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

MARGARETH DE CÁSSIA OLIVEIRA PAVAN

GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: AVALIAÇÃO E DIRETRIZES PARA TECNOLOGIAS POTENCIALMENTE APLICÁVEIS NO BRASIL

SÃO PAULO

2010

MARGARETH DE CÁSSIA OLIVEIRA PAVAN

GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: AVALIAÇÃO E DIRETRIZES PARA TECNOLOGIAS POTENCIALMENTE APLICÁVEIS NO BRASIL

Tese 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 obtenção do título de Doutor em Energia.

Orientadora: Prof[a]. Dr[a]. Virgínia Parente

São Paulo

2010

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.

FICHA CATALOGRÁFICA

Pavan, Margareth de Cássia Oliveira.
Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil./ Margareth de Cássia Oliveira Pavan**,** orientadora Virgínia Parente. – São Paulo, 2010
186 F.: IL.; 30 CM.

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

1. Energia renovável 2. Resíduos sólidos urbanos 3 . Incineração 4. Aterro sanitário I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

EP – FEA – IEE - IF

MARGARETH DE CÁSSIA OLIVEIRA PAVAN

"Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil"

Tese aprovada pela Comissão Julgadora:

Profª Drª Virgínia Parente – PPGE/USP
Orientadora e Presidente da Comissão Julgadora

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

Prof. Dr. Alvim Borges da Silva Filho - UFES

Profª Drª Carla Kazue Nakao Cavaliero - UNICAMP

Prof. Dr. Lineu Belico dos Reis – EP/USP

DEDICATÓRIA

Ao meu querido e saudoso pai, “Bertinho”, que fez dos seus dias, os dias de seus filhos. E, com dignidade e trabalho, proporcionou-nos condições para que pudéssemos fazer nossas escolhas.

AGRADECIMENTOS

Á Professora Virgínia Parente pelo apoio, confiança e companheirismo, e, sobretudo, pela dedicação e seriedade com que desempenhou sua função de orientadora durante o desenvolvimento desta tese de doutorado.

Ao meu marido, Paulo, pelo apoio, incentivo, compreensão e, principalmente, pela tolerância durante a fase de finalização do presente trabalho.

A todos os amigos do “Bloco Didático” pela troca de experiências e conversas relevantes e agradáveis que tivemos durante nossa convivência.

Aos amigos Clara Barufi e Munir Yones, pela amizade, incentivo, sinceridade e horas de estudos que passamos juntos.

Ao meu companheiro de sala, Fernando Romero (*in memorian*), pelo exemplo de perseverança e otimismo.

Aos professores do PPGE pela importante contribuição para minha formação.

Aos funcionários do IEE/USP (biblioteca, SPG, informática e administração) pelo constante respeito e dedicação que sempre recebi de cada um.

EPÍGRAFE

“Nunca o homem inventará nada mais simples nem mais belo do que uma manifestação da natureza. Dada a causa, a natureza produz o efeito no modo mais breve em que pode ser produzido.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

PAVAN, M.C.O. **Geração de Energia a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos: Avaliação e Diretrizes para Tecnologias Potencialmente Aplicáveis no Brasil**, 2010, 186 f.. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) tornou-se uma tarefa que demanda ações diferenciadas e articuladas, em função da quantidade e diversidade dos mesmos. O grande desafio está em encontrar soluções ambientalmente seguras, socialmente adequadas e economicamente eficientes para equacionar este problema. Todavia, se corretamente gerenciados, estes resíduos podem ser aproveitados do ponto de vista energético. Estimativas realizadas neste estudo apontam para um potencial de geração de energia a partir de resíduos urbanos, para o Brasil, da ordem de 16 GW (utilizando o processo de incineração) ou 5,8 GW (pela digestão anaeróbia em aterros). Outros benefícios da recuperação energética dos resíduos também podem ser destacados tais como: (a) benefícios estratégicos, uma vez que essa ação pode contribuir como fonte alternativa de energia; (b) benefícios ambientais, pois colabora com organização dos aterros e a mitigação de gases de efeito estufa; (c) benefícios sócio-econômicos, devido ao desenvolvimento de tecnologia nacional com o uso de equipamento e insumos nacionais e, sobretudo, (d) emprego de mão-de-obra qualificada e não qualificada nas várias etapas do processo de recuperação energética. O presente trabalho faz uma análise das tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil, para recuperação energética a partir RSU, e propõe uma série de diretrizes para esse aproveitamento, levando em consideração as especificidades da realidade brasileira.

Palavras-chave: Energia renovável; resíduos sólidos urbanos; incineração; aterro sanitário.

ABSTRACT

PAVAN, M.C.O. **Power Generation From Solid Waste: Assessment and Guidelines for Potentially Applicable Technologies in Brazil**, 2010, 186 f.. Doctorate Thesis. Graduate Program in Energy, University of São Paulo, São Paulo, 2010.

The management of solid waste (MSW) has become a challenge that demands articulated and non-conventional actions because of the quantity and diversity of such wastes. Finding environmentally friendly, socially adequate and economically efficient solutions to overcome this issue is the challenge to be faced. Nevertheless, if properly managed, these wastes can be recovered from the standpoint of energy. Estimates presented in this work highlight a potential power generation from urban waste, in Brazil, around 16 GW (using incineration process) or 5.8 GW (by anaerobic digestion in landfills). Several other advantages of recovering energy from waste could also be rolled as follows: (a) strategic benefits, since it may contribute as an alternative energy source and increase energy supply; (b) environmental benefits, once it contributes to improve waste management and to the mitigation of greenhouse gases; (c) social-economic benefits, due to the development of a Brazilian technology taking advantage of national equipment and materials, and most important, (d) employment of skilled and unskilled labor in the various stages of the energy recovery process. This thesis analyzes though the technologies potentially applicable in Brazil for energy recovery from MSW, and proposes guidelines for such use taking into account the specificities of the Brazilian reality.

Keywords: renewable energy, solid waste, incineration, landfill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma para reciclagem de resíduos sólidos urbanos..... 31

Figura 2: Leiras de composto orgânico já estabilizado..... 33

Figura 3: Antigo lixão de Cachoeiro do Itapemirim..... 41

Figura 4 Resíduos sólidos urbanos gerados em países Europeus..... 49

Figura 5: Gerenciamento de resíduos sólidos nos países Europeus..... 50

Figura 6: Projeção tendencial das emissões de metano pelos resíduos no Brasil.. 54

Figura 7: Principais opções tecnológicas para conversão de biomassa em energia..... 58

Figura 8: Fases do processo de formação de gases de aterro sanitário..... 69

Figura 9: Instalação de poços drenantes verticais no aterro finalizado..... 76

Figura 10: Instalação de poços drenantes verticais com o aterro em operação..... 77

Figura 11: Instalação de poços drenantes verticais no início da operação do aterro..... 78

Figura 12: Detalhe do poço drenante vertical..... 78

Figura 13: Visão de perfil de trincheiras horizontais..... 79

Figura 14: Corte transversal de trincheiras horizontais..... 79

Figura 15: Tubo coleta de gases do Aterro Bandeirantes..... 80

Figura 16: Outra perspectiva da rede de coleta de gases do aterro Bandeirantes.... 80

Figura 17: *Flare* principal do Aterro Sasa, em Temembé, SP (modelo aberto)..... 82

Figura 18: *Flare* do Aterro Marca, em Cariacica, ES (modelo fechado)..... 82

Figura 19: Grupo geradores..... 87

Figura 20: Desenho esquemático de evaporação do *chorume* com aproveitamento energético do gás de aterro..... 89

Figura 21: Evaporador de *chorume* com utilização de gás de aterro sanitário, instalado no Aterro Sasa, em Tremembé, SP..... 90

Figura 22: Fontes primárias de energia utilizadas no mundo..... 92

Figura 23: Grandes regiões geográficas do Brasil e seus respectivos estados..... 101

Figura 24: Destino dos resíduos sólidos urbanos no Brasil..... 104

Figura 25: Composição gravimétrica dos resíduos do Brasil..... 108

Figura 26: Percurso do gás de aterro..... 111

Figura 27: Vista parcial de um dos sopradores da usina termelétrica do Aterro Bandeirantes..... 112

Figura 28: Vista parcial do sistema de captação de gases termelétrica do Aterro Bandeirantes 112

Figura 29: Vista parcial da casa de máquinas da termelétrica do Aterro Bandeirantes..... 112

Figura 30: Vista parcial da casa de máquinas da termelétrica do Aterro São João. 113

Figura 31: Vista externa da caldeira e da casa do turbo gerador..... 115

Figura 32: Produtividade de energia a partir de incineração..... 124

Figura 33: Potencial de energia disponível para o Brasil – cenário em que participam todos os municípios..... 127

Figura 34: Potencial de energia disponível para o Brasil – cenário em que participam apenas os municípios com mais de 500 mil habitantes..... 127

Figura 35: Potencial de energia disponível para o Brasil – cenário em que participam apenas os municípios com mais de 1 milhão de habitantes.. 128

Figura 36: Análise de sensibilidade ao Poder Calorífico Inferior..... 136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de aterros sanitários e formas de gestão dos aterros de algumas cidades do Brasil..... 38

Tabela 2: Emissão de metano por resíduos no Brasil..... 53

Tabela 3: Principais gases de efeito estufa..... 54

Tabela 4: Composição típica de gases de aterros sanitários..... 69

Tabela 5: Valores propostos para k em função da precipitação e da disponibilidade de nutrientes..... 72

Tabela 6: Valores propostos para k em função da precipitação..... 72

Tabela 7: Valores de L_o sugeridos em função da degradabilidade do resíduo..... 73

Tabela 8: Valores de FCM_i recomendados pelo IPCC para aterros não controlados..... 73

Tabela 9: Valores de porcentagens de COD_i em massa..... 74

Tabela 10: Índice de acesso ao serviço de coleta de resíduos domésticos em domicílios particulares permanentes no Brasil..... 102

Tabela 11: Formas de disposição de resíduos sólidos urbanos por regiões do país 103

Tabela 12: Geração *per capita* de resíduos sólidos urbanos dos municípios brasileiros em função do número de habitantes..... 104

Tabela 13: Quantidade de lixo coletada, em número absoluto e relativo por tipo de disposição final..... 106

Tabela 14: Taxa de geração de resíduos sólidos urbanos por regiões do Brasil..... 107

Tabela 15: Usinas de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos implantadas ou em fase de implantação no Brasil..... 109

Tabela 16: Características da usina termelétrica do Aterro Bandeirantes..... 111

Tabela 17: Projetos de captura e queima de metano no âmbito de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo..... 116

Tabela 18: Quantidade de resíduos gerada por região do país..... 118

Tabela 19: Quantidade de resíduos gerada por região em municípios com população acima de 500 mil habitantes e acima de 1 milhão de habitantes..... 118

Tabela 20: Parâmetros assumidos para a estimativa de potencial energético a partir de digestão anaeróbia em aterros sanitários..... 122

Tabela 21: Potencial teórico de geração de energia a partir da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários..... 123

Tabela 22: Parâmetros assumidos para a estimativa do potencial energético a partir de incineração de resíduos sólidos urbanos..... 125

Tabela 23: Potencial teórico de geração de energia a partir da incineração de resíduos sólidos urbanos..... 126

Tabela 24: Estimativas das receitas do projeto – incineração..... 133

Tabela 25: Características da usina de incineração hipotética..... 134

Tabela 26: Quadro de análise econômica para o cenário de referência – incineração..... 134

Tabela 27: Análise de sensibilidade para o processo de incineração..... 135

Tabela 28: Análise de sensibilidade para o processo de incineração variando-se o Poder Calorífico Inferior..... 136

Tabela 29: Estimativas das receitas e despesas do projeto hipotético de geração de energia a partir de gás de aterro..... 139

Tabela 30: Quadro de análise econômica para o cenário de referência – digestão anaeróbia em aterro sanitário..... 140

Tabela 31: Análise de sensibilidade para o processo digestão anaeróbia em aterro sanitário..... 141

Tabela 32: Emissão de NO_x por tecnologia de conversão..... 143

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Modelo empírico *School Canyon*..... 71

Equação 2: Equação para determinação da constante k 72

Equação 3: Equação para determinação de L_o 73

Equação 4: Equação para determinação de carbono orgânico degradável..... 74

Equação 5: Equação do Modelo *LandGEM*..... 75

Equação 6: Equação para determinação da potência disponível..... 121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ALC: América Latina e Caribe

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ANVISA: Agência Nacional de Vigilância Sanitária

BID: Banco Interamericano de Desenvolvimento

BIRD: Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento

BM&F: Bolsa de Mercadorias Futuros

BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CETESB: Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental

CDR: Combustível Derivado de Resíduo

CER: Certificado de Emissão Reduzida

COD: Carbono Orgânico Degradável

CEWEP: Confederation of European Waste-to-Energy Plants

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente

CONSEMA: Conselho Estadual do Meio Ambiente

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO: Demanda Química de Oxigênio

ELETROBRAS: Centrais Elétricas Brasileiras

EPA: Agência de Proteção Ambiental Americana

ETE: Estações de Tratamento de Esgoto

FINEP: Financiadora de Estudos e Projetos

FNMA: Fundo Nacional de Meio Ambiente

GLP: Gás Liquefeito de Petróleo

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC: International Panel on Climate Change

IPTU: Imposto Predial e Territorial Urbano

IQC: Índice de Qualidade de Compostagem

IQR: Índice de Qualidade dos Aterros de Resíduos

JBIC: Japan Bank for International Cooperation

LandGEM: Landfill Gas Emissions Model

MCT: Ministério de Ciência e Tecnologia

MDL: Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MMA: Ministério do Meio Ambiente

MME: Ministério de Minas e Energia

OPS: Organização Pan Americana de Saúde

PCI: Poder Calorífico Inferior

PEAD: Polietileno de Alta Densidade

PNAD: Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

PNSB: Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico

PROINFA: Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

RSS: Resíduos de Serviços de Saúde

RSU: Resíduos Sólidos Urbanos

TIR: Taxa Interna de Retorno

TJLP: Taxa de Juros de Longo Prazo

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

VPL: Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 19

1.1 Apresentação..... 19

1.2 Objetivos..... 20

1.3 Justificativa e Motivação..... 21

1.4 Procedimentos Metodológicos..... 22

1.5 Estrutura do Trabalho..... 22

2. RESÍDUOS SÓLIDOS 24

2.1 Resíduos Sólidos: definições..... 24

2.2 Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos..... 28

2.3 Gestão Integrada de Resíduos Sólidos..... 34

2.4 Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil..... 36

2.5 Resíduos Sólidos no Brasil: a problemática..... 40

2.6 Políticas Públicas e Fontes de Recursos para Resíduos Sólidos no País..... 42

2.7 Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Contexto Internacional..... 48

2.8 Energia, Resíduos e Meio Ambiente..... 52

2.9 Considerações Finais sobre o Capítulo 2..... 55

3. GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 56

3.1 Considerações sobre Biomassa e Tecnologias para Conversão em Energia..... 56

3.2 Tecnologias Usuais para Conversão de Resíduos Sólidos Urbanos em Energia..... 59

3.3 Energia a partir de Biomassa..... 91

3.4 Considerações Finais sobre o Capítulo 3..... 99

4. PANORAMA E POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL 100

4.1 Panorama da Situação dos Resíduos Sólidos no Brasil..... 100

4.2 Plantas de Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos..... 108

4.3 Potencial de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos 117

4.4 Considerações Finais sobre o Capítulo 4..... 128

5. ROTAS TECNOLÓGICAS, GARGALOS E DIRETRIZES PROPOSTAS 129

5.1 Comparação Entre as Duas Rotas Tecnológicas de Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos..... 129

5.2 Gargalos no Processo de Implantação de Projetos Brasileiros Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos..... 144

5.3 Diretrizes para Elaboração de Projetos com Vistas à Recuperação de Energia de Resíduos Sólidos Urbanos..... 146

5.4 Considerações Finais sobre o Capítulo 5..... 159

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... 161

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 166

ANEXO..... 181

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O acelerado processo de urbanização, aliado ao consumo crescente de produtos duráveis e/ou descartáveis, tem provocado sensível aumento do volume e diversificação dos resíduos sólidos gerados pela população. Deste modo, o encargo de gerenciar esses resíduos tornou-se uma tarefa que demanda ações diferenciadas e articuladas. O grande desafio consiste, portanto, em encontrar soluções ambientalmente seguras e eficientes para os problemas de geração de resíduos em grandes quantidades.

Por outro lado, estes resíduos, se adequadamente gerenciados, podem ser aproveitados do ponto de vista energético. Vários países da Europa e da América do Norte utilizam energia a partir de resíduos sólidos para vários fins, entre os quais: aquecimento, geração de energia elétrica e como combustível veicular.

Além disso, podem-se destacar outros benefícios da recuperação de energia dos resíduos, tais como: (a) benefícios estratégicos, uma vez que essa ação pode contribuir como fonte alternativa de energia; (b) benefícios ambientais, pois ela colabora com a mitigação de gases de efeito estufa – o metano é um dos principais gases responsável pelo efeito estufa; (c) benefícios sócio-econômicos, devido ao desenvolvimento de tecnologia nacional com o uso de equipamento e insumos nacionais; e, sobretudo, (d) emprego de mão de obra qualificada e não qualificada nas várias etapas do processo de recuperação de energia a partir dos resíduos.

O presente trabalho – que toma como ponto de partida uma revisão bibliográfica sobre tecnologias disponíveis para aproveitamento de energia a partir de resíduos (especialmente a incineração e gás de aterro) e efetua a análise de projetos de recuperação energética a partir RSU – visa a propor diretrizes para o aproveitamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), levando em consideração as especificidades da realidade brasileira.

O resultado desta tese torna-se relevante na medida em que analisa a questão do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de maneira integrada – socialmente, tecnicamente, economicamente e ambientalmente. Espera-se, desse modo, que os resultados obtidos a partir deste trabalho venham contribuir para a formulação de políticas

públicas mais eficazes relacionadas ao gerenciamento integrado de resíduos sólidos e de fontes alternativas de energia.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram subdivididos entre objetivo geral e objetivos específicos, conforme descrito abaixo.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é analisar tecnologias para a recuperação e utilização de energia a partir de resíduos sólidos urbanos-aproveitamento de metano em aterros sanitário e a incineração, tendo em vista propor diretrizes que combinem aspectos ambientais, tecnológicos e socioeconômicos que mais se adaptem à realidade brasileira.

1.2.2 Objetivos Específicos

São quatro os objetivos específicos desta tese:

- Traçar um panorama da situação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, considerando-se dados sobre coleta, composição, disposição e características dos projetos de geração de energia a partir desses RSU;

- Estimar o potencial de aproveitamento energético dos RSU, com base na análise de viabilidade ambiental, técnica, operacional e socioeconômica (considerando o uso de gás de aterros sanitários e a geração de energia através de incineração);

- Comparar as rotas tecnológicas para a recuperação de energia a partir de RSU – incineração e a digestão anaeróbia em aterros sanitários – sob os aspectos técnicos, econômicos e socioambientais, utilizando-se para isso uma análise econômica, através

das técnicas de Taxa Interna de Retorno – TIR, Valor Presente Liquido – VPL, e Análise de Sensibilidade;

- Fazer o levantamento de gargalos para a geração de energia a partir de RSU para o caso brasileiro.

1.3 Justificativa e Motivação

O consumo crescente e os impactos ambientais e sociais causados pelas fontes de energias tradicionais têm levado o poder público, privado e a comunidade científica a pensarem em novas alternativas para a geração de energia.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2009) mais de 45 % da Matriz Energética do Brasil é renovável, enquanto a média mundial não ultrapassa os 14%. Entretanto, cerca de 70% (ANEEL, 2009) da energia elétrica do país é gerada em grandes usinas hidrelétricas, provocando importantes impactos ambientais, tais como o alagamento de áreas extensas, o deslocamento de populações e, em alguns casos, a perda de biodiversidade local.

Para incentivar a utilização de fontes alternativas de energia, o governo brasileiro criou, em 26 de abril de 2002, através da Lei nº 10.438, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), o qual posteriormente foi revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003. Em decorrência as fontes alternativas, como a solar, a eólica e a biomassa, passaram a ser vistas pelos empreendedores como uma perspectiva de investimento mais factível no contexto da geração de energia no Brasil.

Nesse contexto, a geração de energia a partir de resíduos sólidos vem apresentando-se como uma alternativa possível, com vistas ao desenvolvimento sustentável. Deve-se considerar que esta prática pode incentivar o desenvolvimento de práticas sanitárias adequadas (implantação de aterros sanitários, estações de triagem, coleta seletiva, incineradores), em decorrência da atratividade dos projetos para a iniciativa privada. Outras vantagens do aproveitamento energético dos RSU podem ser enumeradas, destacando-se: geração de emprego, transferência de tecnologia, substituição de combustíveis fósseis e mitigação de gases de efeito estufa.

1.4 Procedimentos Metodológicos

Para atingir seus objetivos, este trabalho utiliza as metodologias de pesquisa bibliográfica e o método de estudo de caso. Segundo Martins e Pinto (2001, p. 410) a pesquisa bibliográfica procura explicar um problema e propor soluções a partir de referências teóricas publicadas em documentos e contribuições científicas existentes. Já para o método de estudo de caso, Martins e Lintz (2000, p. 36), diz tratar-se de uma técnica de pesquisa cujo objetivo é o estudo de uma unidade que se analisa profunda e intensamente dentro do contexto de uma situação real.

Assim, em primeiro lugar foi realizado o levantamento de dados secundários sobre a situação de resíduos sólidos no país por região. Na sequência, estimou-se o potencial energético para a geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos considerando-se a digestão anaeróbia em aterros sanitários e a incineração de resíduos sólidos urbanos. Para o cálculo do potencial de geração de energia a partir da digestão anaeróbia utilizou-se o programa de modelagem matemática LandGEM.[1] Já para o cálculo do potencial de geração de energia a partir da incineração de resíduos sólidos urbanos foram utilizados dados teóricos de produção de energia por tonelada de resíduos incinerados (MW/t).

Em seguida, foram aplicadas as técnicas de análise econômica (Taxa Interna de Retorno – TIR, Valor Presente Liquido – VPL, e Análise de Sensibilidade) às duas rotas tecnológicas identificadas na fase de revisão bibliográfica.

A partir da observação das potencialidades das rotas tecnológicas avaliadas, bem como de suas limitações, foram identificados os gargalos para a implantação de projetos desse tipo e propostas diretrizes para o aproveitamento energético dos RSU no Brasil.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho subdivide-se em seis capítulos. No primeiro, que compreende esta introdução, buscou-se realizar uma contextualização do assunto de resíduos e a geração de

[1] LandGEM, versão 3.02 – desenvolvido pela the United States Environmental Protection Agency (USEPA).

energia a partir desses recursos. Nela também estão apresentados os objetivos do trabalho e as justificativas e motivações que levaram ao desenvolvimento do tema proposto. Adicionalmente está inclusa a metodologia utilizada para desenvolver o tema e a descrição da estrutura desta tese.

O segundo e terceiro capítulos são voltados à revisão da bibliografia pertinente. Neles são abordados conceitos utilizados no trabalho, tais como definições sobre resíduos, ferramentas para a gestão de resíduos e políticas públicas de saneamento. Também são descritas tecnologias de geração de energia a partir de resíduos (com ênfase em incineração e digestão anaeróbia em aterros sanitários), e seus respectivos impactos socioambientais. Outras questões de políticas públicas, como o estímulo a projetos no contexto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e PROINFA, bem como os riscos usualmente associados a tais projetos também são trabalhados nestes capítulos. Deste modo, esta parte do trabalho pode ser considerada como subsídio para os capítulos 4 e 5.

No capítulo 4 é analisado o panorama atual de resíduos sólidos no Brasil e são descritas as características dos projetos de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos, implantados no país. Além disso, é estimado o potencial de aproveitamento energético a partir de resíduos sólidos urbanos para o Brasil, enfocando as tecnologias de digestão anaeróbia em aterro sanitário e incineração.

