UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA
EP – FEA – IEE – IF

NATALIE JIMENEZ VÉRDI DE FIGUEIREDO

UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – ESTUDO DE CASO

SÃO PAULO
2011

NATALIE JIMENEZ VÉRDI DE FIGUEIREDO

UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – ESTUDO DE CASO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física) para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Profª. Suani Teixeira Coelho

SÃO PAULO
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Figueiredo, Natalie Jimenez Vérdi

Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso / Natalie Figueiredo; orientador Suani Teixeira Coelho – São Paulo, 2011.

147 f.: Il.; 30cm.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1. Biogás. 2. Fontes alternativas de energia. 3. Energia de biomassa. I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

EP – FEA – IEE - IF

NATALIE JIMENEZ VÉRDI DE FIGUEIREDO

"Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – estudo de caso"

Dissertação aprovada pela Comissão Julgadora:

Profª Drª Suani Teixeira Coelho – PPGE/USP
Orientadora e Presidente da Comissão Julgadora

Profª Drª Patrícia Helena Lara dos Santos Matai – PPGE/USP

Profª Drª Sílvia Maria Stortini González Velázquez - FAAP

Aos meus pais, cujo exemplo e apoio me fizeram ser quem sou hoje; que abdicaram de muitos sonhos para que os meus pudessem ser realizados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e a todo apoio que me deram. Dedico este trabalho a vocês que sempre serviram de exemplo para a minha formação. Espero que possa ter lhes retribuído e que todo sacrifício tenha valido a pena.

Aos meus irmãos e irmã que participam da minha vida e a tornam mais especial a cada dia juntos.

Ao Rodrigo, parte de minha vida, por todo apoio e compreensão neste período.

Ao tio Gilmar que com certeza, onde quer que esteja, vibra por todas as minhas conquistas.

À orientadora Prof. Dra. Suani Teixeira Coelho pelos ensinamentos, oportunidades, paciência e todo o auxílio para elaboração deste trabalho.

A toda equipe do CENBIO pelo profissionalismo e trabalho em equipe, em especial a Vanessa Pecora, pelo convívio e amizade.

Ao IEE pela oportunidade do curso de mestrado e por contribuir com a minha formação, em especial aos professores Murilo Fagá e Patrícia Matai, professores incríveis na arte de ensinar.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para o meu sucesso. A todos amigos e professores que fizeram com que conseguisse tornar meu sonho realidade.

“O mundo é como um espelho que devolve a cada pessoa o reflexo de seus próprios pensamentos. A maneira como você encara a vida é que faz toda diferença.” (Luís Fernando Veríssimo).

RESUMO

FIGUEIREDO, N. J. V. Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso. 2011. 147P. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

A intensificação das atividades humanas nas últimas décadas tem gerado um acelerado aumento na produção de resíduos sólidos urbanos (lixo), tornando-se um grave problema para as administrações públicas e para a sociedade. O aumento desordenado da população e o crescimento sem planejamento de grandes núcleos urbanos dificultam as ações de manejo dos resíduos; além disso, o uso de lixões nos grandes centros urbanos ainda é uma prática comum, o que gera problemas de saúde e ambientais. A decomposição da matéria orgânica promove a liberação do biogás, cujos principais constituintes são o gás carbônico e o metano, que corresponde a cerca de 50% e é um gás de efeito estufa, cuja emissão acarreta no aquecimento global. Além disso, gera odores desagradáveis e oferece riscos de explosão. Os aterros sanitários são considerados atualmente uma alternativa das mais interessantes para geração do biogás, visto que podem dispor de técnicas de captação dos gases liberados através de dutos de captação e queima posterior em *flares*, onde o metano, principal constituinte do biogás é transformado em gás carbônico, que possui um potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor que o metano. Nestes aterros também existem dutos para captação do chorume, líquido proveniente da decomposição de resíduos orgânicos que se não for devidamente coletado, acarreta poluição dos recursos hídricos. Além da oportunidade de reduzir os danos ambientais é possível utilizar o biogás como combustível, gerando energia elétrica. Portanto, neste estudo é avaliado o potencial de geração de biogás do Aterro Essencis – CTR Caieiras, na cidade de Caieiras, SP, e a viabilidade técnica e econômica da implantação de um projeto de geração de energia elétrica com o biogás proveniente do mesmo, por meio de um estudo de caso. Este estudo mostrou que a metodologia utilizada para quantificar o potencial de biogás do aterro em questão aproxima-se do real captado e também que a CTR – Caieiras possui um alto potencial de geração de energia elétrica. Além disto, o grupo motogerador de 230 kW instalado no aterro é viável do ponto de vista econômico, podendo apresentar melhores resultados com a instalação de grupos motogeradores de maior porte.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. Biogás. Energia Elétrica. Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

FIGUEIREDO, N. J. V. Use of landfill biogas for electric energy production – Case study. 2011. 147P. Master's Dissertation. Graduate Program in Energy. University of São Paulo.

The intensification of human activities in the last few decades has brought about an accelerated increase in the production of urban solid wastes (garbage), becoming a serious problem for the public administrations and society. The disorderly increase in population and the unplanned growth of huge urban nuclei makes it difficult for the waste management actions; in addition, the use of dump areas in the major urban centers is still a common practice, what causes health and environmental problems. The decomposition of the organic matter releases biogas, which main constituents are the carbonic gas and methane, corresponding to approximately 50% and is a greenhouse gas, which emission causes global heating. In addition, it generates unpleasant odors and presents explosion risks. The sanitary landfills are currently regarded as one of the most interesting alternatives for biogas generation, as they can rely on techniques to capture the gases released, through a capturing ducts and subsequent burning in flares, where the methane - biogas main constituent - is transformed into carbonic gas which global heating potential is approximately 20 times lower than methane. Ducts are in place at these landfills to capture the leachate, a liquid deriving from the decomposition of organic wastes which, if not duly collected, pollutes the hydrological resources. Besides the opportunity to reduce the environmental damages, it is possible to use biogas as a fuel to generate electric power. Therefore, this study assesses the potential biogas generation of the Essencis Landfill – CTR Caieiras, in the city of Caieiras (SP), as well as the technical and economic feasibility for the deployment of an electric power generation project with the biogas deriving from same, by means of a case study. This study has showed that the methodology used in order to quantify the potential biogas from the landfill at issue is close to the actually captured one, and also that the CTR – Caieiras has a high potential for electric power generation. In addition, the 230 kW power generator installed at the landfill is feasible, from the economic point of view, and may present better results with the installation of greater size power generators.

Keywords: Landfill. Biogas. Electric Power. Solid Wastes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Participação das regiões do país no total de resíduos sólidos urbanos coletados.	24
Figura 3.1	Classificação dos Resíduos Sólidos.	41
Figura 3.2	Impermeabilização do solo.	51
Figura 3.3	Colocação de geomembrana de PEAD em aterro sanitário.	51
Figura 3.4	Geomembrana de PEAD em aterro sanitário.	52
Figura 3.5	Instalação dos dutos de captação de chorume.	53
Figura 3.6	Drenos de chorume.	53
Figura 3.7	Tanque de chorume.	54
Figura 3.8	Canalização de águas pluviais.	55
Figura 3.9	Etapas de construção de um aterro sanitário.	56
Figura 3.10	Rede de captação de biogás.	57
Figura 3.11	Tubos de coleta de biogás.	58
Figura 3.12	Tubos de coleta de biogás.	58
Figura 3.13	Compressores para *flare*.	59
Figura 3.14	*Flare*.	61
Figura 4.1	Desenho esquemático das etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto.	63
Figura 4.2	Turbina a gás: (a) circuito aberto – processo real de combustão interna; (b) circuito fechado – aproximação por um processo ideal de transferência de calor.	65
Figura 4.3	(a) Ciclo de ar-padrão de turbina a gás regenerativa. (b) Diagrama T x s do sistema regenerativo.	67
Figura 4.4	Microturbina baseada no ciclo Brayton aberto.	68
Figura 4.5	Ciclo de Rankine.	69
Figura 5.1	Vista aérea do aterro de Várzea Paulista.	76
Figura 5.2	Dreno de biogás preenchido de material cerâmico.	77
Figura 5.3	Vista do aterro de Sorocaba.	78
Figura 5.4	Vista aérea do CGR – Paulínia.	78
Figura 5.5	Impermeabilização do solo.	79
Figura 5.6	Dreno de captação do biogás.	79
Figura 5.7	Analisador instantâneo das características físico-químicas do biogás.	80

Figura 5.8	Tanque de retenção de chorume.	80
Figura 5.9	Esquema construtivo. (a) aterro classe I (b) aterro classe II.	81
Figura 5.10	Vista aérea do aterro – CTR Caieiras.	82
Figura 5.11	Vista do aterro classe I – CTR Caieiras.	83
Figura 5.12	Vista do aterro classe II – CTR Caieiras.	83
Figura 5.13	ETE – CTR Caieiras.	85
Figura 5.14	Transporte do biogás.	86
Figura 5.15	Planta de biogás – CTR Caieiras.	86
Figura 5.16	*Flares* – CTR Caieiras.	87
Figura 5.17	Motogerador LANDSET.	95
Figura 5.18	Container de 6 metros.	96
Figura 5.19	Cilindros de gás natural utilizados nos testes.	97
Figura 5.20	Bobina que apresentou defeito.	100
Figura 5.21	Turbina e voluta.	100
Figura 5.22	Planta de biogás e instalação do container.	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1	Oferta interna de energia no Brasil.	19
Gráfico 1.2	Oferta interna de energia Mundial.	19
Gráfico 1.3	Relação renda *per capita* e geração de resíduos.	20
Gráfico 2.1	Fases da degradação de resíduos sólidos.	31
Gráfico 2.2	Relação entre o poder calorífico do biogás e porcentagem de metano em volume.	35
Gráfico 3.1	Geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil.	39
Gráfico 3.2	Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos.	43
Gráfico 3.3	Destinação final dos RSU coletados no Brasil em 2009.	45
Gráfico 4.1	Eficiência térmica do ciclo de ar padrão frio Otto, k=1,4.	64
Gráfico 4.2	Ciclo de ar-padrão ideal Brayton.	66
Gráfico 4.3	Fatores de emissão em caldeiras para diferentes combustíveis.	71
Gráfico 4.4	Fator de emissão do CO_2 em caldeiras para diferentes combustíveis.	72
Gráfico 4.5	Comparação dos fatores de emissão para algumas tecnologias.	72
Gráfico 5.1	Curva de comportamento da vazão.	91
Gráfico 5.2	Curva de comportamento da potência	93
Gráfico 5.3	Curva de comportamento da energia.	94
Gráfico 5.4	Medições efetuadas durante o primeiro teste sem carga.	97
Gráfico 5.5	Medições do segundo teste sem carga.	98
Gráfico 5.6	Medições do primeiro teste com carga.	98
Gráfico 5.7	Medições do segundo teste com carga.	99
Gráfico 5.8	Medições do teste final.	101
Gráfico 7.1	Número de projetos por escopo setorial.	124
Gráfico 7.2	Atividades de projeto por estado brasileiro.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Potencial de geração de energia elétrica nos aterros pesquisados.	25
Tabela 2.1	Propriedades físicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico.	34
Tabela 2.2	Equivalência de 1Nm³ de biogás em relação a outros combustíveis.	35
Tabela 2.3	Poder calorífico inferior de alguns combustíveis.	37
Tabela 2.4	Técnicas empregadas para purificação do biogás.	37
Tabela 3.1	Destino final dos resíduos sólidos entre os anos de 1989 e 2008.	44
Tabela 3.2	Quantidade de municípios por modalidades praticadas de destinação final	45
Tabela 3.3	Despesas com coleta de resíduos sólidos urbanos por regiões.	45
Tabela 3.4	Tempo de decomposição dos resíduos sólidos na natureza.	46
Tabela 3.5	Dados do estudo da Usina de Tratamento Térmico	48
Tabela 4.1	Comparação entre as tecnologias de conversão.	70
Tabela 4.2	Limites de emissão para caldeiras a gás natural.	73
Tabela 4.3	Limites de emissão para caldeiras a biomassa (resíduos de madeira).	73
Tabela 4.4	Fatores de emissão para turbinas e microturbinas a gás.	73
Tabela 5.1	Previsão da quantidade de resíduos e ser depositados na CTR Caieiras.	84
Tabela 5.2	Vazão de biogás e metano captado.	89
Tabela 5.3	Potência e energia disponível em função da vazão de metano.	92
Tabela 5.4	Parâmetros ideais de pressão e temperatura do motor.	99
Tabela 5.5	Análise do biogás e dos gases de exaustão do motor.	102
Tabela 5.6	Parâmetros do sistema de geração de energia elétrica.	104
Tabela 6.1	Custo dos equipamentos, materiais e serviços do sistema de geração de energia elétrica.	106
Tabela 6.2	Plano de manutenção elaborado pelo fabricante do equipamento	108
Tabela 6.3	Número de intervenções no prazo de 10 anos.	109
Tabela 6.4	Fluxo de caixa do projeto.	112
Tabela 7.1	Valor de venda de energia elétrica.	119
Tabela 7.2	Energia contratada em 2010.	120
Tabela 7.3	Leilões de fontes alternativas de energia desde 2007.	121
Tabela 7.4	Situação dos projetos de aterros sanitários no Brasil.	125

Tabela 7.5 Políticas para promoção de energias renováveis. 128

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CGR	Centro de Gerenciamento de Resíduos
CIAS	Consórcio Intermunicipal para Aterro Sanitário
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COP	Conferência das Partes
CTR	Centro de Tratamento de Resíduos
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
DCP	Documento de Concepção do Projeto
EMAE	Empresa Metropolitana de Águas e Energia
EPA	Environmental Protection Agency
ESTRE	Empresa de Saneamento e Tratamento de Resíduos
EVTE	Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PIB	Produto Interno Bruto
PDD	Project Design Document
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RCE	Redução Certificada de Emissões
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
SSE	Secretaria de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 Justificativa 23
1.2 Estrutura da dissertação 27

2 ESTADO DA ARTE DO BIOGÁS 29
2.1 Histórico do biogás 29
2.2 Formação do biogás 30
2.2.1 Fatores que influenciam a geração de biogás 32
2.2.2 Aspectos físico-químicos 33
2.3 Características do biogás 36

3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 39
3.1 Definição e classificação 40
3.1.1 Classificação dos resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente 41
Fonte: ABNT (2004). 41
3.1.3 Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade 42
3.1.4 Composição do lixo urbano 42
3.2 Tratamento e disposição final dos resíduos 43
3.2.1 Compostagem 46
3.2.2 Tratamento Térmico de Resíduos 47
3.2.3 Reciclagem 49
3.2.4 Aterros Sanitários 49
3.2.4.1 Tecnologias de construção do aterro sanitário 50
3.2.4.2 Captação do biogás de aterro sanitário 56

4 TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA 62
4.1 Motores de combustão interna – ciclo Otto 62
4.2 Turbinas e microturbinas a gás 64
4.2.1 Ciclo de ar-padrão ideal Brayton 66
4.2.2 Ciclo Brayton com recuperação 67
4.2.3 Microturbinas 67
4.3 Caldeiras a vapor - Cogeração 68

4.4 Comparação entre as tecnologias de conversão 70

5 ESTUDO DE CASO 75

5.1 Objetivo do projeto 75

5.2 Seleção e caracterização do aterro sanitário para implementação do projeto 76

5.2.1 Caracterização do aterro selecionado 82

5.3 Determinação do potencial de biogás a ser produzido 87

5.3.1 Determinação da potência e energia disponível 91

5.4 Sistema de geração de energia elétrica 94

5.4.1 Realização dos testes no sistema 96

6 ASPECTOS ECONÔMICOS DA CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS 105

6.1 Custo de investimento 105

6.2 Custos de operação e manutenção 107

6.3 Avaliação econômica do sistema instalado na CTR-Caieiras 110

7 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA: ANÁLISE DE BARREIRAS E PROPOSTAS DE INCENTIVOS 114

7.1 Barreiras tecnológicas e econômicas 114

7.2 Barreiras socioambientais 115

7.3 Barreiras políticas 116

7.4 Propostas de Incentivos ao Uso Energético do Biogás 118

7.4.1 PROINFA 118

7.4.2 Protocolo de Quioto 121

7.4.3 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) 123

7.5 Propostas de Políticas ao Uso Energético do Biogás 127

7.5.1 Diretrizes legais e administrativas 129

7.5.2 Diretrizes políticas 130

7.5.3 Diretrizes financeiras e fiscais 130

7.5.4 Diretrizes tecnológicas 131

8 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS 132

REFERÊNCIAS 136

1 INTRODUÇÃO

O aumento da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera terrestre ao longo dos últimos anos, resultante da intensificação das atividades humanas, deve-se principalmente ao uso de combustíveis fósseis e ao desmatamento de florestas. Os efeitos globais das emissões dos GEE resultaram na quase duplicação da concentração atmosférica desses gases nos últimos 20 anos (CEPEA, 2004).

Desta forma, diminuir a dependência de combustíveis fósseis e não renováveis e buscar soluções ambientalmente corretas, como a utilização sustentável da biomassa como fonte de energia, não apenas reduzirá os impactos globais pela queima de combustíveis fósseis como também contribuirá para a sustentabilidade da matriz energética dos países. Além disto, o desenvolvimento de tecnologias que utilizem fontes renováveis de energia possibilita a geração de energia de forma descentralizada e em pequena escala, base fundamental para o desenvolvimento sustentável em países desenvolvidos e em desenvolvimento (COLDEBELLA et al., 2006).

O Brasil apresenta situação privilegiada em termos de utilização de fontes de energia renováveis, sendo que 47,3% (Gráfico 1.1) da oferta interna de energia são provenientes de fontes renováveis, enquanto a média mundial é de 12,9% (Gráfico 1.2). A oferta interna de energia, também conhecida como matriz energética é a quantidade de energia disponibilizada para posterior transformação, incluindo as perdas na distribuição (BEN, 2010). Mais de 85% da matriz mundial é proveniente de combustíveis fósseis, como carvão mineral, gás natural e derivados de petróleo, valor 65% superior ao da matriz brasileira.

Os principais GEE's são o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), que correspondem, respectivamente, a 50% e 17% do efeito estufa (CEPEA, 2004). Porém, como o potencial de aquecimento global do metano é cerca de 20 vezes superior ao dióxido de carbono, os programas que visam seu controle podem produzir resultados significativos. O controle de emissão de GEE e geração de energia a partir de fontes renováveis têm se tornado tema de grande interesse mundial.

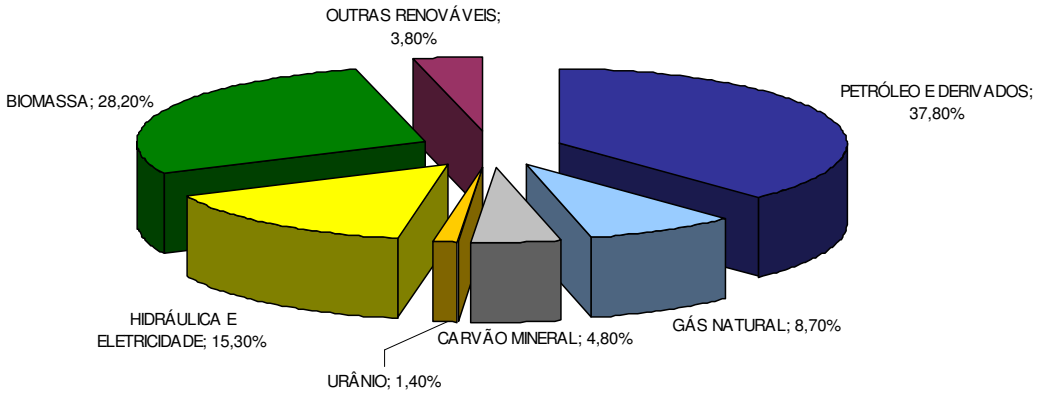

Gráfico 1.1. Oferta interna de energia no Brasil.

Fonte: BEN (2010).

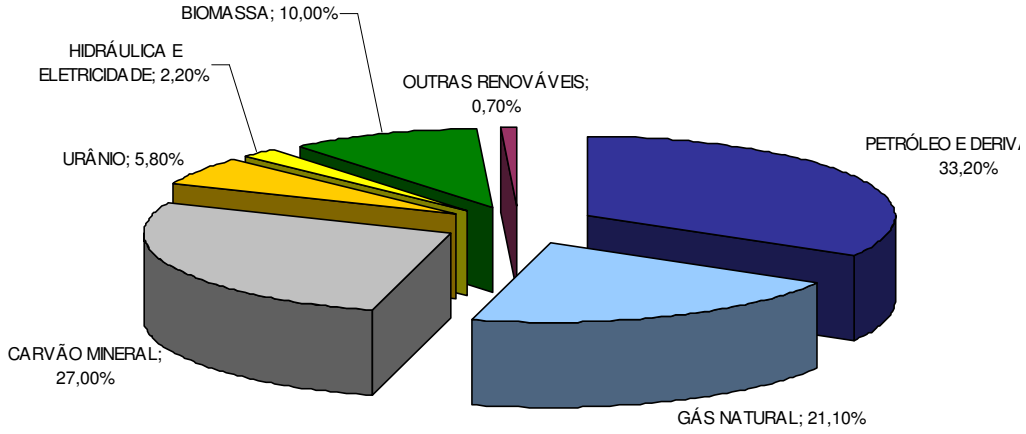

Gráfico 1.2. Oferta interna de energia Mundial.

Fonte: IEA (2010).

Ao contrário do dióxido de carbono, o metano tem uma grande variedade de fontes, podendo ser naturais ou antropogênicas. As fontes naturais são, por exemplo, terras alagadas e animais ruminantes e as antropogênicas são provenientes da agricultura, decomposição de resíduos de animais, decomposição do lixo e extração de combustíveis fósseis. Estimativas indicam que 60% das emissões globais de metano são oriundas das atividades humanas (EPA,

2009), sendo que destas, cerca de 12% é proveniente da degradação de resíduos sólidos em aterros (MTM, 2008).

A decomposição dos resíduos sólidos ocorre por meio de dois processos, sendo o primeiro aeróbio, que ocorre normalmente no período de deposição do lixo no solo. Após este período, com a redução do oxigênio presente nos resíduos, tem início a fase da decomposição anaeróbia. Durante esta fase ocorre a formação do biogás, composto tipicamente por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. Dependendo da eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano (PECORA, 2006) e sua formação e taxa de geração é variável ao longo do tempo, atingindo um pico entre o primeiro e segundo ano, e diminuindo continuamente por alguns anos.

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB (2006), a taxa de geração de resíduos no Brasil é de 0,5 kg/hab.dia, valor divergente do Intergovernamental Panel on Climate Change - IPCC e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, que apontam, respectivamente, as taxas de 1,47 kg/hab.dia e 2,2 kg/hab.dia. O Gráfico 1.3 compara valores de taxa de geração de resíduos entre países com diferentes rendas *per capita*, onde pode ser observado que países com alta renda apresentam maiores taxa de geração de resíduos por habitante, enquanto que os países de menores rendas apresentam menores taxas de geração. O valor estabelecido pela CETESB, quando comparado aos demais, acompanha melhor a tendência geral.

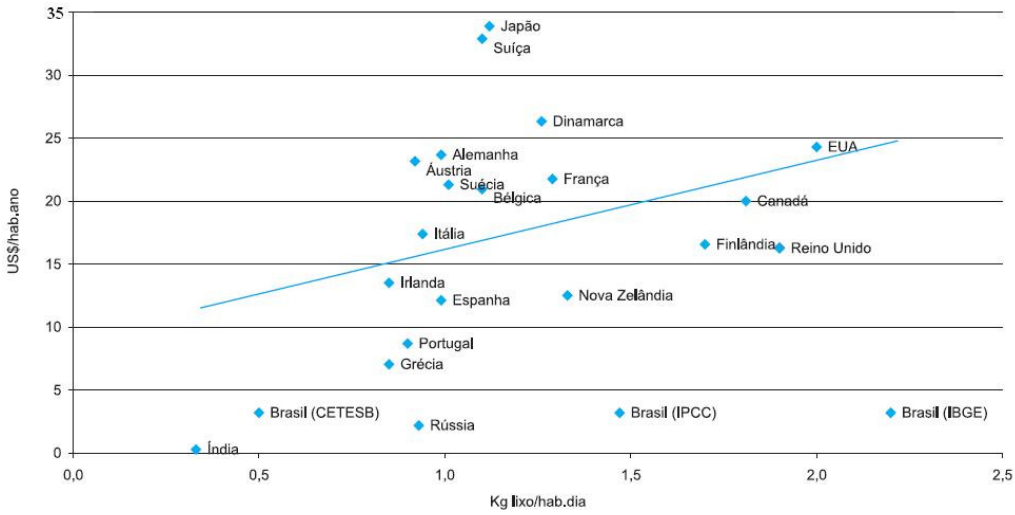

Gráfico 1.3. Relação renda *per capita* e geração de resíduos.

Fonte: CETESB (2006).

Nos grandes centros urbanos, a gestão dos resíduos sólidos de maneira eficiente é um grande desafio, onde o crescimento sem planejamento das cidades e o aumento da população dificultam esta gestão. Se os resíduos forem acumulados no meio ambiente de forma inadequada, podem resultar em problemas de saúde pública e ambientais como enchentes, transmissão de doenças, poluição do ar, solo e água.

Neste contexto, os aterros sanitários se apresentam como formas de disposição de resíduos no solo, realizadas de maneira segura e econômica, utilizando métodos de confinamento que utilizem a menor área possível. Neles, o solo é impermeabilizado com geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) evitando contaminação, os resíduos são compactados ocupando menor volume e, então, cobertos com camadas de terra. O chorume, líquido produzido durante a decomposição dos resíduos, é captado e transportado às estações de tratamento de efluentes, enquanto que o biogás gerado é captado e queimado, ou utilizado como combustível para geração de energia.

A captação do biogás é realizada por meio de uma rede coletora composta por drenos verticais perfurados e succionados por sopradores, equipamentos movidos a motores elétricos que criam pressão negativa na célula do aterro. Para retirada de condensado das tubulações e umidade do biogás são utilizados purgadores e desumidificadores e, após passar por sistemas de controle de pressão, temperatura e vazão, o biogás é conduzido ao *flare* (queimador) ou ao sistema de geração de energia elétrica.

Segundo Ensinas (2003), os primeiros projetos de aproveitamento energético de biogás tiveram início nos anos 70, nos Estados Unidos, visando controlar as emissões de metano e aproveitar uma nova fonte de energia frente à crise do petróleo. Posteriormente, países da Europa também iniciaram projetos de aproveitamento de biogás de aterros sanitários sendo que, atualmente, mais de 500 aterros no mundo possuem plantas de aproveitamento energético de biogás. Dentre os aproveitamentos energéticos, destaca-se a geração de energia elétrica e o uso direto como combustível utilizado nas indústrias e transporte.

No Brasil, dois grandes projetos de aproveitamento de biogás foram desenvolvidos na cidade de São Paulo, no aterro Bandeirantes, com área de 140 hectares e no aterro São João, com 84 hectares. As atividades de captação do biogás nestes aterros tiveram início em 2003 e 2005, respectivamente, e ambos contam com um potencial instalado de 20 MW em cada um, com motores de combustão interna importados. Por se tratar de projetos de empresas privadas, dados e resultados não são divulgados, impossibilitando um estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental, além da análise das barreiras existentes para este tipo de geração de energia.

Objetivando verificar a viabilidade da geração de energia elétrica e iluminação a gás a partir do biogás de aterro sanitário, o Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) iniciou o desenvolvimento do projeto "Aproveitamento do Biogás Proveniente do Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás", com o financiamento do Ministério de Minas e Energia (MME).

O projeto foi implantado na Central de Tratamento de Resíduos (CTR), localizado em Caieiras, na Rodovia dos Bandeirantes, km 33, SP e controlado pelo Grupo Essencis. A CTR Caieiras é a maior Central de Tratamento de Resíduos da América Latina e sua experiência é a base do desenvolvimento deste trabalho, incluindo a instalação de uma planta de geração de energia elétrica e a análise dos resultados. Esta Central de Tratamento foi escolhida por apresentar fatores favoráveis à instalação do projeto, como a fácil localização, elevado potencial de produção de biogás, rede de captação de gás estruturada, preocupação com o meio ambiente e com o desenvolvimento sustentável, além do grande interesse em participar deste projeto.

Os objetivos propostos no projeto do CENBIO contemplavam a instalação de um sistema de geração de energia elétrica composto por um motor ciclo Otto de 230 kW e um sistema de iluminação a gás, composto por 7 postes de iluminação com potência instalada de 750 W cada. Desde o término das instalações, o sistema de iluminação a gás apresentou problemas de funcionamento, visto que a pressão da linha de biogás não era suficiente para a iluminação da planta. Além disto, qualquer vazamento de biogás por estes postes, que operavam por queima direta do gás, resultaria em explosões e riscos de segurança para os funcionários do local. Desta forma, o sistema instalado foi adaptado para operar com a energia elétrica gerada pelo motor ciclo Otto.

Neste contexto, o objetivo central desta dissertação é avaliar o potencial de produção de biogás proveniente da decomposição dos resíduos sólidos urbanos, abordando os aspectos ambientais, técnicos e econômicos, bem como analisar a viabilidade da geração de energia elétrica em aterros sanitários, a partir de um modelo que possa ser facilmente replicado. O estudo baseou-se em uma unidade piloto instalada na CTR Caieiras, que utiliza o biogás produzido e captado nesta Central como combustível para geração de energia, utilizando motor ciclo Otto adaptado, com potência nominal de 230 kW, de fabricação nacional, e foi elaborado a partir do trabalho da autora no referido projeto. Haviam os número iniciais dos projetos CENBIO porém, devido a atualizações de dados e inconsistência de cálculos, todos estes valores foram revisados, recalculados e atualizados neste trabalho.

Na presente dissertação, portanto, serão apresentados os resultados do sistema instalado em Caieiras, o estudo de viabilidade técnico-econômico da tecnologia adotada, os programas de incentivo para geração de energia a partir do biogás e as barreiras existentes para tal energia alternativa.

1.1 Justificativa

Atualmente, a sociedade e a administração pública, se deparam com um grande desafio quanto à gestão dos resíduos sólidos, já que sua produção vem aumentando devido à intensificação das atividades humanas nas últimas décadas, dificultando o manejo e disposição correta dos mesmos.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2009) são coletadas diariamente 156.195 toneladas de resíduos sólidos urbanos, porém, mais de 7 milhões de toneladas deixam de ser coletadas anualmente apresentando um destino incerto e certamente inadequado, sendo vetores de doenças e poluição do meio ambiente. De todo o resíduo coletado no país, apenas 57% são destinados para aterros sanitários e anualmente, aproximadamente 22 milhões de toneladas são enviados a aterros controlados ou lixões, onde não recebem o tratamento final adequado. A Figura 1.1 mostra a contribuição das regiões do Brasil na destinação final do lixo, onde é possível observar que a região com maior participação na destinação dos resíduos é a Sudeste.

O aterro sanitário é a forma de disposição final adequada de resíduos sólidos urbanos no solo através do seu confinamento em camadas cobertas com terra, visto que atende às normas ambientais, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ao meio ambiente. Ao ser disposto no solo, os resíduos passam por um processo de degradação em que é liberado gás metano e, se este processo não for devidamente controlado por meio de sistemas de coleta e aproveitamento ou queima em *flare*, o mesmo será liberado à atmosfera. Além disto, por ser um gás altamente inflamável, o biogás pode apresentar risco de incêndio e explosões.

