazão de biogás e pressão manométricas nos

medidores profundos a cada 8 horas por 1 dia. A média das pressões em cada medidor (P_{fa}) deve ser obtida e comparada com a média das medidas realizadas no teste estático.

Os medidores de pressão que indicarem a média P_{fa} menor ou igual a P_{ia} representam a distância do máximo raio de influência do poço (R_{ma}) atingido pelo vácuo do exaustor.

A profundidade da camada de lixo atingida pelo poço (D_{st}) é obtida pela somatória da profundidade do poço com o raio de influência.

O volume de influência pelo poço é calculado pela Equação D.1.

$$V = 0,40 \times R_{ma}^2 \times D_{st} \quad (D.1)$$

Esse procedimento deve ser repetido para cada poço.

Teste de longa duração

O teste de longa duração pretende retirar do aterro duas vezes o valor do volume de influência obtido no teste de curta duração.

Caso seja usado o mesmo exaustor para vários poços, todas as válvulas de controle de fluxo dos poços devem ser abertas com ajuste do vácuo do exaustor igual ao máximo obtido nos testes individuais realizados na etapa de curta duração. A cada 8 horas devem ser coletadas amostras do biogás na saída dos poços e medidas as pressões nos medidores rasos, o vácuo do exaustor e a vazão de biogás. O mesmo procedimento de detecção da infiltração de ar no aterro descrito no teste de curta duração deve ser adotado para esta etapa, sendo necessário em caso de

presença de N₂ acima da aceitável o fechamento das válvulas dos poços, mantendo-se o vácuo no exaustor.

O cálculo do volume total de biogás extraído dos poços segue a Equação D.2.

$$V_t = \sum_{i=1}^n 60Q_i t_{vi} \quad (D.2)$$

Sendo:

V_t : volume total de biogás extraído dos poços (m³);

Q_i : vazão de biogás obtida no medidor de vazão no intervalo i, (m³/min);

t_{vi} : tempo do intervalo i (normalmente 8 horas);

A vazão final estabilizada deve ser registrada. Caso não seja obtida uma condição de estabilização do fluxo, a média das últimas 10 medidas deve ser adotada. Também se registra a pressão em cada medidor profundo para esta condição (P_{sa}).

Em seguida devem ser comparadas as pressões P_{ia} e P_{sa} e determinado o novo raio de influência já estabilizado (R_{sa}) quando P_{sa} for menor ou igual a P_{ia} . A nova profundidade do lixo que é atingida pelo poço (D) é obtida com a soma de R_{sa} com a profundidade do poço.

Assim pode-se obter o volume de influência do poço (V_r) com a Equação D.3.

$$V_r = R_{sa} \pi D \quad (D.3)$$

A massa de lixo atingida pelo poço (M_r) é obtida pela equação D.4.

$$M_r = V_r \rho_l \quad (\text{D.4})$$

Sendo :

ρ_l : densidade do lixo (Kg/m^3)

Com os parâmetros anteriormente calculados pode-se obter o valor da constante de decaimento ('k') da Equação 2.9. por processo iterativo, testando-se valores de k na Equação D.5 até a conversão em zero com precisão de $\cong 0,001$.

$$-ke^{-kT_m} \left[\frac{Q_f}{2L_o M_r} \right] = 0 \quad (\text{D.5})$$

Sendo:

Q_f : vazão de biogás (m^3/ano)

L_o : potencial de geração de metano do lixo (m^3/t de lixo)

M_r : massa de lixo atingida pelo poço (t)

T_m : idade média do lixo depositado (anos)

k : constante de decaimento (ano^{-1})

Apêndice E

Instrumentos utilizados

Neste apêndice está apresentada a lista da instrumentação utilizada nos experimentos.

- Termo anemômetro de fio quente:
Fabricante: ALNOR Instrument Co.
Tipo: 8500
Nº 3226
- Termopar tipo K
- Milivoltímetro digital para leitura de termopar tipo K
Fabricante: ICEL
- “Bags” para coleta de gás feitos de Tedlar
Fabricante: Col Parmer Instruments Company
Tamanho: 12 x 12 in
- Bolhômetro 10 ml
Fabricante: Merse Artigos para Laboratório Ltda