No quinto capítulo é realizada uma análise econômica para projetos de geração de energia a partir de resíduos e são discutidos os gargalos existentes no Brasil para a implantação e a viabilização dos projetos de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. Por fim, são propostas diretrizes para a elaboração de projetos de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos considerando-se as especificidades brasileiras.

No sexto e último capítulo é apresentado um sumário das conclusões, contendo um apanhado dos pontos-chave do presente trabalho, bem como recomendações para trabalhos futuros.

2. RESÍDUOS SÓLIDOS

Este capítulo aborda conceitos básicos a respeito de resíduos, apresentando as principais práticas de disposição e definições sobre ferramentas de gestão e gerenciamento. É discutida a problemática dos resíduos sob o ponto de vista da saúde pública e das questões ambientais locais e globais. O texto também faz uma inter-relação entre energia, resíduos sólidos e meio ambiente. Além disso, procura dimensionar as políticas públicas e fontes de recursos sobre o tema no Brasil. A revisão de literatura apresentada neste e no capítulo subsequente tem como função dar suporte aos resultados e discussões que se desenvolverão nos capítulos 4 e 5.

2.1 Resíduos Sólidos: definições

Quando a vida útil de um material se esgota, este se torna um resíduo (NAZAROFF e ALVAREZ COHEN, 2001). O termo resíduo sólido é empregado como sinônimo de “lixo” (MANCINI, 1999). Com base em Bidone e Povinelli (1999) os lixos ou resíduos sólidos apresentam grande diversidade e são gerados pelas mais variadas atividades humanas e nos mais diversos ambientes urbanos, constituindo assim uma massa de materiais reunidos julgada sem utilidade e posta fora.

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1997), como resíduos sólidos urbanos (RSU), ou simplesmente ‘lixo’, entende-se todo e qualquer material sólido proveniente das atividades diárias do homem em sociedade, cujo produtor ou proprietário não o considere como algo de valor suficiente para conservá-lo.

Para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2000), a definição de lixo corresponde a restos de atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. Normalmente, apresentam-se nos estados sólido e semi-sólido, ou seja, com um conteúdo líquido insuficiente para que possam fluir livremente.

No Brasil, os resíduos sólidos seguem os critérios de tratamento estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a qual apresenta uma relação de normas. A definição de resíduos sólidos publicada pela ABNT, através da norma NBR 10.004,

dimensiona a complexidade e a diversidade dos resíduos sólidos e a variedade de setores e de atividades de que eles se originam:

> Resíduos sólidos: são aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Consideram-se também resíduos sólidos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como, determinados líquidos cujas particularidades tornem inviáveis seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções tecnicamente e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 1987).

O mesmo documento da ABNT (NBR 10.004), publicado em 1987 e atualizado em 2004, classifica os resíduos sólidos quanto a seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública (ABNT, 2004). De acordo com o documento, os resíduos dividem-se em três grupos, discriminados a seguir:

- Resíduos Classe I (perigosos) – aqueles que apresentam risco à saúde pública ou ao ambiente, caracterizando-se por possuir propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

- Resíduos Classe II A (não perigosos e não inertes) – são aqueles que não apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, porém, apresentam propriedade de solubilidade em água (acima dos padrões estabelecidos pela norma da ABNT), existindo a possibilidade de haver reação com o meio ambiente, e, consequentemente, risco de poluição.

- Classe II B (não perigoso e inerte) – aqueles que não tem constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade da água.

Além da sua divisão por riscos potenciais ao meio ambiente, os resíduos podem ser classificados também de acordo com sua natureza física (seco ou molhado), por sua composição química (matéria inorgânica ou matéria orgânica) ou em função da origem (fonte geradora).

A classificação dos resíduos quanto à origem, quando se trata de gerenciamento de resíduos, é a mais útil e apropriada. Nesta classificação os resíduos podem se dividir em: domiciliar; comercial; de estabelecimentos públicos; de serviços de saúde e hospitalares; de

portos e aeroportos; de terminais rodoviários e ferroviários, de indústrias, da agricultura, da construção civil, ou de fontes radioativas (resíduos nucleares).

Resíduos domiciliares são aqueles originados da vida diária das residências, e são constituídos de restos de alimentos (cascas de frutas, verduras, sobras, etc), de produtos deteriorados, de jornais e revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico usado, fraldas descartáveis e uma grande diversidade de outros itens tóxicos, como baterias, pilhas, medicamentos vencidos, entre outros.

Resíduos de origem comercial são aqueles gerados nos diversos estabelecimentos comerciais e de serviços, tais como supermercados, estabelecimentos bancários, lojas, bares, restaurantes etc. Estes resíduos caracterizam-se pela grande quantidade de papel, plásticos, embalagens diversas.

Resíduos de estabelecimentos públicos são aqueles oriundos de serviços de limpeza pública urbana, incluindo todos os resíduos de varrição das vias públicas, de limpeza de praias, limpeza de galerias, de córregos e terrenos, restos de podas de árvores e corpos de animais.

Os resíduos de serviços de saúde (RSS) – ou hospitalares – são aqueles originados em hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, clínicas veterinárias, postos de saúde, consultórios odontológicos, etc. Trata-se de agulhas, seringas, gazes, bandagens, algodões contaminados, órgãos e tecidos removidos, meios de cultura e animais utilizados em teste de pesquisas, luvas descartáveis, remédios com prazos de validade vencidos, instrumentos de resinas sintéticas e outros resíduos sépticos que contêm ou potencialmente podem conter germes patogênicos. Os resíduos assépticos desses locais, constituídos de papéis, restos da preparação de alimentos, resíduos de limpeza em geral e outros materiais, desde que coletados segregadamente e não entrem em contato direto como os pacientes ou resíduos sépticos anteriormente descritos, são semelhantes aos resíduos domiciliares.

Devido a sua complexidade, os RSS são alvo de diversos diplomas legais. Seu manuseio adequado é objeto de normatização e regulamentação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), pela Resolução 306/04, da ABNT, através da NBR 12.808, e do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução 358/05. Esses

documentos legais também propõem uma visão sistêmica para o gerenciamento dos resíduos sólidos, abordando suas vertentes e todos os aspectos de sua existência, tais como geração, acondicionamento, transporte, tratamento e disposição final.

Resíduos de portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários constituem-se basicamente, de materiais de higiene, asseio pessoal e restos alimentares, os quais podem veicular doenças provenientes de outras cidades, estados ou países. Já os resíduos industriais são aqueles originados das atividades dos diversos ramos da indústria, tais como metalurgia, química, petroquímica, papel e celulose, alimentícia, etc.

Os resíduos de origem agrícola são aqueles que têm origem nas atividades agrícolas e de pecuária. Incluem embalagem de fertilizantes e de defensivos agrícolas, rações, restos de colheita e esterco animal. As embalagens de produtos agroquímicos, geralmente altamente tóxicos, têm sido alvo de legislação específica quanto aos cuidados para com a sua destinação final.

Resíduos da construção civil são compostos por materiais de demolição, restos de obras, solos de escavações diversas, etc. O entulho é geralmente um material inerte, passível de reaproveitamento, porém, geralmente contém uma vasta gama de materiais que podem lhe conferir toxicidade, com destaque para restos de tintas e solventes, peças de amianto e metais diversos.

A resolução CONAMA 307/2002, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para os resíduos da construção civil. Segundo esta Resolução os entulhos de obras, construção e reformas são de responsabilidade da fonte geradora, cabendo ao mesmo o acondicionamento, o transporte e a destinação final, sem que se comprometa a limpeza pública e o meio ambiente. Cabe, portanto, aos municípios, disciplinar, regulamentar e fiscalizar a atividade dos agentes privados e dos pequenos geradores.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) objeto deste estudo incluem aqueles gerados em domicílios, locais públicos, comércio e, frequentemente, na agricultura. Desta forma, são bastante variados, podendo ser representados por plásticos, papéis, madeiras, fibras, borrachas, metais, vidros, cerâmicas, restos de alimentos, podas de árvores, aparelhos eletrônicos, pilhas, lâmpadas, entre outros. Esses resíduos são definidos pela NBR 8419

(ABNT, 1992) como resíduos gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos.

De acordo com a Resolução CONAMA 308/2002, que trata do licenciamento ambiental de sistemas de disposição final de RSU gerados em municípios de pequeno porte, RSU são "provenientes de residências ou qualquer outra atividade que gere resíduos com características domiciliares, bem como os resíduos de limpeza pública urbana". Com base no artigo 2, ficam excluídos desta definição os resíduos perigosos.

O Artigo 6º da Lei nº 1.445/2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, propõe que "o lixo originário das atividades comerciais, industriais e de serviços, cuja responsabilidade pelo manejo não seja atribuída ao gerador, pode, por decisão do poder público, ser considerado resíduo sólido urbano".

O Artigo 12, inciso I do Projeto de Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos, PL 1991/2007, define RSU como os "resíduos gerados por residências, domicílios, estabelecimentos comerciais, prestadores de serviço e oriundos dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, que por sua natureza ou composição tenham as mesmas características dos gerados nos domicílios" (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2007).

2.2 Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos

O gerenciamento inadequado dos RSU pode resultar em riscos indesejáveis às comunidades, constituindo-se, ao mesmo tempo, em problema de saúde pública e fator de degradação do meio ambiente, além, é claro, dos aspectos sociais, estéticos, econômicos e administrativos envolvidos.

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

A preocupação com o volume dos resíduos gerados, bem como com as possibilidades de reaproveitamento dos materiais, sobretudo do ponto de vista energético, ainda é incipiente, sendo raras as iniciativas dos poderes públicos voltadas à conscientização e à mobilização da comunidade.

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

Existem várias formas de disposição e tratamento de RSU. Entre os métodos mais comuns, considerados adequados do ponto de vista sanitário e ecológico, podem ser mencionados: i) aterro sanitário; ii) reciclagem; iii) compostagem; e, iv) incineração.

2.2.1 Aterro Sanitário

O aterramento sanitário é um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, que permitem a proteção do meio ambiente e da saúde pública. Os resíduos sólidos, quando dispostos em aterros sanitários, são compactados e cobertos com terra na forma de células diárias, dispostas lado a lado, formando camadas de resíduos sobre o solo. São empregados princípios de engenharia para tratamento e coleta dos líquidos percolados gerados.

Antes de se projetar um aterro sanitário devem ser realizados estudos geológicos e topográficos para a seleção da área e a verificação do tipo de solo. Também deve ser feita a impermeabilização do solo, os líquidos percolados devem ser captados por drenos horizontais para tratamento e devem ser instalados drenos verticais para liberação dos gases formados durante a decomposição anaeróbia da matéria orgânica.

Segundo Lima (1991), a prática de aterrar resíduo sólido como forma de destino final não é privilégio da civilização moderna, os antigos também já faziam uso dela. Os nabateus, na Mesopotâmia, 2.500 anos a.C., enterravam seus resíduos domiciliares e agrícolas em trincheiras escavadas no solo. Depois de algum tempo, as trincheiras eram abertas e a matéria

orgânica, já decomposta, era removida e utilizada como fertilizante orgânico na produção de cereais.

É importante diferenciar aterro sanitário, descrito anteriormente, de aterro controlado e de lixão. Os aterros controlados são formas de disposição que buscam minimizar os impactos ambientais. Confinam-se os resíduos, cobrindo-os no final de cada dia de trabalho com uma camada de material inerte e, normalmente, utiliza-se algum princípio de engenharia para tratamento e coleta dos líquidos percolados gerados. Em geral, esse processo não dispõe de impermeabilização de base.

Já os lixões ou vazadouros caracterizam-se pela simples descarga dos resíduos. Acarretam vários problemas de saúde à população vizinha do local devido à proliferação de vetores de transmissão de doenças. Além disso, exalam maus odores e contaminam solos, águas superficiais e subterrâneas, através dos líquidos percolados (ou *chorume*)[2] gerados no local. Associam-se também aos lixões o total descontrole quanto ao tipo de resíduos recebidos, podendo-se encontrar nesses locais desde resíduos de origem industrial a restos provenientes de serviços de saúde. Geralmente existem catadores que moram no local e sobrevivem da venda de materiais recicláveis coletados no próprio local.

2.2.2 Reciclagem

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

Teixeira (2000) definiu reciclagem como o processo em que o material, após o seu uso, retorna ao ciclo produtivo, quer seja o de sua origem, ou em qualquer outro ciclo produtivo.

---

[2] *Chorume* é o líquido oriundo da decomposição dos resíduos e provém de três fontes: 1) da umidade natural dos resíduos, que se agrava nos dias de chuva intensa; 2) da água de constituição de vários materiais que sobra durante a decomposição; 3) de líquidos provenientes da dissolução da matéria orgânica pelas enzimas expelidas pelas bactérias. Este líquido possui cor escura, caráter extremamente ácido, odor desagradável e alta carga poluente.

Para Lajolo (2003), a reciclagem consiste num conjunto de operações interligadas, realizadas por diferentes agentes econômicos, com a finalidade de reintroduzir no processo produtivo os materiais presentes nos resíduos gerados pelas atividades humanas.

Os trabalhos de Calderoni (2003); Cunha (2002); Renó *et al.* (2002); Meldonian (1998) e Figueiredo (1995) discutem a reciclagem como forma de reintrodução da matéria-prima ao processo produtivo, evitando, de modo significativo, a quantidade de energia gasta na produção industrial. No entanto, é preciso ressaltar que a reutilização de componentes presentes na massa de RSU deve ser precedida de uma separação, mecânica ou manual, e de um pré-processamento que englobe a lavagem, a descontaminação e o acondicionamento desses componentes. Assim, a cadeia produtiva da reciclagem tem início com a separação dos materiais recicláveis na fonte geradora e termina com a reciclagem e o retorno de um novo produto ao mercado. Observa-se na Figura 1 a participação de diferentes agentes na cadeia de reciclagem.

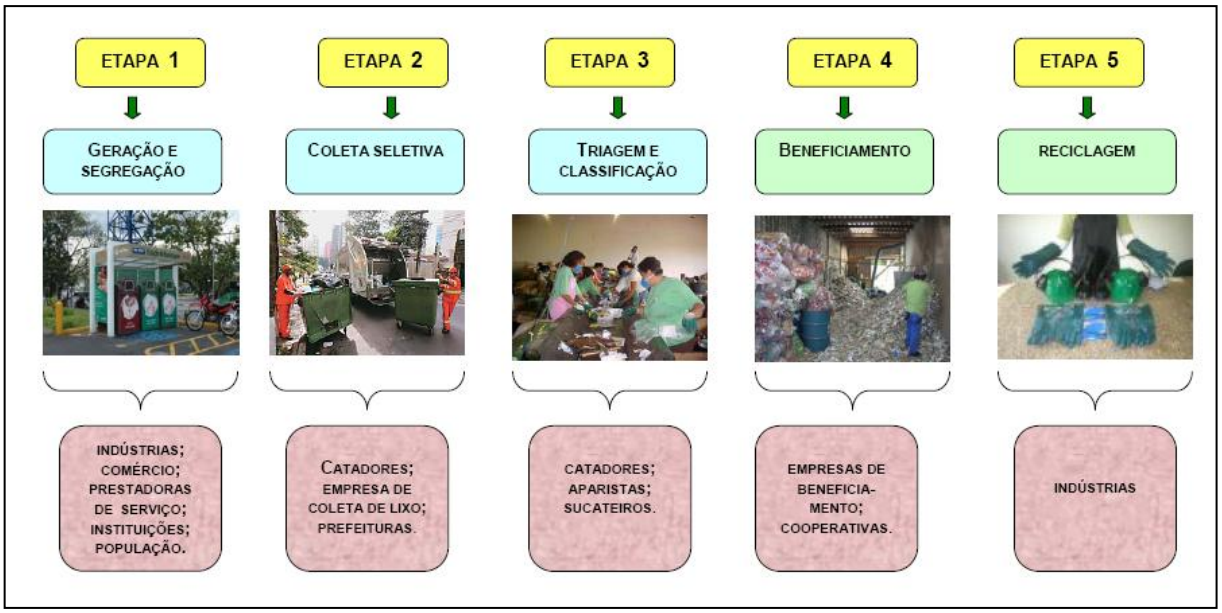


Figura 1: Fluxograma para reciclagem de resíduos sólidos urbanos.
Fonte: Elaboração da autora com base em Lajolo (2003).

A primeira etapa consiste na separação dos resíduos nas diversas fontes geradoras. A segunda é a coleta seletiva dos materiais recicláveis já separados. Já a terceira etapa é quando o material é encaminhado para triagem, onde ocorre a separação por tipo, classificação e prensagem. A quarta etapa, por sua vez, é aquela em que pode haver algum tipo de beneficiamento. É importante destacar que a triagem é considerada uma atividade estratégica, na medida em que prepara os materiais para reciclagem e define o preço de venda em função

do estado dos materiais. Na etapa 5 pode-se dizer que é quando ocorre a reciclagem propriamente, onde o material é re-introduzido no processo produtivo.

2.2.3 Compostagem

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

Outro conceito mais completo para compostagem é o de Lopez-Real, (1990), que define o método como uma decomposição controlada, exotérmica e bio-oxidativa de materiais de origem orgânica, por microorganismos, num ambiente úmido, aquecido e aeróbico, tendo como resultado a produção de dióxido de carbono, água, minerais e matéria orgânica estabilizada.

Para o processo de compostagem, materiais orgânicos (restos de preparos de alimentos e jardinagem) provenientes do lixo doméstico são separados dos materiais inertes, como vidro, plástico e alumínio, e levados a locais apropriados, como pátios de compostagem, silos ou tambores rotativos, para sofrerem processo de degradação controlada para a produção do composto.

Existem muitos fatores que influenciam ou interferem na decomposição, maturação e qualidade do produto final. Daí a importância de os diversos materiais que compõem os RSU serem separados em materiais passíveis de reciclagem e em matéria orgânica. Desta forma, pode-se dizer que a compostagem depende integralmente da coleta seletiva e o composto só será de boa qualidade se for livre de impurezas e de metais.

Os principais segmentos de mercado para o composto são: agricultura; paisagismo; jardinagem; reflorestamento e cobertura de solo. A Figura 2 apresenta leiras do composto final, já estabilizado pronto para ser utilizado.

Figura 2: Leiras de composto orgânico já estabilizado.
Fonte: CEMPRE (2008).

2.2.4 Incineração

Segundo LIMA (1991), a incineração é o processo de redução de peso e volume do resíduo sólido através de combustão controlada em temperaturas elevadas (871 ºC a 1204 ºC). Os remanescentes são geralmente gases (CO_2, SO_2, N_2, gases inertes provenientes do ar e do próprio resíduo e oxigênio do ar em excesso), água, cinzas e escórias que se constituem por metais ferrosos e inertes, como vidros e pedras.

Para Rocca (1993), a incineração é considerada um método de tratamento de resíduos via oxidação térmica, que torna os resíduos menos volumosos, menos tóxicos ou atóxicos.

Sogabe (1999) em seu trabalho descreve que a purificação com fogo é um conceito antigo. O autor cita que na idade média era utilizado o ‘vagão de fogo’, o primeiro incinerador móvel. Era um vagão retangular de madeira, protegido internamente por uma camada de argila, contendo uma fogueira. O vagão era levado pelas ruas e os moradores jogavam seus rejeitos dentro dessa fogueira móvel.

Atualmente, entretanto, estão disponíveis várias tecnologias para incineração de resíduos, que devem ser empregadas de acordo com o tipo e quantidade de material a ser operado. Estas tecnologias serão descritas oportunamente neste trabalho.

Segundo IEA (1997) existem no mercado incineradores com alta eficiência de queima, baixo consumo de combustíveis e baixa emissão de poluentes. Lima (1991) cita, entretanto, que havendo combustão incompleta, pode aparecer monóxido de carbono (CO), particulados que consistem de carbono finamente dividido, lançado à atmosfera como fuligem ou negro de fumo, e dioxinas e furanos. Se a combustão é realizada em altas temperaturas, pode haver dissociação do nitrogênio, surgindo ainda compostos resultantes da combinação deste com o oxigênio, como NO_x.

É importante ressaltar, ainda, que por se tratar de unidades complexas, com alto grau de automatização e número elevado de dispositivos de controle de processo, que exigem especialização da mão-de-obra, os incineradores requerem valores altos de investimento e custos de operação mais elevados em relação a outros processos. Por outro lado, os resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) resultantes dessa forma de tratamento, que são descartados no ambiente, têm volumes bastante reduzidos, além de haver a possibilidade de aproveitamento da energia, liberada na queima para a geração de vapor e eletricidade.

Nos países da Europa e no Japão a tecnologia de incineração de RSU é amplamente difundida. Segundo Menezes *et al.* (2000), neste ano, na Suíça, 80% dos resíduos gerados no país eram incinerados, já no Japão este número correspondia a 72%.

2.3 Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

Gestão significa elaboração de estratégias, planejamento de ações. Pressupõe visão holística, integração entre as partes, articulação entre os agentes, integrar e compartilhar informações. Por este motivo os termos ‘gestão integrada’ e ‘gestão compartilhada’ têm sido muito empregados. Existe ainda o termo ‘gestão sustentada’, que provém de gestão ‘sustentável’. Todas essas formas enfatizam o planejamento a longo prazo (LOPES, 2007).

De acordo com Souza (2000), o termo ‘gestão’ assume um significado amplo quando se refere à questão ambiental, pois envolve um grande número de variáveis que interagem simultaneamente. Para Machado (2003), o conceito de gestão é usado no sentido global e diversificado, como gestão ambiental integrada, gestão de recursos naturais, gestão do espaço, gestão integrada das águas, entre outros. Segundo o autor, a gestão integrada foi

adotada por cientistas, administradores públicos, industriais e associações técnico-científicas, e possui diferentes conotações e dimensões.

No Brasil, muitas vezes, os termos gestão e gerenciamento são usados como sinônimos. A literatura americana, porém emprega para ambos a expressão *management*, sem distinção, pressupondo-se que seus significados estão englobados numa única palavra. No que se refere aos resíduos sólidos são apresentadas algumas definições.

De acordo com Tchobanoglous (1993), gerenciamento de resíduos sólidos engloba a geração, armazenamento, coleta, transferência, transporte, tratamento e disposição final desses resíduos, bem como aspectos econômicos, de engenharia, de saúde pública e ambientais, entre outros fatores.

A Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA), *U.S Environmental Protection Agency* (USEPA, 2001a), conceitua gerenciamento integrado de resíduos sólidos como um processo que compreende a combinação de quatro métodos: redução, reciclagem, combustão e disposição. Conforme a EPA, o gerenciamento integrado de resíduos sólidos é composto de ações, etapas, métodos, processo e facilidades, como planejamento, financiamento, regulação, operação e gerenciamento. Inclui também a redução da geração desses resíduos, coleta, transferência, reciclagem dos materiais, compostagem, combustão (incineração ou geração de energia a partir da queima dos resíduos) e disposição. De acordo com Leite (1997), gestão de resíduos sólidos é "um conjunto de referências político-estratégicas, institucionais, legais e financeiras capaz de orientar e organizar o setor". Esta definição foi complementada por Lima (2003), que inseriu as variáveis operacionais, sociais e ambientais.

Segundo a Lei 12.300/2006 que trata da Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo, gerenciamento de resíduos sólidos:

> "é o estabelecimento de diretrizes e a implantação dos serviços de limpeza urbana, sobre os aspectos ambientais, econômicos, financeiros, administrativos, técnicos, sociais e legais, para todas as fases do manejo, de sua geração e da sua disposição final". (LEI 12.300/2006).