De acordo com Johannessen (1999), são gerados, em média, 200 Nm^3 de biogás para cada tonelada de resíduo disposto em aterros sanitários. Para que se torne viável explorar a recuperação energética do biogás, o aterro deve receber, no mínimo, 200 toneladas de

resíduos diariamente e ter capacidade de 500 mil toneladas ao longo de sua vida útil. Em 2004, o CEPEA realizou um estudo com 101 municípios das regiões metropolitanas do país, em sua maioria de médio e grande porte (acima de 200 mil habitantes) e estimado o potencial de geração de energia a partir do biogás nos aterros destas regiões, cujos cenários são mostrados na Tabela 1. No ano de 2011, é estimado um potencial entre 322,7 e 399,3 MW, capaz de suprir o consumo energético de uma cidade com cerca de 1,5 milhões de habitantes, partindo-se da premissa do consumo energético *per capita* de 2.662 kWh/ano (BEN, 2010).

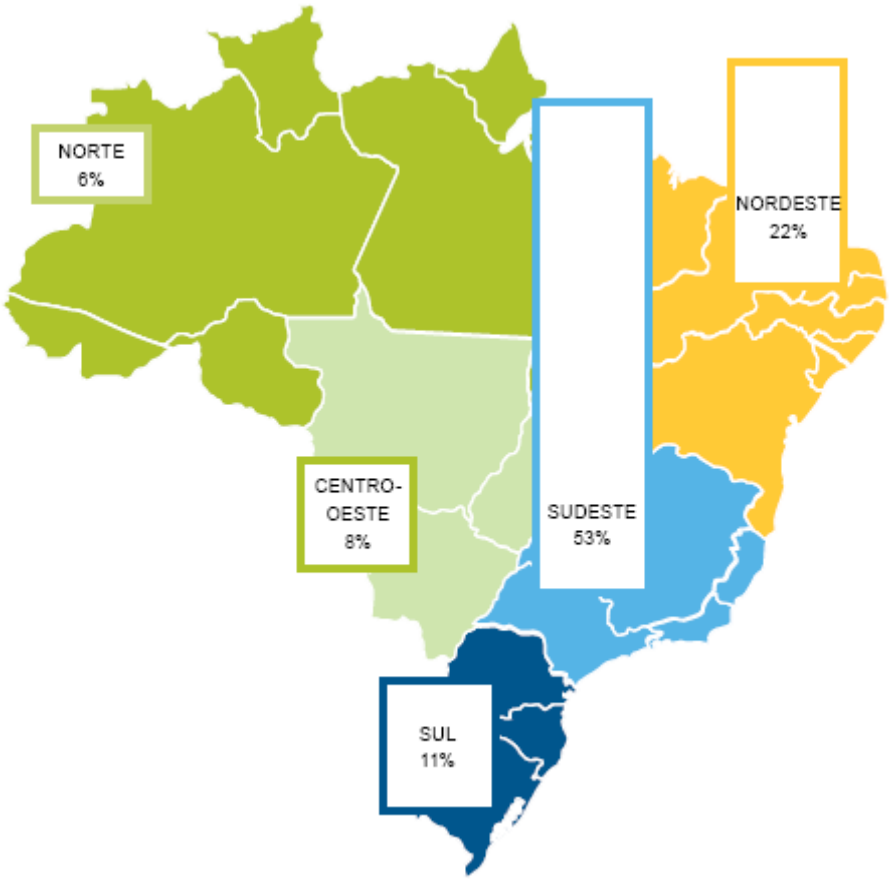

Figura 1.1. Participação das regiões do país no total de resíduos sólidos urbanos coletados.

Fonte: ABRELPE (2009)

A energia proveniente do biogás de aterro sanitário, ganha importância frente às novas políticas de geração de energia a partir de biomassa e outras fontes renováveis, visto que podem reduzir o consumo de combustíveis fósseis. A descentralização da geração de energia promove a diminuição das perdas na transmissão, já que a geração está próxima ao centro de carga e à captação do biogás. A impermeabilização do solo possibilita a redução da formação

de chorume, evita a contaminação do solo, além de diminuir vazamentos de gás e odores desagradáveis nas proximidades do local.

Tabela 1.1. Potencial de geração de energia elétrica nos aterros pesquisados.

Cenários (Ano)	Otimista	Conservador
	(MW)	
2005	344,3	278,3
2006	352,9	258,3
2007	361,7	292,4
2008	370,8	299,7
2009	380,0	307,2
2010	389,5	214,9
2011	399,3	322,7
2012	409,3	330,8
2013	419,5	339,1
2014	430,0	347,6
2015	440,7	356,2

Fonte: CEPEA (2004)

A utilização do biogás apresenta outros efeitos positivos, visto que a conversão energética possibilita a recuperação do capital e incrementa a viabilidade econômica da planta. O impacto ambiental negativo advindo da captação do biogás é praticamente inexistente quando comparado ao benefício global gerado. A geração de energia pode proporcionar receita extra para as prefeituras, proveniente da comercialização de energia, viabilizará disposição adequada e o tratamento de resíduos, além de diminuir a rejeição social dos aterros, já que passariam a ser gerenciados de forma correta.

Além disto, o MDL, instrumento financeiro para abatimento de emissões e sequestro dos gases de efeito estufa, pode ser utilizado de forma a viabilizar projetos como estes. O MDL permite a certificação de projetos de redução de emissões nos países em desenvolvimento e posterior venda destas reduções aos países desenvolvidos, a fim de que estes cumpram as metas de redução de emissões estabelecidas.

O primeiro projeto de MDL no mundo a ter seu registro aprovado pela Organização

das Nações Unidas (ONU) foi o Nova Gerar, desenvolvido em 2004 no aterro de Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. Em seu escopo estava contemplada a desativação do lixão da Marambaia e a construção de um aterro sanitário no mesmo local. O biogás captado é queimado em flare e, até 2016 serão instaladas duas plantas de geração de energia elétrica com potencial total de 9 MW. Os créditos de carbono obtidos até 2012 serão negociados diretamente com a Holanda (GAIOTTO, 2009).

Atualmente, os projetos de MDL no Brasil representam 7% do total mundial, sendo superado apenas pela Índia e China e, em termos de potencial de redução de emissões, o país é responsável pela redução anual de 398.867.673 tCO_2e, que corresponde a 5% do total mundial (CIMGC, 2011).

Desta forma, este trabalho pretende apresentar a possibilidade de diminuição das emissões de metano para a atmosfera e a busca de novas tecnologias para geração de energia elétrica, por meio de uma fonte renovável, bem como o incentivo ao saneamento básico. Além disso, representará oferta de energia, reduzindo o consumo de energia proveniente de fontes não renováveis. A geração de energia por meio da utilização do biogás de aterros se enquadra nos quesitos de desenvolvimento sustentável, visto que deixaria de ser lançada na atmosfera grande quantidade de metano.

As análises conduzidas neste estudo poderão orientar como e onde os sistemas de geração de energia elétrica utilizando biogás como combustível podem ser inseridos, bem como os benefícios e as principais barreiras para sua implantação. Porém, é importante ressaltar que os aterros não são a melhor solução para a disposição final dos resíduos, visto que ocupam grandes áreas que não poderão ser utilizadas futuramente, devido à sua instabilidade após o encerramento e necessidade de constante monitoramento a fim de evitar explosões ou vazamentos de biogás.

A correta gestão dos resíduos sólidos urbanos deve preocupar-se inicialmente em reduzir o volume de lixo gerado, reciclar todo o resíduo possível (orgânico e inorgânico), realizar o tratamento térmico o restante aproveitando todo o seu potencial energético e por fim, enviar apenas os rejeitos aos aterros sanitários, diminuindo assim as áreas necessárias para esta destinação final.

Além disto, com a urbanização dos municípios e a saturação dos aterros locais, os resíduos sólidos urbanos estão sendo transportados a distâncias cada vez maiores, encarecendo o custo de sua disposição final e contribuindo com a emissão dos gases de efeito estufa provenientes de seu transporte. De acordo com Cortez (2011), este distanciamento é o resultado não apenas de falta de áreas disponíveis, mas também da rejeição da sociedade pela

construção de aterros próximos a áreas residenciais, visto que esta construção resulta em depreciação imobiliária, intensa movimentação de caminhões, forte odor desagradável, ruídos, poluição visual, além da possibilidade de poluição do solo e das águas.

No Brasil, muitos municípios transportam seus resíduos por longas distâncias a fim de obter a destinação final adequada. No Rio Grande do Sul, uma pesquisa realizada por uma Comissão Especial criada para tratar apenas o assunto dos resíduos sólidos no Estado concluiu que 65% de seus municípios fazem um deslocamento superior a 50 km, sendo que destes, 27% percorrem distâncias entre 50 e 100 km, 27% entre 100 e 200 km e 11% por mais de 200 km. Como exemplo desta situação pode-se citar o município Dom Pedrito que destina os seus resíduos em São Gabriel, a 180 quilômetros de distância, e Bento Gonçalves, cujos resíduos percorrem 200 km até serem destinados em Minas do Leão (CERS, 2008).

Em vários países da Europa, as políticas governamentais estão direcionadas para os tratamentos térmicos, não apenas pela redução de volume dos resíduos, como pela segurança quanto aos riscos ambientais e a possibilidade de instalação em locais mais próximos aos pontos de geração. Segundo Cortez (2011), no Brasil ainda existe resistência a este processo devido ao receio das características de toxidade dos gases de exaustão, porém em novembro de 2009 a Secretaria do Meio Ambiente (SMA, 2009) instituiu a Resolução nº 79/2009 estabelecendo as diretrizes e condições para a operação e licenciamento do tratamento térmico de resíduos no Estado de São Paulo.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em oito capítulos principais, conforme estrutura detalhada a seguir.

O primeiro capítulo “Introdução” apresenta a contextualização do trabalho, caracterizando o tema desta pesquisa, os objetivos do estudo, bem como a justificativa da escolha deste tema.

No capítulo 2 “Estado da arte do biogás” faz-se uma revisão bibliográfica sobre o biogás e seu histórico, os aspectos e fatores que influenciam sua formação, bem como as características deste gás e os processos de purificação para utilização do mesmo como combustível para geração de energia elétrica.

O capítulo 3 “Resíduos sólidos urbanos” traz a definição destes resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente, bem como quanto à natureza e origem. Também apresenta a composição média do lixo urbano no país, o percentual de resíduos coletados, por destinação final e os custos envolvidos nesta destinação. A partir desta análise, o capítulo apresenta os tipos de tratamento e disposição final dos resíduos: compostagem, incineração, reciclagem e, por fim, os aterros sanitários. São descritas as tecnologias de construção de um aterro sanitário, bem como a forma de captação, compressão, tratamento (purificação) e queima do biogás produzido.

O quarto capítulo “Tecnologias para a conversão do biogás em energia” apresenta as características de diferentes tecnologias que permitem realizar a queima do biogás para geração de energia, como motores de combustão interna, turbinas e microturbinas a gás e caldeiras. Por fim uma comparação entre as tecnologias apresentadas é apresentada.

O capítulo 5 “Estudo de caso” se inicia com o objetivo do projeto e com as etapas para a seleção e caracterização do aterro sanitário para a implementação do mesmo. A partir da determinação do aterro, são apresentados os dados técnicos para a determinação do potencial de biogás a ser produzido e, a partir deste potencial, a determinação da potência e energia disponíveis. Por fim, é apresentado o sistema de geração de energia elétrica instalado no aterro, bem como os testes executados no startup do sistema.

No sexto capítulo, “Aspectos econômicos da conversão energética do biogás” apresenta os custos de investimento do sistema de energia elétrica instalado na CTR de Caieiras, bem como todos os custos de operação e manutenção preditiva, preventiva e corretiva inerentes à este sistema. Por fim é feita a avaliação econômica do sistema, a partir dos dados previamente estabelecidos.

O capítulo 7 “Utilização do biogás como fonte de energia: análise de barreiras e propostas de incentivos” descreve as barreiras tecnológicas, socioambientais, econômicas e políticas, bem como programas de incentivo ao uso energético do biogás, como o PROINFA, Protocolo de Quioto, Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Por fim, são apresentadas propostas de políticas para a utilização deste gás, baseadas em diretrizes legais, administrativas, políticas, financeiras, fiscais e tecnológicas.

E no último capítulo, “Conclusões e propostas para novas pesquisas” são apresentadas as conclusões finais dos temas abordados neste trabalho, bem como propostas para novos estudos neste contexto.

2 ESTADO DA ARTE DO BIOGÁS

O biogás, até pouco tempo, era apenas considerado um subproduto obtido por meio da decomposição de resíduo urbano, do tratamento de efluentes domésticos e resíduos animais. Porém, a alta dos preços dos combustíveis convencionais e o crescente desenvolvimento econômico vêm estimulando pesquisas de fontes renováveis para produção de energia tentando criar, deste modo, novas formas de produção energética que possibilitem a redução da utilização dos recursos naturais esgotáveis.

A conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgotos domésticos e de resíduos sólidos, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos (COSTA, 2002).

2.1 Histórico do biogás

Segundo Coelho et al. (2001), a descoberta do biogás, também denominado gás dos pântanos, foi atribuída a Shirley em 1667. Já em 1776, Alessandro Volta reconheceu a presença de metano no gás dos pântanos. No século XIX o aluno de Louis Pasteur Ulysse Grayon realizou a fermentação anaeróbia (decomposição sem presença de oxigênio) de uma mistura de estrume e água, a 35ºC, obtendo então 100 litros de gás/m³ de matéria. No ano de 1884, ao apresentar os trabalhos do seu aluno à Academia das Ciências, Louis Pasteur considerou que a fermentação podia construir uma fonte de aquecimento e iluminação (PECORA, 2006).

Em 1808, Sir Humphry Davy mostrou a possibilidade de obtenção de metano a partir da digestão anaeróbica de esterco bovino e, cerca de 50 anos depois, teve início a operação da primeira planta de digestão anaeróbica em Bombaim, na Índia. Outro exemplo do aproveitamento do biogás ocorreu na Inglaterra em 1895, onde o biogás recuperado de poços

de estações de tratamento de esgoto era utilizado como combustível para luminárias nas ruas de Exeter (HENRIQUES, 2004).

No início dos anos de 1920, a digestão ocorria em lagos anaeróbicos, porém, com o conhecimento e controle do processo, emergiram modos operacionais e tecnologias mais sofisticadas. Nas décadas de 50 e 60, Índia e China foram os primeiros países a utilizar o processo de biodigestão, sendo que desenvolveram seus próprios modelos de biodigestores. A tecnologia da digestão anaeróbia foi trazida para o Brasil com a crise do petróleo na década de 70. Diversos programas de difusão foram implantados no nordeste, porém os resultados não foram satisfatórios e os benefícios obtidos não foram suficientes para dar continuidade ao programa (COELHO et al., 2001).

De acordo com Pecora (2006), com a crise do petróleo, diversos países buscaram alternativas para sua substituição, acarretando em um grande impulso na recuperação de energia gerada pelos processos de tratamento anaeróbio. Esses processos foram ficando mais complexos abrangendo, também, o tratamento de resíduos sólidos municipais e resíduos industriais. Porém, as soluções para os problemas de desenvolvimento devem ser apropriadas às necessidades, capacidades e recursos humanos, recursos financeiros e cultura e, deste modo, o impulso recebido durante a crise não chegou a substituir os recursos não renováveis por fontes renováveis.

2.2 Formação do biogás

O biogás é formado a partir da degradação da matéria orgânica. Sua produção é possível a partir de uma grande variedade de resíduos orgânicos como lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, lodo de esgoto, entre outros. É composto tipicamente por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. Estes percentuais são variáveis e dependentes do tipo do resíduo, do tratamento e, de acordo com a eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano.

No aterro sanitário, a decomposição da matéria orgânica ocorre por meio de dois processos. Inicialmente, durante a deposição de resíduos no solo, tem início a decomposição

aeróbica e, após a cobertura dos resíduos, com a redução do O_2 presente, inicia-se a fase de decomposição anaeróbica.

A taxa de geração do biogás a partir da decomposição de resíduos é variável ao longo do tempo. Em condições normais, a taxa de decomposição atinge um pico entre o primeiro e segundo ano, diminuindo continuamente por alguns anos. Ela pode ser dividida em cinco fases em função de sua biodegradabilidade, ou quatro se desconsiderar a segunda, por ser uma fase de transição, conforme mostrado no Gráfico 2.1.

Segundo Borba (2006), a primeira fase considera o período em que os resíduos são depositados no solo e tem início a decomposição aeróbia, que se estende por períodos de horas ou dias até que seja realizada a cobertura dos mesmos, diminuindo a presença de oxigênio. A segunda fase é conhecida como fase de transição, período onde o nível de oxigênio diminui e a fase anaeróbia é iniciada. Nesta, os microorganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano iniciam a formação de ácidos graxos e outros produtos intermediários.

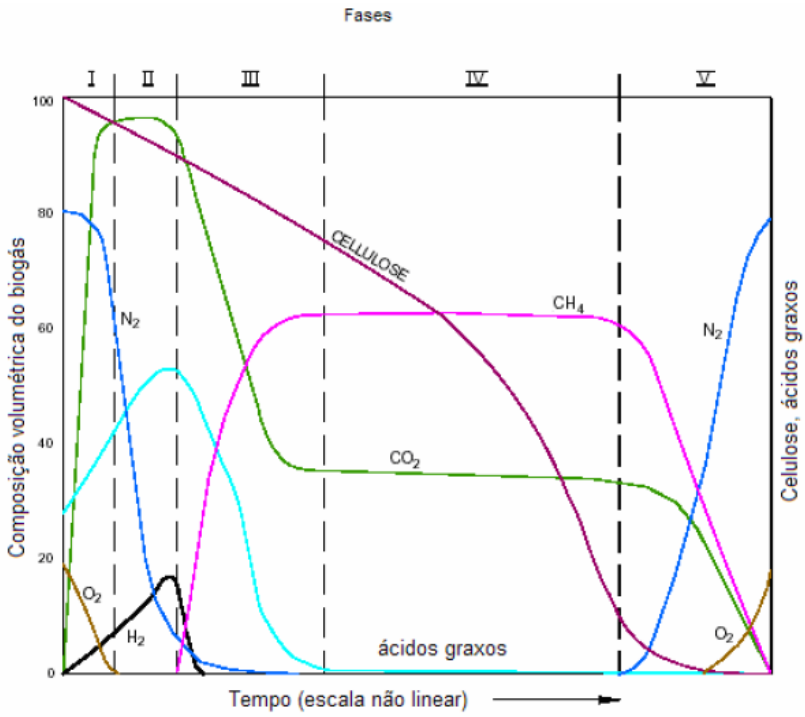

Gráfico 2.1. Fases da degradação de resíduos sólidos.

Fonte: DUARTE (2006).

Na fase seguinte (ácida), que antecede a formação do metano, as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas, produzindo compostos com baixa massa molecular, como o ácido acético e concentrações reduzidas de outros ácidos mais complexos. A fase quatro é onde predominam os microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem o ácido acético e hidrogênio, produzido na fase anterior, em metano e dióxido de carbono.

Após a degradação de grande parte da matéria orgânica e conversão em metano e dióxido de carbono, tem início a maturação, última fase. Como a umidade continua através da massa de lixo, porções que até então não haviam degradado acabam reagindo e a taxa de geração do biogás diminui, visto que a maior parte dos nutrientes foi consumida nas fases anteriores. A duração de cada fase de produção de biogás depende da distribuição dos componentes orgânicos no solo, da quantidade de nutrientes disponível, da umidade dos resíduos e do seu grau de compactação. Uma previsão geral é que a geração do biogás após o encerramento da célula do aterro se prolongue por cerca de 20 anos (FREITAS, 2007).

2.2.1 Fatores que influenciam a geração de biogás

Segundo Brito Filho (2005), a capacidade de um aterro gerar gás vai depender de muitos fatores como, por exemplo, a composição do resíduo, umidade, pH, entre outros. Os fatores que afetam a geração de biogás são descritos a seguir:

a) Composição do resíduo – quanto maior a porcentagem de material orgânico na composição do resíduo, maior será o potencial de produção de biogás no aterro. Resíduos de alimentos são exemplos de matéria orgânica facilmente decomposta, o que acelera a taxa de produção do gás, enquanto que materiais que se decompõem lentamente, como grandes pedaços de madeira, não contribuem significantemente para a geração de gás;
b) Umidade – as condições de umidade no aterro dependem de diversos fatores, como a umidade com que o resíduo chega ao aterro, o percentual de infiltração da água da superfície e do solo, da pluviosidade regional, além da água produzida durante a decomposição. Quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção do biogás;
c) Tamanho das partículas – quanto menor a unidade da partícula, maior será a área da superfície específica e, portanto, a decomposição será mais rápida se comparada a uma

partícula de menor área. Por exemplo, a decomposição de um tronco de madeira ocorrerá mais rápida se este for cortado em pedaços menores ao invés de ser disposto inteiro;

d) Idade do resíduo – a geração do biogás num aterro possui duas variáveis dependentes do tempo: tempo de atraso (período que vai da disposição do resíduo até o início da geração do metano) e tempo de conversão (período que vai da disposição do resíduo até o término da geração do metano). Os resíduos novos possuem potencial de geração de metano maior, quando comparados à resíduos antigos que, em condições de umidade adequada, já passaram pelos processos de decomposição;

e) pH – dentro da faixa ótima de pH a produção do metano é maximizada, enquanto que fora dessa faixa – um pH abaixo de 6 ou acima de 8 – a produção de metano fica estritamente limitada;

f) Temperatura – as condições de temperatura de um aterro influenciam os tipos de bactérias predominantes e o nível de produção de gás. As máximas temperaturas do aterro freqüentemente são alcançadas dentro de 45 dias após a disposição dos resíduos, como um resultado da atividade aeróbia microbiológica. Elevadas temperaturas de gás dentro de um aterro são o resultado da atividade biológica. As temperaturas típicas do gás produzido eu um aterro variam, tipicamente, entre 30 a 60º C; e

g) Outros fatores – Outros fatores que podem influenciar a taxa de geração de gás são os nutrientes, bactérias, compactação de resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos variáveis.

2.2.2 Aspectos físico-químicos

Visto que no biogás as concentrações de outros gases são muito pequenas se comparados ao metano e gás carbônico, pode-se restringir as propriedades físico-químicas apenas a esses dois componentes. Porém, esses gases presentes em menor quantidade, como por exemplo, o gás sulfídrico, influenciam na escolha da tecnologia de operação, limpeza e combustão (PECORA, 2006). Algumas propriedades físicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico podem ser observadas na Tabela 2.1.

O principal componente do biogás é o metano, quando se trata de utilizá-lo como combustível. Segundo Alves (2000), a presença de substâncias não combustíveis no biogás

(água, dióxido de carbono) prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente. Estas substâncias entram com o combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. O poder calorífico do biogás se torna menor à medida que se eleva a concentração das impurezas.

Tabela 2.1. Propriedades físicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico.

Propriedades	Metano (CH_4)	Dióxido de Carbono (CO_2)	Gás Sulfídrico (H_2S)
Peso Molecular	16,04	44,01	34,08
Peso Específico Ar=1	0,555[a]	1,52[a]	1,189[b]
Volume Específico	1.473,3cm³/g[a]	543,1cm³/g[a]	699,2cm³/g[a]
Capacidade Calorífica, Cp, a 1 atmosfera	0,775 kcal/kg°C[a]	0,298 kcal/kg°C[a]	0,372 kcal/kg°C[a]
Relação CP/CV	1,307	1,303	1,320
Poder Calorífico	13.268 kcal/kg	0 kcal/kg	4.633 kcal/kg
Limite de Inflamabilidade	5-15% por volume	Nenhum	4-46% por volume

Obs.: [a] -60 º C, 1 atm; [b] -70 º C, 1 atm; [c] -77 º C, 1 atm.

Fonte: PECORA (2006).

Segundo Pecora (2006), outros aspectos importantes que devem ser considerados são a umidade, visto que afeta a temperatura da chama, diminuição do poder calorífico e limites de inflamabilidade. Outro parâmetro importante quando se deseja a manipulação do gás para armazenamento é o volume específico, representado pelo peso específico. Estudos realizados mostraram que, de acordo com a quantidade de metano no biogás seu poder calorífico aumenta, visto que o CO_2 é a forma mais oxidada do carbono não podendo ser queimado.

O Gráfico 2.2 mostra a relação entre o poder calorífico do biogás (kcal/m³) e a porcentagem de metano, em volume, presente no mesmo.

A equivalência energética do biogás, em relação a outros combustíveis é determinada levando em conta o poder calorífico e a eficiência média de combustão. A Tabela 2.2 mostra a equivalência de 1Nm³ de biogás.

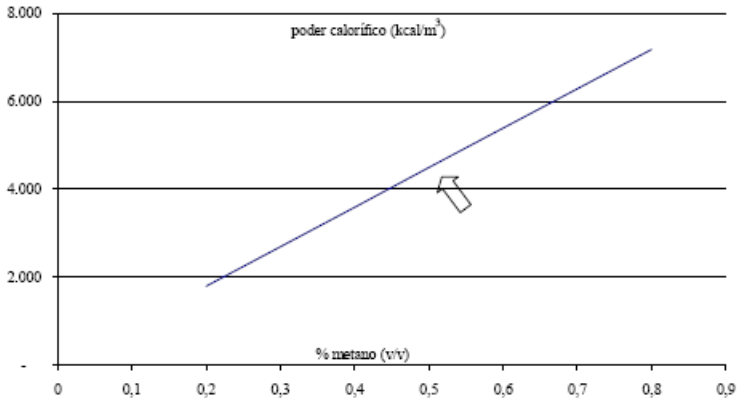

Gráfico 2.2. Relação entre o poder calorífico do biogás e porcentagem de metano em volume.

Fonte: ALVES (2000).

Tabela 2.2. Equivalência de 1Nm³ de biogás em relação a outros combustíveis.

Combustível	Quantidade equivalente a 1Nm³ de biogás
Carvão Vegetal	0,8 kg
Lenha	1,5 kg
Óleo Diesel	0,55 l
Querosene	0,58 l
Gasolina Amarela	0,61 l
GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	0,45 l
kWh	1,43
Álcool Carburante	0,80 l
Carvão Mineral	0,74 kg

Fonte: CARDOSO FILHO (2001).

O biogás pode substituir outros combustíveis utilizados na indústria. Como pode ser verificado na Tabela 2.2, com 1Nm³[1] de biogás obtêm-se a energia equivalente à de 1,5 kg de lenha ou 0,74 kg de carvão mineral, por exemplo.

Visto que é uma fonte primária de energia, o biogás pode ser utilizado para iluminação de residências, aquecimento de água, além de aquecimento de caldeiras e fornos em usos industriais. O biogás não é tóxico, porém atua sobre o organismo humano diluindo o

[1] A unidade Normal Metro Cúbico (Nm³) é referente à Condição Normal de Pressão e Temperatura (CNPT) de 0ºC e 1 atm.

oxigênio, o que pode provocar morte por asfixia. Não é solúvel em água e sua combustão não libera resíduos, porém emite NOx (LIMA, 2005).

2.3 Características do biogás

As características do biogás dependem da pressão, umidade, temperatura, concentração do gás metano e concentração dos gases inertes. A presença de substâncias não combustíveis em sua composição como, por exemplo, a água e o dióxido de carbono, resulta na diminuição de sua eficiência, visto que estas substâncias absorvem parte da energia gerada. Portanto, na medida em que o percentual destas substâncias aumenta, o poder calorífico do biogás diminui.

A presença de vapor de água na composição deste gás também prejudica as instalações utilizadas para sua conversão energética, podendo agir como agente corrosivo após sua condensação, enquanto que o gás carbônico ocupa um volume desnecessário, resultando na necessidade de maior capacidade de armazenamento. Além disto, o gás sulfídrico, mesmo em pequenas concentrações, pode acarretar na corrosão das partes metálicas, bem como na diminuição de eficiência e vida útil dos equipamentos utilizados.

Desta forma, o estudo para determinar a viabilidade da utilização do biogás como combustível leva em conta, inicialmente, sua equivalência energética comparada à do combustível que será substituído. Porém, não apenas o poder calorífico (Tabela 2.3) do combustível deve ser avaliado, mas também a presença de contaminantes e outras substâncias citadas anteriormente, que poderão influenciar significativamente nos custos de operação e manutenção das instalações. O poder calorífico do biogás pode variar entre 4,17 e 8,04 kWh/Nm³, considerando uma concentração de metano na mistura de 40 e 80%, respectivamente.

Já o metano puro apresenta um poder calorífico de 8.500 kcal/Nm³ e, desta forma, 10% de CO_2 na mistura gasosa do biogás representa aproximadamente 850 kcal/Nm³ a menos no poder calorífico (MAGALHÃES et al., 2004).

Tabela 2.3. Poder calorífico inferior de alguns combustíveis.

Combustível	PCI
Bagaço de cana (20% água)	3.200 kcal/kg
Carvão vegetal	7.500 kcal/kg
Gás de alto forno	700 kcal/Nm³
Biogás	5.000 kcal/Nm³
Gás natural	9.400 kcal/Nm³
Óleo Combustível (1A)	9.750 kcal/kg
Óleo de soja	8.125 kcal/l
Óleo diesel	8.620 kcal/l
Cavaco eucalipto	4.300 kcal/kg

Fonte: AALBORG (2008).

De acordo com Alves (2000), estas considerações contribuem para a determinação das adaptações necessárias nas máquinas que utilizarão o biogás como combustível e as técnicas usualmente empregadas na purificação deste gás são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Técnicas empregadas para purificação do biogás.

Remoção de:	Descrição Geral	Detalhes
Água	Adsorção	Sílica Gel Peneira molecular Alumina
	Absorção	Etileno glicol Selexol
	Refrigeração	Resfriamento a 2ºC
CO_2 e H_2S	Absorção	Solventes orgânicos Selexol, flúor, soluções de sais alcalinos
	Adsorção	Peneira molecular Carvão ativado
	Separação por membranas	Membranas de fibra oca

Fonte: ALVES (2000).

De acordo com Magalhães et al (2004), a tecnologia mais utilizada para purificação do biogás é a lavagem do gás com água, devido à grande solubilidade do CO_2 e do H_2S. Em um experimento simples e de baixo custo com colunas de absorção, os autores removeram 18% do CO_2 (inicialmente com 33%), resultando em um aumento do poder calorífico de mais de 27%.

O Centro de Gás da Suécia, por sua vez, avaliou o desempenho da purificação em 11 plantas de biogás, determinando que os custos desta atividade são proporcionais ao tamanho da planta. Para plantas de grande volume (200 a 300 Nm^3/h) o custo de purificação representa, aproximadamente, um terço do custo de uma planta de 100 Nm^3/h (SGC, 2005).

3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O aumento desordenado da população e o crescimento sem planejamento de grandes núcleos urbanos dificulta as ações de manejo dos resíduos e, por falta de recursos, essas ações acabam sendo postergadas acarretando problemas de saúde e ambientais. Esses resíduos, quando acumulados no meio ambiente de forma inadequada, causam problemas de poluição e caracterizam também um desperdício da matéria originalmente utilizada.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2009), no ano de 2009 o Brasil produziu cerca de 57 milhões de toneladas de resíduos sólidos, 7,7% superior à quantidade produzida no ano anterior (Gráfico 3.1). A geração *per capita* de resíduos, por sua vez, cresceu 6,6%, enquanto que o crescimento populacional no mesmo período foi de 1%. Pode-se verificar, portanto, que no país ainda não foram implementadas ações para a redução da geração de resíduos sólidos.