Com base nesta mesma Lei, gestão integrada de resíduos sólidos:

> "é a maneira de conceber, implementar, administrar sistemas de limpeza urbana considerando uma ampla participação dos setores da sociedade com a perspectiva do desenvolvimento sustentável. A

> sustentabilidade do desenvolvimento é vista de forma abrangente, envolvendo as dimensões ambientais, sociais, culturais, econômicas, políticas e institucionais. Isso significa articular políticas e programas de vários setores da administração e vários níveis de governo, envolver o Legislativo e as comunidades locais, buscar e garantir os recursos e continuidade das ações, identificar tecnologias e soluções adequadas à realidade local (LEI 12.300/2006).

Em suma, a gestão integrada de resíduos sólidos visa elaborar diretrizes para disciplinar as ações (gerenciamento), considerando os aspectos envolvidos (ambientais, culturais, econômicos, de saúde pública, políticos, sociais, técnicos, urbanísticos, entre outros), a fim de que as medidas adotadas sejam sustentáveis. Desta forma, o gerenciamento faz parte da gestão e pode ser entendido como as etapas a serem executadas. Pode-se dizer que gestão integrada de resíduos sólidos é a integração dos diversos atores, de forma a estabelecer e aprimorar a gestão dos resíduos, englobando todas as condicionantes envolvidas no processo e possibilitando um desenvolvimento uniforme e harmônico entre todos os interessados, de forma a atingir os objetivos propostos, adequados às necessidades e às características de cada comunidade (LOPES, 2007).

Segundo o Ministério das Cidades (2005) o modelo de gestão integrada de resíduos sólidos pode ser entendido como "um conjunto de referências político estratégicas, institucionais, legais, financeiras, sociais e ambientais capaz de orientar a organização do setor". Para o autor, os seguintes elementos são indispensáveis na composição de um modelo de gestão: i) reconhecimento dos diversos agentes sociais envolvidos, identificando os papéis por ele desempenhados e promovendo sua articulação; ii) integração dos aspectos técnicos, ambientais, sociais, institucionais e políticos para assegurar a sustentabilidade; iii) consolidação da base legal necessária e dos mecanismos que viabilizem a implementação das leis e, iv) mecanismos de financiamento para a auto-sustentabilidade das estruturas e gestão e do gerenciamento.

2.4 Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil

A Constituição Brasileira de 1988, em seu artigo 30, incisos I, II e V estabelece que é competência do município, legislar sobre assuntos de interesse local, suplementar as legislações estadual e federal quando necessário, e organizar e prestar, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local. Sendo assim, os RSU são de propriedade e responsabilidade da prefeitura municipal, a quem cabe a missão de assegurar sua coleta e sua destinação final.

Mesmo considerando ser competência do município o tratamento e a destinação do lixo, a legislação ressente-se da falta de uma Política Nacional de Resíduos Sólidos, bem como de normas gerais e de âmbito nacional, visando não apenas o correto gerenciamento dos resíduos, mas principalmente a redução de sua geração. Isso requer mecanismos que extrapolem as competências municipais e estaduais, como por exemplo, a atribuição de responsabilidades aos fabricantes pelo ciclo total do produto, incluindo a obrigação de recolhimento após o uso pelo consumidor ou tributação diferenciada por tipo de produto. Destaca-se aqui, que em agosto de 2010 foi sancionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em trâmite no congresso desde 1991. Entretanto, este instrumento legal ainda não foi regulamentado.

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

A opção adotada pelo Brasil para disposição de resíduos são os aterros sanitários em função de custos e também da ‘aparente’ disponibilidade de área. Entretanto, as práticas operacionais desses locais de disposição são muito diferenciadas entre as regiões, ou até mesmo entre os municípios. Estas diferenciações se dão, principalmente, em função de má gestão. Consequentemente, existem, e ainda são aceitos pelos órgãos de fiscalização, os aterros controlados.

A incineração, por sua vez, é uma técnica pouco utilizada no Brasil. Pode-se dizer que está restrita a uma parte dos resíduos hospitalares, a embalagens de agrotóxicos e a certos resíduos industriais perigosos.

Quanto à coleta de resíduos, na maioria das cidades é realizada pela iniciativa privada, sob forma de concessão, ou permissão (cerca de 60%), (SMA, 2003).

De acordo com Jucá (2002), os aterros existentes no país, na maioria dos casos, são operados pela iniciativa privada, contratada pelas prefeituras ou empresas municipais sob a forma de terceirização. Neste sentido as empresas gestoras dos aterros recebem pela quantidade, em peso, de resíduo depositado no aterro (R$/tonelada). A Tabela 1 mostra o

tipo de aterro (controlado ou sanitário) e a forma de gestão (municipal ou terceirizada) de alguns aterros do Brasil.

Tabela 1: Tipos de aterros sanitários e formas de gestão dos aterros de algumas cidades do Brasil

Localização	Tipo de aterro	Forma de gestão
Recife/PE	Aterro controlado de Muribeca	Municipal
Biguaçu/SC	Aterro sanitário de Formaco	Terceirizada
Fortaleza/CE	Aterro sanitário de Caucáia	Terceirizada
Fortaleza/CE	Aterro sanitário de Aquiraz	Terceirizada
Goiânia/GO	Aterro controlado de Goiânia	Terceirizada
Belo Horizonte/MG	Aterro controlado de Belo Horizonte	Municipal
Porto Alegre/RS	Aterro sanitário da Extrema	Municipal
Porto Alegre/RS	Aterro sanitário de Santa Tecla	Municipal
Itaquaquecetuba/SP	Aterro sanitário de Itaquaquecetuba	Terceirizada
Mauá/SP	Aterro sanitário de Mauá	Terceirizada
São Paulo	Aterro sanitário São João	Terceirizada
Santo André	Aterro sanitário	Municipal
União da Vitória/PR	Aterro sanitário	Municipal
Salvador/BA	Aterro sanitário	Municipal
Palmas/TO	Aterro sanitário	Municipal
Aragauaína/TO	Aterro sanitário	Municipal
Guaraí	Aterro sanitário	Municipal
João Pessoa	Aterro sanitário	Municipal

Fonte: Adaptado de Jucá (2002).

Em 2002 a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) revelou uma tendência de terceirização nos serviços de limpeza urbana em todas as regiões brasileiras, acentuada, sobretudo, nos municípios de maior porte e com menor intensidade no Nordeste do país. Observou-se, naquela época, que nas regiões Sul e Sudeste a quantidade de municípios que havia optado pela terceirização e instituído alguma taxa de limpeza era muito maior do que em outras regiões.

O Panorama de Resíduos Sólidos do Brasil, publicado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2008), em sua edição de 2008, confirma esta tendência. Os dados mostram que, no Brasil, 70,2% do mercado de serviços de limpeza urbana pertence à iniciativa privada, o que corresponde a uma movimentação financeira da ordem de 12 bilhões de reais por ano.

Segundo a ABRELPE (2006) houve uma evolução no que concerne à disposição em aterro sanitário, que em 2005 era 58% e em 2006 chegou a pouco mais de 62%. O quadro de crescimento do número de aterros sanitários e a redução de aterros controlados demonstram

uma evolução na técnica e na política da gestão correta de resíduos sólidos no país. No caso do Estado de São Paulo isso pode ser demonstrado através do IQR (Índice de Qualidade dos Resíduos) do Inventário Estadual dos Resíduos Sólidos Domésticos de São Paulo, produzido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) desde 1998, com base nos dados de 1997, quando o IQR era 4,04, subindo em 2005 para 7,36 (CETESB, 2006).

Outro fator indicativo da melhora da destinação final dos RSU, de acordo com a ABRELPE (2006), é a informação das diversas agências estaduais de controle ambiental de que houve um aumento nos pedidos de licenciamento de locais destinados à disposição de RSU.

Ressalte-se, entretanto, que o tratamento dado aos resíduos sólidos ainda está aquém do que é praticado em países desenvolvidos e pode ser avaliado a partir da própria dificuldade de se obter informações confiáveis e detalhadas sobre o tema. Os dados são escassos, falhos e conflitantes, a começar pelas estimativas acerca da quantidade de resíduos gerados, o que será discutido mais a adiante neste trabalho. Por exemplo, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2002) fornece subsídios que permitem o conhecimento detalhado sobre a questão de limpeza urbana em todos os municípios brasileiros, mas não informa sobre a qualidade dos serviços prestados.

Quanto ao sistema de coleta seletiva, dos 5.654 municípios existentes no Brasil, aproximadamente 56% tomaram algum tipo de iniciativa nesse sentido. Estas, porém, na maioria das vezes, se resumem à implementação de postos de coleta voluntária ou na simples formalização de convênios com cooperativas de catadores para a execução dos serviços (ABRELPE, 2008).

Quanto aos recursos financeiros, a principal fonte destinada às empresas municipais de limpeza urbana provém do orçamento executivo municipal, pelo ressarcimento dos serviços prestados à municipalidade. A taxa de serviços de coleta é cobrada juntamente com o Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU).

É importante destacar que os arranjos institucionais inadequados, aliados a mecanismos de financiamento ultrapassados e ao baixo nível de comprometimento dos administradores públicos, fazem com que diretrizes que determinam as formas de disposição final de resíduos

sólidos não sejam cumpridas à luz da lei, o que produz um quadro alarmante no setor de saneamento.

2.5 Resíduos Sólidos no Brasil: a problemática

O maior impasse na gestão dos resíduos é o fato de que a produção é diretamente proporcional ao crescimento da população e, à medida que a quantidade de lixo aumenta, torna-se mais difícil encontrar lugares adequados para sua disposição. Pois, com a expansão das áreas urbanas e devido às restrições ambientais, são cada vez menores as extensões de terreno disponíveis para a implantação de locais de disposição e/ou tratamento de resíduos. Considerando-se uma população de aproximadamente 184 milhões (IBGE, 2007) e a média brasileira de geração de resíduos de 0,88 kg/hab/dia (ABRELPE, 2006) estima-se que sejam produzidas cerca de 162 mil toneladas de resíduos por dia.

Uma pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) em 2006 revelou que 94,4% dos resíduos gerados são submetidos à coleta regular. A mesma pesquisa revelou, ainda, que cerca de 6% dos resíduos são dispostos em lixões a céu aberto.

Em 2000, a publicação do IPT (2000) já declarava que a crescente degradação causada pelo lixo vem afetando a vida cotidiana de tal forma que está causando sérios “problemas políticos”. Isso porque constata-se que o lixo urbano não é o mesmo de vinte ou trinta anos atrás, pois mudou em quantidade, qualidade, volume e em composição. Atualmente os resíduos urbanos apresentam uma grande quantidade de embalagens e outros materiais de grande volume e de difícil biodegradação, o que ocupa cada vez mais lugar em aterros e tem como consequência o aumento dos gastos públicos para o setor.

Neste contexto, tratar, destinar ou aproveitar os resíduos gerados é uma responsabilidade da qual a sociedade não tem como se esquivar. A inexistência de gestão sobre os resíduos onera o Estado tanto no diz respeito ao tratamento e à disposição propriamente ditos, quanto no que concerne aos gastos indiretos relacionados à saúde pública.

De acordo com Bidone e Povinelli (1999), os resíduos urbanos do Brasil são compostos entre 40% e 60% de matéria orgânica. Nesta composição, eventualmente encontra-se matéria

fecal humana (que pode ser de um indivíduo doente), devido à presença de absorventes higiênicos, fraldas descartáveis e outros. Encontra-se também o lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto, que pode apresentar organismos patogênicos, e também o lodo industrial, este último com grande concentração de metal pesado, de efeito cumulativo na biota.

Entre os animais e insetos propagadores de moléstias que habitam os lixões a céu aberto ou aterros mal operados estão os ratos (causadores de peste bubônica e da leptospirose), as moscas (que podem abrigar agentes transmissores de febres, cólera, tuberculose, lepra e varíola), os mosquitos (transmissores de virose, dengue, febre amarela e malária), as baratas (suspeitas de abrigarem o vírus da poliomielite), os urubus (transmissores de toxoplasmose)e muitos outros (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Infelizmente ainda existem lixões que contaminam recursos hídricos e solo, e nos quais se pode verificar a presença de catadores ou de famílias inteiras que vivem próximas ou propriamente dentro dessas áreas. A Figura 3, uma fotografia tirada em um lixão desativado do município de Cachoeiro do Itapemirim, no Estado do Espírito Santo, ilustra o cenário ainda vivenciado no país.

Figura 3: Antigo lixão de Cachoeiro do Itapemirim, ES.
Fonte: Fotografado pela autora durante visita em dezembro de 2007.

Constata-se, no entanto, uma melhoria crescente no setor, o que poderá ser verificado no capítulo 4, no qual são apresentados os resultados e as discussões e é verificado o panorama da gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

2.6 Políticas Públicas e Fontes de Recursos para Gestão de Resíduos Sólidos no País

Conforme descrito anteriormente, o primeiro instrumento legal a ser utilizado para a área de resíduos sólidos é a Constituição Federal, notadamente em seu artigo 30, que estabelece como competência do município "organizar e prestar diretamente ou sob regime de concessão ou permissão os serviços públicos de interesse local, que tem caráter essencial". Incluindo, portanto, o gerenciamento de resíduos sólidos, como serviços públicos de interesse local e de caráter essencial.

Entretanto, a falta de uma Lei Federal que trate da gestão ambientalmente segura dos resíduos sólidos traz insegurança jurídica nos atos da administração pública e privada. Pois o arcabouço legal federal da área de resíduos sólidos não se encontra consolidado em um único documento, mas distribuído em leis, decretos, portarias e resoluções. Esta dispersão dificulta a aplicação das normas legais.

Na forma de lei propriamente dita, só a Lei 9.605, de 1998 – a Lei de Crimes Ambientais –, faz menção à área de resíduos sólidos. E, ainda assim, esta se restringe mais aos resíduos industriais, como pode se observar no Art. 54, parágrafo 2º: "considera-se crime se: ocorrer lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamento". A Lei de Crimes Ambientais não faz menção à criminalização da disposição final inadequada dos resíduos domésticos.

O CONAMA vem, nos últimos anos, editando resoluções referentes à coleta e ao tratamento de resíduos sólidos de construção civil, pilhas e baterias, pneumáticos e lâmpadas de mercúrio e construção de aterros sanitários, estabelecendo obrigações diversas para a sociedade. Entretanto, esses instrumentos são apenas resoluções, não leis, e como tal não podem imputar obrigações.

Ressalte-se aqui que está em trâmite no Congresso Nacional (desde 1991) o Projeto de Lei (PL-203/1991) que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cujo objetivo é estabelecer diretrizes, em nível federal, para a gestão e o gerenciamento dos diferentes tipos de resíduos sólidos (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2007).

O Projeto de Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos, citado anteriormente, (PL 1991/2007), prevê a gestão integrada de resíduos. A lei prevê, inclusive, no seu Artigo 12, a necessidade de recuperação de energia de resíduos. Por hora, contudo, sem a obrigação legal, os municípios pouco praticam a gestão integrada de resíduos sólidos, ignorando que ela deve ser planejada desde a origem até a disposição final.

Cabe destacar que todos os empreendimentos relacionados ao tratamento e à disposição de resíduos devem ser submetidos a estudos de impacto ambiental. Desta forma, é importante que esses projetos não sejam traçados isoladamente. O contexto regional e as características ambientais do entorno devem ser analisados. O Plano Diretor Municipal é um instrumento importante de planejamento e gestão municipal e pode e deve orientar as escolhas das áreas para instalações de unidades de tratamento e disposição de resíduos, inclusive com vistas à geração de energia.

Abaixo são citadas algumas legislações (Federais e Estaduais) pertinentes a vários aspectos que cerceiam a problemática dos resíduos:

- **Legislações Federais**

Portaria nº 53, de 1º de março de 1979 – Estabelece normas aos projetos específicos de tratamento e disposição de resíduos sólidos, bem como a fiscalização de sua implantação, operação e manutenção;

Resolução CONAMA nº 6, de 15 de junho de 1988 – Exige o estabelecimento de inventários dos tipos e quantidades de resíduos gerados pelas empresas;

Resolução CONAMA nº 8, de 19 de setembro de 1991 – Veta a entrada de materiais residuais oriundos de outros países destinados à disposição final e incineração no país;

Resolução CONAMA nº 5, de 05 de agosto de 1993 – Dispõe sobre a destinação final de resíduos sólidos. Define normas mínimas para o tratamento de resíduos sólidos oriundos de serviços de saúde, portos e aeroportos. Estende as exigências aos terminais rodoviários e ferroviários;

Resolução CONAMA nº 23, de 12 de dezembro de 1996 – Proíbe a importação dos resíduos perigosos, em todo o território nacional, sob qualquer forma e para qualquer fim;

Lei nº 10.888, de 20 de setembro de 2001 – Dispõe sobre o descarte final de produtos potencialmente perigosos do resíduo urbano (pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes e frascos de aerosóis em geral) que contenham metais pesados e dá suas providências;

- **Legislações Estaduais (Estado de São Paulo)**

Decreto nº 8468, de 8 de setembro de 1976 – Estabelece que o uso do solo para disposição final de resíduos seja permitido apenas em condições definidas em projetos, bem como define responsabilidades para tratamento, transporte e disposição de resíduos e trata da classificação das águas, assim como dos padrões de qualidade e emissão;

Resolução SMA 13, de 27 de fevereiro de 1998 – Dispõe sobre o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares:

Artigo 1º Publicar nos termos da Resolução SMA 66, de 17/12/96, o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares;

Artigo 2º A CETESB, através de sua Diretoria de Controle de Poluição Ambiental, deverá publicar anualmente a atualização do inventário referido no artigo anterior;

Artigo 3º O Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares deverá considerar o Índice de Qualidade dos Aterros de Resíduos (IQR) e o Índice de Qualidade de Compostagem (IQC), para efeito de classificação da destinação final e das usinas de compostagem;

Artigo 4º As condições da destinação final e das usinas de compostagem serão consideradas inadequadas, controladas ou adequadas, em conformidade com o IQR e com o IQC, de acordo com a pontuação e o enquadramento previstos para o IQR.

Deliberação do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) nº 20, de 10 de agosto de 1990 – Aprova o Projeto 130/89 e a norma de critérios de exigência de EIA/RIMA para Sistemas de Disposição de Resíduos Sólidos Domiciliares, Industriais e de Serviço de Saúde.

Lei Estadual nº 12.300, de 16 de março de 2006 – Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo.

- **Legislações Estaduais (Estado do Rio de Janeiro)**

Lei nº 1.361, de 06 de outubro de 1988 – Regula a estocagem, o processamento e a disposição final de resíduos industriais tóxicos.

Lei nº 2.011, de 10 de julho de 1992 – Dispõe sobre a obrigatoriedade da implantação de programas de redução de resíduos.

Decreto nº 8.975, de 15 de maio de 1986 – Aprova o regulamento dos serviços de controle, coleta e destino final de despejos industriais do Estado do Rio de Janeiro e dá suas providências.

Deliberação CECA nº 3.327, de 29 de novembro de 1995 – Aprova a Dz 041 R.7 – Diretriz de destinação de resíduos.

- **Fontes de Financiamentos e Recursos**

Para a implementação de ações necessárias à gestão de resíduos sólidos, na maioria das vezes, é necessário um aporte alto de recursos financeiros. Desta forma, as entidades públicas ou privadas dispõem de linhas de financiamento, dentre as quais podem-se destacar:

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) – uma ex-autarquia federal criada pela Lei nº 1.628, de 20 de junho de 1952, que foi enquadrado como uma empresa pública federal, com personalidade jurídica de direito privado e patrimônio próprio, pela Lei nº 5.662, de 21 de junho de 1971 (BNDES, 2005). O BNDES é um órgão vinculado ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior e tem como objetivo apoiar empreendimentos que contribuam para o desenvolvimento do país. Desde sua fundação, o BNDES financia os grandes empreendimentos industriais e de infraestrutura, tendo marcante posição no apoio aos investimentos na agricultura, no comércio e serviços e nas micro, pequenas e médias empresas, e aos investimentos sociais direcionados para educação e saúde,

agricultura familiar, saneamento básico e ambiental e transporte coletivo de massa (BNDES, 2005). Suas linhas de apoio contemplam financiamentos de longo prazo e custos competitivos, para o desenvolvimento de projetos de investimentos e para a comercialização de máquinas e equipamentos novos, fabricados no país, bem como para o incremento das exportações brasileiras. A instituição observa o conceito de desenvolvimento ambientalmente sustentável e fomenta iniciativas inovadoras que maximizem a eficácia da aplicação dos recursos, em projetos de preservação, conservação e recuperação ambientais. O critério de aprovação de projetos pelo BNDES é que estes sejam de modernização produtiva e que utilizem tecnologias, processos e procedimentos com vistas a reduzir a geração de resíduos, aumentar a eficiência energética e evitar a utilização de insumos tóxicos (BNDES, 2005).

O Fundo Nacional de Meio Ambiente (FNMA) – do Ministério do Meio Ambiente (MMA), instituído pela lei número 7.797 de julho de 1989, visando a manutenção da qualidade ambiental. A obtenção de recursos financeiros do FNMA está condicionada à apresentação de proposta que delineie ações para o aproveitamento do potencial natural de uma região ou que contribua para solucionar ou minimizar problemas ambientais relevantes. O órgão financia despesas com obras e instalações, equipamentos e material permanente, além de diárias, material de consumo, locomoção, serviços de consultoria e serviços de terceiros, sejam pessoa física ou jurídica (MMA, 2007).

Ministério das Cidades – os financiamentos em nível federal são coordenados pelo Ministério das Cidades e provenientes de duas fontes orçamentárias, a saber: i) orçamento geral da União e, ii) as emendas parlamentares. A liberação dos recursos é feita através da Caixa Econômica Federal – CAIXA –, subordinada ao Ministério da Fazenda. A Caixa aprova projetos que incentivam o crescimento, o fortalecimento do capital de giro e o programa de saneamento através do Programa Pro-Saneamento, financiado com recursos do FGTS – Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2005).

Banco Mundial – atua no Brasil desde 1949, com enfoque inicial em projetos de infraestrutura básica, tais como tranporte, energia e indústria. Atualmente a instituição tem ênfase em projetos de combate à pobreza, na área social e em reformas setorias, incluindo ações de protenção ao meio ambiente.

Consórcios – outra possibilidade dos municípios de superar entraves financeiros ou até mesmo operacionais é a união de forças através de consórcios. As ações consorciadas constituem na formação de entidades/associações com o objetivo de buscar soluções aos problemas comuns que envolvem municípios limítrofes. A formação de associações já era prevista na legislação civil brasileira (artigos 1363 a 1409 do Código Civil). Ou seja, partindo da ideia de que dois ou mais governantes criariam entidades de direito privado, que teriam por finalidade o estudo, o planejamento, e a execução de obras e serviços, envolvendo municípios que dela viessem participar. Em 2005, foi criada a Lei Federal nº 11.107/2005 – Lei dos Consórcios Público – regulamentada pelo Decreto nº6.017/07. Para o Ministério de Meio Ambiente, no momento de acessar as fontes de recursos financeiros do governo federal, as iniciativas consorciadas são privilegiadas em detrimento das demandas isoladas. Além disso, editais do Fundo Nacional de Meio Ambiente, relativos à elaboração de Planos de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos e da implantação e monitoramemnto de resíduos Sólidos foram criados após o advendo da Lei de Consórcios Públicos (MMA, 2007).

Fontes Internacionais de Cooperação Técnica, Científica ou Financeira – algumas entidades internacionais podem financiar projetos ligados à melhoria ambiental, redução de emissão de gases de efeito estufa e uso racional de recursos naturais. Entre essas instituições podem-se destacar:

i) Agência de Cooperação Técnica Internacional do Japão (*Japan International Cooperation Agency – JICA*); ii) Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (*United Nations Development Program*–- *UNDP*); iii) Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (*United Nations Environment Program – UNEP*); iv) Instituto Francês de Pesquisa para o Desenvolvimento em Cooperação (*L'institut Français de Recherche Scientifique pour le Developpement en Coopération – ORSTOM*); v) Agência Alemã de Apoio a Projetos de Cooperação Técnica (*Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit – GTZ*); vi) Fundo Mundial para o Meio Ambiente (*Global Environmental Facility – GEF*).