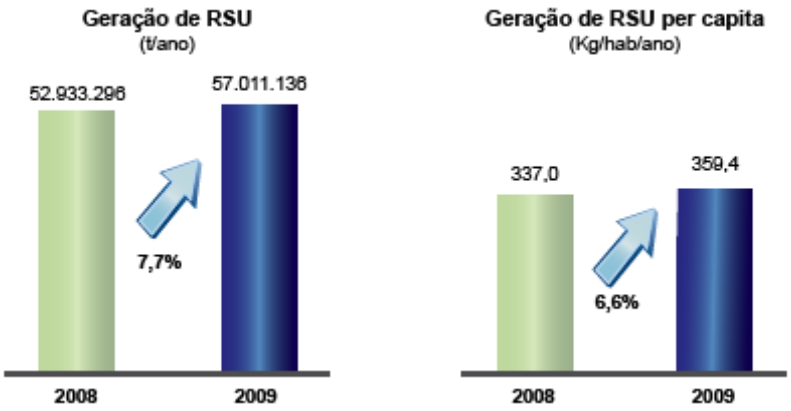

Gráfico 3.1. Geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Fonte: ABRELPE (2009).

São Paulo é a cidade mais populosa do país, com 5,7% da população do Brasil. Com mais de 11 milhões de habitantes, abriga mais de ¼ da população do Estado de São Paulo (26,7%) (IBGE, 2010). Nesta cidade são geradas, diariamente, 17 mil toneladas de resíduos, sendo que destas, são coletadas mais de 10 mil toneladas apenas de resíduos domiciliares.

Diariamente é percorrida uma área de 1.523 km² e estima-se que mais de 11 milhões de pessoas são beneficiadas pela coleta. Cerca de 3,2 mil pessoas trabalham no recolhimento dos resíduos e são utilizados 492 veículos (PMSP, 2010). Os resíduos coletados são destinados a aterros sanitários da região e conclui-se, portanto, que é necessário um programa que incentive a reciclagem e redução de resíduos gerados, diminuindo assim os custos envolvidos em seu transporte e deposição, além dos impactos causados por sua decomposição.

Nas grandes cidades, está cada vez mais difícil encontrar locais próximos para a destinação dos resíduos sólidos urbanos, não apenas pela falta de áreas disponíveis, mas também pela pressão da sociedade contra a instalação de aterros próximos às áreas residenciais. Como exemplo, pode-se citar a cidade de Bento Gonçalves (RS) em que são percorridos 200 km para destinação dos resíduos sólidos, além das cidades de Praia Grande e São Vicente (SP) que transportam seus resíduos até o município de Mauá, cuja distância atinge mais de 70 km.

3.1 Definição e classificação

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2004), NBR 10004, define resíduos sólidos como resíduos nos estados sólidos ou semi-sólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluem-se os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos, instalações de controle de poluição e líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto, ou exijam soluções técnicas economicamente inviáveis.

Esta norma classifica os resíduos sólidos de acordo com os riscos potenciais ao meio ambiente, auxiliando na determinação do tipo de aterro que receberá determinado resíduo. Já a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, estabelecida em 2 de agosto de 2010, classifica os resíduos sólidos quanto à origem e quanto à periculosidade em seu Artigo 13.

3.1.1 Classificação dos resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são classificados em dois grupos: perigosos e não-perigosos. Este último ainda pode ser subdividido em inertes e não-inertes e a classificação pode ser representada conforme a Figura 3.1.

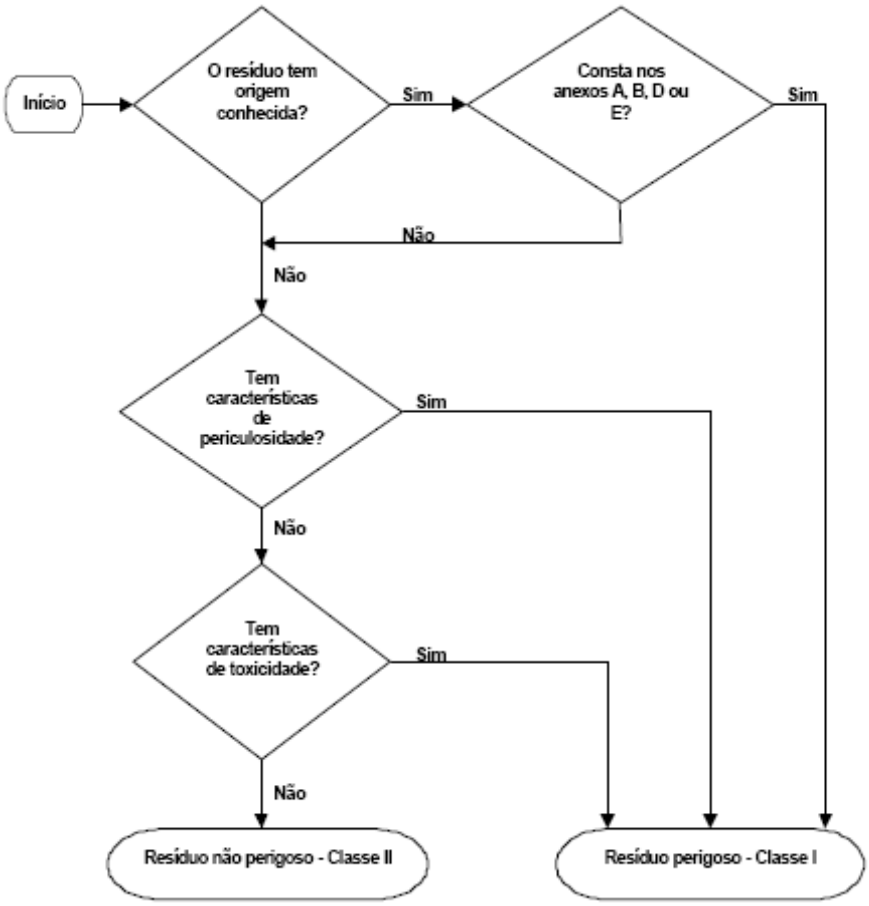

Figura 3.1. Classificação dos Resíduos Sólidos.

Fonte: ABNT (2004).

a. Resíduos Classe I: conhecidos também como resíduos perigosos, são aqueles que, de acordo com suas características, podem apresentar riscos à saúde da população ou ao meio ambiente, quando sua disposição final for realizada inadequadamente. As características que conferem periculosidade a um resíduo são a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (ou contaminantes);

b. Resíduos Classe II: denominados também não-inertes, são resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, podendo causar riscos ao ser humano ou ambiente, e não se enquadram nas demais classificações;

c. Resíduos Classe III: são os resíduos sólidos que não apresentam riscos ao ser humano e ao meio ambiente, e quando submetidos a testes de solubilização, não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se os padrões relativos ao aspecto, cor, turbidez e sabor.

3.1.3 Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade

De acordo com este parâmetro, os resíduos sólidos podem ser divididos em resíduos perigosos ou resíduos não perigosos:

a. Resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;

b. Resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

3.1.4 Composição do lixo urbano

O gerenciamento de resíduos sólidos tem por objetivo a coleta, tratamento e disposição final do lixo gerado pela população, seguindo normas socioambientais de uma maneira economicamente viável.

Com o aumento da geração de materiais e substâncias identificadas como perigosos, tornam-se necessárias soluções mais eficazes e, consequentemente, maiores investimentos por parte de seus geradores e da sociedade de maneira geral, já que estes resíduos são provenientes de regiões, que nem sempre estão preparadas para processá-los ou armazená-los adequadamente. Neste contexto, a caracterização de resíduos é uma ferramenta importante para definição do seu ciclo final, já que sua manipulação de maneira correta tem grande importância no controle do risco que ele representa (COMLURB, 2008).

A determinação dos componentes dos resíduos sólidos, como matéria orgânica, papel, papelão, vidro, umidade, entre outros, é possível por meio de uma análise conhecida como caracterização gravimétrica. No Gráfico 3.2, são apresentadas as composições gravimétricas dos resíduos de São Paulo, Rio de Janeiro, Santo André e a média do país.

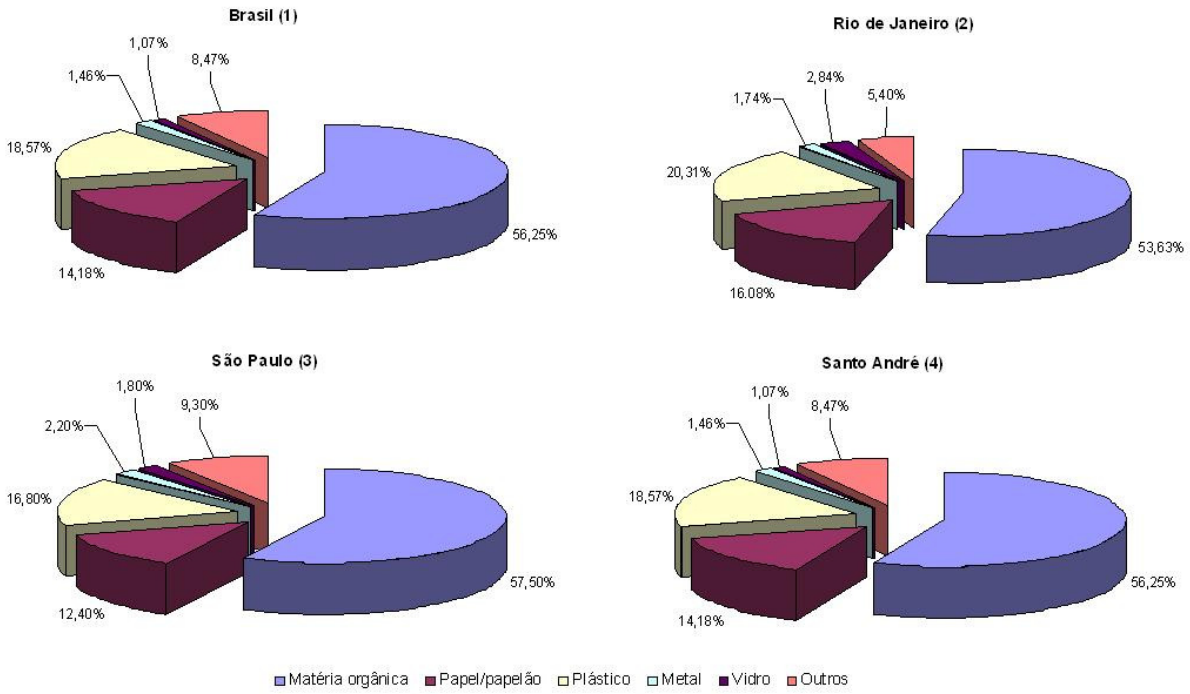

Gráfico 3.2. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos.

Fonte: Elaborado pela autora, com dados da ABRELPE [(1)] (2009); COMLURB [(2)] (2008); PMSP [(3)] (2003); SEMASA [(4)] (2008).

Com esta análise, é possível determinar meios de aproveitamento dos resíduos, como reciclagem ou compostagem, além auxiliar no dimensionamento dos equipamentos utilizados na limpeza urbana.

3.2 Tratamento e disposição final dos resíduos

Tomando como referência os últimos 20 anos, é possível verificar uma perspectiva

otimista quanto à disposição final dos resíduos no Brasil, porém, muito longe da situação ideal. Segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) do ano de 2008, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os vazadouros a céu aberto, também conhecidos como lixões, ainda são o destino final de 50,8% dos resíduos sólidos urbanos dos municípios do país.

Porém, observando a Tabela 3.1, verifica-se que este valor já é aproximadamente 30% menor, quando comparado ao ano de 2000. As regiões Nordeste e Norte registram ainda as maiores proporções de municípios que destinam seus resíduos aos lixões, alcançando os valores de 89,3% e 85,5%, respectivamente, enquanto as regiões Sul (15,8%) e Sudeste (18,7%) apresentam os menores percentuais. E, finalmente, a destinação de forma adequada para os aterros sanitários que aumentou de 60%, corresponde somente a pouco mais de um quarto do volume total de resíduos gerados.

Tabela 3.1. Destino final dos resíduos sólidos entre os anos de 1989 e 2008.

Ano	Vazadouro a céu aberto (%)	Aterro controlado (%)	Aterro sanitário (%)
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Fonte: IBGE (2008).

A destinação final dos resíduos sólidos urbanos é mais otimista analisando os dados da ABRELPE de 2009. De acordo com a Associação, 57% dos resíduos são corretamente tratados e quase 22 milhões ainda são destinados a aterros controlados ou lixões (Gráfico 3.3), sem as corretas medidas de controle ambiental, mostrando a necessidade da melhoria da gestão neste segmento.

No Brasil, a região Sul é apresentada como a região cujos municípios têm o maior índice de destinação adequada dos resíduos. De acordo com a Tabela 3.2, 57,8% dos municípios destinam seus resíduos aos aterros sanitários, enquanto que na região Sudeste, este índice não atinge 48%. Nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste este índice é ainda menor, sendo de 18%, 24% e 31,3%, respectivamente.

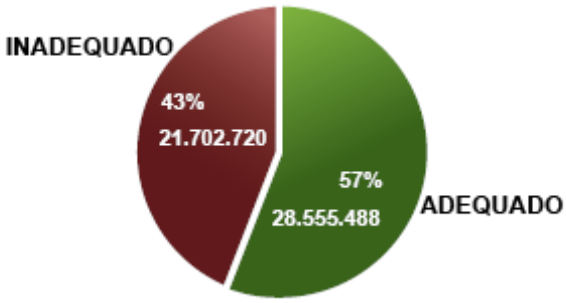

Gráfico 3.3. Destinação final dos RSU coletados no Brasil em 2009.

Fonte: ABRELPE (2009).

Tabela 3.2. Quantidade de municípios por modalidades praticadas de destinação final

Disposição Final	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sul	Sudeste
Aterro Sanitário	81	431	146	793	2.138
Aterro Controlado	105	497	146	630	1.739
Lixão	263	866	174	245	1.688
TOTAL	449	1.794	466	1.668	5.565

Fonte: ABRELPE (2009).

Os gastos com a coleta de resíduos sólidos (Tabela 3.3), por sua vez, são contraditórios se os compararmos com a tabela anterior. As despesas equivalentes por habitante na região Norte é uma das mais elevadas (3,54 R$/mês), perdendo apenas para a região Sudeste (3,85 R$/mês).

Tabela 3.3. Despesas com coleta de resíduos sólidos urbanos por regiões.

Regiões	População Urbana (hab)	Despesa com coleta (milhões R$/ano)	Despesa equivalente por habitante (R$/mês)
Norte	11.482.246	488	3,54
Nordeste	38.024.507	1.337	2,93
Centro-Oeste	11.976.679	415	2,89
Sudeste	74.325.454	3.434	3,85
Sul	22.848.997	822	3,00

Fonte: ABRELPE (2009).

Estes dados apenas confirmam a necessidade de uma gestão eficiente dos resíduos nos municípios do país, que possibilitariam um destino correto com um menor valor agregado a esta atividade.É importante salientar, que mesmo com rigorosas medidas ambientais, os aterros sanitários não são a melhor forma de destinação de resíduos, já que grande parte destes irá demorar anos para se decompor (Tabela 3.4), ocupando uma grande área que necessitará de monitoramento mesmo após o seu encerramento.

Tabela 3.4. Tempo de decomposição dos resíduos sólidos na natureza.

Resíduos	Tempo de decomposição
Jornais	2 a 6 semanas
Embalagens de papel	1 a 4 meses
Ponta de cigarro	2 anos
Chiclete	5 anos
Guardanapos	3 meses
Palito de fósforo	2 anos
Casca de frutas	3 meses
Copo de plástico	200 a 450 anos
Pilha / bateria	100 a 500 anos
Latas de alumínio	100 a 500 anos
Garrafa de vidro	Mais de 500 anos
Garrafa de plástico	Mais de 500 anos

Fonte: GRIPPI (2001).

A redução do volume de resíduos gerados, por meio de outras técnicas como compostagem, incineração e reciclagem, trariam maiores benefícios socioambientais, já que diminuiriam o volume de resíduos destinados para aterros sanitários. Estas técnicas, bem como os aterros sanitários, são abordadas a seguir.

3.2.1 Compostagem

A compostagem é o processo de tratamento de resíduos em que ocorre, por meio de

processos físicos, químicos e biológicos, a transformação da matéria orgânica em um material estável e utilizável na agricultura. Esta transformação ocorre naturalmente e é realizada por microorganismos presentes nos próprios resíduos, porém pode ser acelerado pela intervenção humana (BRITO, 2010).

De acordo com Reis (2005), os resíduos sólidos urbanos apresentam grande potencial para a compostagem, visto que possuem grande fração de matéria orgânica, porém, a presença de materiais como plásticos não recicláveis, madeira, isopor, entre outros, dificulta o processo e interfere negativamente na qualidade do composto resultante. O processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos se inicia com uma etapa de triagem, a fim de que se obtenha a máxima recuperação de matéria orgânica e, após a triagem, os resíduos passam pelo processo de decomposição da fração biodegradável e preparação do produto final, denominado composto.

3.2.2 Tratamento Térmico de Resíduos

O tratamento térmico de resíduos, também conhecido como incineração é o processo de queima de resíduos a elevadas temperaturas (900 a 1200ºC) com tempo de permanência controlada, onde ocorre a decomposição térmica da parcela orgânica dos resíduos, resultando em um produto final com menor peso e volume (ESSENCIS, 2010). O calor proveniente dos gases de exaustão pode ser aproveitado para geração de energia térmica, produzindo vapor por meio de uma caldeira de recuperação, ou para geração de energia elétrica, onde o vapor produzido é expandido em uma turbina a vapor (CORTEZ, 2011).

No Brasil, diversas tentativas de utilização desta tecnologia não tiveram sucesso devido a problemas de dimensionamento, operação ou manutenção. Desde 1896, foram instalados no país diversos incineradores de resíduos sólidos urbanos de pequeno porte e, os que ainda operam, o fazem de forma precária e inadequada, com equipamentos obsoletos, o que resultou em uma imagem negativa vinculada a este processo. Em contrapartida, em diversos países da Europa, as plantas de incineração passaram por processos de modernização e de controle do processo de combustão, resultando em um método eficaz e viável do tratamento dos resíduos (GONÇALVES, 2007).

Nos últimos anos este processo vem sendo tema de grande interesse no país, já que os aterros sanitários próximos dos centros urbanos estão atingindo sua capacidade máxima de armazenamento e os novos aterros ficam cada vez mais distantes, aumentando o custo de transporte e deposição final dos resíduos. Além disto, a possibilidade do aproveitamento da energia térmica do processo para geração de vapor ou energia elétrica torna o projeto mais atrativo do ponto de vista socioeconômico.

Neste contexto, em 2004 a Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo - SMA e o Estado Livre de Baviera firmaram um acordo de cooperação técnica para a avaliação do atual gerenciamento dos resíduos sólidos nas regiões metropolitanas do país, em que mostraram as vantagens do tratamento térmico dos resíduos frente aos aterros: redução do volume de lixo, bem como das áreas necessárias, além de possibilitar a instalação da usina de tratamento próximo aos pontos de geração, diminuindo gastos com transporte (CORTEZ, 2011).

A partir destas conclusões, a Secretaria de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo - SSE e a Empresa Metropolitana de Águas e Energia – EMAE estudam novas tecnologias para o tratamento dos resíduos sólidos nas regiões metropolitanas do Estado de São Paulo. Neste estudo, são avaliadas as características de processamento da usina, bem como as produções e custos envolvidos (Tabela 3.5).

Tabela 3.5. Dados do estudo da Usina de Tratamento Térmico.

Características	Valor
Capacidade de Processamento	1.200 t/dia
Poder calorífico inferior do resíduo	1.900 kcal/kg
Potência instalada	26 MW
Potência comercializável	18,9 MW_{medios}
Área da central	40.000 m²
Custo total	R$ 324 milhões

Fonte: BOLOGNESI (2010).

Com base neste cenário, Bolognesi (2010) traçou dois cenários. O primeiro prevê a produção de 115 toneladas vapor por hora, para processos industriais a 400ºC e 40 bar, fixando um rendimento global de 83% e o preço por tonelada para o tratamento de resíduos em 70 R$. O valor de venda do vapor resultante foi de 62 R$ por tonelada. O segundo cenário

previa somente a geração de energia elétrica, fixando o rendimento global do processo em 22% e o preço de tratamento sólido como o do cenário anterior, o que resultou em um valor de venda superior ao valor de mercado.

Desta forma, é possível analisar que o processo de tratamento térmico de resíduos ainda apresenta-se inviável do ponto de vista econômico devido ao elevado custo de investimento. Porém, com o desenvolvimento de tecnologias nacionais e as vantagens ambientais que este processo apresenta frente aos destinos finais disponíveis, o tratamento térmico de resíduos se apresenta como uma boa alternativa aos problemas de gestão de resíduos atuais.

3.2.3 Reciclagem

A reciclagem consiste na triagem de resíduos, por meio do qual se separam determinados materiais como plástico, metais e papel, para posterior utilização na fabricação de novos produtos. É um processo muito interessante do ponto de vista econômico, social e ambiental, visto que reduz a quantidade de resíduos destinados a aterros, além de diminuir a necessidade de extração dos recursos naturais utilizados em processos de fabricação.

3.2.4 Aterros Sanitários

Os processos de tratamento apresentados auxiliam na redução dos resíduos gerados pela sociedade, porém é possível verificar que, em todos eles, sobram resíduos que são enviados aos aterros sanitários. No Brasil, os aterros sanitários são, atualmente, a forma de tratamento mais utilizada, já que apresenta o menor custo associado.

A destinação final dos resíduos sólidos depende da disponibilidade de área de cada região, além do índice de desenvolvimento do país. Como exemplo, pode-se citar o Japão, país de pequena dimensão e com leis rigorosas quanto à ocupação do solo onde, torna-se necessária a redução do volume de resíduos, em maior parte realizada por incineração e aproveitamento das cinzas para obras civis (CEPEA, 2004). Já os Estados Unidos, país de

grande dimensão, utilizam a técnica dos aterros sanitários como destino final para os resíduos sólidos urbanos em que, das 250 mil toneladas geradas diariamente, 54% são levadas para um dos 1.812 aterros existentes (EPA, 2009a). O Brasil, assim como os EUA, destina a maior parcela do lixo coletado em aterros sanitários e, das 150 mil toneladas de resíduos coletados diariamente, 56,8 % são destinados a aterros sanitários (ABRELPE, 2009).

3.2.4.1 Tecnologias de construção do aterro sanitário

Durante a projeção de um aterro sanitário, são realizados estudos geológicos e topográficos para a seleção da área ideal, de forma que o meio ambiente e a sociedade local não sejam comprometidos com sua instalação. Na fase de preparação do terreno para a recepção dos resíduos sólidos, algumas medidas preventivas são tomadas, de modo a evitar problemas futuros de contaminação ou falta de estabilidade do terreno, como impermeabilização do solo, sistema de drenagem de líquidos, entre outros, que contribuem também com a otimização da geração de metano.

No local onde será instalado o aterro, o solo é inicialmente perfurado até o lençol freático limitando a profundidade de escavação, já que a base do aterro não pode ficar com distância inferior a 2 metros do lençol. A impermeabilização do solo é feita por meio de camadas de argila e de geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), como apresentado nas Figuras 3.2 a 3.4, com a finalidade de evitar infiltração dos líquidos percolados (chorume) no solo, contaminando o lençol freático. Sobre a membrana, é colocada uma camada de argila ou de pedra britada por onde escoarão os líquidos percolados gerados pela decomposição dos resíduos.

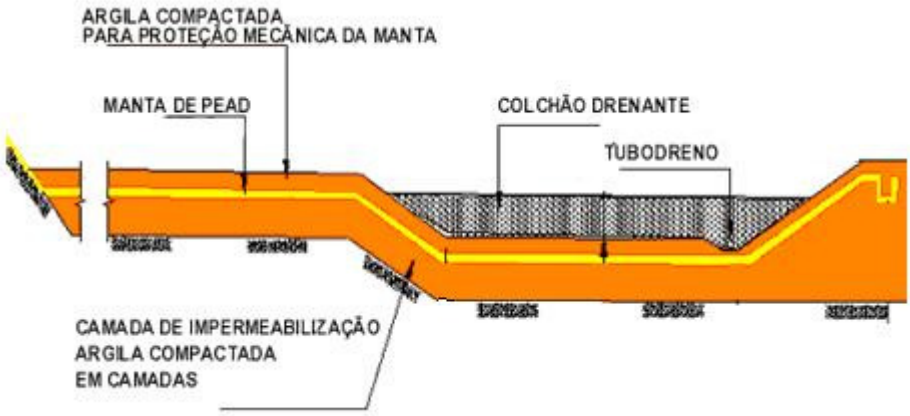

Figura 3.2. Impermeabilização do solo.

Fonte: SANTEC RESÍDUOS (2005).

Figura 3.3. Colocação de geomembrana de PEAD em aterro sanitário.

Fonte: SANTEC RESÍDUOS (2005).

Figura 3.4. Geomembrana de PEAD em aterro sanitário.

Fonte: SANTEC RESÍDUOS (2005).

São instalados, então, drenos para captação do chorume produzido (Figuras 3.5 e 3.6), visto que se este não for coletado de maneira eficaz, poderá acarretar no aumento da umidade dos resíduos. O aumento da umidade influencia negativamente a velocidade de degradação da matéria orgânica e, consequentemente, diminui a geração do biogás. Por outro lado, nas estações secas do ano, alguns aterros utilizam a técnica de recirculação do chorume captado, a fim de manter a umidade dos resíduos adequada para a atuação dos microorganismos (MACIEL, 2003).

Figura 3.5. Instalação dos dutos de captação de chorume.

Fonte: SANTEC RESÍDUOS (2005).

Figura 3.6. Drenos de chorume.

Fonte: SANTEC RESÍDUOS (2005).

O chorume que é captado e não tem utilização, segue por tubulações onde é armazenado em tanques (Figura 3.7) ou lagoas até ser enviado às estações de tratamento de esgoto.

Figura 3.7. Tanque de chorume.
Fonte: CENBIO (2006).

O lixo é depositado sobre o terreno, compactado e depois recoberto com camadas do solo do próprio local, isolando-o do meio ambiente. Cada camada do aterro possui cerca de 5 metros de altura, sendo composto por 4 metros de lixo compactado e 1 metro de terra. A compactação dos resíduos permite a obtenção de maior densidade, acentuando a produção de gás por unidade volume, enquanto que a cobertura adequada, além de impedir a entrada de água proveniente de escoamento superficial, também impede a entrada de oxigênio e a fuga de biogás para a atmosfera. A infiltração de oxigênio retardaria o processo de decomposição anaeróbia, fase em que o metano é produzido (BORBA, 2006).

Por fim, para evitar o excesso de água pluvial, são colocadas tubulações ao redor das células do aterro (Figura 3.8), que permitem interceptar e desviar o escoamento dessas águas até lagoas, para posterior utilização, evitando sua infiltração na massa de lixo.

Figura 3.8. Canalização de águas pluviais.

Fonte: CIAS (2003).

Ao atingir a altura máxima permitida de deposição de resíduos, as células do aterro são encerradas, sendo que, em alguns aterros, esta altura pode chegar a 20 metros, correspondendo a quatro camadas de resíduos. Após o encerramento do aterro, a geração de biogás e percolados continua por cerca de 20 anos, impossibilitando a utilização da área para construções. Portanto, nestes locais, normalmente são construídas áreas verdes, como parques, onde a geração do gás continua sendo monitorada.

Na Figura 3.9, a seguir, é possível analisar as características descritas anteriormente. Na primeira imagem, os drenos de remoção de percolado são instalados. Na segunda e terceira imagem, já se observam as tubulações de captação do biogás e as camadas de resíduos aterrados. Por fim, a última imagem ilustra o encerramento do aterro e construção de área verde.

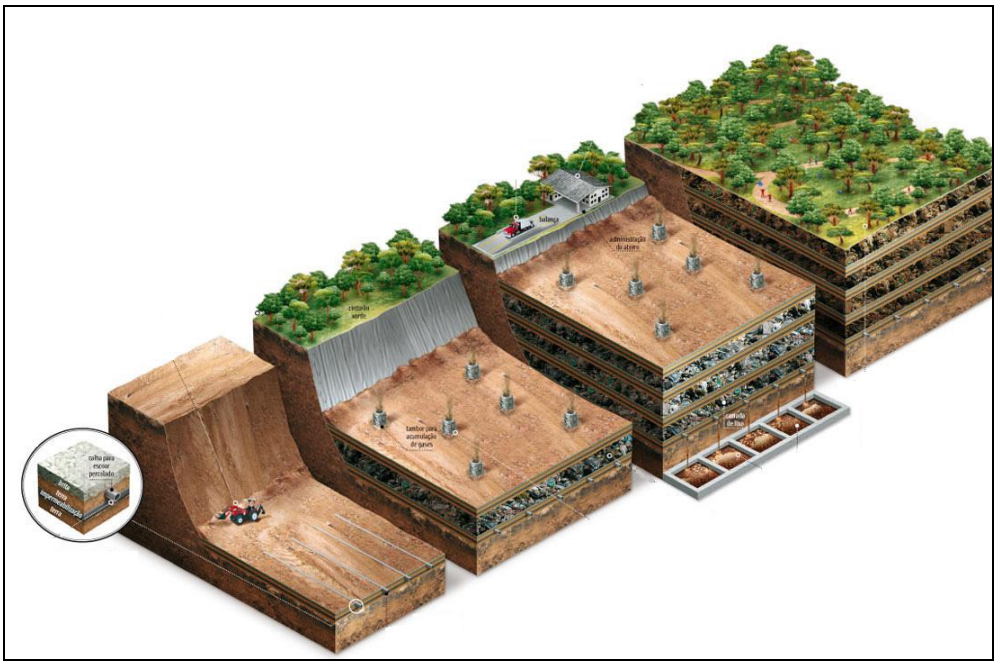

Figura 3.9. Etapas de construção de um aterro sanitário.

Fonte: RE (2010).

3.2.4.2 Captação do biogás de aterro sanitário

A forma mais simples de coletar gases do aterro é por meio de uma rede de tubos verticais perfurados (Figura 3.10). Os tubos de sucção horizontais são instalados enquanto o lixo ainda está sendo depositado no aterro, possibilitando que a coleta do biogás seja iniciada desde o início da sua produção (WILLUMSEN, 2001). Nos aterros sanitários construídos conforme a norma nacional vigente, já está prevista a colocação desta tubulação para a coleta do gás.

Algumas vezes, uma membrana impermeável protetora é colocada sobre o aterro e assim, quase todo o biogás pode ser coletado e recuperado, já que essa membrana obstrui a entrada de água impedindo assim também o escape do biogás para a atmosfera. Porém esta solução é muito cara, utilizada em países com demanda limitada. Para que haja continuidade na produção de biogás, se faz necessária a injeção de água sob a membrana ou promover a recirculação do chorume injetando-o da mesma maneira.

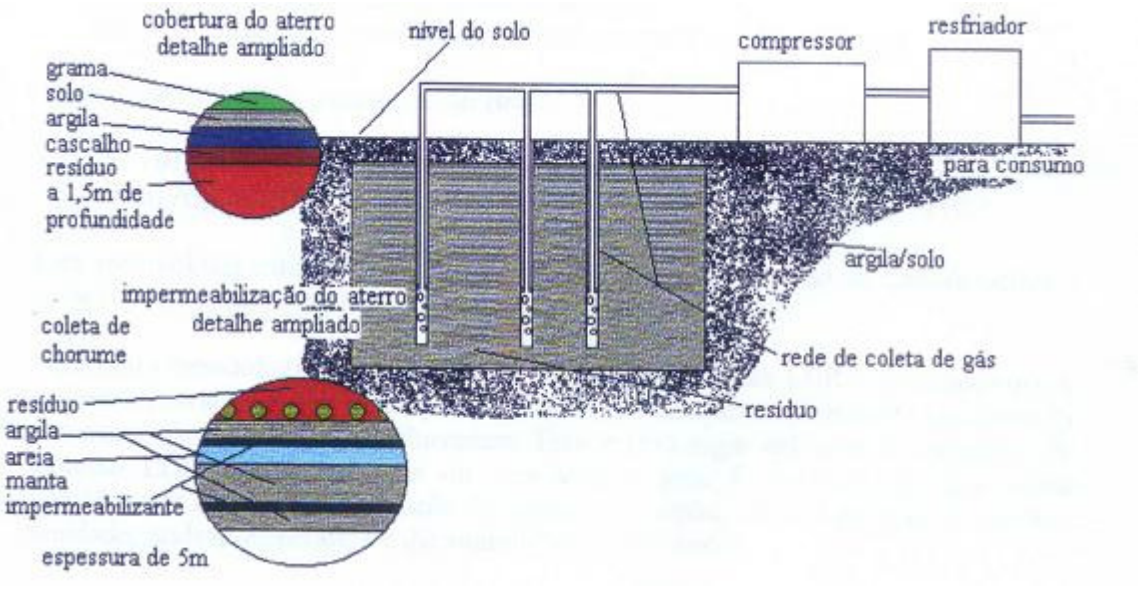

Figura 3.10. Rede de captação de biogás.
Fonte: ALVES (2000).

Um sistema padrão de coleta do biogás de aterro é composto, portanto, por poços de coleta e tubos condutores, sistema de compressão e sistema de purificação do biogás. Além disto, a maioria dos aterros sanitários com sistema de recuperação energética possui *flare* para queima do excesso do biogás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos de geração de energia elétrica.

Captação do Biogás

A coleta de gás normalmente começa efetivamente após uma porção do aterro ser fechada por terra ou pelos próprios resíduos. Cada uma das pontas do tubo é conectada a uma tubulação lateral que transporta o gás para um coletor principal. O sistema de coleta (Figura 3.11 e 3.12) deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás se necessário (MUYLAERT, 2000). O biogás é succionado do aterro por meio de pressão negativa nos tubos de transmissão.

Figura 3.11. Tubos de coleta de biogás.

Fonte: CENBIO (2006).

Figura 3.12. Tubos de coleta de biogás.

Fonte: CENBIO (2006).

A conexão entre poço com a bomba e o sistema de utilização pode ser feita de diversas maneiras. Os poços são ligados a um tubo principal que percorre o aterro. A maior dificuldade deste sistema é regular a quantidade e qualidade do biogás, além de encontrar o local do vazamento quando todos os tubos estão ligados a um grande sistema. Para uma operação mais segura, econômica e com melhores condições para os trabalhadores, uma solução é ter um tubo para cada poço ligado a uma bomba e uma casa de regulagem (WILLUMSEN, 2001).

Sistema de Compressão

A sucção do gás dos poços de coleta é realizada por um compressor. Os compressores (Figura 3.13) também podem ser necessários para comprimir o gás antes de entrar no sistema de recuperação energética. O tamanho, tipo e número de compressores necessários dependerão do fluxo de gás e do nível de compressão desejado, que pode ser determinado pelo equipamento de conversão energética (TOLMASQUIM, 2003).

Figura 3.13. Compressores para *flare*.

Fonte: CENBIO (2006).

Sistema de Tratamento de Condensado

O biogás produzido no aterro está em uma temperatura elevada e, durante seu transporte pelas tubulações, acaba resfriando formando o condensado. Caso não se remova esse condensado o sistema de coleta pode ser bloqueado interrompendo, então, o processo de recuperação de energia. O controle do condensado tem início no sistema de coleta onde são utilizados conectores e tubos inclinados para permitir a drenagem em tanques e após a coleta o condensado é removido. Os métodos para disposição do condensado são: descarga no sistema público de esgoto, sistema de tratamento local e recirculação para o aterro sanitário. O melhor método dependerá das características do condensado (em função dos componentes do lixo local), do custo do tratamento, além da legislação e regulação vigentes (TOLMASQUIM, 2003).

Queima do biogás

O *flare* (Figura 3.14) é um dispositivo utilizado na ignição e queima do biogás e é considerado um componente de cada opção de recuperação de energia, visto que pode ser necessário durante as etapas de início do processo e manutenção do sistema.

Também pode ser utilizado para queima do biogás excedente entre os *upgrades* de sistemas, podendo ser abertos (ou vela) ou enclausurados. Estes últimos são mais caros, mas podem ser requeridos porque proporcionam testes de concentração e podem obter eficiências de combustão altas. Além do que, *flares* enclausurados podem reduzir o nível de ruído e iluminação (MUYLAERT et al, 2000).

Sistema de Tratamento do Biogás

Após a coleta e antes da sua utilização no processo de conversão de energia, o biogás é tratado para a remoção de algum condensado que não foi coletado, assim como particulados e impurezas em geral. Para sua utilização em caldeiras, um tratamento mínimo é requerido; em gasodutos é indispensável um tratamento extensivo para remover o CO_2. No caso da geração de energia podem ser utilizados filtros para a remoção de impurezas, visto que estas podem danificar os componentes do motor ou da turbina, reduzindo a eficiência do sistema. (TOLMASQUIM, 2003).

Figura 3.14. *Flare*.

Fonte: CENBIO (2006).

4 TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA

A conversão energética de um combustível consiste na transformação de um tipo de energia em outro. A conversão energética do biogás, portanto, é o processo de transformação da energia química de suas moléculas, por meio de uma combustão controlada, em energia mecânica. Essa energia mecânica poderá acionar um alternador gerando, então, a energia elétrica.

A geração de energia elétrica a partir do biogás apresenta algumas vantagens como a utilização de um combustível renovável de baixo custo (resíduo de processo), com menor emissão de poluentes e balanço de carbono negativo, além da possibilidade de geração descentralizada próxima aos pontos de distribuição, diminuindo custos e perdas na transmissão.

Dentre as tecnologias convencionais para a transformação energética do biogás destacam-se as caldeiras, turbinas a gás e os motores de combustão interna, detalhadas a seguir. Existem também tecnologias emergentes como as células de combustíveis que, ainda em fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento, pode ser considerada uma tecnologia promissora (CASTRO, 2006).

4.1 Motores de combustão interna – ciclo Otto

O motor de combustão interna é assim chamado por produzir energia mecânica queimando uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro. A energia mecânica é gerada com a transformação do movimento retilíneo do pistão em circular por meio de um virabrequim. É um mecanismo amplamente utilizado, por ser um processo prático e apresenta grande durabilidade (CORREA, 2003).

Ainda segundo Correa (2003), em 1876, o engenheiro alemão chamado Nikolaus August Otto desenvolveu um motor com o conceito de 4 tempos que foi introduzido no mundo em 1878, e até hoje é conhecido como motor de ciclo Otto. Os motores de ciclo Otto aspiram a mistura ar-combustível antes de ser comprimida no interior dos cilindros e a combustão da mistura é dada por centelha produzida numa vela de ignição (PEREIRA, 2006).

A Figura 4.1 mostra os quatro tempos do motor Otto, assim designado, pois seu funcionamento ocorre seqüencialmente em quatro etapas. Castro (2006) lista, na seqüência, as 4 etapas do funcionamento do motor Otto:

Primeiro tempo: abertura da válvula de admissão através da qual é injetada no cilindro a mistura ar-combustível e o pistão é empurrado para baixo com o movimento do virabrequim.

Segundo tempo: fechamento da válvula de admissão e compressão da mistura (taxa da ordem de 10:1) e conforme o pistão sobe (antes de chegar à parte superior) a vela gera uma faísca.

Terceiro tempo: explosão da mistura e expansão dos gases quentes formados na explosão. Esta expansão promove uma força que faz com que o pistão desça.

Quarto tempo: Abertura da válvula de escape através do qual os gases são expulsos pelo pistão.

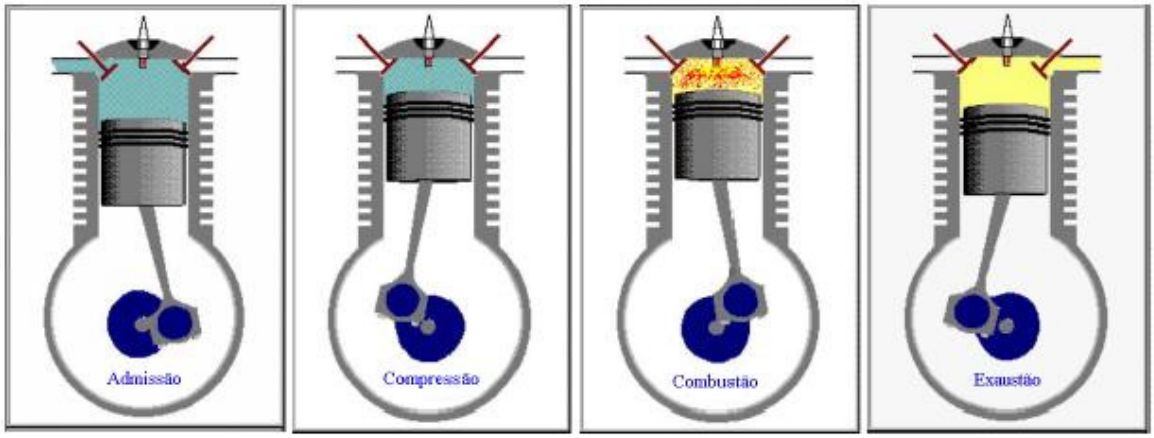

Figura 4.1. Desenho esquemático das etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto.

Fonte: PECORA (2006).

A eficiência térmica do ciclo Otto é função apenas da taxa de compressão em relação diretamente proporcional, como pode se verificar no Gráfico 4.1. Seria interessante, que motores de combustão interna possuíssem razões de compressão elevadas, porém, é estabelecido um limite superior de compressão para motores ciclo Otto devido à possibilidade de auto-ignição, que ocorre caso a temperatura da mistura não queimada se torne muito alta antes que a mistura seja consumida pela frente de chama. A auto-ignição pode causar ondas

de alta pressão que provocam perda de potência e danos no motor.

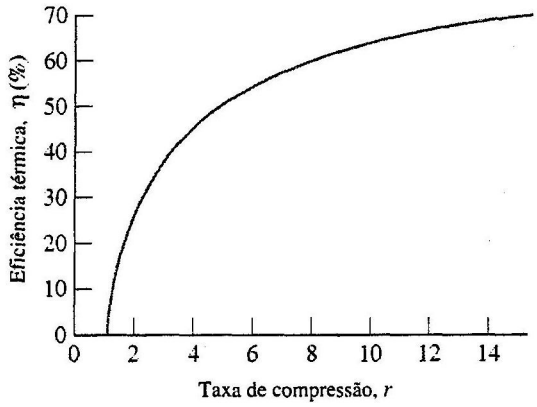

Gráfico 4.1. Eficiência térmica do ciclo de ar padrão frio Otto, k=1,4.

Fonte: MORAN; SHAPIRO (2002).

O biogás pode ser utilizado diretamente em motores estacionários sendo necessária, em alguns casos, a purificação do combustível. De acordo com Silva (1995), os motores a álcool são interessantes para a operação com biogás, já que possuem uma taxa de compressão mais elevada. Já em estudo realizado por Lombard et al. (2004), observou-se que a eficiência do motor diminui drasticamente quando o teor de metano presente no combustível é menor que 50%. Atualmente, fabricantes como GE Jenbacher, Caterpillar e Cummins já possuem motores preparados para utilizar o biogás como combustível.

A qualidade, temperatura, pressão do biogás, eficiência e ponto de operação do motor influenciam diretamente o consumo específico do combustível (por unidade de energia mecânica produzida), sendo importante determinar o tempo de ignição da mistura, além das características apropriadas do combustível (DIAZ, 2006).

4.2 Turbinas e microturbinas a gás

As turbinas a gás podem ser classificadas, de acordo com o ciclo de operação, em ciclo fechado e ciclo aberto, sendo o último, o mais comum. O modo aberto é ilustrado na Figura 4.2a, onde o fluido de trabalho é comprimido (no compressor) elevando-se a pressão.

Este processo não tem nenhum calor adicionado, visto que o compressor, em condições ideais, opera em regime adiabático, fazendo com que o trabalho de compressão aumente a temperatura do ar. Este então entra na câmara de combustão e, em contato com o combustível, reage, iniciando o processo de queima.

Os gases resultantes da combustão, à elevada temperatura, expandem-se na turbina gerando energia mecânica, além de acionar o compressor. O trabalho útil produzido é calculado pela diferença entre o trabalho da turbina e o consumido pelo compressor. No ciclo fechado, ilustrado na Figura 4.2b, os gases que deixam a turbina passam por um trocador de calor onde sofrem resfriamento para entrar novamente no compressor (MORAN; SHAPIRO, 2002). Esta configuração apresenta, portanto, melhor aproveitamento do calor, a possibilidade de operação em pressões elevadas e é utilizado somente em instalações de grande porte (COSTA et. al, 2003).

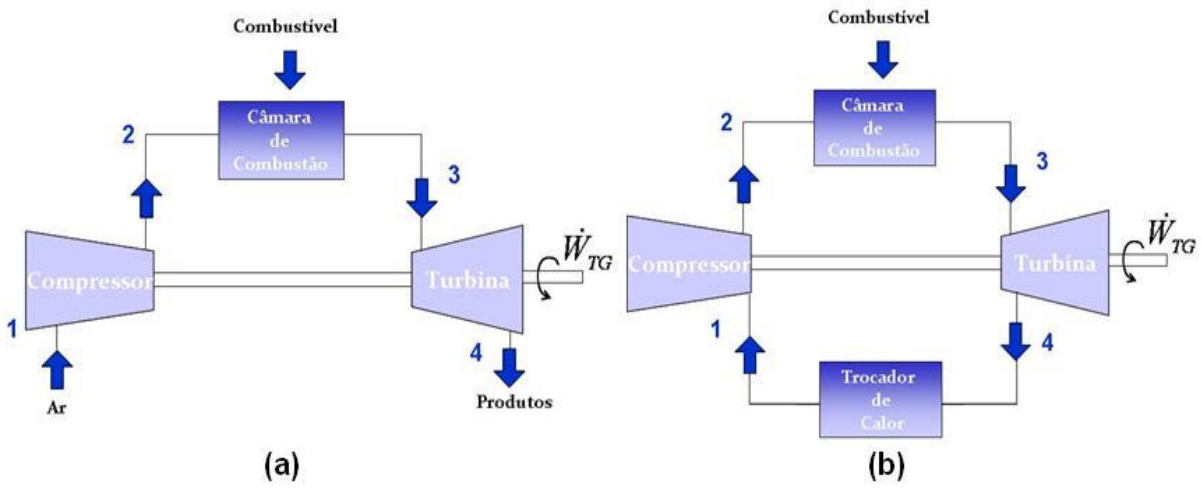

Figura 4.2. Turbina a gás: (a) circuito aberto – processo real de combustão interna; (b) circuito fechado – aproximação por um processo ideal de transferência de calor.

Fonte: Elaboração da autora.

Segundo Moran e Shapiro (2002), visando à simplificação do processo, o estudo de instalações de potência com turbinas a gás é a de uma análise de ar-padrão, onde sempre são estabelecidas duas hipótese: o ar é o fluido de trabalho (se comporta como gás ideal) e o aumento de temperatura que seria obtido por meio da combustão é realizado por meio de uma fonte externa de calor. Pode-se dizer, ainda, que o ciclo aberto é o processo real de combustão interna enquanto que o ciclo fechado é a aproximação de um processo ideal de transferência

de calor.

4.2.1 Ciclo de ar-padrão ideal Brayton

Nas condições simplificativas anteriormente citadas (ciclo fechado), os sistemas de potência equipados com turbinas a gás operam de acordo com o ciclo de Brayton e são compostos por quatro processos. De acordo com as idealizações do ar-padrão, desconsiderando as perdas por transferência de calor para o ambiente e as perdas de carga por atrito, além de que o ar escoa a pressão constante através do trocador de calor, os processos no compressor e na turbina são considerados isoentrópicos (MORAN; SHAPIRO, 2002). Os quatro processos envolvidos são descritos a seguir e podem ser observados no Gráfico 4.2.

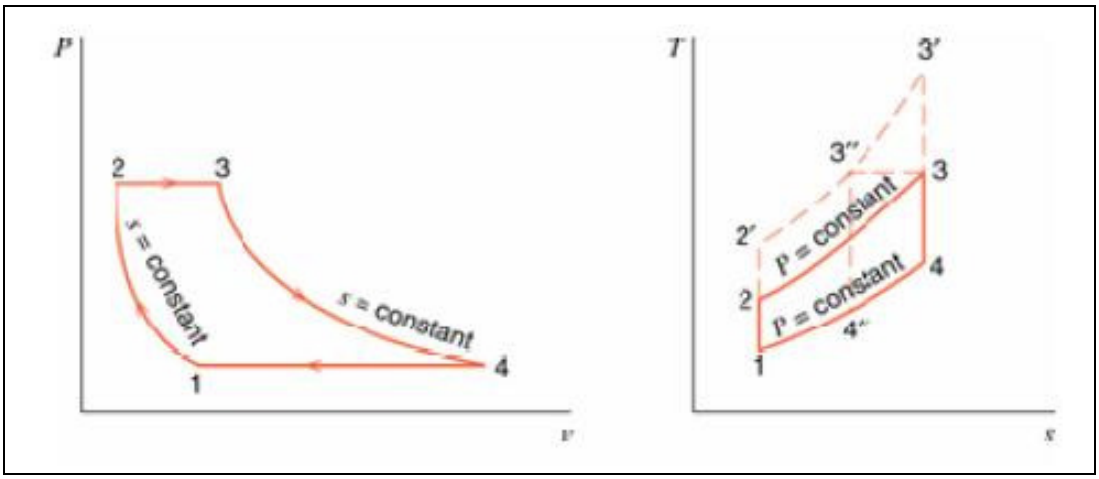

Gráfico 4.2. Ciclo de ar-padrão ideal Brayton.

Fonte: MORAN; SHAPIRO (2002).

Por meio do Gráfico 4.2, podem-se identificar os quatro processos:

1-2: Compressão isoentrópica no compressor;

2-3: Aumento de temperatura a pressão constante;

3-4: Expansão isoentrópica na turbina e;

4-1: Recuperação de calor a pressão constante.

4.2.2 Ciclo Brayton com recuperação

Caso os gases provenientes da turbina fossem descarregados diretamente para o ambiente, grande quantidade de energia estaria sendo desperdiçada, visto que a temperatura de saída desses gases é normalmente superior à ambiente. Através de um trocador de calor (regenerador) é possível utilizar esse potencial energético pré-aquecendo o ar antes de entrar na câmara de combustão, reduzindo a quantidade de combustível a ser queimado (MORAN; SHAPIRO, 2002). O ciclo ar-padrão Brayton com regenerador é mostrado na Figura 4.3a. O gás que deixa a turbina é resfriado do estado 4 ao estado y e o ar que deixa o compressor é aquecido do estado 2 ao estado x (Figura 4.3b).

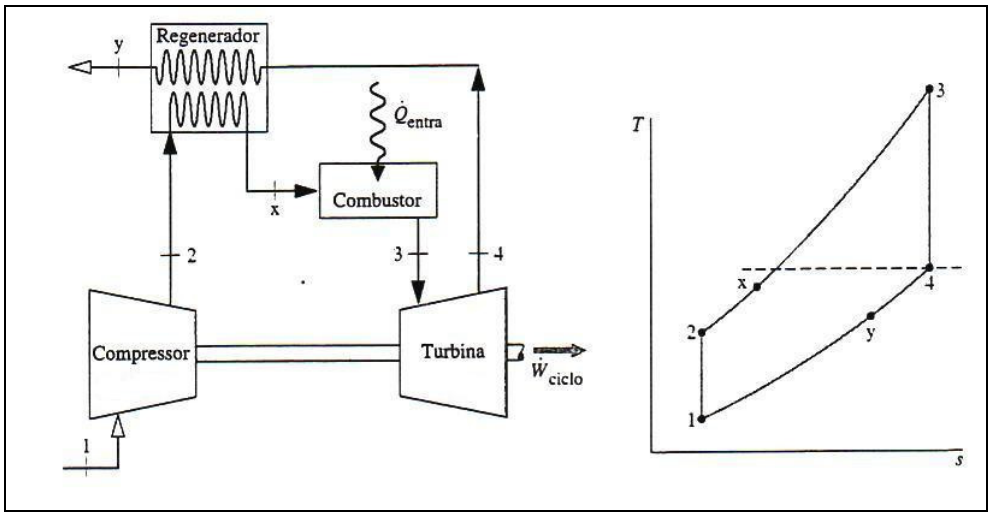

Figura 4.3. (a) Ciclo de ar-padrão de turbina a gás regenerativa. (b) Diagrama T x s do sistema regenerativo.

Fonte: MORAN; SHAPIRO (2002).

4.2.3 Microturbinas

As microturbinas possuem o mesmo princípio de funcionamento das turbinas a gás de circuito aberto, apresentando possibilidade de geração de eletricidade em pequena escala. Apresenta alta confiabilidade, simplicidade de projeto, é compacta, de fácil instalação e

manuseio. Foram, inicialmente, construídas para aplicações em transporte como motores de ônibus e turbinas de aviões e, posteriormente, aplicadas em sistemas de geração de energia elétrica e cogeração (GOMES et. al., 2001).

A redução no consumo de combustível e máxima geração de potência, elevam a eficiência do ciclo. Pode-se realizar o resfriamento do ar de combustão na entrada do compressor, obtendo-se, desta forma, melhor eficiência e potência destes ciclos, já que o ar, a elevadas temperaturas apresenta menor densidade, reduzindo a massa de ar a ser fornecida à turbina. O resfriamento do ar pode ser feito com a utilização de sistemas evaporativos por painéis de contato (CASTRO, 2003).

A Figura 4.4 mostra uma microturbina constituída basicamente por um ciclo Brayton aberto com um painel evaporativo acoplado à entrada de ar do compressor. No resfriador evaporativo direto (RED) o ar sofre resfriamento e umidificação antes de entrar no compressor (1). Na saída do compressor o ar é insuflado para a câmara de combustão (CC) onde é queimado com o combustível gerando os produtos de combustão que sofrerão expansão na microturbina a gás (MTG) gerando trabalho de eixo (PIMENTA; CASTRO, 2003).

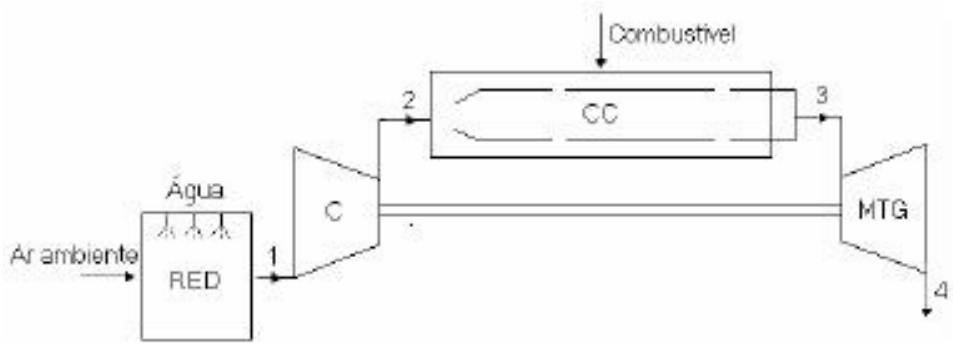

Figura 4.4. Microturbina baseada no ciclo Brayton aberto.

Fonte: PIMENTA; CASTRO (2003).

4.3 Caldeiras a vapor - Cogeração

As caldeiras para vapor d'água são equipamentos capazes de produzir vapor, saturado ou superaquecido, a partir da queima de um combustível, e podem ser divididas em dois

grandes grupos: aquatubulares e flamotubulares. Nas caldeiras aquatubulares, a água que será aquecida passa pelo interior de tubulações, que por sua vez estão envolvidos pelos gases quentes da combustão, enquanto que, nas flamotubulares, estes gases circulam dentro dos tubos que atravessam o reservatório de água a ser aquecida.

O ciclo de Rankine (Figura 4.5) apresenta o funcionamento básico do ciclo de vapor, sendo constituído basicamente por caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba. A energia térmica da combustão é transferida à caldeira, onde ocorre o aquecimento da água e posterior vaporização.

O vapor gerado pode seguir diretamente para os processos industriais ou para uma turbina a vapor. Este vapor se expande conforme passa pela turbina, exercendo trabalho sobre as palhetas e gerando potência mecânica no eixo da turbina, que por sua vez aciona um alternador produzindo energia elétrica. Ao sair da turbina, o vapor segue para um condensador e é bombeado novamente para a caldeira, reiniciando o ciclo. É importante ressaltar que a produção da eletricidade depende do fluxo de vapor, bem como das características de entrada e saída da turbina.

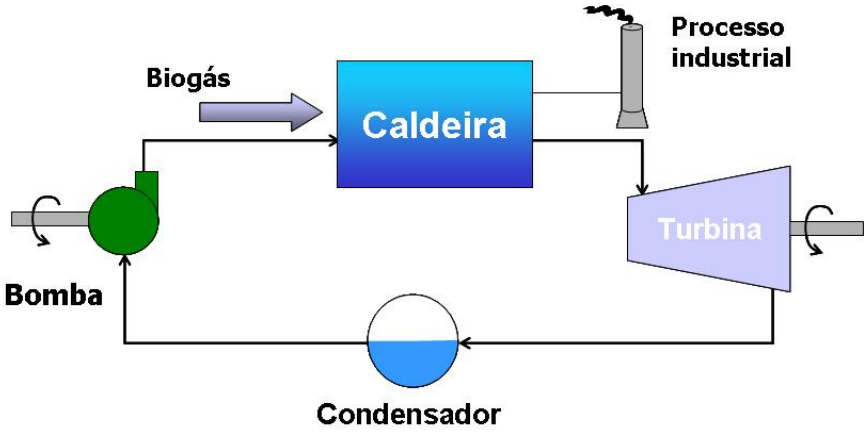

Figura 4.5. Ciclo de Rankine.

Fonte: Elaboração da autora.

A caldeira aquatubular pode apresentar um custo 50% superior a uma flamotubular de mesma capacidade, porém podem ser projetadas para trabalhar em pressões e temperaturas elevadas e possuem menor tempo de partida. Para aumentar a eficiência da caldeira, alguns dispositivos como economizadores e pré-aquecedores de ar podem ser instalados, a fim de aumentar o aproveitamento da energia dos gases de exaustão.

Os fabricantes recomendam que as caldeiras operem entre 40 e 90% de sua capacidade nominal, a fim de obter sua eficiência máxima. Trabalhar abaixo deste valor contribui para a redução de eficiência da caldeira, enquanto que valores superiores aos apresentados comprometem a vida útil do equipamento.

Salomon (2007) faz algumas considerações a respeito da combustão direta do biogás em caldeiras, como o controle do nível de umidade e vazão do combustível. A umidade pode danificar o equipamento, causar problemas durante sua operação e, portanto, deve ser controlada através de linhas de condensado e purgadores. Enquanto isso, a variação da qualidade do gás torna necessária a instalação de válvulas e sensores que controlem a quantidade de combustível que será queimado, de acordo com a concentração de metano presente no mesmo.

4.4 Comparação entre as tecnologias de conversão

Como apresentado na Tabela 4.1, os motores a combustão interna possuem maior eficiência de conversão elétrica, porém as turbinas podem apresentar um aumento da eficiência global do processo quando operadas em cogeração, além de apresentarem menor emissão de NOx.

Tabela 4.1. Comparação entre as tecnologias de conversão.

Tecnologia de Conversão	Potência Instalada	Rendimento Elétrico	Emissões de NOx partes por milhão (ppm)
Motores a Gás (Ciclo Otto)	30 kW – 20 MW	30% - 40%	250 – 3000
Turbinas a Gás (Médio Porte)	500 kW – 150 MW	20% - 30%	35 – 50
Microturbinas (Pequeno Porte)	30 kW – 100 kW	24% - 28%	< 9

Fonte: CENBIO (2005).

O Gráfico 4.3, por sua vez, apresentada as emissões de NOx, CH_4, CO e N_2O para diferentes caldeiras. Observa-se que as caldeiras a biogás resultam na menor emissão de NOx, enquanto que as caldeiras que utilizam combustíveis fósseis apresentam os maiores números. Já as emissões de CO são maiores nas caldeiras a biomassa e biogás, respectivamente.

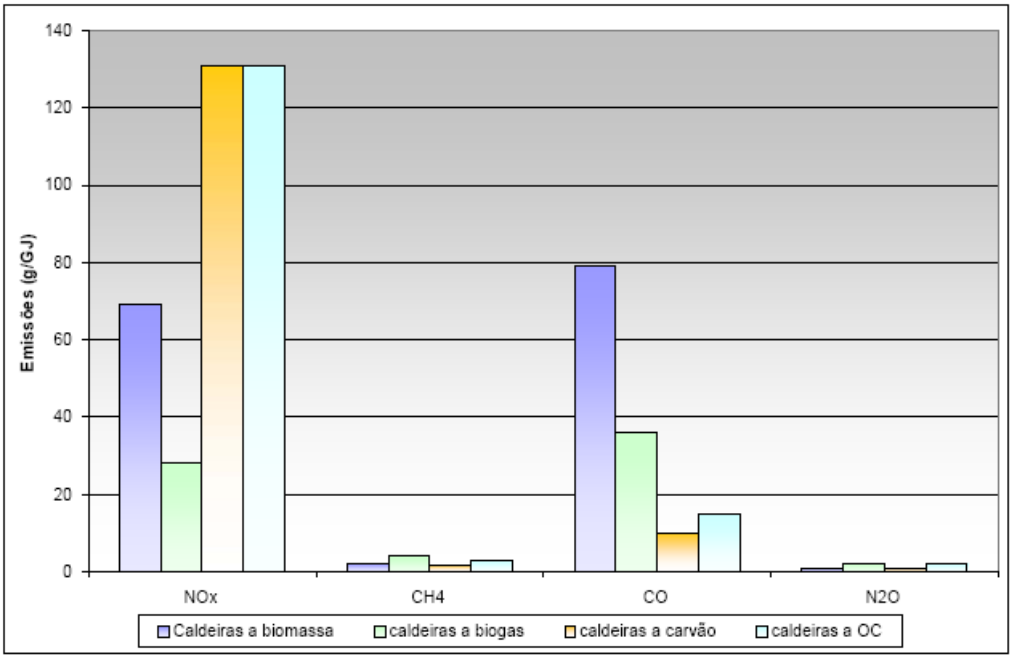

Gráfico 4.3. Fatores de emissão em caldeiras para diferentes combustíveis.

Fonte: SALOMON (2006) apud NERI (2002).

Já no Gráfico 4.4 são apresentadas as emissões de CO_2 em g/GJ para estas caldeiras. As caldeiras a óleo combustível e biogás são as que apresentam as menores emissões, quando comparadas às caldeiras de carvão e biomassa.