Todavia, deve-se chamar atenção para o fato de que a clientela dessas instituições de cooperação normalmente é composta pelo Estado, por organizações não governamentais ou por instituições sem fins lucrativos, o que implica a impossibilidade ou o difícil acesso a esses créditos por empresas privadas.

2.7 Gestão de Sólidos Urbanos no Contexto Internacional

Conforme discutido anteriormente, a gestão de RSU não se restringe ao sistema de coleta, tratamento e disposição final. Envolve outros fatores, como o financiamento dos serviços, a participação do setor privado, a participação da comunidade e as políticas públicas. Sendo assim, é abordado o panorama internacional da gestão de RSU do ponto de vista da gestão apoiada em políticas ambientais.

- **União Europeia**

A União Europeia se destaca no cenário descrito acima, tendo sido pioneira na implementação políticas públicas na área de resíduos. A Europa possui cerca de 450 milhões de habitantes e 25 Estados Membros da Comunidade Europeia seguem diretrizes básicas estabelecidas para gestão de resíduos sólidos.

A Legislação da União Europeia sobre gestão de resíduos encontra-se na Lei de Economia Circulatória de 27.09.1994. Com base nessa Lei e na respectiva Norma vigente, foram promulgados decretos específicos, entre eles os referentes às áreas de disposição e de tratamento de resíduos. Desde julho de 2005 vigora a Diretiva da União Europeia, que proíbe a disposição, sem prévio tratamento, de resíduos urbanos no solo (PRO EUROPE, 2007).

A política de gestão de resíduos sólidos nos países europeus apresentou, nos últimos 20 anos, três fases distintas: i) até o final dos anos 1970 foi centrada na disposição final de resíduos; ii) nos anos 1980 deu-se ênfase à redução de resíduos e à reciclagem; iii) nos anos 1990 consolidou-se a legislação que viabilizaria a coleta seletiva, a reciclagem e o aproveitamento energético dos resíduos (DEMAJOROVIC, 1995 e MARTINS, 2002).

De acordo com Waite (1995), a estratégia usada na década de 1990 para a gestão de resíduos sólidos foi fundamentada no uso sustentável dos recursos naturais e baseou-se na seguinte hierarquia:

i) redução na fonte geradora;
ii) reutilização e reciclagem;
iii) recuperação energética; e
v) disposição final ambientalmente segura.

A Legislação que entrou em vigor em 1996 estabeleceu uma nova abordagem da responsabilidade pelo produto, segundo a qual os fabricantes e comerciantes passaram a ter obrigação de cumprir as metas acordadas na política de gerenciamento de resíduos sólidos, cujo o objetivo principal seria reduzir a geração de resíduos. A partir de então, somente os resíduos que não pudessem ser evitados deveriam ser encaminhados para reciclagem ou incinerados para a geração de energia ou de calor. Apenas aqueles para os quais não existisse nenhuma forma de reaproveitamento deveriam ser encaminhados para aterros sanitários. Além disso, ficaram estabelecidas metas de redução de disposição em aterros (WIEDEMANN, 2001).

Segundo o governo europeu, nos Estados membros da União Europeia são gerados cerca de dois milhões de toneladas de resíduos sólidos por anos, incluindo resíduos perigosos (EUROPA, 2007). A Figura 4 mostra a geração de resíduos *per capita* por ano de vários países europeus.

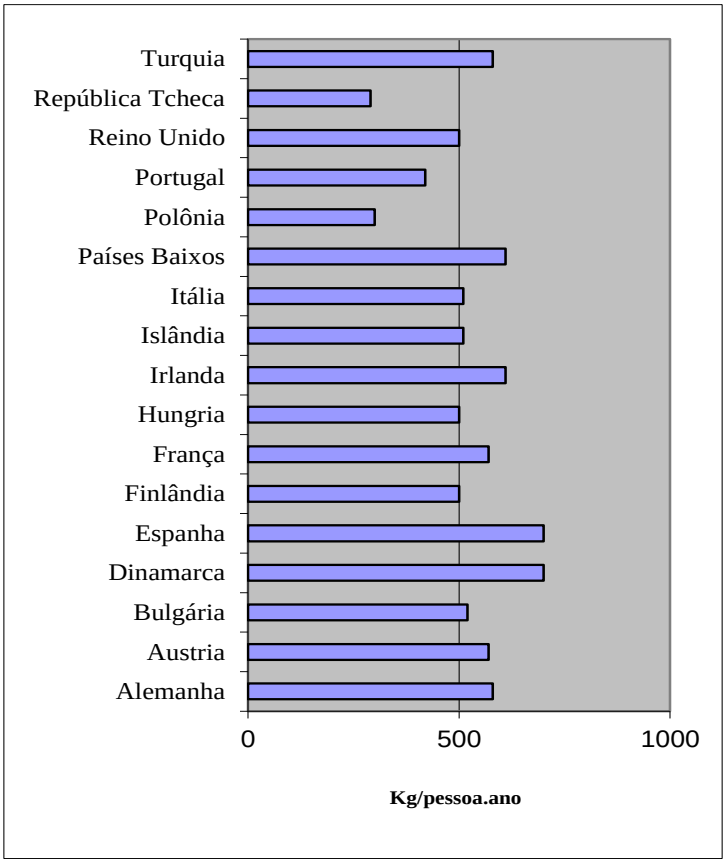


Figura 4: Resíduos sólidos urbanos gerados em países europeus.
Fonte: European Commission (2003).

Quanto às formas de tratamento e disposição final, prevalece, nos países Europeus, o uso dos aterros sanitários (58%). A Figura 5 mostra as proporções entre as formas de tratamento/disposição dos RSU adotadas por países europeus.

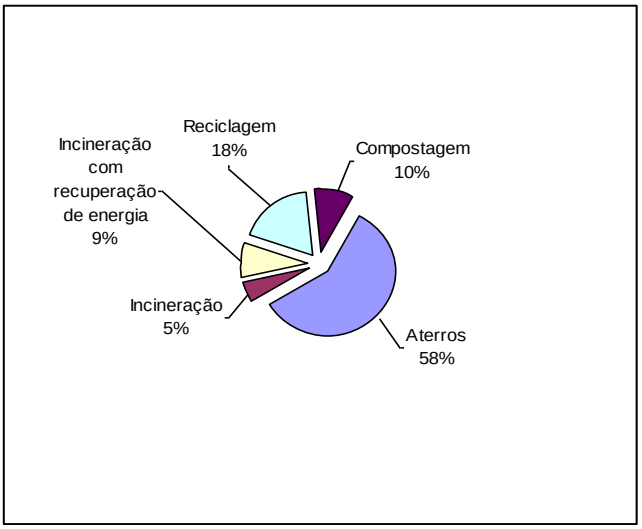


Figura 5: Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos nos países europeus.
Fonte: Adaptado de Williams (2005).

- **Estados Unidos**

Os Estados Unidos da América, com seus cerca de 300 milhões de habitantes, são os maiores produtores de lixo do planeta, devido ao estilo de vida voltado ao consumo. A política americana sobre resíduos sólidos vem se alterando ao longo dos anos. O gerenciamento dos resíduos passou gradativamente para a iniciativa privada, incluíram-se mais estações de transbordo, novas tecnologias de tratamento e incrementou-se a separação de resíduos (EPA, 2005). Ainda segundo dados da EPA, os EUA produziram em 2005, cerca de 250 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), o que significa uma geração *per capta* média de 2,0 Kg/hab.dia.

Ainda segundo a EPA, com relação à disposição final em aterros, a meta americana é reduzir ao máximo seu número e implantar aterros cada vez maiores. Em 1978, por exemplo, existiam, nos Estados Unidos cerca de 20.000 aterros sanitários. Já em 1998, esse número caiu para 5.499 e em 2002 chegou a 3.091, com meta de redução para menos da metade desse número até o final da década (EPA, 2005).

Quanto ao tratamento e à disposição final dos RSU, 55,4% são dispostos em aterros sanitários, 23,6% são recuperados, 7,1% são compostados e 14% incinerados. Ou seja, os aterros sanitários constituem a principal forma de destinação final de RSU nos EUA.

No país a cobrança pelos serviços de coleta e destinação final do lixo é tradicionalmente proporcional às propriedades, ou mediante taxas fixas. No entanto, segundo a EPA, mais da metade dos municípios americanos aderiram ao *Pay-As-You-Throw* (Pague Equivalente ao Descarte) e as residências pagam um taxa variável, que depende da quantidade de lixo descartada. A EPA justifica a cobrança das taxas a partir de três argumentos:

i) sustentabilidade ambiental, pois as comunidades conseguiram incrementar a reciclagem e a redução da produção dos resíduos, o que representa economia de recursos naturais;
ii) sustentabilidade econômica, pois a cobrança possibilita que as comunidades paguem os custos do gerenciamento de resíduos sólidos;
iii) equidade, pois a cobrança de taxas iguais para pessoas que produzem quantidades de resíduos diferentes seria injusta.

Quanto à composição dos RSU, verifica-se a presença de uma grande porcentagem de embalagens. Em 2003, apenas 11,7% eram restos de alimentos, 35% de papel, 12,1% de poda de árvores, 11,3% de plástico, 8,5% de metal e 5,3% de vidro, 3,4% de madeira e 7,4% de outros materiais (EPA, 2005).

- **América Latina e Caribe**

A Organização Pan Americana de Saúde (OPS) estima que na América Latina e Caribe (ALC) cerca de 369.000 toneladas de RSU por ano sejam produzidas pelos seus 518 milhões de habitantes. A cobertura do sistema de coleta varia muito de região para região (entre 11% a 100%) e apenas 23% dos resíduos gerados tem destinação ambientalmente correta (OPS, 2005).

O documento *Informe de La Evaluación Regional dos Servicios de Manejo de Resíduos Sólidos Municipales en America Latina y El Caribe*, uma publicação da OPS (2005), sistematiza o panorama de resíduos para 36 países da América Latina e Caribe (ALC) no

período de 2002 a 2003. Este documento buscou verificar os avanços na gestão de resíduos sólidos no continente. Os diagnósticos setoriais revelaram que:

i) na ALC há falta de capacidade institucional, principalmente em níveis municipais, para identificar, desenvolver e implementar planos e programas locais de manejo de resíduos sólidos;
ii) não há pessoal capacitado para cumprir as tarefas de apoio à gestão/gerenciamento de resíduos sólidos;
iii) um número expressivo de municípios, especialmente os de menor porte, não tem unidades específicas e nem recursos econômicos específicos para realizar adequadamente a gestão de resíduos sólidos.

Na América Latina, segundo OPS (2005), a maioria dos países não possui políticas nacionais de gestão de resíduos sólidos, com exceção do Chile, Colômbia e El Salvador. Apenas alguns países contam com política ambiental na qual está inserido o tema e as legislações referentes aos resíduos sólidos. Nesses locais, a segregação informal é prática comum e fonte de renda para parte da população pobre e desempregada. Muitos catadores são encontrados nas áreas de disposição final de resíduos sólidos, realizando a catação de forma autônoma ou organizada em associações.

É relevante destacar ainda que em muitos países os resíduos sólidos são exportados devido à falta de área disponível para seu aterramento. No Canadá, por exemplo, toneladas de resíduos são enviadas para aterros de Michigan, localizado nos Estados Unidos. Em 2006 foram exportadas do Canadá para Michigam cerca de 5,7 milhões de toneladas. Em 2007, 69,2% dos resíduos dispostos em aterros de Michigam foram gerados neste estado, 19,5% foram gerados no Canadá e 11,2% foram gerados resíduos produzidos em outros estados (WASTE AGE, 2007).

2.8 Resíduos Sólidos e o Efeito Estufa

O processo de decomposição anaeróbio, que ocorre com a matéria orgânica na ausência de oxigênio, dá origem à produção de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) e pequenas frações de outros gases. Este processo é característico dos aterros onde os resíduos são

depositados e cobertos diariamente com uma camada de material inerte. Porém, nos lixões existe também a ocorrência desse processo, uma vez que há ausência de oxigênio nas camadas inferiores onde os resíduos estão depositados (OONK, *et al.*, 1995). Nos aterros, porém, são instalados drenos que facilitam a saída destes gases para a superfície, evitando explosões. Na terminação dos drenos são colocados queimadores especiais que possibilitam a queima destes gases que são emitidos para a atmosfera.

É importante salientar que o CO_2 e o CH_4, os principais gases do efeito estufa, estão presentes nos gases originados nos aterros, em concentrações de 40% e 60% respectivamente. No entanto, esses gases podem ser recuperados para a geração de energia. De acordo com o IPCC (1997), entre as fontes de emissão antropogênica de metano, a digestão anaeróbia de resíduos é responsável por 13% a 31% de toda a emissão de metano (de fontes antropogênicas) do planeta.

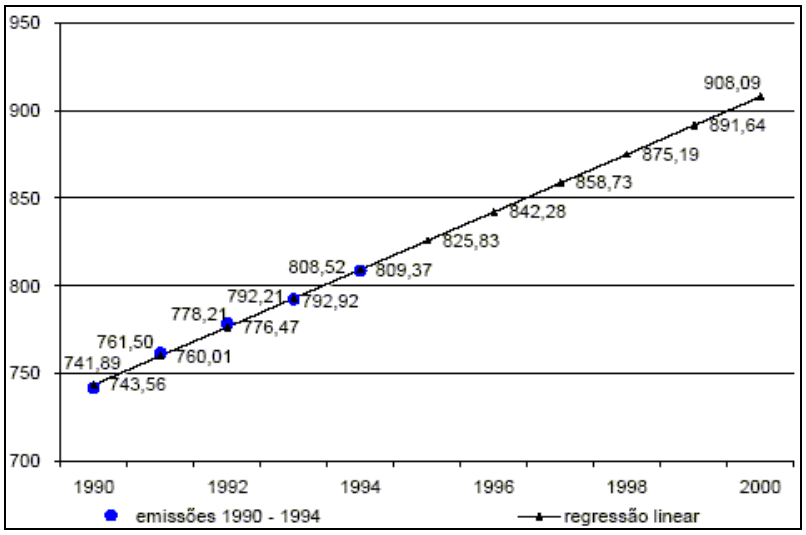
O Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa realizado pela CETESB no ano de 1994 e atualizado em 2006 concluiu que, no Brasil, a principal fonte de emissão de metano pelos resíduos, considerados em sua totalidade, prové especificamente dos resíduos sólidos, com uma parcela que corresponde a 84% das emissões dos resíduos totais (que incluem as emissões pela digestão anaeróbia de efluentes domésticos/comerciais e dos efluentes industriais). Os dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Emissão de metano por resíduos no Brasil

Emissões de Metano (Gg CH_4/ano)							
	Resíduos sólidos		Esgotos		Efluentes industriais		Total
Ano	Emissões	(%)	Emissões	(%)	Emissões	(%)	Emissões
1990	618,01	84	39,34	5	80,00	11	737,35
1991	636,34	84	40,51	5	79,82	11	756,67
1992	649,68	84	41,36	5	82,01	11	773,05
1993	663,28	84	42,23	5	82,71	11	788,22
1994	677,18	84	43,11	5	84,41	11	804,70

obs: 1Gg = 1000 t
Fonte: CETESB (1994); MCT (2006).

A partir dos resultados do inventário, realizado em 1994, Alves (2000) apresentou uma estimativa da tendência de evolução das emissões anuais para o período de 1990 a 2000, o que é apresentado pela Figura 6 a seguir. A projeção de Alves (2000) estimou em 908,09 Gt de emissões de metano para ano de 2000.



Obs: Em 1.000t de CH_4
Figura 6: Projeção tendencial das emissões de metano pelos resíduos no Brasil
Fonte: Alves (2000).

Na Tabela 3 são apresentados os principais gases de efeito estufa e seus respectivos potenciais de aquecimento global, atentando-se para o CH_4 (metano), que possui potencial de aquecimento global 21 vezes maior do que o CO_2 (dióxido de carbono). Ou seja, cada tonelada de CH_4 lançada na atmosfera contribui 21vezes mais para o efeito estufa do que uma tonelada de CO_2 lançada. Portanto, o gás metano gerado em aterros, quando não devidamente controlado, seja por meio de sistemas de coleta e aproveitamento, seja pela queima em *flares*, contribui para o agravamento do efeito estufa, indicando que este representa não somente uma preocupação com a integridade da região onde é gerado, como também que está ligado às questões ambientais globais.

Tabela 3: Principais gases de efeito estufa

Espécies (GEE)	Fórmula química	Tempo de vida (anos)	Potencial de aquecimento global[3]		
			20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono	CO_2	Variável	1	1	1
Metano	CH_4	12 ± 3	56	21	6,5
Óxido Nitroso	N_2O	120	280	310	170
Ozônio	O_3	0,1 – 0,3	n.d.	n.d.	n.d.
CFCs	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d. – não disponível
Fonte: IPCC (1997).

[3]O conceito de Potencial de Aquecimento Global permiti a comparação da capacidade de cada gás de efeito estufa para reter o calor na atmosfera em relação ao dióxido de carbono (CO_2) em um horizonte de tempo especificado.

Além dos danos causados pelo agravamento do efeito estufa, os gases gerados pelos aterros ou “lixões” podem representar riscos para o ambiente local quando não controlados devidamente. Ou seja, esses gases podem migrar lateralmente para áreas próximas ou mesmo emanar para a superfície, causando prejuízos à saúde humana e à vegetação, devido à formação de ozônio de baixa altitude ou da exposição de alguns constituintes desses gases. O câncer e outras doenças que atacam o fígado, os rins, os pulmões e o sistema nervoso central (USEPA, 1991) são outros riscos potenciais, resultantes da emanação desses gases.

Ainda segundo USEPA (1991), devido às altas concentrações de gás metano nos gases liberados nos aterros, existe o risco de incêndios e explosões em instalações próximas aos aterros. Outro efeito negativo da emissão descontrolada desses gases é o inconveniente causado por odores desagradáveis que, segundo a mesma referência, provocam distúrbios emocionais em indivíduos que residem em áreas próximas aos aterros e favorecem a desvalorização das propriedades.

2.9 Considerações Finais sobre o Capítulo 2

O capítulo fez um apanhado geral sobre os conceitos básicos de resíduos sólidos e sobre as práticas utilizadas para a disposição/tratamento desses resíduos. Com destaque para o aterramento sanitário, uma das técnicas mais utilizadas no Brasil e em outros países. Foram discutidas as dimensões para a prática da gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. Neste contexto, ressaltou-se que as práticas correntes no país estão longe de serem as ideais. Também foram apresentadas as consequências da má gestão dos resíduos. Discutiu-se, ainda, as políticas públicas existentes no país.

No contexto internacional foram mencionadas as novas tendências para a gestão do lixo, isto é, a redução da produção de lixo na fonte, as novas formas de sua taxação em função da quantidade gerada, e a geração de energia através da incineração e de outros processos. Por fim, o capítulo fez a relação direta entre energia, resíduos e meio ambiente, sendo relevante o aspecto de questões globais, como o efeito estufa.

3. GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O presente capítulo trata dos aspectos gerais da biomassa, descreve sucintamente as tecnologias disponíveis para a conversão de biomassa em energia e detalha as tecnologias usuais de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. Além disso, discute alguns fatores importantes para o desenvolvimento de energias renováveis, entre os quais a política para o setor, o mercado, a regulação e legislação.

3.1 Considerações sobre Biomassa e Tecnologias para Conversão em Energia

A biomassa pode ser utilizada na produção de energia de diversas maneiras. As tecnologias disponíveis para a conversão desses recursos em energia dependem das características das mesmas. Em função dessas peculiaridades, Hoogwijk *et al.* (2003) classificam os resíduos de biomassa em: i) primários, aqueles produzidos na agricultura e silvicultura; ii) secundários, os gerados durante o processo produtivo (indústrias de alimentos, de bebidas e de papéis, entre outras); e, iii) terciários: resultantes dos pós-uso dos resíduos secundários e correspondem a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

Este trabalho foca nos RSU como fonte de energia, portanto, as tecnologias aqui investigadas são aquelas que tratam desse tipo de biomassa. Entretanto, para a contextualização do tema, optou-se por descrever sucintamente as principais tecnologias para a conversão de biomassa em energia.

Como já foi dito, uma grande variedade de tecnologias têm sido desenvolvida para a produção de energia a partir de biomassa. Para a produção de calor (seja para uso industrial, ou doméstico), de eletricidade ou de combustível veicular. Segundo os trabalhos de Williams *et al*. (2003) e Turkenburg *et al.* (2000) as tecnologias para conversão de resíduos de biomassa em energia podem ser classificadas em três grupos: i) processo de conversão termoquímica; ii) processo de conversão bioquímica e iii) processo de conversão físico-químico.

▪ **Conversão termoquímica:** produz uma quantidade significativa de calor durante o processamento. Essas tecnologias são similares na medida em que reações endotérmicas e exotérmicas ocorrem no processo, mudando a composição dos resíduos. Os produtos

resultantes incluem gás de síntese (composto de hidrogênio gasoso, monóxido e dióxido de carbono), resíduos sólidos inertes ou vitrificados (no caso do plasma) e, dependendo do processo, líquidos orgânicos. Estão incluídos neste grupo os processos de incineração, gaseificação, pirólise e plasma e liquefação;

▪ **Conversão bioquímica:** trata-se da transformação dos resíduos de biomassa mediante a decomposição por microorganismos, acompanhada da produção de líquidos ou gases. A digestão anaeróbia (sem a presença de oxigênio) e a fermentação pertencem a este grupo. A digestão anaeróbia, que ocorre em aterros sanitários ou em biorreatores, produz um gás conhecido como biogás, (ou gás de aterros sanitários), cuja composição predominante é de CH_4 (metano) e CO_2 (dióxido de carbono). Na fermentação, por sua vez, os açúcares são convertidos em álcool pela ação de microorganismos (geralmente fungos e leveduras) e os componentes finais são separados através de destilação;

▪ **Conversão físico-química:** envolve a síntese física e química de produtos, como a transformação de óleos vegetais em biodiesel. As reações químicas são realizadas, em geral, através do processo de transesterificação que, por sua vez, empregam catalisadores alcalinos, ácidos ou enzimáticos e metanol ou etanol. A Figura 7 mostra o portfólio das principais tecnologias existentes para a conversão de biomassa em energia.

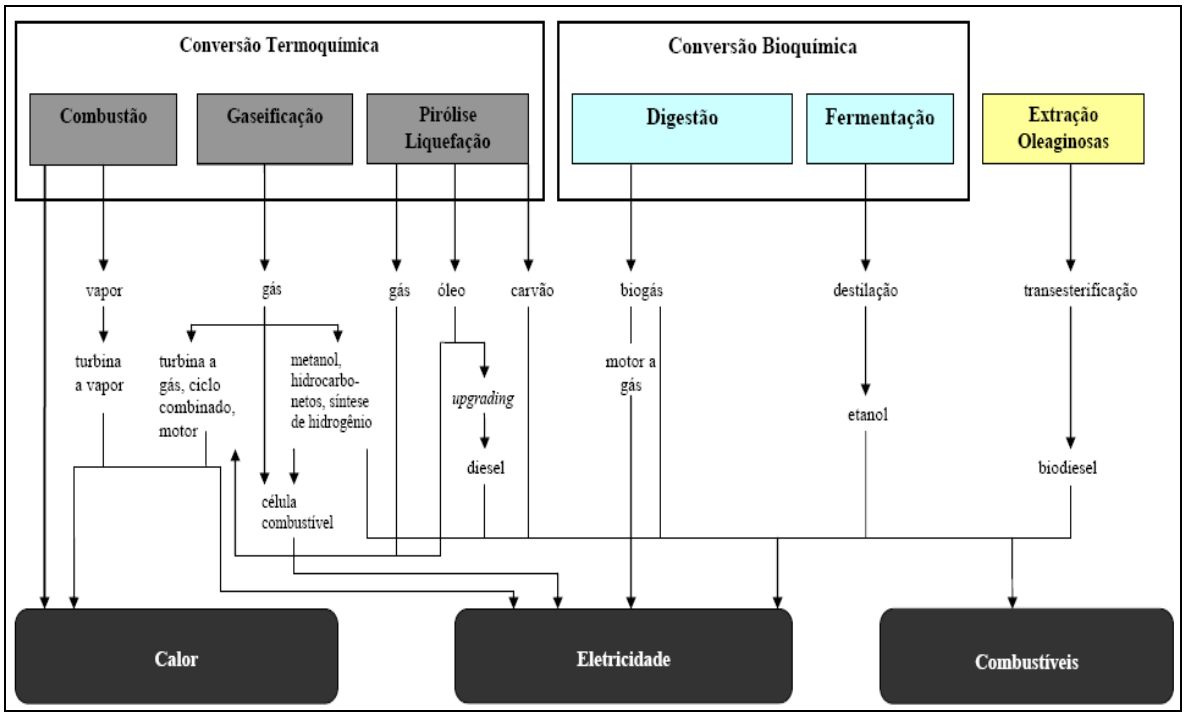


Figura 7: Principais opções tecnológicas para a conversão de biomassa em energia.
Fonte: Adaptado de Turkenburg *et al*. (2000).

Entre as rotas tecnológicas apresentadas anteriormente, as mais utilizadas para a conversão de RSU em energia são a digestão anaeróbia (que ocorre em aterros sanitários) e a combustão, através do processo de incineração.

Faaij (2006) aponta alguns motivos para que estas sejam as opções mais praticadas. No caso da digestão anaeróbia, o autor argumenta que essa tecnologia vem sendo desenvolvida há muito tempo e que se encontra bastante estabelecida/estável tecnicamente. Outro fator importante é que ela pode ser aplicável tanto no caso dos resíduos orgânicos úmidos homogêneos quanto no caso dos mais heterogêneos, como os RSU. Outra contribuição para a difusão da tecnologia, segundo o mesmo autor, é que o aterramento sanitário é a opção política e tecnológica para tratamento de resíduos mais utilizada mundialmente. Além disso, essa rota tecnológica apresenta atratividade financeira e técnica para mitigação de gases de efeito estufa.

Com relação à combustão, Faaij (2006) diz tratar-se de uma tecnologia que também já está estabelecida e com alta eficiência no tratamento de resíduos (principalmente na questão de redução de volume) e na produção de energia. É uma opção para tratamento de resíduos cada vez mais utilizada, sobretudo nos países da Europa.

Os autores Larkin *et al.* (2004) corroboram com argumentos acima explicitados e os fortalecem, complementado que os custos mais baixos dos equipamentos utilizados na captura de gás metano em aterros sanitários, quando comparados com outros métodos de conversão, também favoreceram a disseminação e a prática da tecnologia.

Para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se por analisar a tecnologia de digestão anaeróbia que ocorre em aterro sanitário, através da recuperação de metano, e o processo de incineração de RSU.

No caso do processo de digestão anaeróbia, a opção deu-se pelo fato de o método de aterramento ser a alternativa corrente de tratamento de RSU no Brasil. Também por tratar-se de uma tecnologia já desenvolvida e, portanto, mais acessível do ponto de vista financeiro. Além dos benefícios energéticos, a implantação desses tipos de projetos pode contribuir com a melhoria da situação sanitária do país, através da viabilização de recuperação ambiental de antigos lixões e da instalação e manutenção de aterros sanitários bem operados.

Quanto ao processo de incineração, ele tem sido uma alternativa crescente de tratamento de RSU em vários países da Europa, dos EUA e do Japão, daí ter sido incluído como objeto de análise neste estudo. Sua escolha é válida, ainda, por ser a incineração uma medida pouco utilizada no Brasil e apresentar-se como uma opção para locais com restrição de áreas de disposição final, como as grandes cidades. Ademais, trata-se de uma tecnologia já estabelecida, com constantes aprimoramentos relacionados à eficiência de queima e controle de poluição.

3.2 Tecnologias Usuais para Conversão de Resíduos Sólidos Urbanos em Energia

Neste item são apresentadas as tecnologias de incineração e de digestão anaeróbia em aterros sanitários, consideradas as mais praticadas quando trata-se de RSU.

3.2.1 Incineração

Desde os primórdios da civilização humana, a incineração de resíduos era praticada mediante processos rudimentares, e o primeiro incinerador da era moderna de que se tem notícia foi construído na cidade de Nottingham, Inglaterra, em 1854. Entre 1885 e 1908, 180

incineradores foram construídos nos EUA, na cidade de Nova York. Desde então iniciaram-se nesses países os experimentos para gerar eletricidade (PDH ENGINEER, 2007).

No Brasil, a primeira unidade foi instalada na cidade de Manaus, em 1876, vinte e dois anos depois da implantação da primeira unidade inglesa. Na cidade de São Paulo, o primeiro incinerador de RSU foi instalado no bairro de Araçá, hoje Sumaré. Este incinerador utilizava lenha para auxiliar a combustão dos resíduos, e a alimentação era feita manualmente. Esse equipamento operou por 27 anos, até 1940, quando foi desativado por sua capacidade ter ficado abaixo da necessária e por se encontrar nas proximidades de áreas residenciais (RUBERG, 2006).

O conceito de incineração foi se modernizando ao longo dos anos. Países com pequena disponibilidade de área adequada para aterro, como Japão, Suíça e Suécia, não somente apresentam um grande número de unidades em operação, como têm apresentado tendência acentuada de crescimento desta forma de tratamento de resíduos ao longo dos anos. Isto tem ocorrido devido à incorporação, às novas unidades de incineração, de sistemas mais eficientes de recuperação de energia e de tratamento de gases de combustão, tornando-os mais interessantes do ponto de vista econômico e mais seguros do ponto de vista ambiental (CEWEP, 2007).

Em 1999 o *Landfill Directive* da Comunidade Econômica Europeia recomendou a todos os seus membros a redução drástica (75%) do envio de resíduos biodegradáveis (matéria orgânica e papel, entre outros) para os aterros sanitários até o ano 2006, com metas adicionais para os anos seguintes, objetivando a eliminação dos aterros até 2016. Países como a França, a Alemanha, Áustria, Dinamarca e Holanda, já em 2005, haviam atingido os objetivos de 2016.

De acordo com a *Confederation of European Waste-to-Energy Plants* (CEWEP), existem na Europa mais de 400 unidades com geração de energia elétrica ou vapor para processo de aquecimento (CEWEP, 2007).

Especificamente na França, segundo Wenisch *et al.* (2004), há tempos a incineração vem exercendo papel de destaque frente às outras alternativas de tratamento de resíduos não perigosos. De acordo com o artigo dos autores, 35% dos resíduos sólidos urbanos (em massa)

eram incinerados no ano de 2003 (cerca de 9,7 milhões de toneladas em 248 plantas), sendo que em aproximadamente 29% dos casos com recuperação de energia (ou seja, cerca de 7,9 milhões de toneladas em 100 plantas). Ainda segundo o artigo, em 1998 a energia recuperada a partir de resíduos com produção combinada de calor e eletricidade representava mais de 7.000.000 MWh.

Segundo Menezes *et al.* (2000), no Brasil o processo de incineração têm sido empregado prioritariamente no caso de Resíduos de Serviços de Saúde e os incineradores não dispõem de sistema de aproveitamento energético. Como os projetos destes equipamentos, geralmente, são obsoletos e anteriores às atuais legislações ambientais, os sistemas de limpeza de gases existentes nessas instalações são muito elementares, restringindo-se a métodos primários de coleta de material particulado, sem capacidade de retenção de material particulado mais fino, gases ácidos e metais tóxicos.

O Manual de Gerenciamento Integrado, publicado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) (2000), define incineração como uma das tecnologias térmicas existentes para tratamento de resíduos, cuja queima ocorre a altas temperaturas (geralmente acima de 900ºC), em uma mistura apropriada de ar, durante um tempo predeterminado. No caso dos RSU, os compostos orgânicos são reduzidos a seus constituintes minerais, principalmente dióxido de carbono gasoso e vapor d'água, e a sólidos inorgânicos (cinzas).

Para Schneider (2002), a incineração consiste na oxidação dos materiais, a altas temperaturas, sob condições controladas, convertendo materiais combustíveis em materiais não combustíveis (escórias e cinzas) com a emissão de gases.

Com relação à incineração com vistas à recuperação energética, Connet (1998) registra que algumas premissas devem ser consideradas, ou seja, o empreendedor necessita levar em conta um planejamento estratégico de longo prazo no qual sejam contempladas questões de ordem política, econômica, técnica, e social. O autor enumera algumas dessas premissas:

▪ é preciso haver um contrato para a incineração dos resíduos com a prefeitura, definindo claramente os aspectos quanto à garantia de fornecimento e características de pagamento, entre outras;

- há necessidade de um contrato de longo prazo para a venda de energia elétrica ou vapor d'água;

- é necessário estabelecer estratégias para a obtenção de financiamento a taxas acessíveis;

- é imprescindível implantar programas de reciclagem de resíduos que possam influenciar no volume de resíduos disponíveis, no seu conteúdo energético e, consequentemente na capacidade de geração da usina de incineração.

A composição dos RSU também é um quesito de relevância quando se trata de incineração visando aproveitamento de energia. Conforme foi dito anteriormente, a composição dos RSU é bastante variável e está atrelada ao nível de desenvolvimento do país. Além disso, Autret *et al.* (2006) observaram conteúdo energético maior e umidade menor nos resíduos de países desenvolvidos.

Portanto, a determinação da composição e o conteúdo energético do resíduo a ser incinerado é de fundamental importância para o dimensionamento correto da unidade de incineração e dos sistemas de limpeza de gases. Desta forma, nos projetos de unidades de incineração também devem ser realizadas determinações do conteúdo energético dos resíduos e projeções da evolução desse conteúdo energético ao longo do tempo de vida do equipamento, procurando-se levar em conta programas de reciclagem.

Segundo a *Confederation of European Waste-to-Energy* (CEWEP, 2007), a caracterização completa de um resíduo visando sua incineração engloba a determinação de:

- poder calorífico inferior (PCI), que indica a quantidade de energia útil que pode ser liberada durante a queima de resíduo. Quanto maior o PCI, maiores serão as potências liberadas no interior do incinerador e maiores as temperaturas atingidas;

- análise imediata, que determina os teores de água, cinzas e matéria volátil dos resíduos. O teor de cinza determina o montante de material a ser descartado em aterros, após a incineração do resíduo;

▪ análise elementar, que determina os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio. Esta análise possibilita avaliar a quantidade de ar necessária para realizar a combustão completa do resíduo;

▪ teores de elementos tóxicos, pois a partir dos teores médios de elementos tóxicos presentes nos resíduos (mercúrio, cádmio, chumbo, cromo, níquel, cloro, enxofre, etc) e não somente nas cinzas dos resíduos, para estimar o potencial de geração e de formação de compostos tóxicos durante o processo de incineração e dimensionar adequadamente o sistema de limpeza de gases da unidade.

3.2.1.1 Tipos de Incineradores

As tecnologias existentes para incineração estão divididas em três grupos: i) combustão em grelha; ii) combustão em câmaras múltiplas; e, iii) combustão em leito fluidizado.

Os sistemas tipo grelha, entretanto, são mais adequados para resíduos grandes e irregulares. Podem ser mantidos em uma grelha móvel ou estacionária, permitindo que o ar penetre pela grelha, passando através dos resíduos.

Por estas características Cerino (2000) afirma que os incineradores em grelha são os mais indicados para o tratamento de RSU. Dempsey e Oppelt (1999) reforçam o argumento dizendo que os incineradores com combustão em grelha são os equipamentos mais empregados para incineração de RSU.

Esses incineradores podem incinerar RSU no estado bruto ou em forma beneficiada, conhecida como combustível derivado de resíduo (CDR), resultado de um processo prévio de separação de materiais recicláveis do RSU, gerando um material com granulometria menor e mais uniforme que o resíduo bruto, e mais adequado para incineração.

Dempsey e Oppelt (1999) explicam que as usinas com incineradores de grelha normalmente são compostas de dois a três equipamentos de combustão operando em paralelo, cada um com uma capacidade variando de 50 a 1.000 toneladas por dia.

Segundo os mesmos autores, nos incineradores de RSU bruto o material é alimentado na forma em que chega à usina de incineração. O RSU, depois de pesado, é descartado em um fosso, onde o material inicialmente é revolvido por garras suspensas em pontes rolantes para homogeneização da carga. Este mesmo dispositivo carrega o silo de alimentação onde o material é descarregado, por meio de êmbolos hidráulicos, para dentro da câmara de combustão do incinerador. A grelha inclinada, do tipo basculante, desloca os resíduos através da câmara de combustão, provocando o seu revolvimento e a sua exposição às regiões de alta temperatura. Durante este deslocamento, o material vai se aquecendo e passa por secagem, perda de compostos orgânicos voláteis, e sai da câmara de combustão, ao fim do processo de grelha, com uma pequena quantidade de material orgânico ainda presente, na forma de carvão. Esse tipo de grelha pode operar com materiais com granulometria bastante variada, o que o torna bastante adequado para a incineração de RSU no estado bruto.

Cerca de 60% do ar de combustão é introduzido por baixo da grelha e o restante entra por sobre a carga. O ar injetado por baixo da grelha, normalmente pré-aquecido, tem a função de resfriá-la e auxiliar na secagem e combustão do RSU. O ar introduzido por sobre a grelha é injetado em alta velocidade para criar uma região de elevada turbulência e promover a sua mistura com os gases e vapores combustíveis gerados durante a decomposição térmica do RSU. A temperatura na região sobre a grelha atinge cerca de 1.200 ºC, decompondo a maioria dos compostos orgânicos a CO_2 e água (KUMAR, 2000). De acordo com o mesmo autor, os gases de combustão a alta temperatura, ao saírem dessa região, trocam calor com as paredes do incinerador e trocadores de calor, produzindo vapor, que pode ser utilizado para gerar energia elétrica ou para fins de aquecimento.

Ao fim da grelha, a fração orgânica do RSU deve estar quase completamente consumida, restando uma fração predominantemente inorgânica, denominada cinza de fundo. Na prática, uma pequena fração orgânica ainda sai com as cinzas na forma de carvão. Estas cinzas são apagadas em um tanque de água e, depois de desaguadas, enviadas para disposição final em aterros.

O vapor gerado pode ser utilizado para geração exclusiva de energia elétrica ou energia elétrica e vapor, este último geralmente empregado para aquecimento em processos industriais, (KUMAR, 2000). O sistema de geração simultânea de vapor e energia elétrica é conhecido por cogeração. No primeiro caso, o vapor gerado é expandido em uma turbina e ao

sair é totalmente condensado. Na cogeração, a expansão de vapor se dá até uma pressão intermediária (normalmente 3 atm) e, ao sair da turbina, é enviado para unidade consumidora deste vapor. O condensado gerado pela unidade é retornado à usina de incineração e o rendimento energético de uma usina operando em cogeração pode atingir 85%. Este rendimento é bem maior que uma unidade com geração exclusiva de energia elétrica, que atinge cerca de 35%, gerando cerca de 600 kWh/t de RSU bruto. Neste cálculo, partiu-se de um RSU com poder calorífico inferior (PCI) em torno de 10,5 MJ/Kg (KUMAR, 2000).

Na combustão do RSU, além de CO_2 e água, também podem se formar gases extremamente corrosivos, como ácido clorídrico, cloro, ácido fluorídrico. Assim, as grelhas devem ser revestidas de material refratário. Na saída dessa região, os gases ainda se encontram aquecidos a cerca de 400 ºC. E, normalmente, passam por mais uma sessão de troca de calor, aquecendo a ar de combustão. Os gases, então resfriados a cerca de 250 ºC, são enviados para o sistema de tratamento de gases para a remoção de gases ácidos, material particulado, dioxinas e furanos e metais pesados eventualmente presentes (DEMPSEY E OPPELT, 1999).

Existem diversos sistemas de limpeza de gases em escala comercial, alguns dos quais apresentando eficiência de remoção de poluentes bastante elevadas (USEPA, 2005). Os sistemas de limpeza de gases geram um material sólido fino, em geral com carga de material tóxico muito maior que as cinzas de fundo, e que podem, dependendo da concentração destes produtos tóxicos, requerer a disposição em aterros especiais, para resíduos Classe I (perigosos).

É importante ressaltar que, dependendo da composição dos resíduos a serem incinerados, nem sempre é possível manter uma temperatura elevada, adequada para a incineração eficiente. Nesses casos, há necessidade da queima de combustível auxiliar, que pode ser o gás liquefeito de petróleo (GLP) ou o gás natural.

3.2.2 Digestão Anaeróbia em Aterro Sanitário

A utilização de aterros sanitários apresenta-se como principal alternativa para a destinação final dos RSU tanto no Brasil como na maioria dos países do mundo. Conforme já mencionado, os resíduos aterrados geram gases devido à decomposição anaeróbia do material

orgânico. O principal constituinte desses gases, o metano, pode ser coletado e utilizado como fonte de energia.

Motta (1986), contando a história da digestão anaeróbia, a mesma que ocorre nos aterros e lixões, descreve que muito embora o gás metano já fosse reconhecido, foi somente em 1776 que o físico e químico italiano Alessandro Volta (1745-1827) identificou o metano no gás dos pântanos, verificando que o mesmo possuía características combustíveis. O metano passou, então, a ser conhecido como gás dos pântanos (CUNHA, 2002).

Joseph Priestley (1733-1804), ao estudar os gases combustíveis, volta a citar o metano. Foi, porém, o químico inglês Humphrey Davy (1778-1829) que, ao analisar em 1808 os gases produzidos pela fermentação da palha de estábulos umedecida, observou a existência de metano e dióxido de carbono. Somente em 1844, Louis Pasteur (1822-1895), mostra que o gás metano poderia ser produzido a partir da fermentação de uma mistura de excrementos, palha de estábulo e água, e discutiu as propriedades combustíveis do gás metano (CUNHA, 2002).

Os primeiros projetos de aproveitamento de metano em aterros foram implantados na década de 1970 nos Estados Unidos, como medidas de controle das emissões de metano e também como uma nova fonte de energia em meio às crises do petróleo daquela época. Posteriormente, novos projetos surgiram em outros países, principalmente na Europa, sendo que em 2005, 500 aterros na Europa e 620 nos Estados Unidos tinham plantas de aproveitamento do gás metano (USEPA, 2005).

Já no Brasil o projeto pioneiro para aproveitamento de gás de aterro, em escala industrial, ocorreu no Rio de Janeiro, no Aterro do Caju, em 1977. O empreendimento, desenvolvido pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) e pela Companhia Estadual do Gás do Rio de Janeiro (CEG), visava à incorporação do gás na rede domiciliar da cidade, através de gasoduto.

Aproximadamente na mesma época, a Companhia de Gás do Município de São Paulo (COMGÁS) realizou no aterro da Estação da Rodovia Raposo Tavares (Km 14,5) um projeto similar. Nesse aterro, onde haviam sido depositadas 2.100 toneladas de resíduos, a empresa instalou uma estação experimental para captação do gás. Este, por sua vez, era distribuído

para cerca de 30 residências e para uma indústria de produtos isolantes, que ficava nas proximidades do local. Em 1985, a mesma empresa fez outro projeto para uso energético de aterros. Desta vez, para abastecimento de 40 ônibus da Companhia Municipal de Transportes Coletivos (CMTC). Neste projeto, o gás utilizado era captado no aterro de Santo Amaro, que naquele ano tinha capacidade potencial de produção de gás de 80.694 Nm^3/dia. (COMGÁS, 1985).

Ressalte-se, portanto, que os tipos de aproveitamentos energéticos e as finalidades dos projetos são diversos, sendo as mais comuns a geração de energia elétrica e o uso direto como combustível para residências e indústrias. Desta forma, os usos e aplicações de gás de aterro serão discutidos mais adiante neste trabalho.

3.2.2.1 A Formação de Gases em Aterros Sanitários

Ao serem depositados em aterros, os resíduos permanecem descobertos por algum tempo, em contato com o ar, até serem compactados e cobertos. Neste período, já se constata a emissão de compostos voláteis que constituem a massa do resíduo. Esses compostos continuarão a ser emitidos, mesmo após a aplicação do material de cobertura e o fechamento da célula do aterro.

A formação e a taxa de geração dos principais constituintes do gás de aterro é variável ao longo do tempo e segue várias fases distintas, que foram descritas por Tchobanoglous *et al*. (1993):

- fase I (ajuste inicial): a decomposição biológica da matéria orgânica ocorre principalmente em condições aeróbias devido à presença de certa quantidade de ar no interior do aterro. A principal fonte de microorganismos para a decomposição aeróbia nessa fase é a terra, que é usada como material de cobertura para divisão das células do aterro e como camada final;

- fase II (transição): a quantidade de oxigênio decai e as reações anaeróbias se desenvolvem. Os microorganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Nesta fase, o pH do *chorume* começa a cair

devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de CO_2 dentro do aterro;

- fase III (ácida): as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante esta fase e os microorganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas. As demandas bioquímica (DBO)[4] e química de oxigênio (DQO)[5] e a condutividade do *chorume* aumentam significativamente durante esta fase devido à dissolução de ácidos orgânicos no *chorume*. Também devido ao baixo pH, constituintes inorgânicos como os metais pesados serão solubilizados;

- fase IV (metanogênica): nesta fase predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH_4 e CO_2. A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH do *chorume* nesta fase tende ao meio mais básico, na faixa de 6,8 a 8,0;

- fase V (maturação): Esta fase ocorre após grande quantidade do material orgânico ter sido biodegradado e convertido em CH_4 e CO_2 durante a fase metanogênica. Como a umidade continua a migrar pela massa de resíduos, porções de material biodegradável ainda não convertidos acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Dependendo das medidas no fechamento do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no gás do aterro.

A Figura 8 apresenta graficamente as fases de formação de gás de aterro, segundo Tchobanoglous *et al*., (1993).

---

[4] A Demanda Bioquímica de Oxigênio corresponde à quantidade de oxigênio necessária para ocorrer a oxidação de matéria orgânica biodegradável sob condições aeróbicas. É a quantidade de oxigênio utilizada na oxidação bioquímica da matéria orgânica num determinado período de tempo.

[5] A Demanda Química de Oxigênio avalia a quantidade de Oxigênio Dissolvido (OD) consumido em meio ácido que leva à degradação de matéria orgânica. As medidas de DBO e DQO utilizadas juntas servem para diagnosticar a biodegradabilidade da matéria orgânica.

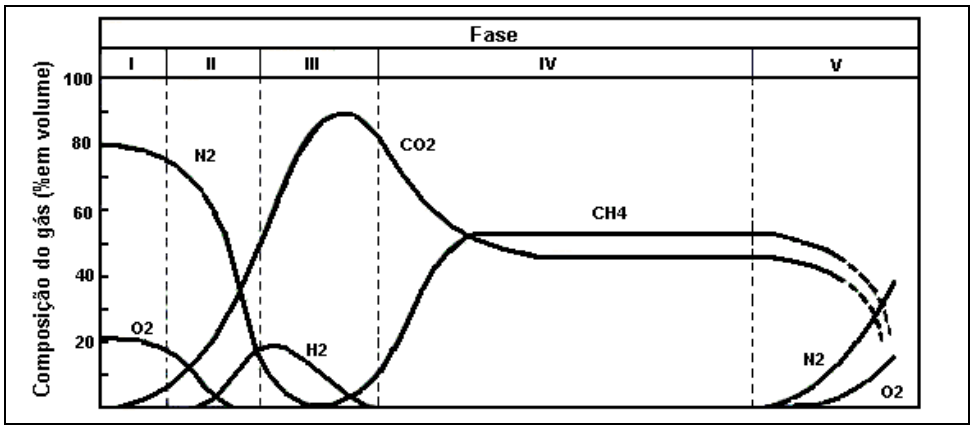


Figura 8: Fases do processo de formação de gases de aterro sanitário.
Fonte: Tchobanoglous et al., (1993).