Uma análise comparativa dos fatores de emissão para motores a combustão interna, caldeiras a biomassa e caldeiras a biogás é apresentada no Gráfico 4.5. Observa-se que a queima de biogás em caldeira apresenta as menores emissões globais, comparadas às demais tecnologias apresentadas.

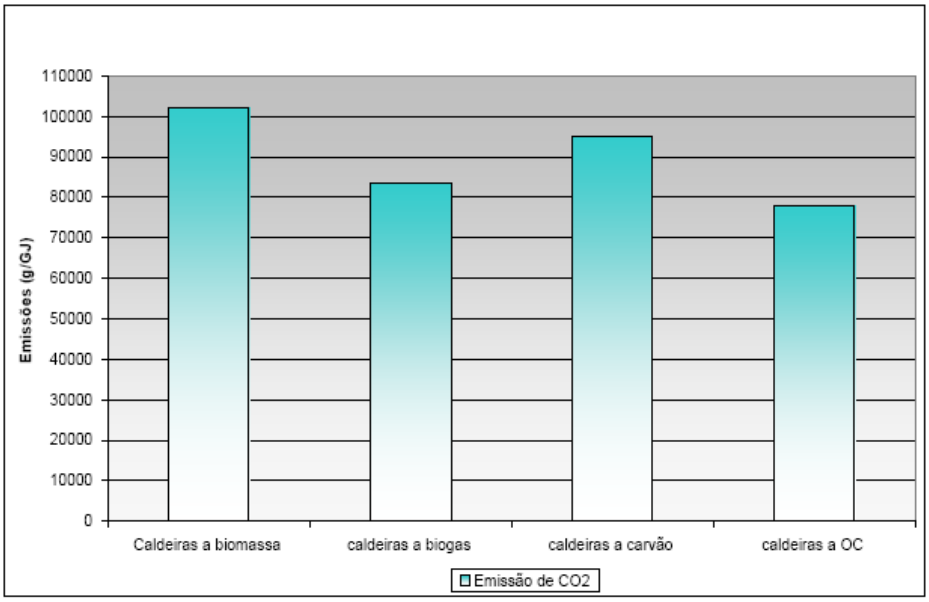

Gráfico 4.4. Fator de emissão do CO_2 em caldeiras para diferentes combustíveis.

Fonte: SALOMON (2006) apud NERI (2002).

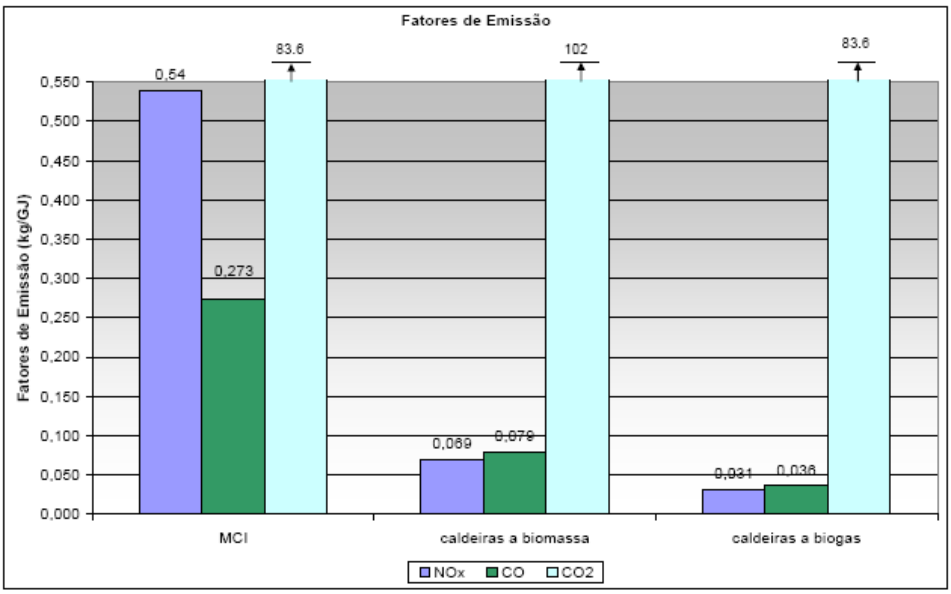

Gráfico 4.5. Comparação dos fatores de emissão para algumas tecnologias.

Fonte: SALOMON (2006) apud NERI (2002).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2006) estabelece, na Resolução nº 382/2006, os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Esta resolução não determina limites de emissão para queima de biogás em caldeiras, porém estabelece limites para queima de biomassa e gás natural, conforme Tabela 4.2 e

Tabela 4.3, respectivamente, que podem ser utilizadas como parâmetro de controle para indústrias que atualmente queimam biomassa e biogás em caldeiras a biomassa adaptadas.

Tabela 4.2. Limites de emissão para caldeiras a gás natural.

Potência Térmica Nominal (MW)	**NOx (mg/Nm^3)[1]**
Menor que 70	320
Maior que 70	200

[1] Em base seca e 3% de excesso de oxigênio
Fonte: CONAMA (2006).

Tabela 4.3. Limites de emissão para caldeiras a biomassa (resíduos de madeira).

Potência Térmica Nominal (MW)	**Material Particulado (mg/Nm^3)[1]**	**NOx (mg/Nm^3)[1]**
Menor que 10	730	N.A.
Entre 10 e 30	520	650
Entre 30 e 70	260	650
Maior que 70	130	650

[1] Em base seca e 8% de excesso de oxigênio
Fonte: CONAMA (2006).

Os fatores de emissão de NO_x, SO_2 e CO_2 para turbinas e microturbinas a gás são apresentados na Tabela 4.4. É possível observar que as emissões de SO_2 e CO_2 são similares, diferenciando apenas as emissões de NOx, menores nas microturbinas.

Tabela 4.4. Fatores de emissão para turbinas e microturbinas a gás.

Tecnologia de Conversão	**NOx** (g/GJ)	**SO_2** (g/GJ)	**CO_2** (g/GJ)
Microturbinas	12,90	0,26	50300,94
Turbinas	21,50	0,26	50300,94

Fonte: LORA e HADDAD (2006) apud BLUESTEIN (2000).

As turbinas e microturbinas apresentam as menores emissões, porém apresentam maior valor de investimento e custos de operação e manutenção, quando comparadas aos motores de combustão interna e caldeiras. A melhor tecnologia dependerá, portanto, das condições impostas na execução do projeto, tanto do ponto de vista ambiental, como do ponto de vista financeiro.

5 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso descrito a seguir é baseado no projeto "Aproveitamento do Biogás Proveniente do Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás", desenvolvido pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) com o financiamento do Ministério de Minas e Energia (MME). O projeto foi implantado no Aterro Essencis no ano de 2009, na Central de Tratamento de Resíduos (CTR), localizado em Caieiras, na Rodovia dos Bandeirantes, km 33, São Paulo e controlado pelo Grupo Essencis Soluções Ambientais. As fases de implementação do projeto, como a escolha e caracterização do aterro, levantamento dos dados técnicos, determinação do potencial de biogás a ser produzido, determinação da tecnologia utilizada e resultados são detalhados a seguir.

5.1 Objetivo do projeto

Este projeto teve como objetivo a implementação de um sistema piloto de geração de energia elétrica a partir da utilização de biogás proveniente da decomposição dos resíduos sólidos de um aterro sanitário. Atualmente, diversos aterros sanitários no país queimam o gás gerado em drenos ou *flares*, desperdiçando a energia contida neste combustível.

O projeto envolve um estudo inicial detalhado, a avaliação do potencial de geração de biogás e energia elétrica a partir dos resíduos sólidos urbanos, a determinação da tecnologia de conversão e sua posterior instalação. Desta forma, foi possível coletar e analisar os dados obtidos, apresentando as dificuldades encontradas e os resultados, que poderão contribuir para a construção de futuras instalações.

5.2 Seleção e caracterização do aterro sanitário para implementação do projeto

Os critérios para a seleção do aterro sanitário foram baseados em sua localização, quantidade e tipo de resíduos recebidos, infraestrutura existente no local, apoio e interesse do aterro na implantação do projeto. As pesquisas foram feitas pela internet, contatos telefônicos, visitas em campo, contando com o apoio da Companhia de Saneamento Básico - CETESB (CENBIO, 2006a).

O primeiro aterro selecionado foi o de Várzea Paulista (Figura 5.1), que possui uma área de 128.000 m² e 84 drenos preenchidos por material cerâmico, onde o biogás é queimado (Figura 5.2). O aterro sanitário em questão se enquadrava perfeitamente às especificações citadas, porém, em setembro de 2006 o CENBIO tomou conhecimento, por meio da CETESB, de problemas resultantes do vazamento de metano proveniente do aterro que, além de causar incômodo aos moradores vizinhos, ainda havia provocado a morte de um deles. Dessa forma não seria possível conseguir o licenciamento ambiental para o sistema de geração de energia elétrica, o que impediu a implementação do projeto no local (CENBIO, 2006a).

Figura 5.1. Vista aérea do aterro de Várzea Paulista.

Fonte: CIAS (2004).

Figura 5.2. Dreno de biogás preenchido de material cerâmico.

Fonte: Cenbio (2006a).

Foram realizadas então outras visitas, sendo a primeira ao aterro de Sorocaba (Figura 5.3), que possui uma área de 400.000 m² e recebe, aproximadamente, 350 toneladas diárias de resíduos domésticos, industriais e hospitalares provenientes apenas da cidade de Sorocaba. Um dos problemas encontrados neste aterro foi a falta de drenos para captação de biogás e a demora no aterramento do lixo, que pôde ser observada pela quantidade significativa de urubus sobre a parcela do lixo descoberto.

Em outubro de 2006, foi realizada uma visita ao Centro de Gerenciamento de Resíduos de Paulínia (CGR), administrado pela Empresa de Saneamento e Tratamento de Resíduos Ltda. (ESTRE) e localizado na cidade de Paulínia, SP. O CGR (Figura 5.4), habilitado para receber resíduos de classe I, IIA e IIB, possui uma área de 705.000 m² e trata resíduos da própria cidade, além de cidades da região como Americana, Sumaré, Jaguariúna, Hortolândia e Santo Antônio da Posse (CENBIO, 2006a).

Figura 5.3. Vista do aterro de Sorocaba.

Fonte: CENBIO (2006a).

Figura 5.4. Vista aérea do CGR – Paulínia.

Fonte: CENBIO (2006a).

O aterro realiza a impermeabilização do solo com geomembrana de polietileno de alta

densidade (PEAD) (Figura 5.5) e capta o biogás por meio de drenos (Figura 5.6), que é transportado até uma central, analisado (Figura 5.7) e posteriormente queimado em *flare* (CENBIO, 2006a).

Figura 5.5. Impermeabilização do solo.

Fonte: CENBIO (2006a).

Figura 5.6. Dreno de captação do biogás.

Fonte: CENBIO (2006a).

Figura 5.7. Analisador instantâneo das características físico-químicas do biogás.

Fonte: CENBIO (2006a).

O chorume captado é enviado a um tanque de retenção (Figura 5.8) onde é armazenado e, posteriormente, transportado para uma estação de tratamento.

Figura 5.8. Tanque de retenção de chorume.

Fonte: CENBIO (2006a).

Em novembro de 2006, o CENBIO se reuniu com a equipe técnica do aterro da Essencis – CTR Caieiras. Além das características já citadas, o aterro executou impermeabilização inferior constituída por uma camada de argila aplicada na base do aterro e geomembrana texturizada de PEAD instalada na base e nos taludes do aterro, evitando a contaminação do solo e do lençol freático. O aterro conta também com um dreno testemunho, instalado na base do aterro, para drenagem do chorume (Figura 5.9). Além disto, realiza a captação e destinação final do chorume e a captação e queima do biogás em *flare*.

Figura 5.9. Esquema construtivo. (a) aterro classe I (b) aterro classe II.

Fonte: ESSENCIS (2007).

Concluiu-se, após as visitas realizadas, que os aterros gerenciados pela Estre e Essencis mostraram-se apropriados para a implantação do projeto, pois possuem infra-estrutura, além de drenos de saída de biogás que possibilitam sua captação, purificação e compressão e, portanto, sua utilização como combustível no sistema de geração de energia elétrica. Os dois aterros demonstraram interesse no projeto e operação do sistema, entretanto selecionou-se o aterro sanitário da Essencis por ser geograficamente mais próximo ao CENBIO e apresentar maior interesse da equipe técnica na participação ativa da instalação e monitoramento dos sistemas (CENBIO, 2006a).

5.2.1 Caracterização do aterro selecionado

O aterro da Essencis (Figura 5.10) localiza-se na Rodovia dos Bandeirantes, km 33, município de Caieiras no Estado de São Paulo. A CTR Caieiras é a maior Central de Tratamento de Resíduos da América Latina e a terceira maior CTR do mundo. Inaugurada em março de 2002, recebe resíduos domiciliares, industriais e de serviços de saúde, em uma área total de 3.500.000 m², sendo 43% dela coberta com vegetação nativa, cultivada na própria unidade.

Figura 5.10. Vista aérea do aterro – CTR Caieiras.

Fonte: ESSENCIS (2010a).

No aterro em questão são tratados resíduos classe I (Figura 5.11) e II (Figura 5.12), além de serem realizados pré-tratamentos, reaproveitamento, operação e gerenciamento, serviços de laboratório, remediação, co-processamento e reciclagem. A expectativa de vida útil é de 50 anos para o aterro classe I e de 60 anos para o aterro classe II (CENBIO, 2006a).

Figura 5.11. Vista do aterro classe I – CTR Caieiras.

Fonte: ESSENCIS (2007).

Figura 5.12. Vista do aterro classe II – CTR Caieiras.

Fonte: ESSENCIS (2010a).

No início de suas atividades, o fluxo diário de resíduos da CTR Caieiras era da ordem de 3.000 toneladas, sendo aproximadamente 60% de origem domiciliar. Desde o início do ano de 2007 o aterro já recebia cerca de 6.000 t/dia de lixo e a partir do mês de setembro, devido ao fechamento do aterro São João, localizado no município de São Paulo, o aterro da Essencis passou a receber 75% do lixo da cidade de São Paulo, totalizando 9.000 a 10.000 toneladas de lixo diariamente. A Tabela 5.1 apresenta a previsão da quantidade de lixo a ser recebido pelo aterro até o ano de 2024.

Tabela 5.1. Previsão da quantidade de resíduos e ser depositados na CTR Caieiras.

Ano	Quantidade de resíduo estimada (t/ano)	Quantidade de resíduo recebida (t/ano)
2002		70.981
2003		415.797
2004		454.349
2005		701.725
2006		735.517
2007		2.111.539
2008		2.880.000
2009		2.579.915
2010		3.447.617
2011	2.400.000	
2012	2.400.000	
2013	2.400.000	
2014	2.400.000	
2015	2.400.000	
2016	2.400.000	
2017	2.400.000	
2018	2.400.000	
2019	2.400.000	
2020	2.400.000	
2021	2.400.000	
2022	2.400.000	
2023	2.400.000	
2024	2.400.000	

Fonte: FREITAS (2011).

O aterro conta com um sistema de coleta e remoção de chorume, instalado acima do sistema de impermeabilização, que o conduz para uma bacia localizada à jusante do aterro. Em seguida, o chorume é levado para tanques (Figura 5.13) e segue, posteriormente, a uma estação de tratamento de efluentes.

Figura 5.13. ETE – CTR Caieiras.

Fonte: ESSENCIS (2010a).

O grupo Essencis realiza a captação do biogás das células do aterro por exaustão forçada promovida pelos sopradores instalados no sistema e o transporta através de uma rede de tubos conectados (Figura 5.14) para a planta de biogás (Figura 5.15) promovendo posteriormente a sua queima em *flares* (Figura 5.16), reduzindo, desta forma, a emissão de compostos mais poluentes como o metano, que segundo a EPA (2009), tem o potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes superior ao CO_2.

Figura 5.14. Transporte do biogás.

Fonte: CENBIO (2006a).

Figura 5.15. Planta de biogás – CTR Caieiras.

Fonte: ESSENCIS (2010a).

Figura 5.16. *Flares* – CTR Caieiras.

Fonte: ESSENCIS (2010a).

5.3 Determinação do potencial de biogás a ser produzido

Para o cálculo do potencial de geração de biogás no aterro foi utilizada a metodologia sugerida pelo *Intergovernamental Panel on Climate Change* - IPCC (1996) a partir de dados fornecidos pelo aterro Essencis – CTR Caieiras (ESSENCIS, 2004 e FREITAS, 2009). Portanto, têm-se as seguintes equações:

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12}\text{, onde:} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

L_0 : potencial de geração de metano do resíduo (m³ biogás/kg_{RSD})

MCF : fator de correção do metano (%)

DOC : fração de carbono degradável (kg_C/kg_{RSD})

DOC_F : fração de DOC dissolvida (kg_C/kg_{RSD})

F : fração de metano no biogás

$^{16}/_{12}$: conversão de carbono (C) para metano (CH_4)

RSD : resíduo sólido domiciliar

$$DOC = 0{,}40A + 0{,}17B + 0{,}15C + 0{,}30D \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Em função das grandes quantidades de alimentos e resíduos orgânicos que são depositados juntos, a Equação 2 foi modificada para:

$$DOC = 0{,}40A + 0{,}16(B + C) + 0{,}30D \text{, onde:} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

A : percentual de papelão e tecidos = 9,23%

B+C : alimentos e outros resíduos orgânicos = 70,44%

D : resíduos de madeira = 1%

Resultando em DOC = 0,153

$$DOC_F = 0{,}014T + 0{,}28 = 0{,}77, \quad onde: \qquad \text{(Eq. 4)}$$

T : temperatura (ºC) na zona anaeróbia dos resíduos, estimada em 35º C

F = 44,2% [análise do gás indicou 44,2% de metano no biogás – relação mol/mol].

MCF = 1 (aterro bem gerenciado).

Portanto, substituindo os valores anteriormente calculados (Equação 3 e 4) na Equação 1, tem-se L_0 = 0,0783 kg $_{CH4}$/kg$_{RSD}$. Considerando a densidade do CH_4 (0º C e 1,013 bar) como 0,7168 kg/m³, tem-se L_0 = 109,301 m³$_{CH4}$/t $_{RSD}$.

A vazão de metano, em m³$_{CH4}$/ano, pode ser calculada da seguinte forma:

$$LFG = k \times Rx \times L_0 \times e^{-k(x-T)} \text{, onde:} \qquad \text{(Eq.5)}$$

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \qquad \text{(Eq. 6)}$$

Rx : fluxo de resíduo no ano (t/ano)

X : ano atual

T : ano de deposição do resíduo no aterro

$t_{1/2}$: tempo médio para 50% da decomposição = 9 anos

k : constante de decaimento (1/ano) = 0,077

A Tabela 5.2 mostra a vazão de metano no aterro Essencis – CTR Caieiras, desde o ano de 2007, quando foi instalado o sistema de coleta do biogás, até a previsão para 2040. A concentração de metano presente no biogás durante o ano de 2010 está na média de 45 % e a eficiência de coleta em 65%.

Tabela 5.2. Geração anual de metano e volume de metano captado.

Ano	m^3CH_4/ano	m^3CH_4/h
2007	31.546.200,48	1.440,47
2008	51.346.418,26	3.692,72
2009	67.312.090,23	5.343,08
2010	88.732.775,75	8.047,18
2011	100.439.716,68	10.765,04
2012	111.382.471,46	11.937,87
2013	121.568.133,03	13.029,56
2014	130.826.799,35	14.021,90
2015	139.410.379,39	14.941,88
2016	147.239.495,51	15.781,00
2017	154.397.353,93	16.548,17
2018	161.088.591,33	17.265,33
2019	167.265.381,94	17.927,35
2020	172.967.278,33	18.538,48
2021	178.230.792,09	19.102,62
2022	183.089.627,68	19.623,38
2023	187.574.898,24	20.104,11
2024	191.715.324,81	20.547,88

Cont. Tabela 5.2. Geração anual de metano e volume de metano captado.

2025	177.055.277,40	18.976,62
2026	163.522.348,00	17.526,18
2027	151.029.879,66	16.187,25
2028	139.497.877,92	14.951,26
2029	128.852.498,61	13.810,29
2030	118.754.095,34	12.727,96
2031	109.432.094,21	11.728,83
2032	101.018.554,98	10.827,08
2033	93.251.879,39	9.994,65
2034	86.082.334,20	9.226,23
2035	79.464.009,83	8.516,88
2036	73.354.526,43	7.862,07
2037	67.714.762,42	7.257,61
2038	62.508.604,09	6.699,62
2039	57.702.714,22	6.184,52
2040	53.266.318,73	5.709,04

Fonte: Elaboração da autora.

A quantidade de metano gerado no ano de 2010 é de 88.732.775 m³/ano ou 86.047 m³ CH_4/h coletados, conforme apresentado na Tabela 5.2. O comportamento crescente da curva apresentada no Gráfico 5.1 corresponde ao período em que o aterro recebe lixo, pois a cada tonelada de lixo, soma-se um novo potencial. O último ano de deposição de resíduos no aterro é dado pelo ponto máximo da curva.

No decaimento, a curva é dirigida pela constante k, referente à degradação da matéria orgânica no tempo.

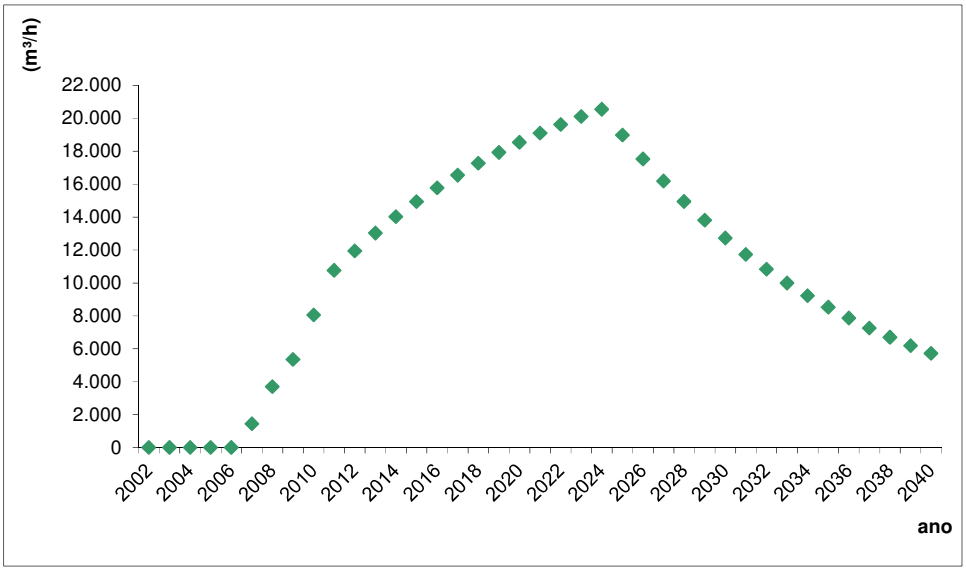

Gráfico 5.1. Comportamento da vazão de metano captado.

Fonte: Elaboração da autora.

5.3.1 Determinação da potência e energia disponível

Para a determinação da potência e energia disponível foram utilizadas as seguintes equações:

$$Px = \frac{Qx \times \eta \times PCI}{860000}, \text{ onde:} \qquad \text{(Eq. 7)}$$

Px : potência disponível a cada ano (MW)

Qx : vazão de metano captado (m^3CH_4/h)

PCI : poder calorífico de metano = $35{,}53.10^6$ J/m^3CH_4

n: eficiência do grupo gerador: 28%

$$E = Px \times 24 \times Disp, \text{ onde:} \qquad \text{(Eq. 8)}$$

E: energia disponível (kWh/ano)

Px: potência disponível (MW)

24: h/dia

Disp: disponibilidade = 7.000 h/ano

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados dos cálculos da potência e energia disponível no aterro, em função da vazão de metano. Os valores disponíveis para o ano de 2010 são: potência de 13 MW e energia de 248,7 MWh/dia. O comportamento da curva de disponibilidade de potência e energia pode ser observado no Gráfico 5.2 e 5.3, respectivamente.

Tabela 5.3. Potência e energia disponível em função da vazão de metano.

Ano	Potência disponível (MW)	Energia disponível (MWh/dia)
2007	2,3	44,5
2008	6,0	114,1
2009	8,6	165,1
2010	13,0	248,7
2011	17,3	332,7
2012	19,2	369,0
2013	21,0	402,7
2014	22,6	433,4
2015	24,1	461,8
2016	25,4	487,8
2017	26,7	511,5
2018	27,8	533,6
2019	28,9	554,1
2020	29,9	573,0
2021	30,8	590,4
2022	31,6	606,5
2023	32,4	621,4
2024	33,1	635,1

Cont. Tabela 5.3. Potência e energia disponível em função da vazão de metano.

2025	30,6	586,5
2026	28,2	541,7
2027	26,1	500,3
2028	24,1	462,1
2029	22,3	426,8
2030	20,5	393,4
2031	18,9	362,5
2032	17,4	334,6
2033	16,1	308,9
2034	14,9	285,2
2035	13,7	263,2
2036	12,7	243,0
2037	11,7	224,3
2038	10,8	207,1
2039	10,0	191,2
2040	9,2	176,5

Fonte: Elaboração da autora.

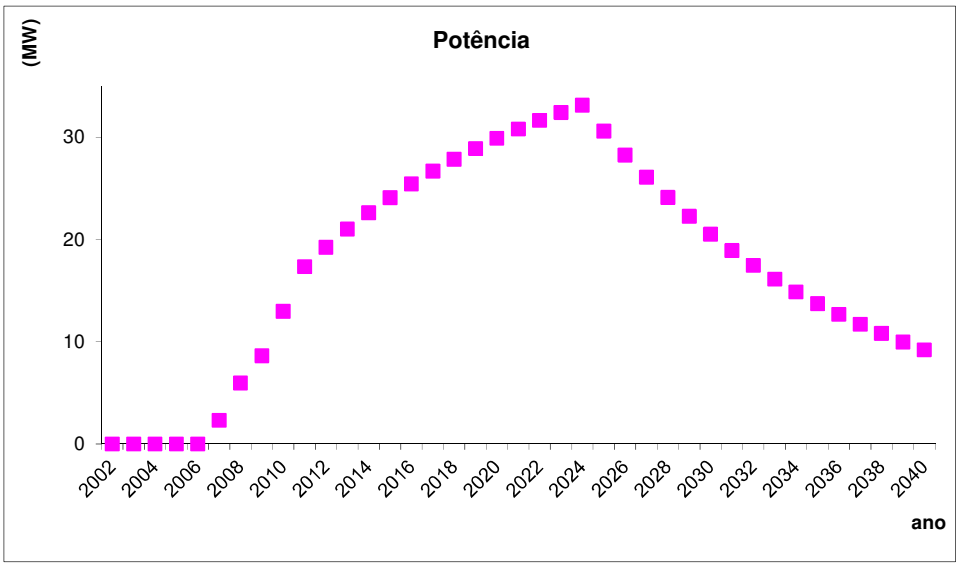

Gráfico 5.2. Curva de comportamento da potência.

Fonte: Elaboração da autora.

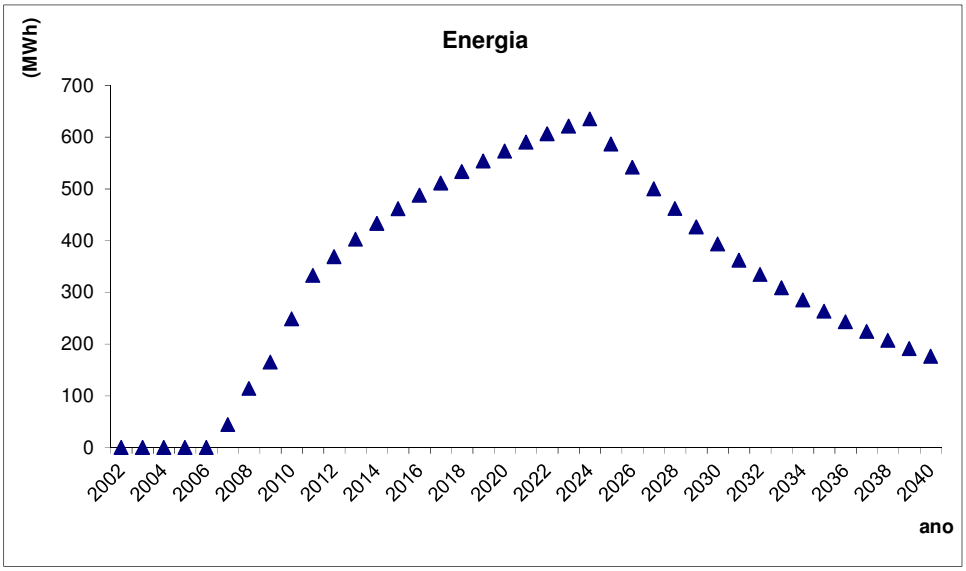

Gráfico 5.3. Curva de comportamento da energia.

Fonte: Elaboração da autora.

Assim como na produção de metano, o ponto máximo das curvas correspondem ao último ano de deposição de resíduos no aterro e, no decaimento, a curva é dirigida pela constante k, referente à degradação da matéria orgânica no tempo.

5.4 Sistema de geração de energia elétrica

O conjunto motogerador de energia elétrica instalado na planta de biogás do aterro Essencis – CTR Caieiras é o LANDSET, desenvolvido pela empresa Brasmetano. Segundo a fabricante (BRASMETANO, 2007), o conjunto motogerador LANDSET (Figura 5.17) é composto por um motor Mercedez modelo 447 – LA convertido para ciclo Otto, com potência nominal de 230 kW, capaz de gerar energia a partir do biogás de aterros sanitários, com variações de metano entre 30 e 80%. O motor é acoplado a um gerador WEG e gerenciado por atuadores Woodward, enquanto os sistemas de ignição e alimentação são gerenciados eletronicamente e existe uma unidade independente de resfriamento e controle de temperatura. A aspiração do biogás dispensa central para sua sucção e bombeamento, já que é feita pelo conjunto motor-compressor e o calor rejeitado pelos motores poderá ser utilizado pelo aterro para evaporação do chorume. Este conjunto, de fabricação brasileira, é fornecido

pronto para instalação em container de 6 metros (Figura 5.18).

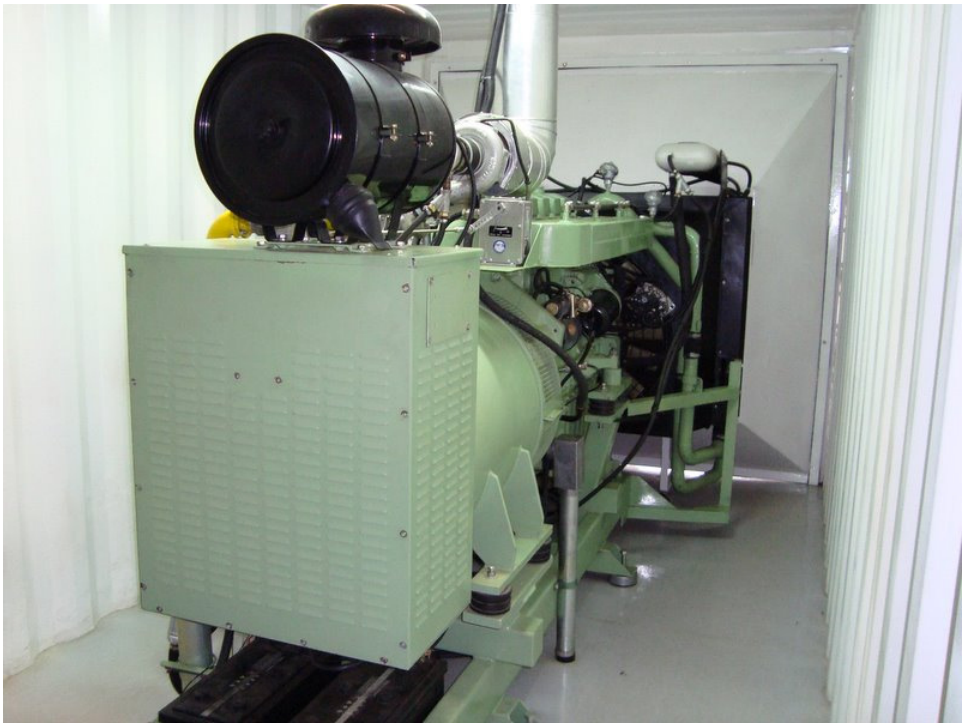

Figura 5.17. Motogerador LANDSET.