A composição de gases de aterros sanitários de RSU é constituída pela fração de vários gases, sendo o gás metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) seus principais constituintes. A Tabela 4 apresenta os valores típicos de sua composição.

Tabela 4: Composição típica de gases de aterros sanitários

Gás	Fórmula química	Concentração (%)
Hidrogênio	H_2	1-10
Nitrogênio	N_2	0,5-3
Oxigênio	O_2	0,1-1
Monóxido de carbono	CO	0,1
Gás sulfídrico	H_2S	0,1
Vapor d'água	H_2O	Variável
Dióxido de carbono	CO_2	35-45
Metano	CH_4	50-70

Fonte: Motta (1986).

A digestão anaeróbia, que ocorre nos aterros, envolve as atividades de várias comunidades bacterianas diferentes que necessitam de condições adequadas para o seu desenvolvimento. De acordo com USEPA (1991) e USEPA (1996), diversos fatores influenciam a taxa de geração de gases de aterros, tais como:

▪ composição dos resíduos – quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano;

▪ ambiente anaeróbio – para que haja produção de metano, a matéria orgânica deve sofrer decomposição em ambiente sem oxigênio, portanto, é importante a cobertura dos resíduos com terra ou argila, de modo a criar condições anaeróbias nas camadas inferiores;

▪ umidade – a umidade é essencial à vida das bactérias decompositoras. Uma umidade alta (60 a 90 %) pode aumentar a geração dos gases;

▪ acidez e temperatura – as bactérias metanogênicas atingem maior produtividade a pH entre 6,8 e 7,2. Inicialmente os aterros apresentam pH ácido, que tende a aproximar-se da neutralidade a partir da fase metanogênica. A produção de metano é afetada pela temperatura. A temperatura ideal para a digestão anaeróbia está entre 29 e 38 ºC para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70ºC para as termofílicas. Abaixo de 10 ºC há uma queda brusca na taxa de geração do gás metano. Tipicamente, a própria decomposição fornece calor suficiente para que ocorra a metanogênese nos aterros.

É importante destacar que a composição e umidade dos resíduos são os fatores mais importantes na avaliação do potencial de geração de gás de aterro sanitário de um local. E, no Brasil, os resíduos produzidos têm tipicamente teor de umidade e material orgânicos altos e clima favorável para a produção de gás de aterro. Uma vez que, na região Norte, o clima é quente com temperatura do ar na faixa de 25 a 40ºC e umidade relativa do ar entre 64 e 91%; na região Nordeste o clima é semiárido com temperatura variando entre 20 e 35 ºC; na região Centro-Oeste a temperatura varia de 15 a 35 ºC em um clima tropical, quente e semiúmido, caracterizado por chuvas intensas no verão e por meses secos no inverno; na região Sudeste, a variação anual do clima é maior, com temperaturas variando de 15 a 40 ºC, bem como na região Sul.

3.2.2.2 Modelagem Matemática para Quantificação de Metano Gerado em Aterros

Existem diferentes métodos para calcular a quantidade de metano gerado em aterros. Desde métodos que apresentam uma aproximação grosseira, considerando somente a quantidade de resíduos dispostos no aterro, até métodos que considerem a cinética de geração de gás em função de três importantes parâmetros: condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo. Esses métodos variam, portanto, em suas considerações, em sua complexidade e na quantidade de dados de *imput* que necessitam.

Vários são os modelos matemáticos disponíveis. Todos, porém, visam à obtenção da curva de geração de gás em função do tempo. Ressalte-se, entretanto, que o valor total de gás

metano produzido e a constante de geração variam de um modelo para outro, mas o parâmetro quantidade de resíduo passível de decomposição é comum a todos eles.

O modelo empírico *School Canyon*, por exemplo, amplamente utilizado, inclusive pela agência reguladora US-EPA (*United States Environmental Protection Agency*), baseia-se no decaimento de primeira ordem. Esse modelo fundamenta-se na existência de uma fração constante de material biodegradável por unidade de tempo no depósito de resíduos. A equação de primeira ordem é expressa conforme segue (Equação 1):

$$\text{Equação 1: } Q_{(CH_4)i} = k \cdot L_o \cdot m_i \cdot e^{-kt_i}$$

Na qual:

$Q_{(CH_4)i}$ é a vazão de metano produzida no ano i a partir da seção i do resíduo (m³/ano);

i é o incremento de tempo em um ano;

k é a constante de geração de metano (anos^{-1});

L_o é o potencial de geração de metano (m³ CH4 / t resíduo);

m_i é massa de resíduo depositada no ano i (t);

t_i é o tempo passado desde o fechamento (anos).

Este modelo simula a produção de metano num intervalo de tempo em função da constante de geração de metano (k), do potencial de geração do metano (L_o), e da quantidade de resíduos depositada.

A constante de geração de metano (k) representa a velocidade de geração do gás e de esgotamento do aterro. Esta constante, k, é função da umidade, da disponibilidade de nutrientes, da temperatura e do pH. Devido à direta relação entre a constante de geração e a umidade e disponibilidade de nutrientes, estudos desenvolvidos pelo World Bank (2003) e pela USEPA (1998) relacionaram essa constante a valores de precipitações anuais, e a quantidade de matéria orgânica biodegradável disponível, conforme apresentado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Valores propostos para k em função da precipitação e da disponibilidade de nutrientes

Precipitação anual	Valores de k (anos^{-1})		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
<250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 e <500	0,01	0,03	0,05
>500 e <1000	0,02	0,05	0,08
>1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: World Bank (2003).

Tabela 6: Valores propostos para k em função da precipitação

Pluviometria anual	< 635mm	> 635mm
k	0,02	0,04

Fonte: USEPA (1998).

O *International Panel on Climate Change* (IPCC), por sua vez, propõe a seguinte formulação para a determinação de k (Equação 2):

$$\text{Equação 2: } k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

Na qual:

$t_{1/2}$ representa o tempo para a fração de carbono orgânico degradável (COD) reduzir-se à metade de sua massa inicial.

Ainda segundo o IPCC, o valor de k deve ser igual a 0,05 quando esta não for caracterizada. E o potencial de geração de metano (L_o) está relacionado com a quantidade de matéria orgânica existente nos resíduos.

A Tabela 7 mostra valores de L_o em função da degradabilidade do resíduo, indicados pelo World Bank (2003). Já USEPA (1998) recomenda o potencial de geração de metano igual a 100 m³ CH_4/toneladas de resíduo, independentemente dos valores de precipitação pluviométrica.

Tabela 7: Valores de L_o sugeridos em função da degradabilidade do resíduo.

Caracterização do Resíduo	Valor mínimo de L_o (m³ CH_4 / ton resíduo)	Valor máximo de L_o (m³ CH_4 / ton resíduo)
Resíduo relativamente inerte	5	25
Resíduo moderadamente degradável	140	200
Resíduo altamente degradável	225	300

Fonte: World Bank (2003).

Por outro lado, a metodologia sugerida pelo IPCC obtém o L_o a partir da seguinte Equação 3:

$$\text{Equação 3: } L_o = FCM_i \cdot COD_i \cdot COD_F \cdot F \cdot {}^{16}\!/_{12}$$

Na qual:

FCM_i é o fator de correção do metano no ano i;

COD_i é a fração de carbono orgânico degradável no ano i (ton C/ton RSD);

COD_F é a fração de carbono orgânico degradável assimilado;

F é a fração de metano no gás de aterro, na ausência de dados, utiliza-se 0,5;

${}^{16}\!/_{12}$ representa a conversão de carbono a metano.

Segundo o IPCC, o fator de correção depende do tipo de depósito de resíduos, se controlado ou não controlado. Depósitos controlados são aqueles que possuem o controle dos resíduos recebidos, e estes são depositados em áreas específicas, com pelo menos um dos seguintes procedimentos: compactação mecânica, cobertura e nivelamento. Já os depósitos não controlados são os comumente conhecidos como lixão. Para os aterros controlados, o IPCC recomenda fator de correção de metano igual a 1. E para os aterros não controlados, o FCM_i é dado em função da altura da pilha de resíduos formada, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8: Valores de FCM_i recomendados pelo IPCC para aterros não controlados

Altura da pilha de disposição de resíduos	FCM_i
≥ 5 metros	80%
< 5 metros	40%
Locais sem classificação	60%

Fonte: CETESB (2006b); adaptado de IPCC (1996).

A fração de carbono orgânico degradável no ano i (COD_i) é a fração passível de ser degradada bioquimicamente, e o IPCC recomenda diferentes valores, de acordo com os diferentes tipos de resíduos, como apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Valores de porcentagens de COD_i em massa

Tipo de resíduo	% de COD_i em massa
A – Papel, papelão e tecidos	40
B – Resíduo de parques e jardins (poda)	17
C – Restos de alimentos	15
D – Madeira	30

Fonte: IPCC (1996).

Sendo assim, COD_i (fração) é obtido pela Equação 4:

Equação 4: $COD_i = 0{,}40A + 0{,}17B + 0{,}15C + 0{,}30D$

Em que:

A, B, C, D representam a fração dos respectivos tipos de RSU apresentados na Tabela 9.

O IPCC recomenda, caso não sejam conhecidas as quantidades dos tipos de resíduos, COD_i igual a 12%.

A fração de carbono orgânico degradável assimilado (COD_F) corresponde à fração que realmente se decompõe, visto que o carbono orgânico degradável não se degrada totalmente, e parte permanece por longos períodos de tempo. O IPCC recomenda COD_F igual a 77% quando não há dados.

Neste trabalho, será utilizado o modelo de estimativa de geração de metano: o LandGEM, versão 3.02, desenvolvido pela USEPA em 2005. Esse Modelo será apresentado a seguir e os *inputs* para a Modelagem serão apresentados e discutidos no capítulo 4 (Panorama e Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos).

- **Modelo *LandGEM***

O Modelo LandGEM baseia-se na seguinte equação de primeira ordem (Equação 5):

$$\text{Equação 5: } Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0,1}^{1} k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

Na qual:

Q_{CH_4} é a vazão de metano (m³/ano);

i é o incremento de tempo em um ano;

j é o incremento de tempo igual a um décimo de um ano;

k é a taxa de geração de metano (anos^{-1});

L_o é o potencial de geração de metano, (m³ CH_4 / t resíduo);

M_i é massa de resíduo depositada no ano i, (t);

t_{ij} é o intervalo de tempo j-ésimo décimo do ano i.

Este programa fundamenta-se no modelo *School Canyon* citado no item 3.2.2.2, que prediz que a geração de gás metano é uma função da constante de geração do metano, do potencial de geração de metano e dos registros históricos do aterro (quantidade de RSU recebidos anualmente).

3.2.2.3 Tecnologias para a Recuperação de Metano de Aterros Sanitários

O gás de aterro sanitário pode ser convertido em energia útil de várias maneiras, incluindo o uso em turbinas a gás, motores de combustão interna, microturbinas, uso para queima direta em fogões, uso como combustível veicular, entre outros. Para cada uma dessas opções são necessários os seguintes componentes:

- sistema de coleta;
- sistema de tratamento/purificação;
- equipamentos para geração ou utilização de energia.

A seguir estão descritos cada um desses componentes:

- **Sistema de coleta**

Um sistema de coleta padrão tem quatro componentes principais: *poços de coleta* (constituído por poços drenantes verticais e tricheiras horizontais), *tubos de coleta*, *compressor* e *flare (queimador)*.

Poços de coleta

Os poços drenantes verticais são a forma de recuperação de gás de aterro mais utilizada (WORLD BANK, 2003). O poço drenante vertical é normalmente construído depois do encerramento das atividades no aterro e consiste de um tubo de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) perfurado em sua parte inferior (tipo filtro). O tubo é colocado na célula do aterro de maneira a encontrar as camadas onde o resíduo está disposto. Na parte superior do tubo é conectado um cabeçote, o qual faz a conexão com a rede de captação de gás (tubulação). Para a implantação do poço drenante vertical é necessária a perfuração da célula do aterro em um diâmetro de aproximadamente 1m (OONK e BOON, 1995). O espaço existente entre a célula do aterro e o poço drenante é preenchido com pedras (britas tamanho nº 4). Ainda segundo Oonk e Boon (1995), para evitar a circulação de ar no poço, a coluna superior preenchida por pedras deve ser fechada com uma camada de cimento ou material similar (por exemplo, argila solo compactado). Os poços drenantes verticais são instalados conforme ilustrado na Figura 9.

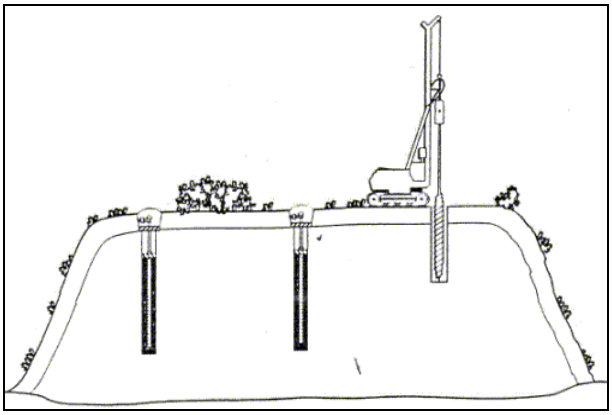


Figura 9: Instalação de Poços Drenantes Verticais no Aterro Finalizado
Fonte: Oonk e Boon (1995).

Quando um aterro é construído por compartimentos, não é preciso esperar o seu fechamento para iniciar a recuperação do gás. Após o fechamento de uma célula do aterro a recuperação do gás pode ser iniciada enquanto outra célula vai sendo preenchida, conforme demonstrado na Figura 10.

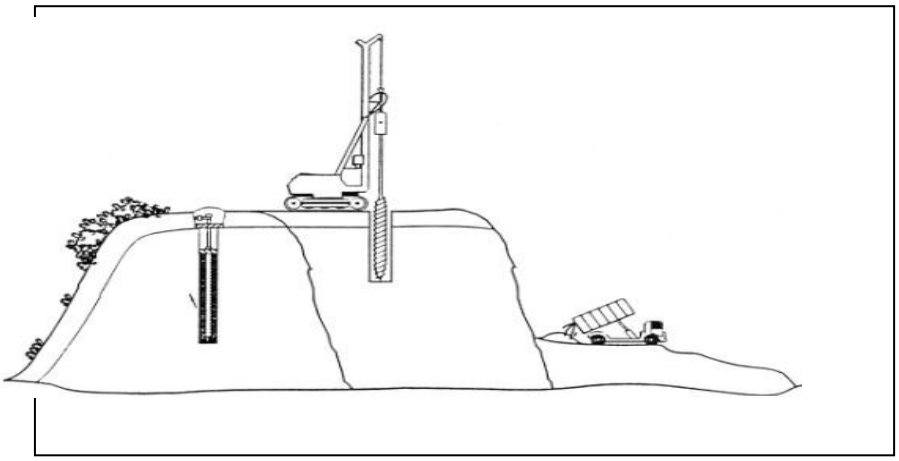


Figura 10: Instalação de poços drenantes verticais com o aterro em operação.
Fonte: Oonk e Boon (1995).

A maior parte do custo de implantação de um poço drenante vertical está na perfuração. Este custo pode ser diminuído se todos os poços drenantes forem colocados previamente ao início da disposição de resíduos. Isto pode ser feito usando-se um cilindro metálico com aproximadamente 5 metros de altura que será colocado no local onde se instalará o poço drenante. Quando o resíduo chegar próximo ao topo do cilindro, este é retirado e o poço drenante deve ser estendido. Após o término da disposição de resíduo, o cabeçote de drenagem é colocado no poço de drenagem e ligado à rede de captação (OONK e BOON, 1995).

A desvantagem deste sistema é que a recuperação do metano não pode ser iniciada até que as atividades no aterro sejam cessadas. A Figura 11 mostra esta opção.

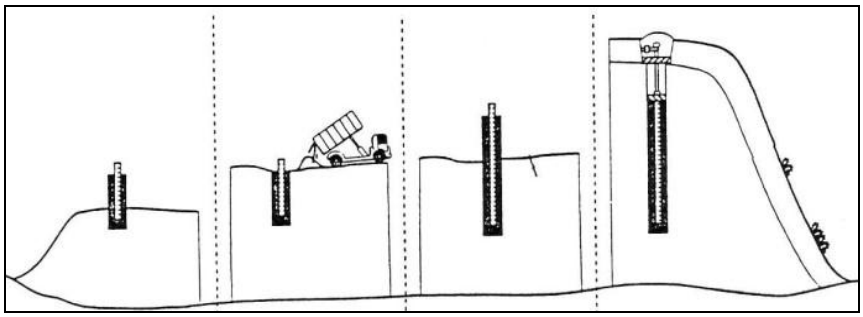


Figura 11: Instalação de poços drenantes verticais no início da operação do aterro.
Fonte: Oonk e Boon (1995).

Na Figura 12 apresenta-se um poço drenante vertical com maiores detalhes.

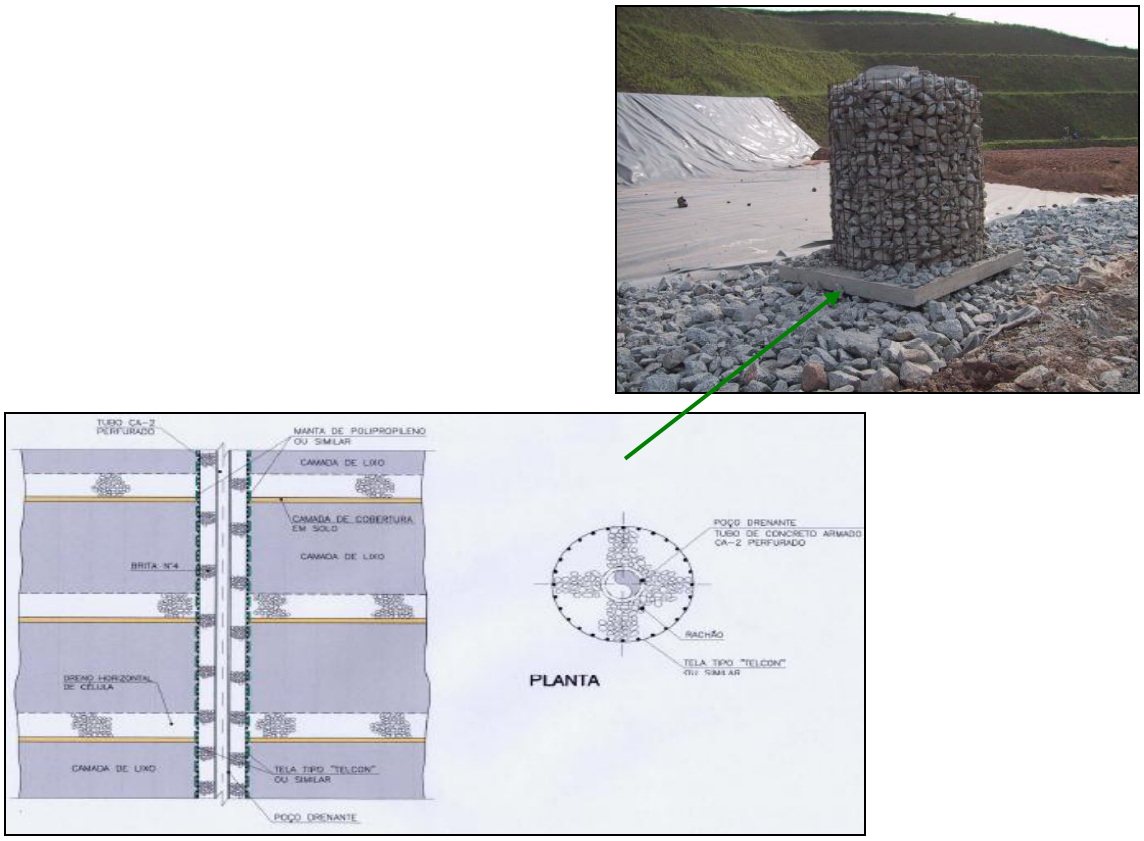


Figura 12: Detalhe do poço drenante vertical.
Fonte: Adaptado de USEPA (1996).

Trincheiras horizontais são tubos perfurados que podem ser colocados horizontalmente na célula do aterro com a finalidade de recuperar o metano gerado. Estes devem ser envolvidos por uma camada de pedra para que não haja contato direto do tubo com o resíduo. Um aterro pode ter várias camadas de tubos horizontais e a distância vertical entre estes deve variar entre 6 a 10 m (OONK e BOOM, 1995).

Nas Figuras 13 e 14 apresentam-se detalhes do sistema horizontal.

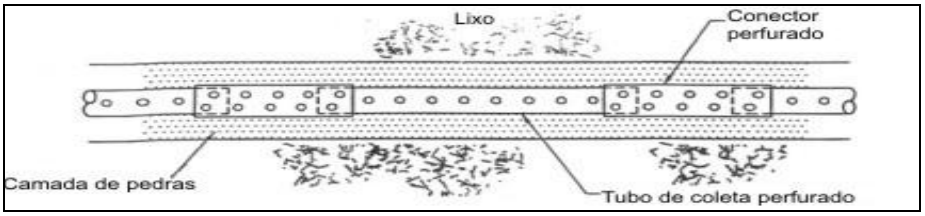


Figura 13: Visão de perfil de trincheiras horizontais.
Fonte: World Bank (2003).

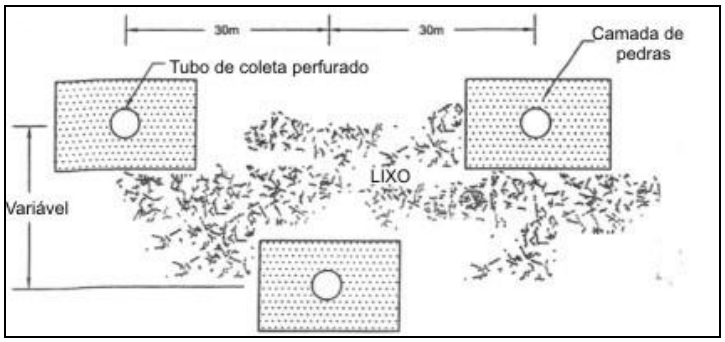


Figura 14: Corte transversal de trincheiras horizontais.
Fonte: World Bank (2003).

Tubos de coleta

Tubos de coleta levam o gás do aterro drenado dos poços para a unidade de utilização do gás ou para a geração de energia elétrica. O sistema é constituído de tubos de PEAD e, normalmente, a área é aterrada para evitar acidentes. A instalação de bombas de sucção de gases é importante para compensar as perdas de carga nas tubulações e garantir uma vazão regular de gás. Deve-se, contudo, equilibrar a vazão da bomba com a geração de gás para evitar a infiltração de ar no sistema e também afastar o risco de explosões.

As Figuras 15 e 16 são relativas aos tubos de coleta de gases do Aterro Bandeirantes, localizado a cidade de São Paulo.

Figura 15: Tubo de coleta de gases do Aterro Bandeirantes.
Fonte: Fotografado pela autora durante visita ao aterro em junho de 2008.

Figura 16: Outra perspectiva da rede de coleta de gases do Aterro Bandeirantes.
Fonte: Fotografado pela autora durante visita ao aterro em junho de 2008.

Compressor

Um compressor (ou um soprador) é necessário para puxar o gás dos poços de coleta. Este também pode ser necessário para comprimir o gás antes de sua entrada no sistema de recuperação energética. O tamanho, tipo e número de compressores necessários dependerão da taxa de compressão, do fluxo de gás e do nível desejado de compressão que tipicamente é determinado pelo equipamento de conversão energética.