Fonte: CENBIO (2009).

A eficiência do sistema e sua durabilidade são dependentes de variáveis como temperatura e teor de umidade do biogás, concentração de dióxido de carbono e oxigênio no combustível, nível de óleo no motor, nível de água nos reservatórios do radiador, entre outros. Estes parâmetros devem ser avaliados visando manter o ótimo funcionamento do sistema. Além disto, o sistema apresenta sensores de temperatura, cuja leitura é feita pelo sistema da WS Controle:

- Sensor de temperatura da água do primário
- Sensor de temperatura da água do secundário
- Sensor de temperatura do Carter
- Sensor de temperatura dos gases de escape
- Sensor de temperatura de queima

Figura 5.18. Container de 6 metros.

Fonte: CENBIO (2009).

5.4.1 Realização dos testes no sistema

Os testes iniciais foram realizados na própria empresa Brasmetano no mês de novembro de 2008, utilizando como combustível duas baterias de gás natural, cada uma composta por 6 cilindros (Figura 5.19), com cerca de 126 m³ e pressão de 200 bar.

As temperaturas medidas durante os testes e a abertura da borboleta são mostradas a seguir. O primeiro teste foi feito sem carga e o motor foi ligado duas vezes para as medições de temperatura com o motor frio (Gráfico 5.1) e quente (Gráfico 5.2). Observa-se que, no segundo teste, as temperaturas de partida foram maiores, visto que o motor já estava aquecido.

Figura 5.19. Cilindros de gás natural utilizados nos testes.

Fonte: CENBIO (2009).

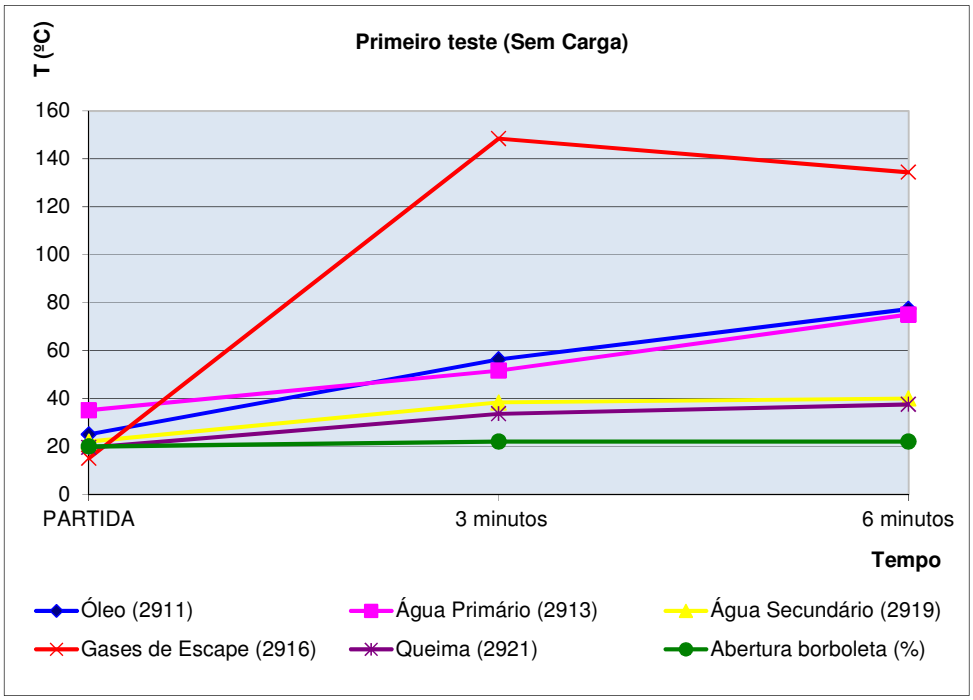

Gráfico 5.4. Medições efetuadas durante o primeiro teste sem carga.

Fonte: Elaboração da autora.

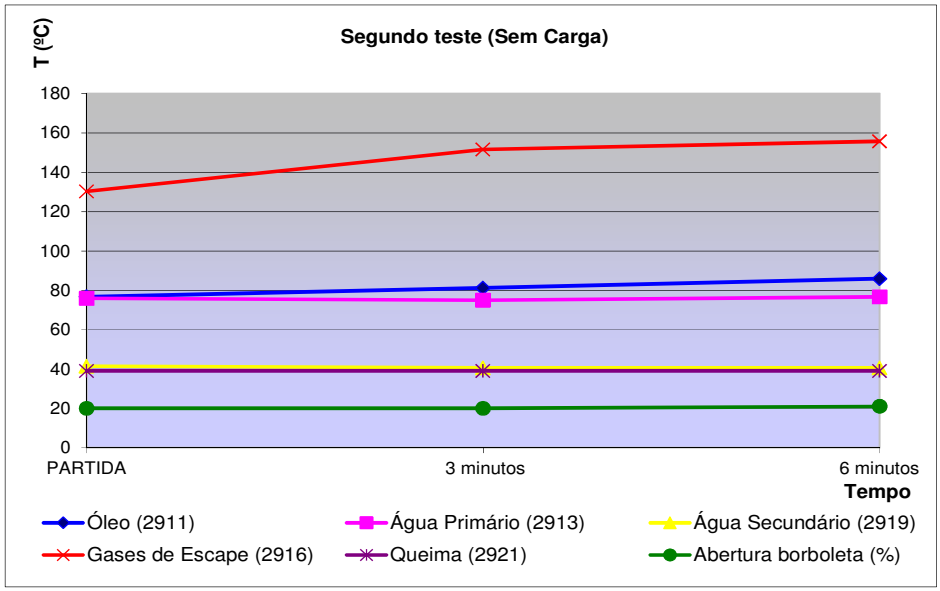

Gráfico 5.5. Medições do segundo teste sem carga.

Fonte: Elaboração da autora.

Posteriormente, foram realizados dois testes com carga, nos quais o motor atingiu uma potência máxima de 120 kW (primeiro teste), e 140 kW (segundo teste). As temperaturas aferidas pelos sensores em ambos os testes, são apresentadas nos Gráficos 5.3 2e 5.4, de acordo com a potência atingida pelo motor.

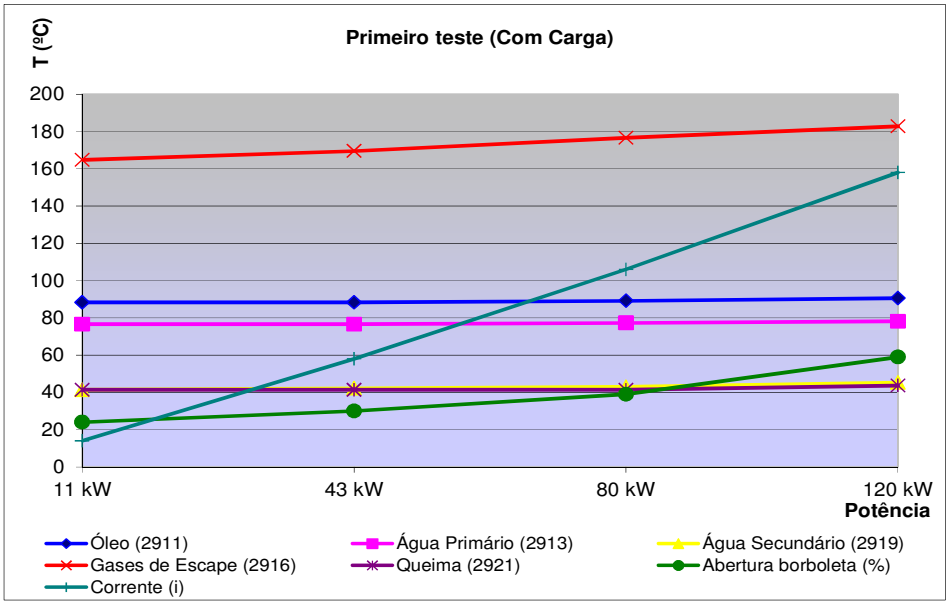

Gráfico 5.6. Medições do primeiro teste com carga.

Fonte: Elaboração da autora.

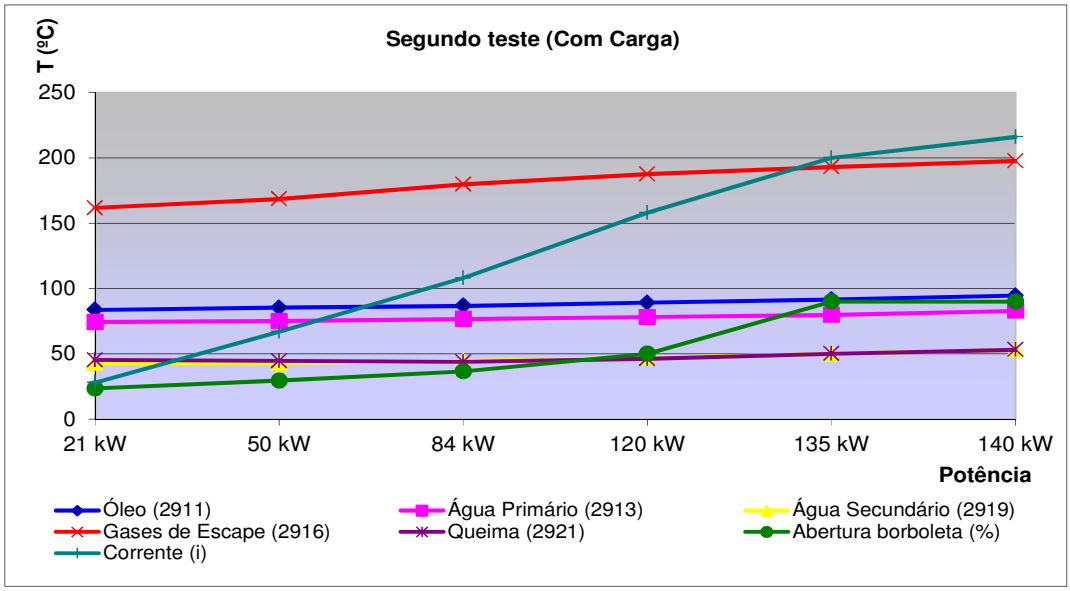

Gráfico 5.7. Medições do segundo teste com carga.

Fonte: Elaboração da autora.

Foi possível verificar que as temperaturas estavam dentro dos parâmetros ideais deste motor (Tabela 5.4), porém a potência nominal não foi atingida devido a algumas falhas apresentadas pelo sistema. A primeira falha detectada foi na 5ª bobina do motor que não estava funcionando (Figura 5.20) e seu chicote precisou ser trocado. Além disto, constatou-se a necessidade da troca da turbina e voluta do sistema (Figura 5.21), que estavam impedindo que fosse atingisse a máxima potência do sistema, cujo valor máximo como observado nos testes não passou dos 140 kW. Para promover esta troca, foram necessários ajustes e adaptação das tubulações, que demandou maior tempo, interrompendo os testes que estavam sendo realizados.

Tabela 5.4. Parâmetros ideais de pressão e temperatura do motor.

Parâmetros	Mínimo	Máximo
Temperatura da água - Rede Primária (ºC)	80	95
Temperatura da água - Rede Secundária (ºC)	40	50
Temperatura dos gases de escape (ºC)	100	600
Temperatura da mistura (ºC)	60	80
Pressão do óleo (bar)	3,6	4,5

Cont. Tabela 5.4. Parâmetros ideais de pressão e temperatura do motor.

Pressão da mistura (kgf/cm2)	0	2
Temperatura do óleo (ºC)	60	110

Fonte: Brasmetano (2009).

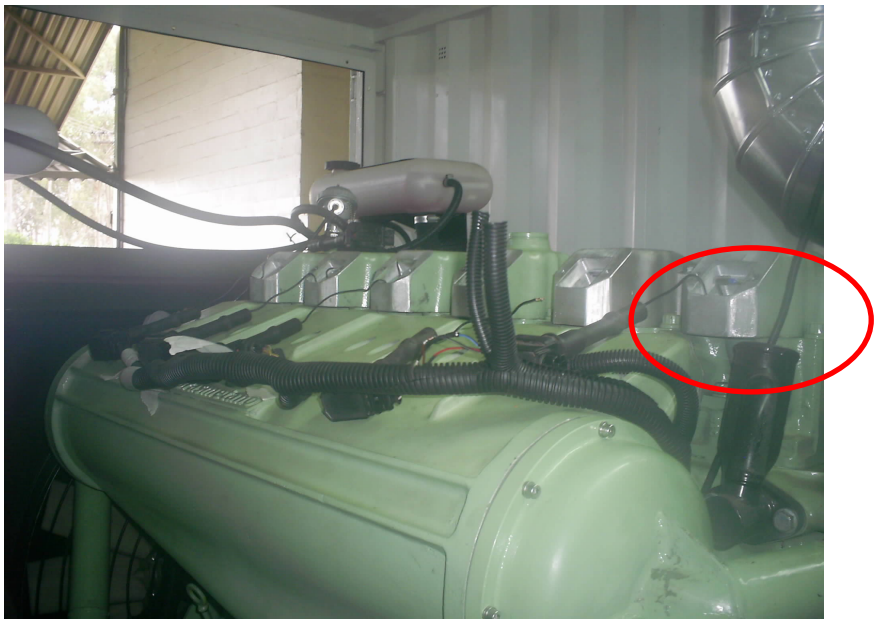

Figura 5.20. Bobina que apresentou defeito.

Fonte: CENBIO (2009).

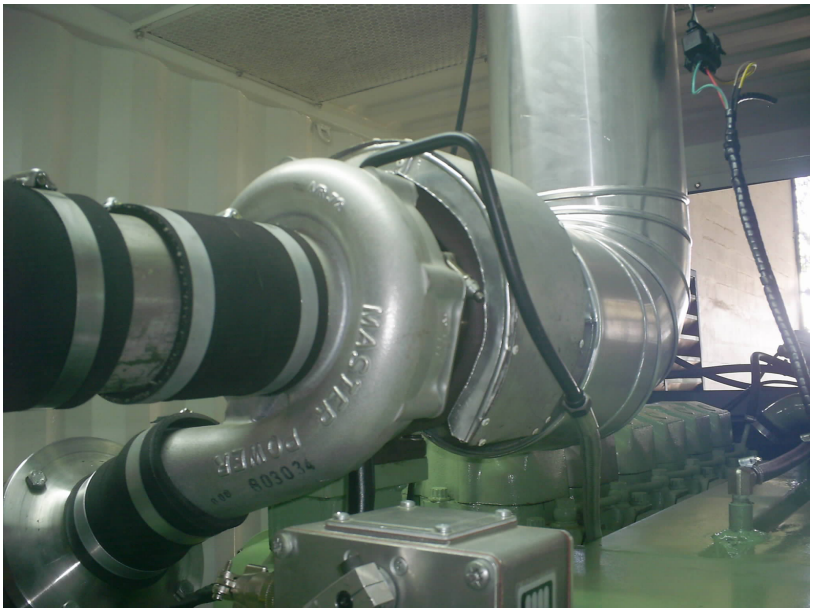

Figura 5.21. Turbina e voluta.

Fonte: CENBIO (2009).

Após a resolução dos problemas encontrados, foi marcado novo dia de testes no início do mês de dezembro. O sistema inicialmente operou sem carga durante 30 minutos, visando determinar o tempo em que as temperaturas ficavam constantes e, então, após os 30 minutos o sistema foi testado com carga atingindo 200 kW em 4 minutos. As informações obtidas neste último teste são apresentadas no Gráfico 5.5, onde se observa que, no momento em que o sistema atingiu a potência de 200 kW, a válvula borboleta encontrava-se 90% aberta.

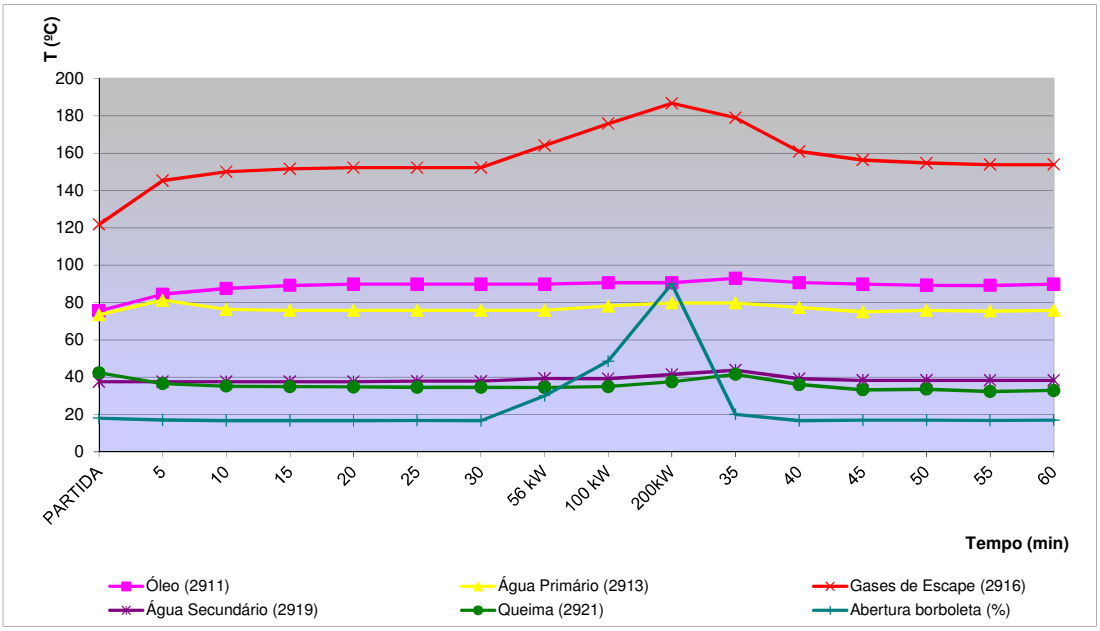

Gráfico 5.5. Medições do teste final.

Fonte: Elaboração da autora.

A partir destes testes concluiu-se que o sistema já estava em condições de ser instalado no aterro, para que fosse possível iniciar os testes finais com biogás e o startup do sistema. A instalação do sistema ocorreu no início de 2009, na própria planta de biogás do aterro (Figura 5.22), entrando efetivamente em operação no mês de junho.

Com o início da operação do sistema, foi realizada análise do combustível, bem como dos gases de exaustão do motor, cujos resultados são mostrados na Tabela 5.5. Vale ressaltar que a tecnologia utilizada neste trabalho opera com composições de metano variando entre 30 e 80% e com a presença de gás sulfídrico em baixas quantidades, parâmetros atendidos pelo biogás da CTR - Caieiras. Caso ocorra o aumento da concentração de gás sulfídrico, um sistema de purificação do biogás tornar-se-á necessário.

Figura 5.22. Planta de biogás e instalação do container.

Fonte: ESSENCIS (2010a).

Tabela 5.5. Análise do biogás e dos gases de exaustão do motor.

Composição do biogás	
Metano	44,20%
Dióxido de Carbono	29,30%
Oxigênio	5,60%
Nitrogênio	19,00%
Gás Sulfídrico	10 ppm
Umidade	2,1%
Composição do gás de exaustão	
Metano	0,20%
Dióxido de Carbono	15,8%
Oxigênio	1,8%
Monóxido de carbono	0,72%
Óxidos de nitrogênio	250 ppm
Dióxido de enxofre	1 ppm

Fonte: CENBIO (2009).

Como o motor não estava operando a plena carga foi possível observar na análise dos gases de exaustão uma pequena parcela do metano sendo emitida para a atmosfera. Outro dado relevante é a emissão de óxidos de nitrogênio, que para motores ciclo Otto apresentam uma faixa entre 250 a 3000 ppm, conforme mostrado no capítulo anterior (Tabela 4.1). Na análise realizada observa-se a emissão de 250 ppm, valor situado no limite inferior ao especificado.

Durante a fase de monitoramento, que consistiu nas horas de operação iniciais, o sistema compressão do biogás do grupo motogerador apresentou falhas, que foram resolvidas pelo fabricante. A operação assistida durou 3 meses, nos quais o sistema foi monitorado constantemente a fim de analisar seu funcionamento e verificar se todos os parâmetros encontravam-se dentro dos limites estabelecidos.

Para o cálculo da energia produzida pelo sistema, foram utilizados os parâmetros reais da Tabela 5.5, que contempla a composição do biogás da CTR-Caieiras, bem como o potencial instalado de 230 kW. Para a análise de geração de energia elétrica deste sistema, considerou-se uma disponibilidade anual de 7.000 horas[2] de operação. A partir destes dados, calculou-se o poder calorífico do biogás, o volume de energia elétrica gerado e a energia elétrica líquida a ser disponibilizada para o aterro sanitário, além do consumo de biogás necessário para a operação do sistema (Tabela 5.6).

Para o cálculo do volume de energia elétrica gerada e a energia elétrica líquida disponível, utilizou-se a equação 9, conforme segue.

$E_T = Pot_E \times Disp$, onde: (Eq. 9)

E_T: energia elétrica total [kWh/ano]

Pot_E: potência elétrica disponível [kW]

Disp: disponibilidade anual [h/ano]

A energia total, portanto, é de 1.610 MWh/ano. Porém, para o processo de geração de energia, é necessária uma pequena quantidade de energia elétrica para movimentar o sistema (autoconsumo), que neste sistema foi estimado em 5%[3]. Desta forma, o volume de energia elétrica que poderá ser consumido pelo aterro sanitário será de 1.530 MWh/ano. Todos os parâmetros do sistema de geração de energia elétrica são resumidos na Tabela 5.6.

[2] Experiência da autora em projetos semelhantes para motores de combustão interna.
[3] Experiência da autora em projetos semelhantes.

Tabela 5.6. Parâmetros do sistema de geração de energia elétrica.

PCI do biogás	4,1 kWh/m³
Potência Instalada	230 kW
Quantidade	1 grupo
Carga de operação	100%
Potencial elétrico	230 kW
Rendimento (fabricante)	28%
Disponibilidade	7000 h
Volume de energia elétrica gerada	1.610 MWh/ano
Auto consumo	81 MWh/ano
Volume de energia elétrica exportada	1.530 MWh/ano
Vazão de biogás	200,6 m³/h

Fonte: Elaboração própria.

O projeto inicial previa a interligação desta energia na rede do aterro, porém, devido à dificuldade de se obter autorização da concessionária local e aos custos elevados não previstos em projeto, a energia gerada neste sistema foi direcionada para a alimentação de um dos sopradores da planta de biogás da CTR – Caieiras, diminuindo, desta forma, o consumo de energia elétrica da concessionária local.

6 ASPECTOS ECONÔMICOS DA CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

A avaliação econômica deste trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade econômica de projetos de conversão energética do biogás e, como referência utilizou-se o estudo de caso do projeto Aproveitamento do Biogás Proveniente do Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás, analisando o sistema instalado na CTR - Caieiras. Desta forma, a análise realista e atual possibilita sua replicação em aterros sanitários de pequeno porte, visto que aterros maiores comportam sistemas de grande capacidade elétrica.

O modelo de avaliação econômico-financeira baseou-se em um fluxo de caixa que contempla o investimento inicial, lucro líquido anual durante um período de amortização de dez anos e, com base nestes valores, é possível realizar o cálculo do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR). Estes parâmetros determinam o comportamento do fluxo de caixa e dos resultados do projeto durante sua vida útil, bem como os custos envolvidos (investimento, operacionais fixos e variáveis), taxa de juros de financiamento, percentual do investimento financiado, prazos e amortização (SALOMON, 2007).

6.1 Custo de investimento

O valor do investimento inicial (Tabela 6.1) contempla todos os custos associados aos equipamentos que compõem o sistema de geração de energia elétrica, bem como os serviços de instalação e montagem, transporte, frete e seguro.

Tabela 6.1. Custo dos equipamentos, materiais e serviços do sistema de geração de energia elétrica.

DESCRIÇÃO	VALOR (R$)
EQUIPAMENTOS	***392.725,00***
Motor e acessórios	263.235,00
Gerador	46.000,00
Segurança (válvulas, sensores e acessórios)	83.490,00
AUTOMAÇÃO	***183.480,00***
Painel de controle elétrico manual e acessórios	83.050,00
Sistema de alimentação e ignição eletrônicas	100.430,00
CIVIL	***58.208,00***
Container 6 m	42.158,00
Obras civis	16.050,00
INSTALAÇÃO / MONTAGEM	***82.850,00***
Serviços (projeto, mão de obra, supervisão, treinamento)	65.890,00
Transporte	4.800,00
Hospedagem	4.500,00
Alimentação	2.250,00
Mão-de-obra local	3.210,00
Guincho	2.200,00
FRETE E SEGURO	***3.654,68***
Frete e seguro	3.654,68
TOTAL	**720.918,68**

Fonte: CENBIO (2007).

*Valores atualizados base IGP_M Jan/2011

6.2 Custos de operação e manutenção

Para a determinação do custo de operação é necessário calcular os custos com mão-de-obra, utilizados para a operação do sistema, além dos custos com o combustível consumido. Já o custo de manutenção, engloba todos os gastos com peças, materiais e ferramentas necessários para sua execução.

A manutenção pode ser definida como um conjunto de intervenções executadas no período de vida útil do equipamento, de forma a mantê-lo nas melhores condições de operação possíveis. Sua realização é de extrema importância a fim de reduzir os custos associados a quebras e falhas, aumentar o rendimento, a disponibilidade do equipamento e pode ser caracterizada como preventiva, preditiva ou corretiva.

A manutenção preventiva consiste em intervenções com intervalos pré-estabelecidos visando reduzir a possibilidade de que o equipamento opere em condições inferiores ao nível requerido, além de rotinas de inspeção e verificação, lubrificações e reposição de peças com desgaste intensivo. Já a manutenção preditiva engloba as ações que podem ser tomadas a partir de um histórico do equipamento e análises específicas, onde se pode optar por uma troca antes mesmo de ocorrer a falha evitando assim sua parada (SILVA, 2010).

A manutenção corretiva, como o próprio nome diz, visa à correção de um equipamento após a ocorrência de uma falha ou quebra, ou seja, não é um evento programado. Esta manutenção possui o maior custo associado, visto que é necessário manter um estoque de peças sobressalentes, além de grande tempo de mão de obra e máquina parada, diminuindo a disponibilidade da produção.

Neste contexto, a determinação dos custos com manutenção foi realizada a partir do plano de manutenções definido pelo fabricante do equipamento. Este plano de manutenção (Tabela 6.2) considera apenas as manutenções preventivas e preditivas, enquanto que os custos com manutenção corretiva foram estimados em 30%[4] do custo com estas manutenções, visto que se trata de uma tecnologia adaptada para operação com biogás.

Além disto, para a determinação deste valor, levou-se em consideração que o biogás é um combustível com composição é variável, fazendo com que o equipamento tenha que trabalhar com características distintas ao longo do dia e não foi contemplado nenhum sistema de tratamento para este combustível. Vale ressaltar que o biogás da CTR-Caieiras apresenta em sua composição gás sulfídrico e umidade, que pode resultar em processos de corrosão das

[4] Experiência da autora em projetos semelhantes.

partes internas do motor.

Tabela 6.2. Plano de manutenção elaborado pelo fabricante do equipamento.

300 horas
Lubrificações dos mancais
Verificação do nível de água e óleo
Verificação da tensão das correias e reaperto de parafusos e conexões
Limpeza do elemento filtrante de umidade
1.000 horas
Troca de óleo e filtro
Limpeza dos cabos de bateria
Análise físico-química do óleo
2.500 horas
Alinhar as polias do esticador de correias, booster e bomba d'água
5.000 horas
Troca das correias do booster e alternador
Troca das velas e cabos de ignição
Regulagem do jogo de válvulas
Análise de vibração e termografia
10.000 horas
Troca dos elementos filtrantes de ar
Troca das abraçadeiras e mangotes do sistema de refrigeração, admissão e biogás
Verificação da estanqueidade do radiador e trocador de calor
25.000 horas
Substituição dos rolamentos, gaxetas, anéis de vedação e retentores
Substituição dos anéis de vedação do Intercooler
Troca das bobinas do sistema de ignição
Troca do elemento filtrante de umidade
Troca da água e fluido do sistema de refrigeração

Cont. Tabela 6.2. Plano de manutenção elaborado pelo fabricante do equipamento.

50.000 horas
Verificar o desgaste das escovas e a folga dos rolamentos
Substituição das baterias
Substituição do sensor lambda
Verificação do estado de corrosão das tubulações (circuitos primário e secundário)

Fonte: Brasmetano (2009).

A partir das intervenções apresentadas, foram contabilizadas quantas intervenções de cada tipo seriam realizadas ao longo de 10 anos de projeto[5] (Tabela 6.3). Multiplicando o custo de cada intervenção pela quantidade realizada no período mencionado, chegou-se ao montante de R$ 265.466,00[6]. Dividindo-se o custo de manutenção pela geração de energia elétrica no mesmo período, obtém-se o valor de 16,49 R$/MWh, sendo que, aproximadamente, 72% correspondem às peças e o restante ao óleo lubrificante. Acrescentando o valor de manutenção corretiva, totaliza-se o valor de 20,44 R$/MWh.

Tabela 6.3. Número de intervenções no prazo de 10 anos.

300 horas	233
1.000 horas	70
2.500 horas	28
5.000 horas	14
10.000 horas	7
25.000 horas	2
50.000 horas	1

Fonte: Elaboração própria.

Para a definição do custo com operação, consideraram-se os custos com combustível

[5] Determinação do tempo de projeto pela autora.
[6] Informação recebida por nfigueiredo@dalkia.com.br em Dezembro de 2010.

nulos, visto que o biogás é um subproduto do processo atual. Já o custo com mão de obra é calculado apenas para um técnico de manutenção[7] que trabalhará 7h20 por dia, durante seis dias na semana, e será responsável pela realização de todas as manutenções e rotinas de manutenção executadas no grupo motogerador. As demais atividades de operação, como partir o motor em caso de parada ou parar o motor em uma situação específica poderão ser executadas pelos operadores da própria planta de biogás. Desta forma, o custo para as atividades descritas totalizam o valor de 3,35 R$/MWh.

6.3 Avaliação econômica do sistema instalado na CTR-Caieiras

Para a avaliação econômica do sistema foram adotadas as seguintes premissas:

- Taxa de atratividade de 15% ao ano;
- Tempo de projeto de 10 anos[8];
- Depreciação linear ao longo do projeto (10% ao ano);
- Taxa de juros no financiamento de 9,25% ao ano;
- Valor de venda de energia de 144,20 R$/MWh, preço negociado para projetos de biomassa no Leilão de Fontes Alternativas de Energia Elétrica A-3/2010 (EPE, 2010);
- Disponibilidade de 7.000 horas/ano;
- Energia elétrica gerada pelo sistema de 1.610 MWh/ano;
- Energia elétrica disponibilizada para o aterro de 1.530 MWh/ano;
- Custo de operação e manutenção de 20,44 R$/MWh;
- O projeto não contabiliza a receita proveniente de créditos de carbono[9];
- O modelo descrito desconsidera a inflação durante o período do projeto.