Uma compressão adicional de gás pode ser necessária dependendo de como o gás será utilizado. No entanto, a quantidade de compressão requerida unicamente para retirar o gás dos poços é geralmente baixa, porque somente uma pequena pressão negativa é necessária. Por

exemplo, uma instalação com 2 milhões de toneladas de resíduos pode produzir 15 milhões de m^3 de gás por ano, ou cerca de 28,5 m^3/min (USEPA, 1996). Conforme citado em USEPA (1996), cerca de 0,3 a 0,8 hp por m^3/min é necessário para o fluxo de gás; o total de potência mecânica necessária para o compressor (ou um soprador) varia de 36 a 95 hp.

Flare (Queimador)

O *flare* é um dispositivo simples para ignição e queima do gás do aterro gerado. Este dispositivo pode ser necessário durante as etapas de início e manutenção do sistema. Além disso, é importante para queimar o excesso de gás entre *up-grades* de sistemas, isto é, antes da adição de um novo motor. Os projetos de *flare* incluem *flares* abertos (ou vela) e enclausurados (KESSLER, 2000).

Os *flares* abertos são o tipo mais simples e apresentam alguns problemas, como a instabilidade da chama, que pode ser originário de uma combustão ineficiente. Nestes também é mais difícil realizar testes de emissões (USEPA, 1996).

Flares fechados (enclausurados) são mais caros, mas são preferíveis aos abertos porque proporcionam testes de concentração e podem obter eficiências de combustão ligeiramente altas. Neste tipo de equipamento a queima incompleta de hidrocarbonetos e a emissão de materiais perigosos são reduzidas (USEPA, 1996). Além disto, *flares* enclausurados podem reduzir os incômodos de ruído. As Figuras 17 e 18 apresentam modelos de *Flares* instalados em aterros do Brasil.

Figura 17: *Flare* principal do Aterro Sasa, em Tremembé, SP (modelo aberto).
Fonte: Fotografado pela autora durante visita técnica em novembro de 2005.

Figura 18: *Flare* do Aterro Marca, em Cariacica, ES (modelo fechado).
Fonte: Fotografado pela autora durante visita técnica em abril de 2009.

- **Sistema de tratamento/purificação**

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

Portanto, além do poder calorífico do gás, é necessário que se observem outras propriedades, como a presença de contaminantes, acidez e pressão. Tais considerações contribuem para uma previsão adequada das adaptações necessárias ao emprego do gás, quer seja como único recurso energético ou como combustível complementar.

Segundo Alves (2000), a não adaptação da máquina ao combustível gera um extenso histórico de motores e queimadores que não operam satisfatoriamente, especialmente em adaptações ao uso do gás de aterro. Além disso, pode ocorrer combustão incompleta, falha de alimentação, perda de potência e corrosão precoce provocada pela presença do ácido sulfídrico (H_2S).

A presença de substâncias não combustíveis no gás de aterro, como água e dióxido de carbono (CO_2), prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente; tais substâncias entram no lugar do combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. À medida que se eleva a concentração das impurezas, o poder calorífico do metano torna-se menor. A presença do condensado pode bloquear o sistema de coleta e interromper o processo de geração de energia. O controle do condensado começa no campo do sistema de coleta, onde tubos inclinados e conectores são usados para permitir a drenagem em tanques ou armadilhas de coleta. Estes sistemas são normalmente complementados por uma remoção de condensado pós-coleta (USEPA, 1996).

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

Os VOCs podem ser removidos através do uso de grânulos de carbono ativado e limalhas de ferro. Segundo o World Bank (2003) este é o método mais utilizado para a purificação de hidrocarbonetos.

A remoção do H_2S empregando-se limalhas de ferro, segundo Beduschi *et al*. (1985), é um dos mais antigos métodos usados na remoção de compostos de enxofre. Segundo os autores, esse processo tem como vantagem o baixo custo, a simplicidade da instalação e a possibilidade da completa remoção do H_2S que reage com o óxido de ferro formando sulfeto.

Além disso, o óxido de ferro (que pode ser palha de aço, cavacos e limalha de ferro) utilizado no filtro é impregnado com aparas de madeira, que servem como leito suporte.

Outra alternativa para a remoção de H_2S do biogás é o método biológico desenvolvido por Fernández e Montalvo[6] (1998 *apud* Alves, 2000). Esse método consiste em colocar o biogás em contato com uma pequena quantidade de oxigênio em um ambiente líquido abastecido por efluentes. A eficiência de remoção de H_2S em experimento é superior a 97%, com tempo de contato entre 13 e 16h. Para um tempo de contato de 1h, a eficiência de remoção, na maioria dos casos, é de 95%.

O CO_2 não tem valor calorífico e forma ácido carbônico, quando entra em contato com vapor d'água. Por meio de extração, adsorção e métodos de separação com membranas, pode-se remover o CO_2 do gás de aterro. Segundo Beduschi *et al*. (1985), a remoção do CO_2 do biogás dá-se pela adsorção do CO_2 na água. Este é um processo antigo que utiliza a água como adsorvente.

- **Equipamentos para geração ou utilização de energia**

O objetivo do projeto de recuperação energética do gás metano gerado em aterros é sempre convertê-lo em alguma forma de energia útil, como vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular, geração de eletricidade ou aquecimento. As tecnologias mais utilizadas são as de geração de eletricidade/cogeração ou uso direto.

Geração de eletricidade

A produção de energia elétrica a partir de gás de aterro e a venda desta para a rede pode ser uma excelente alternativa, especialmente quando o uso direto não é viável ou efetivo. As vantagens da geração de energia elétrica incluem a possibilidade de transmissão para longas distâncias, a disponibilidade de tecnologias para praticamente qualquer tamanho de aterro, e a alta eficiência energética, especialmente quando a geração de eletricidade é feita em ciclo

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

combinado. Por outro lado, como desvantagem, há a necessidade de um maior investimento de capital e maiores gastos para o pré-tratamento do gás.

Estão disponíveis no mercado várias tecnologias para geração de energia elétrica. As principais são: turbinas a gás, microturbinas e motores de combustão interna.

Turbinas a Gás

A utilização de turbinas a gás para a geração de eletricidade pressupõe grandes fluxos de gás de aterro, ideal para grandes locais de disposição, com projetos de 3 a 4 MW no mínimo (USEPA, 2002). A economia na geração de energia e a eficiência do sistema aumentam de acordo com a escala do projeto.

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

Microturbinas

Suas aplicações são geralmente em projetos de pequeno porte com menos de 1 MW de potência, atendendo à demanda de eletricidade do próprio aterro ou de locais próximos. São equipamentos mais recentes e menos empregados no aproveitamento de gases de aterros (USEPA, 2002).

Existe a possibilidade do uso de grupos desses equipamentos com potências de 30 a 100 kW cada, flexibilizando o uso do gás da maneira mais conveniente, de acordo com a necessidade local. Esta é uma alternativa interessante quando há pequena vazão de gás e quando os motores de combustão interna ou turbinas a gás de grande porte são inadequados.

Após a diminuição considerável da produção de gás do aterro, as microturbinas podem ser transferidas para outro local sem grandes dificuldades por serem de pequeno porte. A presença de gases com baixo teor de metano não representa um problema, pois esses

equipamentos funcionam adequadamente com teores menores que 35% de metano no gás de aterro (USEPA, 2002).

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

Motores de Combustão Interna

O uso de motores de combustão interna (Diesel ou Otto) é a alternativa mais utilizada no aproveitamento de gases de aterro pelo seu baixo custo, facilidade de operação e manutenção (KESSLER, 2000).

Segundo Alves (2000), o uso de motores ciclo Otto (gasolina/álcool) ou Diesel, tem duas aplicações principais: i) geração de energia elétrica pelo acoplamento do motor a um gerador elétrico; ii) geração de energia mecânica que pode ser empregada no acionamento de bomba hidráulica, compressor ou veículo.

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

Outra vantagem desses equipamentos é a flexibilidade na implantação do sistema de geração, que pode ser de pequeno porte e ser ampliado com o aumento da quantidade de gás produzido ao longo da vida útil do aterro, instalando-se para isso novos motores (KESSLER, 2000).

O uso desses equipamentos com modernos sistemas de controle de emissão de poluentes pode favorecer a instalação de grandes plantas de geração de energia em aterros localizados em áreas de restrição de emissão de poluentes (USEPA, 2001).

Tanto o uso de moto-geradores do ciclo Otto ou Diesel quanto turbinas a gás têm seus rendimentos em torno de 30 a 40%. Segundo SILVA[7] (1997 *apud* ALVES, 2000), o uso dos gases de escape gerando vapor pode elevar a eficiência do conjunto para aproximadamente 70%. A Figura 19 apresenta exemplos de moto geradores.

Figura 19: Grupo moto geradores
Fonte: World Bank (2003).

Uso direto do gás

O uso mais simples do gás de aterro é como combustível para caldeiras ou para processos industriais (operações de secagem, uso em fornos para produção de cimento ou asfalto, por exemplo). Nesses projetos o gás é transportando por gasoduto diretamente para um consumidor próximo. Outros usos diretos também são possíveis, como por exemplo, para tratamento de *chorume* através de evaporação.

Em caldeiras

Para o uso em caldeiras, os níveis de umidade do gás devem ser controlados com a instalação de purgadores e linhas de condensado para impedir danos aos equipamentos e problemas na operação das mesmas. A vazão de gás deve ser aumentada com a instalação de uma válvula de controle do combustível mais adequada, uma vez que o gás de aterro possui

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

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

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

Em sistemas de tratamento de *Chorume*

No Brasil, no que se define por tratamento do c*horume "in situ"*, utiliza-se com muita frequência as lagoas biológicas, cuja dificuldade é o fato de necessitarem de uma área muito grande, situada em regiões com elevados índices pluviométricos e de umidade. Neste sentido, muitos projetos utilizam a técnica de recirculação de *chorume* para diminuir a quantidade de líquidos a serem tratados, porém, em épocas chuvosas o sistema pode chegar ao limite da sua capacidade. Por este motivo, alguns estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de se definir novas tecnologias para o tratamento eficiente e eficaz, e com custos compatíveis para o tratamento de *chorume.*

A utilização do gás de aterro para o tratamento de *chorume* vem sendo uma boa alternativa. A evaporação do *chorume* é realizada com o aproveitamento energético do metano gerado no próprio aterro. A planta esquemática do equipamento é representada na Figura 20.

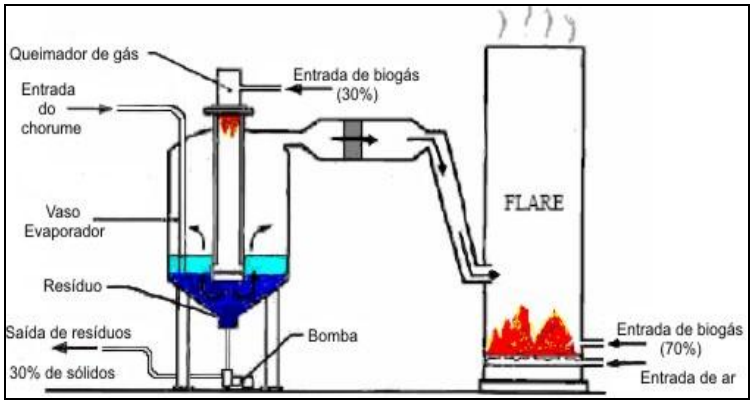


Figura 20: Desenho esquemático de evaporação do *chorume* com aproveitamento energético do gás de aterro

Fonte: Oliveira (2004).

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

No Brasil, alguns aterros sanitários como o Aterro Bandeirantes (São Paulo) e o Aterro Metropolitano Centro (Salvador) não fazem o tratamento do chorume *"in situ"*, e sim, destina-o a estações de tratamento de esgoto ou de resíduos industriais mais próximas. Como consequência, os custos se elevam devido ao transporte desses líquidos, bem como transferem a responsabilidade para outros, pois, em geral, as estações de tratamento de esgoto (ETE) não estão preparadas para receber um líquido com uma grande diversidade e altas concentrações de componentes orgânicos e inorgânicos (inclusive metais pesados). Entretanto, alguns aterros brasileiros já estão fazendo uso da tecnologia de evaporação de *chorume* utilizando o gás do aterro. Entre estes se podem citar o de Nova Iguaçu, localizado na cidade de mesmo nome, no Estado do Rio de Janeiro, e o Aterro Sasa, localizado na cidade de Tremembé, interior do Estado de São Paulo. A Figura 21 mostra um evaporador de chorume instalado no Aterro Sasa.

Figura 21: Evaporador de *Chorume* com utilização de gás de aterro sanitário, instalado no Aterro Sasa, em Tremembé, SP.
Fonte: Fotografado pela autora durante visita técnica em novembro de 2005.

Outros Usos

Outra possibilidade de aproveitamento de gases de aterro é o uso em pequenas aplicações, como o aquecimento de estufas, acompanhado pela recuperação do dióxido de carbono resultante da queima nas caldeiras, que pode ser reutilizado para favorecer o crescimento das plantas quando diluído a frações que não afetem o desenvolvimento dos vegetais (JAFRRIN, *et al.*, 2003).

O metano presente no gás de aterro pode substituir o gás de cozinha – Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) – e ser utilizado na cocção de alimentos. Por exemplo, na cidade de Natal (RN), em um projeto piloto, o gás de aterro foi utilizado para alimentar uma cozinha comunitária e também serviu como combustível na torrefação de castanhas de caju (TRIGÁS, 2005).

Outros aproveitamentos incluem o uso como combustíveis veiculares, uso em células combustíveis, em aquecedores de água e secadores.

Como combustível veicular, segundo argumenta Silva (1995), o maior obstáculo para se alimentar motores automotivos com metano está na dificuldade de armazená-lo, o que requer cilindros pesados e volumosos que refletem na carga útil veicular e implica custos elevados. Há três opções de armazenamento de metano para uso automotivo: o liquefeito, o comprimido

e o adsorvido. O sistema comprimido (alta pressão), porém, é o que fornece autonomia razoável, o que é feito em cilindros de aço-carbono sem costura.

Já o uso em células a combustível,[8] a tecnologia ainda está em desenvolvimento, com vários projetos em andamento em diversos países. Os estudos vêm demonstrando viabilidade técnica do uso do metano proveniente de aterros e estações de tratamento de efluentes, como fonte de hidrogênio, para células a combustível, porém os custos ainda são elevados (WENDT *et al*, 2000; STANIFORTH; KENDALL, 1998; STANIFORTH; ORMEROD, 2003).

3.3 Energia a partir de Biomassa

O sistema energético internacional é fortemente dependente de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás): cerca de 80% do consumo mundial de energia se originam dessas fontes. Consumo este que apresenta um crescimento anual de 2% (média de 20 anos) e nos últimos cinco anos cresceu em média 3,1% ao ano (GOLDEMBERG, *et al*., 2008).

No Brasil, em 2008, o consumo final de energia cresceu 5,2% em relação ano anterior, sendo que mais de 25% desse consumo teve origem em combustíveis fósseis. A participação da biomassa ainda é pequena, apenas 4,8% (BEN, 2009).

Segundo Goldemberg *et al*. (2008) os problemas de segurança de energética têm um papel relevante para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia. Os autores argumentam que a segurança de energia está ligada ao fato de a produção de petróleo estar concentrada em poucos países, e dos EUA, Japão, China e Coreia estarem entre os maiores importadores de petróleo. Além disso, os preços do petróleo e seus derivados atingiram recordes históricos e não há perspectivas, se mantido o crescimento econômico mundial atual, de que declinem sensivelmente nos próximos anos. Os autores concluem dizendo que a incerteza quanto às reservas petrolíferas e o aumento das cotações de petróleo, associados às questões ambientais e sociais, impõem a premência de se alterar as bases do desenvolvimento econômico e de modificar a matriz energética mundial.

---

[8] Células a combustível são dispositivos que convertem diretamente e continuamente energia química, presente em combustíveis como o hidrogênio, em energia elétrica, térmica e água.

A produção de biocombustíveis surge, portanto, como importante opção estratégica, quer como produto complementar, quer como substituto dos derivados de petróleo.

Todavia o avanço da participação das fontes renováveis na matriz energética mundial ainda é incipiente, sobretudo aquelas relacionadas a resíduos. Segundo a IEA (2005), dos 14% correspondentes à participação da energia renovável (Figura 22), 2% referem-se a fontes hídricas, 11% a biocombustíveis e resíduos, e 1% às demais.

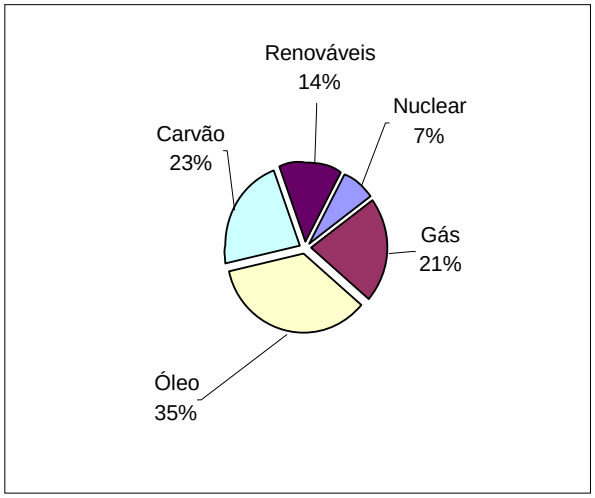


Figura 22: Fontes primárias de energia utilizadas no mundo
Fonte: Adaptado IEA (2005).

Entretanto, é indiscutível que a situação em que a matriz energética seja baseada em fontes de combustíveis fósseis não pode perdurar não só pela exaustão gradativa das reservas, como também pelos efeitos negativos ao meio ambiente que resultam de seu uso, entre os quais o aquecimento global.

Ressalta-se, contudo, que o processo de inserção de energias renováveis na matriz energética depende não só de mecanismos de apoio, mas também de uma combinação bem equilibrada de política, legislação e mercado. Esses fatores são discutidos no item a seguir.

3.3.1 Políticas, Legislação, Regulação e Mercado para Geração de Energia a partir de Fontes Renováveis

As políticas sobre energia e as legislações relacionadas devem buscar o controle da capacidade de mercado para a geração de energia a partir de fontes renováveis. Os mercados

de energia atuais estão em processo de desenvolverem políticas relacionadas à redução das emissões de gases de efeito estufa.

Segundo EREC (2007) os incentivos, apesar de não serem a melhor opção para corrigir falhas de mercado no setor energético, são uma solução política prática para, no curto prazo, se aplicar o princípio do "poluidor pagador". Ainda de acordo com EREC (2007), há dois tipos de incentivos para promover a energia renovável: i) os sistemas de preço fixo, onde o governo dita o preço da eletricidade ou dá um 'prêmio' para o produtor de renováveis e deixa o mercado determinar a quantidade; ii) os sistemas de cotas renováveis (nos EUA chamados de padrões de portfólio renováveis), no qual o governo dita a quantidade de energia e deixa o mercado determinar o preço.

Os sistemas de preços fixos incluem subsídios de investimentos, tarifas fixas, sistemas de recompensa prefixada e créditos de impostos. Ressaltando-se que os subsídios de investimentos são pagamentos financeiros geralmente feitos com base na potência avaliada (em kW) do gerador.

Quanto ao sistema de cotas renováveis existem dois tipos empregados hoje: sistemas de leilão e sistemas de certificado verde. Os sistemas de leilões envolvem ofertas competitivas de contratos para construir e operar um projeto específico, ou uma quantidade fixa de capacidade renovável em um país ou estado. Embora outros fatores também sejam considerados, as ofertas de valores mais baixo invariavelmente ganham nestes casos.

Ambos os modelos podem criar um mercado protegido contra geradores convencionais, cujos custos ambientais não são considerados. Estes sistemas também podem proporcionar incentivos para aperfeiçoamentos tecnológicos e redução de custos, barateando as fontes de energias renováveis e fomentando a competição entre fontes convencionais.

No Brasil, foi lançado em 2002 o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com o objetivo de incentivar fontes renováveis, incluindo aquelas oriundas a partir da biomassa. No item 3.3.1.1 está uma descrição detalhada do programa.

Outra alternativa também disponível no país que veio para fornecer o apoio a projetos energéticos com vistas à redução de emissão de CO_2, através de fontes renováveis, foi o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), discutido no item 3.3.1.2 deste capítulo.

Sobre legislação, é importante destacar que as leis existentes em um país influenciam decisivamente o desenvolvimento potencial de um projeto de geração de energia a partir de biomassa, ou qualquer outra fonte alternativa, ao influenciar a oportunidade de investimento e o retorno econômico para os investidores no desenvolvimento do projeto. Ou seja, uma medida legislativa que pode incentivar a produção de energia renovável e a conceder preferência de acesso à rede de eletricidade, através de acessos razoáveis ou subsidiados.

Quanto às regulamentações dos setores energético e ambiental, existem grandes diferenças entre os países. Como exemplo de regulação e política voltadas para a geração de energia visando à redução de gases de efeito estufa, pode-se citar o Canadá, que aprovou em 2003 uma legislação (*Enviromenntal Choice Program* – ECP-79) com o objetivo de incentivar projetos de geração de energia renovável de baixo impacto, incluindo energia proveniente de resíduos de modo geral.

No caso de energia através de gás de aterro, uma das exigências da ECP é que a eletricidade gerada pela queima de gás deve ter eficiência a ponto de as emissões não ultrapassarem os padrões estabelecidos em normas ambientais específicas (JOHANNESSEN, 2004).

3.3.1.1 Programa de Apoio Financeiro a investimentos em Fontes Alternativas de Energia

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA – foi instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 e revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003. O Programa tem por objetivo diversificar a matriz energética brasileira e buscar soluções de cunho regional utilizando-se de fontes renováveis de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis.

As Centrais Elétricas Brasileiras S.A (ELETROBRAS), no contrato de compra de energia de longo prazo, tem como meta assegurar ao empreendedor uma receita mínima de

70% da energia contratada durante o período de financiamento e proteção integral quanto aos riscos de exposição do mercado de curto prazo. Os investidores, por sua vez, têm que garantir 30% do projeto com capital próprio. As condições do financiamento são TJLP (taxa de juros a longo prazo) mais 2% de *spread* básico e até 1,5% de *spread* de risco ao ano, e carência de seis meses após a entrada em operação comercial, amortização por dez anos e não pagamento de juros durante a construção do empreendimento (ELETROBRAS, 2005).

Uma das exigências da Lei nº 10.762 é a obrigatoriedade de um índice mínimo de nacionalização de 60% do custo total de construção dos projetos. Os critérios de regionalização previstos nesta Lei estabelecem um limite de contratação por Estado de 20% da potência total destinada às fontes eólicas e à biomassa e 15% para as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), o que possibilita a todos os Estados que tenham vocação e projetos aprovados e licenciados a oportunidade de participarem do programa.

A estimativa do Programa é que, com a entrada de novas fontes renováveis, será evitada a emissão de 2,5 milhões de toneladas de gás carbônico/ano, ampliando as possibilidades de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Quioto. O Programa também objetiva a maior inserção do pequeno produtor de energia elétrica, diversificando o número de agentes do setor (ELETROBRAS, 2005).

3.3.1.2 O Financiamento Internacional do Sequestro de Carbono

Em 1991 o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) das Nações Unidas publicou o primeiro relatório sobre o aumento da temperatura no globo, devido à intensificação do efeito estufa, com a participação de cientistas de vários países. Este relatório passou a ser considerado a principal referência sobre o assunto de mudança climática global. Nesta publicação, intitulada de *Climate Change – The IPCC Scientific Assessmen* – pela primeira vez o IPCC divulgou que a concentração de gases de efeito estufa está aumentando na atmosfera global em consequência das emissões pela ação do homem, sendo o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4) os que mais contribuem para o fenômeno.

As Nações Unidas adotaram em 1992 um tratado internacional, a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC),[9] com o objetivo de atingir a estabilização dos gases de efeito estufa na atmosfera. Os países integrantes deste tratado receberam o nome de Partes.