Para a análise da viabilidade de um projeto, geralmente é realizado um estudo de viabilidade técnico-econômico (EVTE), que servirá como base para obtenção de

[7] Considerou-se o salário médio para a categoria.
[8] Durante este tempo, o investidor prevê que a remuneração obtida no projeto seja tal que, para a taxa de atratividade desejada, o valor presente líquido seja zero no final do último ano do projeto, ou seja, o investimento seja amortizado e o capital próprio retornado (Salomon apud Lamônica, 2006).
[9] A não contabilização do crédito de carbono como receita antes da venda faz com que patrimônio líquido seja representado adequadamente.

financiamento. A lucratividade, por sua vez, é medida a partir dos fluxos de caixa estimados para este projeto, ano a ano. Diante das premissas descritas e dos valores estudados, o fluxo de caixa do projeto e apresentado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4. Fluxo de caixa do projeto.

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Investimento inicial										
1.1 Total investido (R$)	(932.732)[10]									
2. Saídas operacionais										
2.1 Operação e manutenção	(31.923)[11]	(31.923)	(31.923)	(31.923)	(31.923)	(31.923)	(31.923)	(31.923)	(31.923)	(31.923)
3. Receitas com vendas										
3.1 Energia elétrica	220.554[12]	220.554	220.554	220.554	220.554	220.554	220.554	220.554	220.554	220.554
Fluxo de caixa livre (R$)	(744.101)	188.630	188.630	188.630	188.630	188.630	188.630	188.630	188.630	188.630
Valor presente líquido (VPL) (R$)	135.621,70									

Fonte: Elaboração da autora.

[10] Valor do investimento acrescido da taxa de juros mencionada.
[11] Custo anual de operação e manutenção, de acordo com os valores apresentados anteriormente.
[12] Receita anual com a venda de energia elétrica, considerando valor de venda e disponibilidade de acordo com os valores apresentados anteriormente.

A Tabela 6.4 permite verificar que o cenário estudado apresenta viabilidade econômica, considerando o valor de venda da energia elétrica de R$144,20, valor negociado para projetos a biomassa no último Leilão de Fontes Alternativas de Energia Elétrica A-3/2010. Para a taxa de atratividade de 15%, o VPL em 10 anos será de, aproximadamente, 135 mil reais e a taxa interna de retorno (TIR) de 21%.

Porém, é importante verificar a partir de qual valor de energia elétrica o projeto deixa de ser viável economicamente. Calculando este valor a partir das mesmas premissas anteriores, e fixando o VPL no valor zero, chega-se ao valor de venda limite de energia elétrica de 126,5 R$/MWh. Abaixo deste valor, o projeto torna-se inviável.

Vale lembrar que o estudo econômico deste capítulo foi realizado considerando uma tecnologia de pequeno porte. A partir da utilização de grupos motogeradores de maior capacidade pode-se obter melhores resultados em um estudo de viabilidade econômica, visto que os custos associados ao equipamento são menores e a produção de energia elétrica é maior. Desta forma, realizou-se uma breve análise econômica de um motor de grande porte, para efeitos comparativos.

O modelo avaliado é um motor da GE Jenbacher_JGS420[13], com potência de 1.426 kW e rendimento de 37,8% e um consumo de biogás de 1.161 m³/h considerando o poder calorífico do aterro estudado. Considerando o investimento anualizado de 575.386 R$/ano, custo de operação e manutenção de 696.965 R$/ano[14] (mão-de-obra e todas as peças necessárias para as manutenções), receita de energia elétrica ao preço de 144,20 R$/MWh e a disponibilidade do equipamento em 7.000 horas/ano, chega-se a um VPL de 3.971.701 R$ e uma TIR de 28%. O valor limite de venda de energia elétrica neste cenário é de 102,75 R$/MWh.

A partir destes cálculos é possível concluir que os grupos motogeradores de grande porte apresentam viabilidade econômica, sendo uma alternativa para aterros com grande produção de biogás, como o caso da CTR – Caieiras.

---

[13] http://www.ge-energy.com/

[14] Cálculos da autora a partir de informações recebidas por nfigueiredo@dalkia.com.br em Janeiro de 2011.

7 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA: ANÁLISE DE BARREIRAS E PROPOSTAS DE INCENTIVOS

7.1 Barreiras tecnológicas e econômicas

As barreiras tecnológicas encontradas hoje no país para a geração de energia a partir do biogás estão diretamente ligadas à falta de equipamentos desenvolvidos para este fim, em âmbito nacional. Além disto, a falta de mão de obra qualificada para operação e manutenção destes sistemas contribui com as dificuldades na implementação destes projetos.

Mesmo com o aumento na demanda de projetos utilizando biogás como combustível no Brasil, destacam-se os projetos de pequeno porte, em sua maioria nas áreas rurais. Nestes locais, onde a geração do biogás é feita a partir da biodigestão de resíduos animais e vegetais, são instalados sistemas de baixa potência (motores de 20 a 50 kW) adaptados de motores veiculares. Estas adaptações resultam em um sistema de menor custo e, também, de menor confiabilidade e durabilidade.

Os aterros sanitários, por sua vez, produzem uma quantidade de gás significativamente maior e podem utilizar sistemas de médio e grande porte. É o caso da CTR de Caieiras que, ao longo de sua vida útil atingirá o potencial de 44 MW, inviabilizando diversas instalações de pequeno porte.

Atualmente, o Brasil não possui tecnologia própria de grande porte, o que acarreta na necessidade de importações destes equipamentos, principalmente de fábricas Européias, onde a conversão energética do biogás já faz parte da rotina dos países. Os custos envolvidos referentes à importação englobam as despesas com transportes, impostos e taxas alfandegárias, tornando o preço final, dependendo da aplicação, inviável.

Ao instalar estes equipamentos, a empresa que os importou passa a depender de materiais e peças de reposição não disponíveis no Brasil. Desta forma, além da compra do sistema, o custo com sua manutenção será diretamente afetado. A questão cambial é extremamente importante na análise destes projetos, já que tanto os equipamentos, quanto as peças para sua manutenção são importadas e, com a instabilidade do Real frente ao Dólar e ao Euro, é difícil estimar estes custos em longo prazo. O tempo demandado para as operações de importação deve ser levado em conta, o que diminui a disponibilidade do sistema, que poderá

ficar parado aguardando alguma peça que venha a ser danificada ao longo da operação do sistema.

A ausência de um mercado consolidado que demande equipamentos e serviços voltados ao aproveitamento energético do biogás, apresenta-se como motivo determinante para a ausência de investimentos nestas áreas. Por sua vez, a demora na instalação destes sistemas, o alto custo de investimento e mão de obra especializada, atrasos e problemas no *startup* e operação do sistema , aliados aos problemas de assistência técnica, não incentivam os aterros sanitários a investirem e implantarem estes sistemas (COSTA, 2006).

As opções de financiamento disponíveis atualmente, bem como as taxas de juros a eles associadas, podem ser fatores determinantes na viabilidade de um projeto de geração de energia a partir do biogás (COSTA, 2006). Por fim, o preço de venda da energia elétrica gerada, como já mostrado na análise econômica do projeto, pode inviabilizar o investimento, já que contribui para o fluxo de caixa negativo.

No projeto abordado neste trabalho, o grande problema encontrado foi referente ao sistema de admissão de biogás, em que, problemas na compressão do gás resultaram na parada do equipamento por diversas vezes. Foram feitos ajustes desde o compressor aos elementos de automação, a fim de solucionar o problema.

A empresa Brasmetano, responsável pela adaptação do sistema, instalação e *startup,* passou por problemas internos, comprometendo a mão de obra especializada necessária para a execução dos serviços acordados e o acompanhamento adequado das primeiras horas de operação do sistema, o que resultou em atrasos no cronograma. Após o *startup* do sistema de geração de energia elétrica, a CTR – Caieiras passou a ser responsável por sua operação e manutenção.

7.2 Barreiras socioambientais

A geração de energia a partir do biogás não apresenta desvantagens do ponto de vista social ou ambiental, desde que as emissões de NOx não estejam fora dos limites estabelecidos. A possibilidade de implantação destes sistemas em aterros sanitários municipais contribuiria com o saneamento básico nestes locais, além de possibilitar a geração de empregos e diminuir o número de pessoas que sobrevivem de restos de lixo.

Analisando os benefícios ambientais, pode-se citar o incentivo para a destinação correta dos resíduos, bem como o monitoramento de sua decomposição e o controle do chorume e biogás gerado. Além disto, as medidas tomadas de impermeabilização do solo impedem a contaminação do mesmo, bem como a contaminação do lençol freático.

A geração de energia descentralizada faz com que esta geração seja feita próxima aos seus pontos de carga, diminuindo as perdas e custos na transmissão. Portanto, a utilização do biogás resulta na diminuição das emissões de metano para a atmosfera, gás com grande potencial de aquecimento global. Já a geração da energia elétrica diminui a necessidade de combustíveis fósseis, responsáveis também pelo efeito estufa.

7.3 Barreiras políticas

As barreiras políticas associadas à conversão energética do biogás estão associadas à falta de incentivos políticos e à falta de priorização para assuntos referentes à saneamento básico no país. Os incentivos políticos dizem respeito à falta de leis que impulsionem o mercado a investir em fontes renováveis de energia, além de subsídios nos financiamentos e tarifas diferenciadas para este tipo de energia.

Na Alemanha, país onde a conversão energética do biogás é amplamente difundida, existem mais de 4.000 plantas com capacidade instalada de aproximadamente 1.400 MWe. Isto se deve à Lei de Energias Renováveis criada no ano de 2000, com o objetivo de aumentar a participação das fontes renováveis na matriz energética alemã em 20% até o ano de 2020, atingindo o patamar de 50% em 2050. Esta lei exige que os operadores da rede elétrica paguem um preço fixo para energia elétrica proveniente de fontes renováveis, superior ao preço da energia convencional, além de garantir a compra em longo prazo. Os preços são reduzidos anualmente em 1%, a fim de incentivar o investimento em novas tecnologias e garantir a competitividade das energias renováveis frente à energia convencional e todos os consumidores de energia elétrica pagam, mensalmente, uma taxa de aproximadamente 4 euros a fim de contribuir com a política energética do país, o que é bem aceito devido ao baixo custo (HOLDER, 2010).

Desta forma, a Alemanha é um grande exemplo de desenvolvimento e incentivo das energias renováveis, desenvolvendo uma política energética organizada e estratégica, além de um plano estruturado de subsídios econômicos e tecnológicos.

O saneamento básico, por sua vez, engloba o abastecimento de água, o manejo de águas pluviais, esgoto e resíduos sólidos, tornando-se essencial para a diminuição da poluição do meio ambiente e melhoria das condições sociais, visto que sem saneamento, as pessoas estão expostas a doenças graves e o meio ambiente pode ser seriamente prejudicado. Desta forma, melhorar o saneamento no país é melhorar a saúde da população (COSTA, 2006).

No Brasil, o índice de tratamento de resíduos sólidos urbanos ainda é baixo, grande parte da população não tem acesso à coleta de lixo e, muitas vezes, o resíduo coletado não tem destinação adequada. Desta forma, a utilização do biogás gerado na decomposição do lixo e a venda da energia elétrica gerada na conversão energética deste gás, poderiam contribuir para aumentar a viabilidade e o interesse de empresas neste tipo de projeto.

Neste contexto, torna-se importante a criação de políticas que integrem a melhoria do saneamento básico, com a geração de energia elétrica e desenvolvimento de tecnologias para o uso do biogás. No final do ano de 2010, foi sancionado o Decreto Federal nº 7.404, que regulamenta a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, criando metas e obrigações quanto ao destino final do lixo produzido e prevendo penalidades e multas àqueles que não cumprirem a legislação.

Na Política Nacional dos Resíduos Sólidos está prevista a redução, reutilização e reciclagem com o objetivo de reduzir a quantidade de resíduos encaminhados para disposição final e autorizam a utilização de tecnologias visando a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que seja comprova sua viabilidade técnica, econômica e ambiental, além do monitoramento das emissões de gases conforme as diretrizes do órgão ambiental competente.

A União fica responsável por elaborar o Plano Nacional de Resíduos Sólidos até junho de 2011, com o diagnóstico da situação atual dos resíduos sólidos, metas de redução e reutilização destes resíduos, metas para o aproveitamento energético do gás gerado nas unidades de disposição final, além de programas, projetos e ações para o atendimento das metas previstas. O poder público poderá instituir linhas de financiamento para iniciativas que visem desenvolver projetos de gestão, prevenção ou redução na geração de resíduos, produtos com menores impactos socioambientais, entre outros.

Os estados, por sua vez, devem elaborar planos estaduais podendo contemplar as regiões metropolitanas. Toda empresa geradora de resíduos deverá elaborar um plano de

gerenciamento e será responsável por qualquer dano que venha a ser ocasionado pela destinação inadequada de seus resíduos.

Desta forma, cabe aos órgãos competentes desenvolverem um plano estruturado com metas realistas, além de criarem equipes para realizar o monitoramento e aplicar as penalidades necessárias, a fim de que a população e as empresas possam se conscientizar da importância do saneamento.

7.4 Propostas de Incentivos ao Uso Energético do Biogás

7.4.1 PROINFA

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia – PROINFA foi criado pelo governo brasileiro com o intuito de aumentar a participação de fontes alternativas de energia, provenientes de fontes eólicas, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) na matriz energética nacional. A participação destas fontes no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) aumenta a confiabilidade e garante a segurança no abastecimento. Além da segurança no abastecimento de energia, o PROINFA objetivou a valorização das características e potencialidades regionais, com a criação de postos de trabalho, capacitação e formação de profissionais qualificados, além da redução da emissão dos gases de efeito estufa (MME, 2009).

Instituído em 2002, pela Lei nº 10.438 de 26 de abril, o PROINFA foi revisado em 11 de novembro de 2003 pela Lei nº 10.762, em 25 de junho de 2004 pela Lei 10.889 e estabelecido em duas etapas distintas, sendo que a primeira etapa correspondia à contratação de 3.300 MW de capacidade instalada, divididos igualmente entre empreendimentos que gerem energia elétrica a partir dos ventos (eólica), biomassa e PCH. A segunda etapa, que não chegou a ser implementada, previa que 15% do acréscimo anual do consumo de energia elétrica deveria ser atendido por fontes alternativas renováveis de energia. Desta forma, até o ano de 2020, estas fontes representariam 10% do consumo de eletricidade no país.

O PROINFA foi gerenciado pela Eletrobrás e conta com o apoio do BNDES, que reservou cerca de 6 bilhões de reais para o Programa, cuja linha de crédito previa

financiamento de até 70% do valor total e amortização de 10 anos. Porém, em 2006, as condições foram melhoradas, ampliando a participação em até 80% do investimento e amortização em 12 anos. Do montante a ser investido, não eram financiáveis bens e serviços importados ou compra de terrenos, o índice de nacionalização exigido para o projeto era de 60% entre equipamentos e serviços e não eram cobrados juros durante a fase de construção da Usina (MME, 2009).

A Eletrobrás, por sua vez, foi responsável pela contratação desta energia, garantindo ao empreendedor o piso de 70% da receita contratual durante o período de financiamento e a comercialização da energia excedente, resultante da diferença na energia contratada e produzida. Os contratos de compra de energia são de longo prazo, tendo a venda assegurada por um período de até 20 anos, com valores de referência distintos para cada tipo de projeto. Os valores de venda da energia elétrica para o PROINFA, determinados na Portaria nº 45 de 30 de maio de 2004, são mostrados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1. Valor de venda de energia elétrica.

	Valor da Energia (R$/MWh) Base: Maio/2004	**Valor da Energia* (R$/MWh) Base: Janeiro/2011**
PHCs	117,02	171,26
Eólica	180,18 a 204,35	263,70 a 299,07
Biomassa		
Bagaço de Cana	93,77	137,23
Madeira	101,35	148,33
Casca de Arroz	103,20	151,04
Biogás de Aterro	169,08	247,45

Fonte: ANEEL (2010).

*Valores atualizados pelo IGP-M/FVG 01/2011

Inicialmente, o Programa previa a operação de 144 usinas até dezembro de 2006, totalizando a capacidade instalada de 3.299,40 MW, divididas em 63 PCHs representando 1.191,24 MW, 54 usinas eólicas com 1.422,92 e 27 centrais a biomassa, com 685,24 MW. Porém, no Plano Anual do Proinfa – PAP 2010, divulgado pela Eletrobrás no final do ano de

2009, 9 empreendimentos encontram-se em processo de rescisão e, portanto, apenas 135 empreendimentos fazem parte do Programa, totalizando a contratação de 3.317,50 MW, conforme apresentado na Tabela 7.2.

Tabela 7.2. Energia contratada em 2010.

Fonte	Número de Empreendimentos	Potência Instalada (MW)
Biomassa	19	553,34
Eólica	44	1.422,92
PCH	62	1.181,24
TOTAL	135	3.317,50

Fonte: ANEEL (2010b).

O atraso na construção destes empreendimentos compreende diversos fatores, como a dificuldade para a cumprir as exigências necessárias na obtenção do financiamento com o BNDES, a falta de equipamentos nacionalizados que atendessem o projeto em questão, novas exigências na renovação ou obtenção das licenças ambientais, as incertezas da regulamentação da segunda fase do PROINFA, criando um cenário pouco atrativo ao investimento privado (DANTAS, 2008). Atualmente, são 44 projetos pendentes, que correspondem a 1.112 MW representando cerca de 30% do programa e, devido a estes atrasos, o prazo foi estendido até o final de dezembro de 2011, tempo em que deverão ser finalizadas 28 usinas já em fase de obras e outras 16 que ainda não foram iniciadas.

Por fim, a segunda fase do PROINFA foi abandonada e, a partir de 2007 foi adotado o sistema de leilão de fontes alternativas de energia. Em junho de 2007, foi realizado o primeiro leilão exclusivo para esta fonte, alcançando um resultado muito abaixo da expectativa do mercado e, em agosto de 2010, aconteceu o segundo leilão de fontes alternativas, visando à entrega do produto entre os anos de 2012 e 2013, com prazos de 15, 20 e 30 anos, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.3. A consultoria Excelência Energética (2010) elaborou um estudo apontando que a entrada da energia destes empreendimentos na matriz energética brasileira, reduzira o uso das usinas termelétricas a gás, carvão e óleo, em mais de 9% ao ano.

Tabela 7.3. Leilões de fontes alternativas de energia desde 2007.

Data do leilão	Fonte	Nº usinas novas	Potência instalada	Período Contratual (anos)	Energia Contratada (MW médio)	Preço Médio (R$/MWh)
18/6/2007	PCH	6	96,74	30	46	134,99
	Biomassa	12	541,9	15	140	138,85
14/12/2009	Eólica	71	1805,7	20	753	148,39
25 e 26/08/2010	PCH	7	131,5	15, 20 e 30 anos	69,80	141,93
	Biomassa	12	721,9		190,6	144,20
	Eólica	70	2.047,8		899,0	130,86

Fonte: ANEEL (2010a).

7.4.2 Protocolo de Quioto

Em 1992, foi adotada a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, comissão que objetiva a estabilização da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, de forma que seus níveis sejam admissíveis para a vida humana no planeta. Para esta Convenção, foram estabelecidas trocas de informações e discussões permanentes, de modo a possibilitar revisões constantes que permitem adoção de compromissos adicionais de acordo com as evoluções de pesquisas científicas e disposições políticas (CRUZ, 2009) e, para promover e monitorar a implementação da Convenção foi estabelecida a Conferência das Partes (COP).

De acordo com Lora (2008), a Convenção estabeleceu entre os países signatários o princípio de responsabilidade comum, porém, os países desenvolvidos, que historicamente tiveram grande contribuição para o aumento da concentração dos gases de efeito estufa, seriam os primeiros com metas de redução das emissões, ao passo que os países em desenvolvimento não seriam obrigados a cumprir tais metas.

Durante os anos de 1995 e 1996 ocorreram duas reuniões da COP, denominadas COP1 e COP2, nas cidades de Berlim e Genebra, respectivamente. Nestas, foi estabelecida a

necessidade de projetar as metas de redução de emissões pelos países desenvolvidos, bem como a descrição de todas as políticas e medidas necessárias para o cumprimento destas metas.

Foi então, na terceira convenção realizada em Quioto, em 1997, que a Convenção decidiu consensualmente na adoção de um acordo internacional firmando as diretrizes básicas para conter o aumento das emissões dos gases de efeito estufa, bem como tratar as áreas degradadas, intitulado Protocolo de Quioto. Diversas medidas estabelecidas neste ano, foram revisadas e detalhadas nas Conferências seguintes (RIBEIRO, 2005).

O Protocolo determina que os 39 países desenvolvidos devem reduzir suas emissões combinadas de gases de efeito estufa, entre os anos de 2008 e 2012, em pelo menos 5% em relação aos índices registrados em 1990. Para o cumprimento das metas, o Protocolo permite que estes países utilizem três alternativas: implementação conjunta, comercialização de emissões e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL).

A implementação conjunta consiste em um acordo entre dois países do Anexo I do Protocolo, em que um país financia o desenvolvimento de tecnologias e projetos de redução em outro, que possui custos menores, de forma a solucionar os problemas comuns. O comércio de emissões, por sua vez, permite que países no Anexo I que possuam um volume de redução excedente, possa comercializá-la com outro país que não conseguir atingir sua meta, de maneira a complementar o montante que falta. Por fim, o MDL tem por objetivo o desenvolvimento e implementação de projetos em países em desenvolvimento, financiados por países desenvolvidos, que promovam a redução dos gases de efeito estufa. Estas reduções poderão ser utilizadas como créditos para serem computados nas metas destes países.

O Protocolo entrou em vigor no ano de 2005, após aprovação por países que, juntos, somassem 55% das emissões dos gases de efeito estufa. Os Estados Unidos, país responsável por mais de um terço das emissões mundiais, não aderiu ao Protocolo, visto que para atingir as metas estabelecidas, necessitariam de investimentos altíssimos que poderiam prejudicar a economia do país (COSTA, 2006).

Ainda de acordo com o autor, em países em desenvolvimento, como o Brasil, o MDL contribui com o desenvolvimento de tecnologias e projetos que propiciem a utilização de fontes limpas de energia, a partir de investimentos na área energética, bem como com a geração de empregos e oportunidades, além da diversificação da matriz energética nacional.

7.4.3 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

Como já mencionado, o objetivo principal do MDL é apoiar os países em desenvolvimento na implantação de tecnologias e projetos que visem a recuperação e preservação ambiental, além de auxiliar os países desenvolvidos a cumprir as metas de redução de emissões estabelecidas pelo Protocolo de Quioto, ou seja, o MDL visa atingir o desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento, utilizando recursos de países desenvolvidos. Desta forma, os países poluidores investem uma quantidade menor de recursos, se for comparado ao custo de implantação destes projetos no próprio local de emissão.

Para que um projeto seja enquadrado no MDL, é necessário seguir os critérios definidos pelo artigo 12 do Protocolo:

a. Participação voluntária pelas partes envolvidas, não sendo aceitos projetos impostos pela legislação local;

b. Benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo relacionados com a mitigação da mudança climática;

c. Reduções de emissões adicionais às que ocorreriam na ausência de determinado projeto.

Para que se comprove este último item, é necessário que seja traçado um cenário de referência, a partir do qual será possível determinar as alterações ocasionadas pelo projeto em questão. Este cenário de referência é denominado linha de base, que possibilita definir o patamar, a partir do qual será calculada a diferença de emissão após a implantação do projeto.

O acordo de Marrakesh, assinado em 2001 no COP 7, estabeleceu três enfoques para a definição da linha de base: emissões atuais ou históricas, emissões de uma tecnologia atrativa do ponto de vista econômico ou média das emissões de projetos similares ao que será implantado, baseado nos cinco anos anteriores, cujo desempenho esteja entre os primeiros 20% de sua categoria. Por fim, a análise da adicionalidade contempla, além dos cálculos de redução de emissões em relação ao cenário de referência, os aspectos financeiros e viabilidade econômica do projeto, contando ou não com os recursos advindos do MDL (LORA, 2008).

Para que um projeto seja passível da obtenção de reduções certificadas de emissões (RCE), suas atividades deverão passar por algumas sete etapas, sendo que a primeira consiste na elaboração do documento de concepção de projeto (DCP ou PDD) que contem todas as informações, como a localização, metodologia adotada para o cálculo das emissões, definição

da linha de base, determinação do período de obtenção de créditos de carbono, descrição do plano de monitoramento e informações para demonstrar o critério de adicionalidade. Este documento é então submetido à validação, por uma entidade credenciada no Conselho Executivo do MDL e, em caso de aprovação, segue para registro. O projeto será monitorado durante todos os anos de competência para que, por fim, as emissões sejam certificadas e aprovadas.

De acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia, até 1º de janeiro de 2011, 6.963 projetos encontravam-se em alguma das fases de projetos descrito anteriormente, sendo que destes, 2.743 já estão registrados pelo Conselho Executivo do MDL. Dentre os países proponentes de projetos de MDL, a China encontra-se na primeira posição, com 2.672 projetos, a Índia, na segunda, com 1.894 e o Brasil, na terceira, com 477 projetos, correspondendo a 7% do total. (CIMGC, 2011).

No cenário mundial, as reduções anuais de emissões de gases de efeito estufa no país atingem 50.539.873 de tCO_{2e}/ano, que representam 5% do total, sendo que a predominância dos projetos brasileiros está no setor energético. A distribuição das atividades destes projetos, por escopo setorial é apresentado no Gráfico 7.1, em que os aterros sanitários correspondem a um percentual de 7,5%, correspondente a 36 projetos.

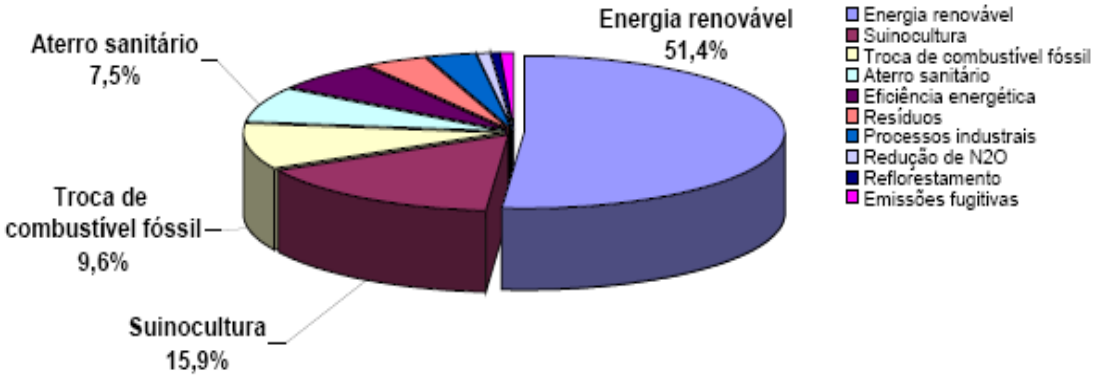

Gráfico 7.1. Número de projetos por escopo setorial.

Fonte: CIMGC (2011).

Dentre os estados brasileiros, São Paulo possui o maior número de atividades de projeto do MDL, seguido por Minas Gerais e Rio Grande do Sul, conforme ilustra o Gráfico 7.2.

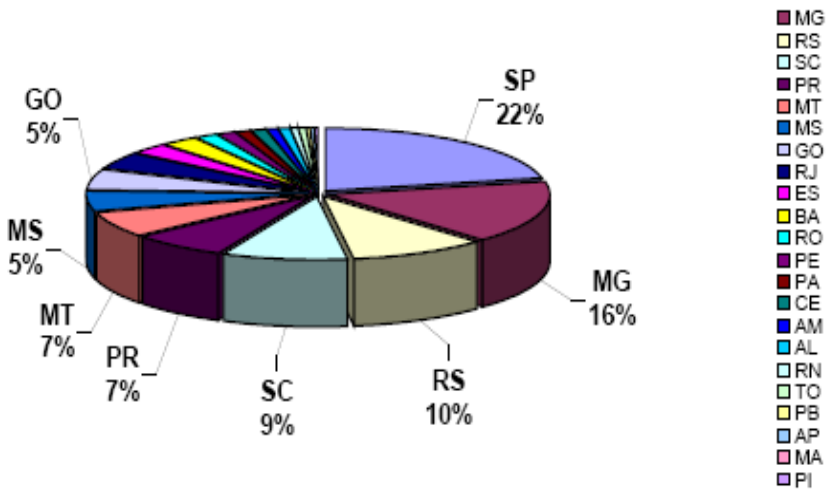

Gráfico 7.2. Atividades de projeto por estado brasileiro.

Fonte: CIMGC (2011).

Os projetos de MDL no Brasil tiveram início em junho de 2004, com a aprovação do projeto da Nova Gerar no Rio de Janeiro e do projeto Vega na Bahia, ambos com a finalidade de geração de energia elétrica por meio do aproveitamento do biogás produzido nos aterros sanitários. A tabela 7.4, a seguir, descreve os projetos de créditos de carbono realizados em aterros sanitários no país, bem como a situação em que se encontram.

Tabela 7.4. Situação dos projetos de aterros sanitários no Brasil.

Aterro	Localização	Situação
Vega Bahia	Bahia	Registrado
Nova Gerar	Rio de Janeiro	Registrado
Onyx (Tremembé)	São Paulo	Registrado
Marca	Espírito Santo	Registrado
Bandeirantes	São Paulo	Registrado

Cont. Tabela 7.4. Situação dos projetos de aterros sanitários no Brasil.

ESTRE (Paulínia)	São Paulo	Registrado
Caieiras	São Paulo	Registrado
São João	São Paulo	Registrado
Lara (Mauá)	São Paulo	Registrado
Anaconda	São Paulo	Registrado
Central de Resíduos do Recreio	Rio Grande do Sul	Registrado
Aurá	Pará	Registrado
Canabrava	Bahia	Registrado
ESTRE (Itapevi)	São Paulo	Registrado
Quintaúna	São Paulo	Registrado
ESTRE (Pedreira)	São Paulo	Registrado
Probiogás (João Pessoa)	Paraíba	Registrado
Embralixo/Araúna (Bragança)	São Paulo	Registrado
Urbam/Araúna	São Paulo	Registrado
Terrestre Ambiental	São Paulo	Registrado
CTRW	Espírito Santo	Registrado
Proactiva (Tijuquinhas)	Santa Catarina	Registrado
Feira de Santana - projeto de gás	Bahia	Registrado
Alto Tiête	São Paulo	Registrado
Santech	Santa Catarina	Registrado
CTRS / BR.040	Minas Gerais	Em validação
Manaus	Amazonas	Em validação
Tecipar – Progat	São Paulo	Em validação
Marília / Araúna	São Paulo	Em validação
VCP Jacareí	São Paulo	Em validação
CGR Guatapará	São Paulo	Em validação
Corpus / Araúna	São Paulo	Em validação
Itaoca	Rio de Janeiro	Em validação
CTR Candeias	Pernambuco	Em validação

Cont. Tabela 7.4. Situação dos projetos de aterros sanitários no Brasil.

Organoeste Dourados e Andradina	MS e SP	Pedido de revisão
Gramacho	Rio de Janeiro	Withdrawn
Lixo Zero – Projeto de compostagem	Rio de Janeiro	Withdrawn
Natal	Rio Grande do Norte	Withdrawn
Organoeste Apucarana e Mandaguaçu	Paraná	Validação negativa
Organoeste Aracruz	Espírito Santo	Validação negativa
Organoeste Contenda e Campo Grande	Paraná e MS	Validação negativa
Parobé	Rio Grande do Sul	Validação terminada
Laguna	Santa Catarina	Validação terminada
UsinaVerde	Rio de Janeiro	Validação terminada

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da UNEP RISOe (2011).

Como é possível observar, a grande parte destes projetos encontra-se na região sudeste do Brasil, local de grande concentração populacional e, consequentemente, com grande geração de resíduos. O elevado volume de resíduos concentrado nestes poucos locais permite uma geração significativa de metano, contribuindo com a viabilidade e atratividade dos projetos.

Desta forma, o Brasil apresenta potencial para a geração de créditos de carbono em aterros sanitários, que poderá contribuir para promover a sustentabilidade socioambiental, por meio de uma correta gestão dos resíduos sólidos urbanos nos municípios (CRUZ, 2009).

7.5 Propostas de Políticas ao Uso Energético do Biogás

O Brasil, comparado a outros países, ainda oferece poucos incentivos para a geração de energia a partir de fontes renováveis. A adoção de políticas de incentivo visa à diversificação da matriz energética local, bem como a redução da dependência de

combustíveis fósseis e o alcance das metas de redução de emissões, propostas no Protocolo de Quioto.

Dentre os mecanismos de incentivo utilizados no mundo, destacam-se:

a. Criação de uma tarifa diferenciada, por tipo de fonte de energia, também conhecida como *Feed-in*;

b. Determinação da compra compulsória de cotas de energia, por fonte definida, pelas distribuidoras;

c. Adoção do sistema *Net Metering*, em que é realizada a medição líquida da energia injetada na rede (abatendo o consumo) e o crédito energético é descontado nas faturas posteriores. Caso não tenha crédito no montante final, o consumidor pagará apenas a diferença entre a energia consumida e gerada no período.

Analisando a Tabela 7.5, que descreve as políticas para promoção de energias renováveis em alguns países, é possível verificar que faltam políticas no Brasil que contribuam com as fontes renováveis de energia, de forma a diminuir as barreiras existentes.

Tabela 7.5. Políticas para promoção de energias renováveis.

País	**Tarifa Feed-in**	**Quotas**	**Net Metering**	**Certificados de energia renovável**	**Leilões públicos de energia**	**Investimentos e/ou financiamentos públicos**
Alemanha	X		X		X	
Austrália	X	X		X	X	
Brasil					X	X
Canadá	(*)	(*)	X		X	X
China	X	X			X	X
Espanha	X			X	X	
Estados Unidos	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Índia	(*)	(*)		X	X	
Itália	X	X	X	X	X	
Japão	X	X	X	X	X	
Portugal	X				X	

(*) Alguns estados / províncias dentro destes países têm políticas de estado, mas não há nenhum nível de política nacional

Fonte: REN (2010).

De acordo com a Aneel (2010a), com base em toda a legislação brasileira, para sistemas de geração distribuída (hídrica, solar, biomassa), com injeção de até 30 MW na rede de distribuição, destacam-se os seguintes incentivos:

a. Desconto mínimo de 50% na tarifa de uso do sistema de distribuição (produção e consumo);

b. Possibilidade de venda de energia para consumidores livres e especiais;

c. Isenção do pagamento anual de 1% da sua receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico;

d. Possibilidade de venda da energia gerada em leilões específicos para fontes alternativas promovidos pelo Ministério de Minas e Energia;

e. Possibilidade de venda de energia diretamente à distribuidora;

f. Venda de energia dentro da cota, preços e condições de financiamentos estabelecidos no PROINFA.

Neste contexto, diretrizes do ponto de vista político, legal, administrativo, tecnológico, financeiro e fiscal, que poderão contribuir com a utilização do biogás como combustível para geração de energia, são descritas a seguir (Declaração de Belo Horizonte, 1994).

7.5.1 Diretrizes legais e administrativas

a) Permitir a livre comercialização de pequenas quantidades de energia, desregulamentando as instalações que utilizem biogás e tenham potência reduzida;

b) Criar grupo de trabalho, para definir metodologia de cálculo de preços de energéticos baseados em custos reais englobando, nestas análises, critérios de avaliação social, ambiental e de custo-benefício;

c) Promover a regulamentação da participação do capital privado, inclusive o estrangeiro, em empreendimentos de geração de energia com biogás;

d) Estabelecer regulamentação específica para compra, venda e transporte de energia elétrica, gerada a partir do biogás;

e) Definir órgão de certificação e homologação de tecnologia que utilizem biogás;

7.5.2 Diretrizes políticas

a) Adequar as políticas governamentais de tarifa, de preços mínimos, de incentivos fiscais, de tecnologia e de subsídios visando promover o desenvolvimento do biogás como fonte de energia;

b) Estimular a produção de biogás, por meio de legislação específica, incentivos em financiamento e garantia de compra da energia gerada;

c) Incentivar a utilização de energia proveniente de biogás no Sistema Interligado, bem como em sistemas isolados;

d) Definir programa específico para o desenvolvimento do biogás, com coordenação centralizada ao nível federal e gestão descentralizada ao nível de estados e municípios, com recursos provenientes de fundos federais, para investimentos em longo prazo e com base em transferências intra-setoriais, de fundos estaduais e municipais complementares como, por exemplo, o de percentual de venda total de energia; e de recursos do setor privado como, por exemplo, da isenção de IPI e imposto de renda;

e) Propor programas específicos para biogás, por meio de projetos visando o desenvolvimento social;

f) Adequar políticas para promover o desenvolvimento tecnológico e industrial do biogás, estimulando a produção de materiais, equipamentos e componentes no país.

7.5.3 Diretrizes financeiras e fiscais

a) Implementar linhas de crédito para produtores de energia, pessoas físicas e jurídicas, com prazos de carência, taxas de retorno e períodos de amortização que viabilizem o desenvolvimento da geração de energia a partir do biogás

b) Criar mecanismos compensatórios para os produtores de energia que utilizem o biogás, como por exemplo a depreciação acelerada e créditos tarifários por período definido;

c) Revisar as alíquotas de importação, reduzindo-as para componentes de alto conteúdo tecnológico e aumentando-as para produtos finais, artificialmente baratos, especialmente aqueles com similar nacional;

d) Estabelecer mecanismos de incentivos fiscais, temporários e decrescentes, para os produtores que utilizem biogás para a geração de energia;

e) Estabelecer linhas de fomento para o financiamento de projetos de pesquisas e desenvolvimento do biogás.

7.5.4 Diretrizes tecnológicas

a) Inventariar os recursos energéticos de biogás, com metodologia uniforme, sob a coordenação de órgão do governo federal;

b) Estabelecer e divulgar zoneamento indicativo dos potenciais de biogás existentes no território nacional, através de instrumentalização de entidade responsável;

c) Criar Centro de Referência de Biogás, responsável pela implementação e divulgação de sistema de informação do desenvolvimento tecnológico, dos modelos de cooperação e do desempenho de sistemas instalados, ao nível nacional e internacional;

d) Credenciar Centros de Excelência, Centros de Desenvolvimento Regional e Laboratórios Especializados em biogás, fortalecendo estas instituições e priorizando os recursos disponíveis;

e) Estimular a realização de projetos, visando à demonstração da viabilidade, técnica, econômica e sócio-ambiental, da utilização do biogás e à formação de recursos humanos;

f) Estimular as instituições de pesquisa e desenvolvimento a realizar programas cooperativos com as indústrias, direcionando as atividades para tecnologias economicamente viáveis num mercado competitivo.

8 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS

Conforme apresentado neste trabalho, a sociedade e a administração pública, principalmente nos países em desenvolvimento, se deparam com um grande desafio quanto à gestão dos resíduos sólidos. Sua produção vem aumentando devido à intensificação das atividades humanas nas últimas décadas, dificultando o manejo e disposição correta dos mesmos. Quando dispostos de forma inadequada, como em lixões, por exemplo, geram metano, cuja emissão para atmosfera contribui com o aumento do aquecimento global, por se tratar de um gás de efeito estufa, além de contaminação do solo e lençóis freáticos.

Este trabalho mostrou que, por meio de gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos é possível aproveitar o potencial energético do biogás e conseqüentemente diminuir o consumo de combustíveis fósseis, reduzindo assim o impacto ambiental e contribuindo para melhoria social e econômica.

O presente trabalho conclui que os aterros sanitários são alternativas interessantes para a disposição final do lixo, considerando, posteriormente, a captação dos gases liberados através de dutos e queima em *flares*, em que o metano, principal constituinte do biogás, é transformado em gás carbônico, com potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor. Porém, ao queimar o biogás em *flares*, os aterros deixam de aproveitar seu potencial energético, enquanto que sua utilização para a geração de energia elétrica, ganham auto-suficiência energética em seu processo e podem vender o restante para uma rede elétrica local.

No entanto, para a utilização deste gás como combustível, é necessário que ele possua a composição adequada para a tecnologia de conversão utilizada. A qualidade do biogás exigido pelo motor de combustão utilizado neste estudo foi atendida pelo biogás da CTR – Caieiras, como mostrado na análise da Tabela 5.5. Porém, como a composição do biogás é variável, torna-se necessário constante monitoramento para que a alteração de sua composição não danifique as instalações, além de se prever a necessidade de um sistema de purificação. Já do ponto de vista ambiental, foi possível observar baixas emissões dos óxidos de nitrogênio quando comparadas às especificadas para motores ciclo Otto, de 250 a 3000 ppm. A análise dos gases de combustão do motor utilizado no projeto apresentou emissão de 225 ppm.

Este estudo mostrou que a CTR - Caieiras possui um potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 13 MW em 2010, podendo chegar a mais de 33 MW no ano de seu encerramento, 2024. A metodologia utilizada para a previsão da geração de metano nos próximos anos mostrou-se adequada, pois considera nos seus cálculos o potencial de

produção de metano de acordo com a composição do lixo, fluxo de resíduo anual, tempo de deposição de resíduo no aterro e constante de decaimento, aproximando-se, dessa forma, das condições reais de trabalho.

A implantação de um sistema de geração de energia em um aterro tem custo elevado, visto que os equipamentos de grande porte são importados e englobam as despesas com transporte, impostos e taxas alfandegárias. Porém, é uma solução eficaz para problemas provocados pela emissão de metano, reduzindo dessa forma a emissão de gases de efeito estufa e a energia gerada pelo sistema poderá ser consumida pelo próprio aterro e a excedente vendida.

Para o cálculo do poder calorífico, consumo de combustível e volume de energia elétrica gerada, foram utilizados os parâmetros obtidos na análise do biogás da CTR – Caieiras. Considerando a disponibilidade do sistema em 7.000 horas anuais, serão gerados anualmente 1.610 MWh e, considerando o autoconsumo de 5%, resultará em 1.530 MWh/ano de energia elétrica líquida que foi direcionada para a alimentação de um dos sopradores da planta de biogás da CTR – Caieiras, reduzindo o consumo de energia elétrica da concessionária local.

A avaliação econômica do sistema instalado baseou-se em um fluxo de caixa que contempla o investimento inicial, lucro líquido anual durante um período de amortização de dez anos e, com base nestes valores, é possível realizar o cálculo do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR). Foram considerados os custos com investimento, operação do sistema, manutenções preventivas, corretivas e preditivas. O custo com combustível foi considerado nulo, visto que o biogás é um subproduto do processo.

Para o fluxo de caixa do projeto, foi considerando o valor de venda da energia elétrica de R$144,20, valor negociado para projetos a biomassa no último Leilão de Fontes Alternativas de Energia Elétrica A-3/2010 e uma taxa de atratividade de 15%. Em 10 anos de projeto, o VPL será de, aproximadamente, 135 mil reais e a TIR de 21%. Fixando o VPL no valor zero, chega-se ao valor de venda limite de energia elétrica de 126,5 R$/MWh e, abaixo deste valor, o projeto torna-se inviável. Observa-se que o valor limite de venda da energia é inferior ao valor comercializado no último Leilão.

A utilização de grupos motogeradores de maior capacidade poderia obter melhores resultados em um estudo de viabilidade econômica, visto que os custos associados ao equipamento são menores e a produção de energia elétrica é maior, o que é comprovado avaliando um motor com potência de 1.426 kW, rendimento de 37,8% e um consumo de biogás de 1.161 m³/h para o poder calorífico do biogás do aterro estudado. Considerando o

investimento anualizado de 575.386,00 R$/ano, custo de operação e manutenção de 699.965 R$/ano (mão de obra e todas as peças necessárias para as manutenções), receita de energia elétrica ao preço de 144,20 R$/MWh e a disponibilidade do equipamento em 7.000 horas/ano, chega-se a um VPL de 3.971.701 R$ e uma TIR de 28%. O valor limite de venda de energia elétrica neste cenário é de 102,75 R$/MWh, concluindo que os grupos motogeradores de grande porte apresentam viabilidade econômica, sendo uma boa alternativa para aterros com grande produção de biogás, como o caso da CTR – Caieiras.

Dentre as vantagens da utilização do biogás para a geração de energia elétrica, pode-se destacar a geração de empregos, geração de energia descentralizada próxima aos pontos de carga, utilização de um resíduo como combustível, possibilidade de receita adicional proveniente da venda da energia excedente, diminuição da dependência de energia da concessionária local, melhor gerenciamento dos aterros sanitários, redução da utilização de combustíveis fósseis e redução e monitoramento das emissões de gases de efeito estufa.

Comparado a outros países o Brasil oferece poucos incentivos para a geração de energia a partir de fontes renováveis, no que diz respeito à falta de leis que impulsionem o mercado a investir em fontes renováveis de energia, além de subsídios nos financiamentos e tarifas diferenciadas para este tipo de energia. A legislação brasileira não requer que o gás de aterro seja queimado, sendo o monitoramento da saída do gás o único requerimento, de modo a evitar fogo e explosões. Nem a queima de gás de aterro, nem sua extração ativa e subseqüente geração de eletricidade é requerida. O fato de não existir legislação técnica específica para captação, queima e geração de energia elétrica a partir de biogás, aliada à falta de investimento e falta de experiência de muitos envolvidos (clientes, projetistas, operadores), faz com que poucos aterros no país se encontrem em situação adequada.

Como um exemplo a ser seguido pode-se citar a Alemanha, país onde a conversão energética do biogás é amplamente difundida, com mais de 4.000 plantas com capacidade instalada de aproximadamente 1.400 MWe. Isto se deve à Lei de Energias Renováveis criada no ano de 2000, exigindo que os operadores da rede elétrica paguem um preço fixo para energia elétrica proveniente de fontes renováveis, superior ao preço da energia convencional, além de garantir a compra em longo prazo.

Devido à alta capacidade de geração de energia elétrica e às vantagens apresentadas, a proposta deste trabalho é considerada viável, visto que a geração a partir de biogás pode diminuir sobrecarga das concessionárias, além da redução das emissões de gases de efeito estufa. Portanto, é evidente a impossibilidade de esgotar o assunto proposto neste trabalho,

não só pela complexidade tecnológica, mas pelo estágio de desenvolvimento de políticas do setor elétrico.

Porém, é importante lembrar que os aterros não são a melhor solução para a disposição final dos resíduos, visto que ocupam grandes áreas que não poderão ser utilizadas futuramente, devido à sua instabilidade após o encerramento e necessidade de constante monitoramento. O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos deve estar focado na redução do volume de lixo gerado, seja por meio da reciclagem ou pelo tratamento térmico dos resíduos, de forma a aproveitar seu potencial energético e enviar aos aterros apenas os rejeitos, diminuindo assim as áreas necessárias para esta destinação final.

Nas grandes cidades, está cada vez mais difícil encontrar locais próximos para a destinação dos resíduos sólidos urbanos, não apenas pela falta de áreas disponíveis, mas também pela pressão da sociedade contra a instalação de aterros próximos às áreas residenciais. As grandes distâncias percorridas para destinar corretamente os resíduos encarece o custo de destinação, além de resultar em emissões de gases de efeito estufa.

Em vários países da Europa, as políticas governamentais estão direcionadas para a utilização do processo de tratamento térmico dos resíduos, não apenas pela redução de seu volume, como pela segurança quanto aos riscos ambientais e a possibilidade de instalação em locais mais próximos aos pontos de geração. Pretende-se, portanto, em um estudo futuro, analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do processo de tratamento térmico dos resíduos sólidos para a geração de energia térmica e elétrica contribuindo, não apenas com a geração descentralizada, mas também com a redução dos resíduos gerados pela sociedade. Este estudo servirá como parâmetro de comparação à utilização do biogás, verificando as emissões e custos associados aos diferentes sistemas.

REFERÊNCIAS

AALBORG. Aalborg Industries. **Livro Técnico.** 15p. Edição própria. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos sólidos: classificação - NBR 10004.** São Paulo, 2004.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos 2009**. 210 p. São Paulo, Maio de 2010.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos.** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Portaria nº 45, de 30 de março de 2004.** Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/prt2004045mme.pdf>. Acesso em Novembro de 2010.

____(2010a). **Nota Técnica nº 0043/2010 – SRD / ANEEL.** Processo 48500.004924 / 2010-51. 20 p. 8 de setembro de 2010.

____(2010b). **Plano Anual do Proinfa – PAP 2010**. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/areh2010930_3.pdf>. Rio de Janeiro, 19 de Outubro de 2010.

BEN. **Balanço Energético Nacional 2010 (ano base 2009) Resultados Preliminares.** Secretaria de Saneamento e Energia. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads>. Acesso em Dezembro de 2010.

BLUESTEIN, J. **Environmental Benefits of Distributed Generation**. Energy and Environmental Analysis. Inc., 2000.

BOLOGNESI, A. **A geração de energia a partir do lixo. Perspectivas no Estado de São Paulo.** Empresa Metropolitana de Águas e Energia. 28 de Maio de 2010.

BORBA, S. M. P. **Análise de modelos de geração de gases em aterro sanitários: Estudo de caso.** (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

BRASMETANO. **Motogeradores a biogás.** Disponível em <http://www.brasmetano.com.br/>. Acesso em Maio de 2007.

____(2009) **Unidade motogeradora de energia elétrica Biogen.** Manual do usuário de operação e manutenção. 16p. Piracicaba, 2009.

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2005.

BRITO, M. **Manual de Compostagem.** Escola Superior Agrária de Ponte de Lima (ESALP). Disponível em <http://www.ci.esapl.pt/mbrito/compostagem/Manual_de_compostagem%20capa.htm>. Acesso em Abril de 2010.

CARDOSO FILHO, E. P. **Fatores que influenciam na digestão anaeróbia de efluentes líquidos.** Sem publicação. CETESB, 2001.

CASTRO, R. **Energias renováveis e produção descentralizada.** Área Científica de Energia. Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC) do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2006.

CASTRO, W. P., **Projeto de sistemas de climatização por resfriamento evaporativo.** Trabalho de Graduação. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Brasília, 2003.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENERG-BIOG.** Relatório Técnico Final. São Paulo, 2005.

____(2006a). **Escolha e caracterização do aterro para implementação do projeto.** Relatório de Atividades. São Paulo, 2006.

____(2006b). **Levantamento de dados técnicos e estudo das alternativas de produção de eletricidade a partir de biogás, no aterro escolhido para a elaboração do projeto. Relatório de Atividades**. São Paulo, 2006.

____(2007). **Proposta para fornecimento de grupo motogerador a biogás (conteneirizado)-LANDSET 200.** Proposta Brasmetano nº 0678-01. São Paulo, 2007.

____(2009). **Relatórios Diversos do Projeto**. São Paulo, 2009.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos aterros sanitários nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil.** Relatório final, 280p. Piracicaba, Março de 2004.

CERS. Comissão Especial do Rio Grande do Sul. **Comissão Especial para analisar a questão do lixo no Rio Grande do Sul.** Relatório Final de 2008. 129 p. Disponível em <http://www.al.rs.gov.br/>. Acesso em Fevereiro de 2011.

CETESB – Companhia de Tecnologia de saneamento Ambiental. **Emissões de metano no tratamento e na disposição de resíduos.** Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, 86 p. São Paulo, 2006.

CIAS. Consórcio Intermunicipal para Aterro Sanitário. **Relatório de Atividades.** Várzea Paulista, 2003.

____(2004). **Relatório de Atividades.** Várzea Paulista, 2004.

CIMGC. Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima. ***Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no mundo***. Última compilação do site da CQNUMC. 1 de janeiro de 2011.

COELHO, S. T.; SILVA, O. C.; VARKULYA, A. Jr.; AVELLAR, L. H. N.; FERLING, F. F. **Estado da arte do biogás. Relatório de acompanhamento.** Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2001.

COLDEBELLA, A., SOUZA, S. N. M., SOUZA, J., KOHELER, A. C. ***Viabilidade da Cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite.*** (Artigo). AGRENER - 6º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. Campinas, 2006.

COMLURB. Companhia Municipal de Limpeza Urbana. **Caracterização Gravimétrica e Microbiológica dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Município do Rio de Janeiro**. 175 p. Rio de Janeiro, 2008.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 382.** 37 p. 26 de dezembro de 2006.

CORREA, A. S. **A influência da folga de válvulas na geração de ruído e vibração no motor fire 999cc 8v.** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2003.

CORTEZ, C. L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: estudo de caso AES Eletropaulo.** (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

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

____(2006). **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COSTA, A. A. S; ASTORGA, O. A. M.; SILVEIRA, J. L. **Análise técnico-econômica da utilização de um gerador a gás natural em um sistema de cogeração: Estudo de caso.** (Artigo). V Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia (CLAGTEE). São Pedro, 2003.

CRUZ, S. R. S. **O mercado de carbono em aterros na cidade de São Paulo – Contribuição dos projetos do MDL para a gestão local de resíduos sólidos.** Trabalho de Graduação Interdisciplinar para o Bacharelado em Gestão Ambiental. Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH) da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

DANTAS, G. A. **O impacto dos créditos de carbono na rentabilidade da cogeração sucroalcooleira brasileira.** (Dissertação de Mestrado). Programa de Economia e Política da Energia e do Ambiente. Instituto Superior de Economia e Gestão da Universidade Técnica de Lisboa Janeiro. Lisboa, 2008.

DECLARAÇÃO DE BELO HORIZONTE. **Diretrizes e plano de ação para o desenvolvimento das energias renováveis solar, eólica e de biomassa no Brasil.** Foro Permanente das Energias Renováveis. 7 p. Belo Horizonte, 27 a 29 de abril de 1994.

DIAZ, G. O. **Análise de sistemas para o resfriamento de leite em fazendas leiteiras com o uso do biogás gerado em projetos MDL.** (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

DUARTE, A. C. **Projetos de MDL em aterros sanitários no Brasil: alternativa para o desenvolvimento sustentável.** (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas/SP**. (Dissertação de Mestrado) Universidade de Campinas, UNICAMP. Campinas, 2003.

EPA. Environmental Protection Agency. **Methane**. Disponível em: www.epa.gov/methane/. Último acesso em julho de 2009.

____(2009a). **Municipal Solid Waste in the United States: 2008 facts and figures.** Relatório, 58p. Novembro de 2009.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Leilões* **de Fontes Alternativas contratam 89 usinas, com 2.892,2 MW**. Informe à imprensa. 3p. São Paulo, Agosto de 2010.

ESSENCIS. Essencis Soluções Ambientais. **Redução das emissões de gases de aterro – Caieiras, SP.** Documento de concepção de projeto (DPC), Versão 0. Caieiras, São Paulo, 2004.

____(2007). **Aterros classe I, II e III.** Disponível em <http://www.essencis.com.br>. Acesso em Maio de 2007.

____(2010). **Incineração**. Disponível em <http://www.essencis.com.br>. Acesso em Abril de 2010.

____(2010a). *Essencis SP CTR Caieiras.* Disponível em <http://www.essencis.com.br/portlets/unidades/essencis-sp>. Acesso em Maio de 2010.

EXCELÊNCIA ENERGÉTICA. **Leilão de eólicas reduz CMO.** Disponível em <http://www.excelenciaenergetica.com.br>. São Paulo, Outubro de 2010.

FIGUEIREDO, N. J. V**. Utilização do Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás – Estudo de Caso**. Trabalho de Graduação Interdisciplinar apresentado ao curso de Engenharia Mecânica. Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo. Dezembro de 2007.

____(2008) **Potencial de Geração de Energia a Partir do Biogás de Aterros Sanitários na Cidade de São Paulo.** Trabalho apresentado na disciplina ENE 5718 – Energia, desenvolvimento e meio ambiente do Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE). São Paulo. Outubro de 2008.

FREITAS F. Mensagem recebida por natalie@iee.usp.br, em Abril de 2007.

___(2009). Mensagem recebida por natalieverdi@iee.usp.br, em Março de 2009.

___(2010). Mensagem recebida por nfigueiredo@dalkia.com.br, em Fevereiro de 2011.

GAIOTTO, E. **Oportunidade para geração de créditos de carbono e aproveitamento energético do biogás.** Apresentação do projeto Nova Gerar. Disponível em: http://www.institutobrasil.com. Acesso em agosto de 2009.

GOMES, E. E. B; COBAS, V. R. M.; NASCIMENTO, M. A. R.; LORA, E. E. S.; NETO, L. J. M. **Aspectos econômicos e ambientais da aplicação de microturbinas a gás natural na geração distribuída.** (Artigo). Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI). Itajubá, 2001.

GONÇALVES, A. T. T. **Potencialidade energética dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais do município de Itajubá - MG**. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá, 2007.

GRIPPI, S. **Lixo-Reciclagem e sua historia: guia para prefeituras brasileiras.** Editora Interciência. 132 p. Rio de Janeiro, 2001.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica** (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação de Ciências em Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

HÖLDER, D. **Bioenergy Utilisation.** Apresentação realizada no Seminário Energias Renováveis Brasil-Alemanha: Aplicação de Tecnologias para Uso Energético da Biomassa/Biogás. Câmara de Comércio e Indústria Brasil – Alemanha. São Paulo, 29 de junho de 2010.

IBAM. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Classificação dos resíduos sólidos**. Disponível em <http://www.ibam.org.br>. Acesso em Maio de 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Número de distritos com serviço de limpeza urbana e/ou coleta de lixo, por percentual de lixo coletado**. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), 2008.

____(2010). **Cidades, Estados e Países.** Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em Abril de 2010.

IEA – International Energy Agency. **Key world energy statistics**. 82 p. França, 2010.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guia para inventários nacionais de gases de efeito estufa.** Módulo 6: Lixo. Volume 2: Livro de trabalho de 1996.

JOHANNESSEN, L. M. **Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills**. Working Paper Series, 34 p. World Bank. Washington, 1999.

LAMÔNICA, H. M. **Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça.** AGRENER GD - Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. Campinas, 2006.

LIMA, F. P. **Energia no tratamento de esgoto: Análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás.** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LOMBARD, X. KHAIRALLAH, P. ***Return of experience for microturbines running on landfill gas / waste water in Europe.*** Bioturbine Project Workshop. Belgium. 24 de setembro de 2004.

LORA, B. A. **Potencial de geração de créditos de carbono e perspectivas de modernização do setor sucroalcooleiro do Estado de São Paulo, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

LORA, E. E. S.; HADDAD, J. H. ***Geração Distribuída Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais.*** Editora Interciência. 124 p. Rio de Janeiro, 2006.

MACIEL, F. J. ***Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos de Muribeca - PE.*** (Dissertação de Mestrado). Centro de Tecnologia e Geociências. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

MAGALHÃES E. A. et al. ***Confecção e avaliação de um sistema de remoção do CO2 contido no biogás***. Acta Scientiarum Technology, v. 26, n. 1, p. 11-19. Maringá, 2004.

MME. Ministério de Minas e Energia. **PROINFA - Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica.** Apresentação do Departamento de Desenvolvimento Energético. Disponível em <http://www.mme.gov.br>. Janeiro de 2009.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios da Termodinâmica para Engenharia.** 4ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

MTM. Methane to Markets. **Landfill Methane Recovery and Use Opportunities.** Disponível em <http://www.methanetomarkets.org>. Março, 2008.

MUYLAERT, M. S.; AMBRAM, R.; CAMPOS, C. P.; MONTEZ, E. M.; OLIVEIRA, L.B. **Consumo de energia e aquecimento do planeta – Análise do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) do Protocolo de Quioto – Estudo de Caso.** Editora COPPE, 247 p., Rio de Janeiro, 2000.

NERI. NATIONAL ENVIRONMENTAL RESEARCH INSTITUTE. **Emission Factors.** Disponível em: http://www2.dmu.dk/1_viden/2_Miljoetilstand/3_luft/4_adaei/ Emission_factors_en.asp. Denmark, 2002. Acesso em dez.2006.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA, J. C**., Motores e Geradores – Princípio de funcionamento, instalação e manutenção de grupos diesel geradores.** Disponível em <http://www.joseclaudio.eng.br>. Acesso em Maio de 2006.

PIMENTA, J. M. D.; CASTRO, W. P. **Simulação computacional do desempenho de painéis evaporativos acoplados a microturbinas a gás.** VIII Congresso Brasileiro de refrigeração, ventilação e condicionamento de ar. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Brasília, 2003.

PMSP. Prefeitura Municipal de São Paulo. **A coleta de lixo em São Paulo.** Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br>. Acesso em Abril de 2010.

RE, D. S. **Sancionada a lei de resíduos sólidos**. Disponível em <http://papodehomem.com.br/sancionada-a-lei-de-residuos-solidos>. Acesso em Agosto de 2010.

REIS, M. F. P**. Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos.** (Dissertação de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

REN. Renewable Energy Policy Natwork. **Renewables 2010 – Global Status Report.** 80 p. Paris, 2010.

RIBEIRO, M. S. **O tratamento contábil dos créditos de carbono.** (Trabalho de Livre Docente). Departamento de Contabilidade da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto, 2005.

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

SANTEC RESÍDUOS. **Estudo e análises geológicas e geotécnicas**. Disponível em http://www.santecresiduos.com.br. Acesso em 02/047/2007. SC, 2005

SEMASE. Serviço Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André. **Relatório de caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos domiciliares do município de Santo André.** 45 p. Santo André, 2008.

SILVA, A. L. **Manutenção Preventiva e Manutenção Preditiva.** Disponível em <http://pt.shvoong.com/social-sciences/1700280-manutenção-preventiva-manutenção-preditiva>. Acesso em Agosto de 2010.

SILVA, F. M. **Sistema de alimentação de motores com duplo combustível (metano e diesel*).*** (Tese de Doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 1995.

SMA. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Resolução SMA Nº 79/2009.** 19 p. Publicado em 04 de Novembro de 2009 e republicado no DOE de 07 de Novembro de 2009. Disponível em < http://sql.ambiente.sp.gov.br/legislacao/estadual/resolucoes/2009_res_est_sma_79_republicada.pdf>. Acesso em Novembro de 2010.

SGC - Svenskt Gastekniskt Center. Disponível em <http://www.sgc.se/uk/index.asp>. Acesso em Setembro de 2009.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil.** Editora Interciência, 515 p. Rio de Janeiro, 2003.

UNEP RISOe, **Capacity Development for the Clean Development Mechanism.** CDM Pipeline Spreadsheet. Disponível em <http://www.cd4cdm.org>. Acesso em Janeiro de 2011.

WILLUMSEN, H. C**. Energy recovery from landfill gas in Denmark and Worldwide**. LG Consultant, 2001.