Em 1997, a Conferência das Partes, realizada em Quioto, deu origem ao Protocolo de Quioto, que determina, principalmente aos países desenvolvidos, a obrigação de reduzirem das emissões de gases de efeito estufa e cria mecanismos financeiros para a consecução desse objetivo.

Desta forma, estabeleceu-se no Protocolo de Quioto um termo de compromisso de redução de emissão de gases de efeito estufa para os países do Anexo 1. Os países desenvolvidos enquadrados como Anexo 1 teriam o compromisso de reduzir sua emissão anual de gases do efeito estufa no período de 2008 a 2012, numa média de 5,2 abaixo das emissões referentes ao ano de 1990.

Também foram estabelecidos nesse Protocolo três mecanismos de flexibilização com o objetivo de reduzir os custos da mitigação do efeito estufa dos países com compromisso de redução, entre os quais o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (descrito no Artigo 12 do Protocolo) permite aos países industrializados financiar projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento e receber créditos como forma de cumprir o compromisso de redução. Este Artigo estabelece também que projetos de MDL devem contribuir para o desenvolvimento sustentável do país hospedeiro.

No que diz respeito à pertinência dos projetos de MDL ao país, estes devem passar pela aprovação dos respectivos governos nacionais, segundo suas prioridades e necessidades específicas, a depender de sua matriz energética, suas condições geomorfológicas e sua inserção político-econômica no cenário internacional.

---

[9] CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA

As reduções de emissões provenientes da implementação de projetos de MDL resultam na geração de créditos, os denominados Certificados de Emissões Reduzidas (CERs). De posse dos CER's, os países desenvolvidos podem ter parcela de suas obrigações de reduções de emissões quitadas perante o sistema internacional de controle de implementação do Protocolo de Quioto.

Para que um projeto seja considerado elegível, isto é, avaliado efetivamente como projeto de MDL, e ter como consequência a obtenção dos CERs, foram estabelecidos no Artigo 12,5 do Protocolo alguns requisitos essenciais:

i) os projetos devem ter a participação voluntária aprovada por cada parte envolvida;

ii) os projetos devem ter benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo, relacionados com a mitigação de gases de efeito estufa;

iii) os projetos devem ter reduções que sejam adicionais às que ocorreriam com a ausência das atividades instaladas com o projeto.

Desta maneia, o MDL permite a criação, emissão e venda de CERs pelos países em desenvolvimento, e aumenta o incentivo financeiro para órgãos ou empresas quando se trata de transferência de tecnologia.

De acordo com Fernandes-Asin (2002) a adição da venda de CERs para o fluxo financeiro do projeto pode aumentar a taxa interna de retorno do projeto. Segundo o pesquisador, isso é particularmente verdadeiro para projetos de captação de metano em aterros sanitários, que na média tem um aumento de 5% na taxa interna de retorno o projeto. Nestes tipos de projetos, ainda que as transações envolvendo a compra e venda dos créditos de carbono tenham ocorrido no mercado internacional, os recursos que vêm para o país hospedeiro do projeto representam um incentivo positivo para melhoria geral do sistema de gestão de lixo.

É importante ressaltar que os CERs dos projetos de geração de energia a partir de gás metano dependem das regulamentações locais para que sejam reconhecidos e possam ser vendidos. Ou seja, se as regulamentações dos órgãos ambientais exigirem a redução das

emissões (por motivos de saúde pública) através de medidas prescritas, tais como o uso de sistema de coleta o de combustão do gás, e o local e qualquer redução associadas estiver regulamentada, o projeto em questão será, portanto, impedido de ser reconhecido como MDL nos termos do protocolo de Quioto. Desta forma, reforça-se o argumento de que a redação de qualquer legislação é um fator-chave a ser considerado quando da análise de viabilidade de um projeto de geração de energia.

Em consequência presume-se que à medida que o controle das emissões dos gases de efeito estufa se desenvolva e se torne mais rígido, as oportunidades de gerar CERs serão cada vez mais reduzidas.

Considerando-se a importância das questões descritas acima, são apresentados os elementos de políticas, legislação, regulamentação e mercados que influenciam o potencial de dos projetos de geração de energia a partir de resíduos.

As categorias de Projetos de MDL são: i) projetos que envolvam a captação de metano e/ou emissões evitadas de metano; ii) projetos que envolvam o uso de energia renovável ou combustíveis com baixas emissões; iii) projetos que envolvam outros gases de efeito estufa (HFC, N2O ou CFC); e, iv) projetos na área de transporte.

Segundo o Banco Mundial (2006), os projetos de captura ou queima de gás metano de aterro sanitário têm vantagem significativa, no que diz respeito à validação, sobre outros projetos ou atividades que possam reduzir gases de efeito estufa, por serem rapidamente e facilmente verificáveis usando-se dados registrados reais tanto para os fluxos medidos como pela caracterização do combustível. Pode também ser registrado o desempenho do equipamento que utiliza o combustível, o que significa que o processo de verificação é simples, pois utilizam-se instrumentação de leitura direta e cálculos diretos para apresentar as reduções da emissões.

Apesar do processo de validação ser simples é importante avaliar a questão de riscos sobre a geração de créditos de carbono para estes projetos. O MCT (2006) aponta algumas fontes potenciais de risco:

- questões de tempo tanto para obtenção dos contratos quanto para validação das reduções nas emissões (que pode durar de 4 meses a 12 meses);

- prazo de contratos insuficientes para o projeto tornar-se econômico;

- valor da redução de gases de efeito estufa no tempo;

- dependência da "situação voluntária" do projeto na legislação do país anfitrião.

3.4 Considerações Finais sobre o Capítulo 3

O objetivo deste capítulo foi apresentar as tecnologias existentes de conversão de biomassa em energia, sobretudo aquelas mais utilizadas para o caso dos resíduos sólidos urbanos. A relevância do capítulo dentro do contexto do trabalho se mostra dentro das discussões sobre as tecnologias de geração de energia a partir de gases de aterro sanitário e incineração. Ademais foram feitas algumas considerações sobre o papel da energia renovável no contexto atual.

4. PANORAMA E POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

Neste capítulo é traçado um panorama da situação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, incluindo dados sobre coleta, destinação e composição. Também são descritas as características das plantas de geração de energia a partir de RSU desenvolvidas no país. Por fim, é estimado o potencial teórico de geração de energia a partir dos resíduos em território brasileiro, considerando-se a recuperação de gás de aterros sanitários e o sistema de incineração.

4.1 Panorama da Situação dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

O diagnóstico apresentado neste trabalho tem como base: i) a pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) nos anos de 2006 e 2008; ii) dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) de 2003; e, iii) dados da última Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico (PNSB), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2000.

Ressalte-se, porém, que o levantamento de dados sobre gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil envolve um problema existente na maior parte dos estados da federação, ou seja, a falta de dados sistematizados e atualizados. Não há, na maioria dos municípios brasileiros, sistematização de coleta e atualização de informações referentes: i) à caracterização qualitativa e/ou quantitativa dos resíduos gerados, ii) à frequência de coleta convencional, iii) à frequência de coleta diferenciada; e iv) ao tipo e ao local da disposição final. Além do mais, as pesquisas existentes em nível nacional, por vezes, apresentam números conflitantes, conforme será visto a seguir no item 4.1.4 (Taxa de Geração de Resíduos Sólidos Urbanos).

Ainda que divulgada dez anos atrás, no ano de 2000, a base de dados nacional de maior abrangência sobre esses resíduos ainda é, até a data de fechamento da presente tese, a Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico (PNSB) supracitada. Em sua primeira versão, realizada em 1983, a PNSB contemplou a questão de limpeza urbana e coleta de lixo. Aprimorada ao longo dos anos, essa pesquisa tornou-se a partir da versão publicada em 1989, uma referência nacional e fonte principal de fornecimento de dados para todas as análises de avaliações sobre gestão e geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), em nível nacional e

regional. Todavia, a realização/publicação da PNSB não ocorre de forma regular: a última divulgação da pesquisa ocorreu em 2000, e outra, relativa a dados coletados entre 2008 e 2009, tem previsão de divulgação até o final de 2010.

Para melhor apresentação, o diagnóstico aqui realizado segue as cinco regiões geográficas tradicionais do país: Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste, as quais são mostradas na Figura 23.

Figura 23: Grandes regiões geográficas do Brasil e seus respectivos estados.
Fonte: IBGE (2007).

4.1.1 Situação da Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos

Na Tabela 10 são apresentados dados sobre coleta de resíduos em nível federal, divulgados em 2003 através da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), do IBGE. Esta pesquisa não é tão detalhada e direcionada ao segmento de saneamento quanto a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB). Porém, a coleta de informações foi realizada de maneira presencial e abrangeu os 5.565 municípios brasileiros. A PNAD (2003) divulgou informações sobre características gerais da população, migração, educação, trabalho, famílias, meio ambiente e domicílios. Entre os indicadores fornecidos, dentro da dimensão de meio ambiente, são apresentados os índices de acesso ao serviço de coleta de resíduo doméstico e o índice da sua destinação final, destacados neste trabalho.

Quanto à coleta de lixo, em termos regionais, verifica-se, a partir dos dados da referida pesquisa (PNAD, 2003), que existe grande diferença das regiões norte e nordeste em relação às demais regiões. Na região Norte, apenas 87,5 % dos municípios têm acesso à coleta dos resíduos gerados e na região Nordeste a coleta é realizada em 89,4% dos municípios, enquanto a média nacional é de 95,3%. Também é possível constatar-se um sensível contraste no que diz respeito ao serviço de coleta de resíduos realizado na área urbana e na área rural. Na área urbana a média nacional é de 95,3%, já na rural este percentual é muito baixo (17,4% considerando-se a média nacional). Neste caso, a região Norte é que têm a pior situação de serviço de coleta de resíduos, ou seja, apenas 0,3% dos resíduos sólidos gerados nos domicílios da zona rural são coletados, conforme pode ser visto na Tabela 10.

As informações apresentadas na Tabela 10 corroboram com dados apresentados em outras pesquisas, nas quais os índices de coleta de resíduos na área urbana encontram-se na faixa de 95% (ABRELPE, 2006).

Tabela 10: Índice de acesso ao serviço de coleta de resíduos domésticos em domicílios particulares permanentes no Brasil

População urbana	
Regiões	**Acesso ao serviço de coleta (%)**
Brasil	**95,3**
Norte	87,5
Nordeste	89,4
Sudeste	98,4
Sul	98,3
Centro-Oeste	96,5
População rural	
Regiões	**Acesso ao serviço de coleta (%)**
Brasil	17,4
Norte	0,3
Nordeste	9,4
Sudeste	34,0
Sul	22,5
Centro-Oeste	14,4

Fonte: PNAD (2003).

4.1.2 Situação da Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos

A PNAD não traz informações a respeito do destino final dos resíduos sólidos urbanos coletados. A pesquisa informa apenas o destino daqueles resíduos não coletados e divide o tipo de sua destinação em: i) queimados ou enterrados na propriedade; ii) jogados em terrenos baldios ou logradouros; iii) jogados em rios, lagos ou mar; iv) outros destinos. Através da

referida pesquisa é possível constatar que 2,9% dos resíduos gerados nos domicílios da área urbana são queimados ou enterrados na propriedade; enquanto para os domicílios situados na área rural esse número sobe para 59,2%.

Por outro lado, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada em 2000, apresentou dados mais detalhados em relação à forma de disposição. Os dados são apresentados na Tabela 11 abaixo. De acordo com as informações da Tabela 11, em 2000 (ano da pesquisa) apenas cerca de 36% dos RSU eram destinados ao aterro sanitário. Em 2006, porém, a pesquisa da ABRELPE apresentou dados mais realistas em relação à pesquisa realizada em 2000. Segundo a pesquisa da ABRELPE (2006), 63% dos resíduos RSU gerados no país tinham como destino os aterros sanitários (Figura 24). Cabe destacar, todavia, que os números apresentados nessa pesquisa devem ser vistos com ressalvas, pelo fato de não se tratar de uma pesquisa tão abrangente como a PNSB.

Tabela 11: Formas de disposição de resíduos sólidos urbanos por regiões do país

Regiões / Formas de disposição	Brasil (%)	Norte (%)	Nordeste (%)	Sudeste (%)	Sul (%)	Centro-Oeste (%)
Vazadouro a céu aberto ou em áreas alagadas	21,3	57,2	48,3	9,8	25,9	22,0
Aterro controlado	37,0	28,3	14,6	46,5	24,3	32,8
Aterro sanitário	36,2	13,3	36,2	37,1	40,5	38,8
Usina de compostagem	2,9	0,0	0,2	3,8	1,7	4,8
Usina de triagem	1,0	0,0	0,2	0,9	4,2	0,5
Incineração	0,5	0,1	0,1	0,7	0,2	0,2
Locais nãofixos	0,5	0,9	0,3	0,6	0,6	0,7
Outra	0,7	0,2	0,1	0,7	2,6	0,2

Fonte: Elaboração própria com dados da PNSB (2000).

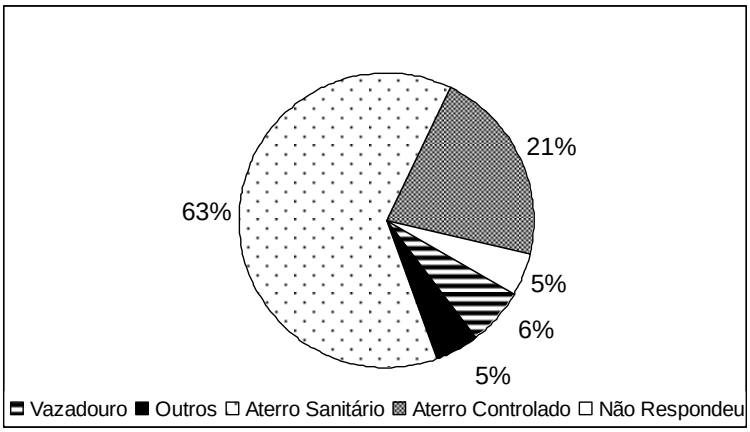


Figura 24: Destino dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.
Fonte: Elaboração própria com dados da ABRELPE (2006).

4.1.3 Taxa de Geração *per capita* de Resíduos Sólidos Urbanos

A taxa de geração *per capita*[10] varia em função do nível de desenvolvimento padrão de consumo, da classe social, da faixa populacional e de fatores culturais locais. No Brasil, segundo a PNSB (2000), a taxa de geração *per capita* de cada município está relacionada ao seu número de habitantes, ou seja, quanto maior o município, maior é também a sua taxa de geração de resíduos por habitante, conforme mostra a Tabela 12.

Tabela 12: Geração *per capita* de resíduos sólidos urbanos dos municípios brasileiros em função do número de habitantes

População (habitantes)	Geração *per capita* de RSU (kg/hab.dia)
Total	0,95
P < 9.999	0,66
10.000 ≤ P ≤ 19.999	0,58
20.000 ≤ P ≤ 49.999	0,64
50.000 ≤ P ≤ 99.999	0,71
100.000 ≤ P ≤ 199.999	0,84
200.000 ≤ P ≤ 499.999	0,91
500.000 ≤ P ≤ 999.999	1,72
P > 1.000.000	1,50

Fonte: PNSB (2000).

Ainda segundo a PNSB (2000), apenas 8,4%, dos municípios, em número, pesavam efetivamente em balanças os resíduos coletados. Todavia, 64,7% do lixo urbano no Brasil

[10] É denominada taxa de geração *per capita* a quantidade de resíduos produzida por habitante por dia. Essa taxa é composta dos seguintes resíduos: resíduos sólidos domiciliares, resíduos sólidos dos estabelecimentos comerciais (não inclui os industriais, hospitalares e da construção civil) e resíduos sólidos de varrição de vias públicas.

eram pesados, na medida em que as grandes cidades, que geram a maior parcela da produção de lixo, dispunham desse equipamento de medição. Sem pesagem, a quantidade de lixo coletada é geralmente estimada considerando-se os seguintes fatores: i) número de viagens realizadas pelos caminhões de coleta; ii) sua capacidade volumétrica; e iii) peso específico dos resíduos da cidade no caminhão de coleta.

As informações da referida pesquisa, realizada em 2000, também destacam que as estimativas de geração *per capita* nos municípios que não pesam o lixo coletado podem ter sido subestimadas. Pois 73,7 % dos municípios acima de 100.000 habitantes têm balanças no sistema de limpeza urbana, e nos municípios menores, apenas 5,7% contam com esse equipamento. Sendo assim, verifica-se que a média de geração *per capita* apontada pelos municípios que possuem balança é maior do que a daqueles que não a têm, conforme pode ser visto na Tabela 12 acima.

4.1.4 Taxa de Geração de Resíduos Sólidos Urbanos

A respeito da quantidade diária de geração de resíduos sólidos urbanos, os dados apresentados por diferentes fontes de pesquisa são discrepantes e incoerentes. Na Tabela 13, por exemplo, são mostrados os dados da PNAD, realizado em 2003, e na Tabela 14 estão descritos os dados da ABRELPE de 2006. Nota-se que os números sobre as quantidades diárias de resíduos produzidos na região Sudeste, segundo a PNAD, eram de 141.617 t/dia em 2003 (Tabela 13). Já a ABRELPE (Tabela 14) apresentou, em 2006, para a mesma região, dados de cerca da metade do valor (72.145 t/dia). Ou seja, esta última pesquisa estaria indicando que teria havido decrécimo na taxa de geração de resíduos, o que aparentemente não é verdadeiro., uma vez que houve aumento populacional nesta região em relação ao ano de 2003 e não se verifcou no período nehuma política rígida de redução de resíduos.

Tabela 13: Quantidade de lixo coletada em número absoluto e relativo por tipo de disposição final

Grandes Regiões	Quantidade de lixo coletado por tipo de destinação final				
	Total (t/dia)	Adequada		Inadequada	
		Total (t/dia)	Relativo (%)	Total (t/dia)	Relativo (%)
Brasil	**228.413**	**92.486**	**40,5**	**135.926**	**59,5**
Norte	**11.067**	**1.481**	**13,4**	**9.585**	**86,6**
Rondônia	692	32	4,6	660	95,4
Acre	538	243	45,0	296	55,0
Amazonas	2.864	28	1,0	2.836	99,0
Roraima	133	0,0	0,0	133	100,0
Pará	5.181	1.019	19,7	4.162	80,3
Amapá	456	0,4	0,1	455	100,0
Tocantins	1.201	159	13,2	1.043	86,8
Nordeste	**41.558**	**15.219,0**	**36,6**	**26.338,8**	**63,4**
Maranhão	2.653	754	28,4	1.898	71,6
Piauí	2.431	91	3,7	2.304	96,3
Ceará	10.150	7.306	72,0	2.844	28,0
Rio G. Norte	2.373	226	9,5	2.147	90,5
Paraíba	2.894	109	3,8	2.785	96,2
Pernambuco	6.281	2.389	38,0	3.892	62,0
Alagoas	2.999	194	6,5	2.805	93,5
Sergipe	1.373	30	2,2	1.347	97,8
Bahia	10.398	4.119	39,6	6.279	60,4
Sudeste	**141.617**	**60.188**	**42,5**	**81.428**	**57,5**
Minas Gerais	15.664	5.952	38,0	9.712	62,0
Espírito Santo	2.924	1.443	49,4	1.480	50,6
Rio de Janeiro	17.447	8.004	45,9	9.443	54,1
São Paulo	105.582	44.789	42,4	60.792	57,6
Sul	**19.875**	**9.256**	**46,6**	**10.619**	**53,4**
Paraná	7.543	2.940	39,0	4.603	61,0
Santa Catarina	4.864	2.611	53,7	2.252	46,3
Rio G. do Sul	7.464	3.704	49,6	3.764	50,4
Centro-Oeste	**14.296**	**6.342**	**44,4**	**7.955**	**55,6**
Mato G. do Sul	1.756	220	12,5	1.537	87,5
Mato Grosso	2.164	787	36,4	1.376	63,6
Goiás	7.809	4.789	61,3	3.020	38,7
Distrito Federal	2.567	545	21,2	2.022	78,8

Fonte: PNAD (2003).

Tabela 14: Taxa de geração de resíduos sólidos urbanos por regiões do Brasil

Região	População (Nº. de habitantes)	Quantidade de resíduos gerados (t /dia)	Porcentagem (%)
Norte	15.053.792	13.863	8,0
Nordeste	55.041.199	50.689	29,0
Sul	28.044.466	25.827	14,8
Sudeste	78.340.242	72.145	41,4
Centro-Oeste	12.614.197	11.617	6,8
Brasil	**189.093.896**	**174.141**	**100**

Fonte: Elaboração própria com dados de ABRELPE (2006).

A PNSB (2000), por sua vez, apresenta os números sobre quantidade de resíduos gerados em função de estratos populacionais, o que dificulta a comparação com as pesquisa supracitadas.

4.1.5 Composição dos Resíduos Sólidos Urbanos

Na Figura 25 é apresentada a composição física/qualitativa média dos resíduos produzidos no país. Essa composição é representada pela porcentagem, em peso, dos vários materiais constituintes dos resíduos. Esses materiais geralmente são constituídos de matéria orgânica, papel, papelão, trapos, couro, plástico, vidro, borracha, metais, madeiras e outros. De acordo com o apresentado na Figura 25, a matéria orgânica é o integrante de maior proporção dos resíduos brasileiros (57,4%).

Entretanto, deve-se considerar que tanto a geração quanto a composição são processos dinâmicos, estando sempre sujeitos a variações provocadas por fatores como: crescimento populacional, nível educacional, poder aquisitivo e tipo de coleta (se há ou não coleta seletiva no município). No caso do Brasil, um país de grandes extensões territoriais e com marcantes diferenças regionais, advindas em geral do processo de colonização, de culturas e costumes distintos, há uma significativa variação na composição dos RSU de região para região. Todavia, é possível afirmar que a matéria orgânica compõe de 50 a 60% dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em função da pesquisa ABRELPE (2006) e de outras realizadas por pesquisadores de diferentes regiões do país, tais como Gomes (1989); Baptista (2001).

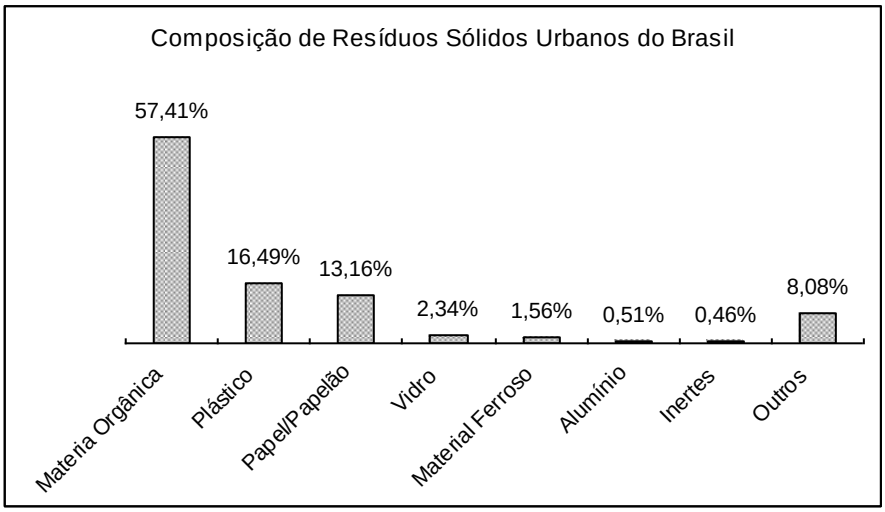


Figura 25: Composição Gravimétrica dos Resíduos do Brasil.
Fonte: Elaborado a partir de ABRELPE (2006).

Sobre o panorama dos RSU no país, é possível constatar que a região Sudeste, devido a suas características econômicas, culturais e populacionais, é responsável pela maior quantidade de geração de resíduos em território nacional. É também a região que mais coleta e melhor dispõe seus resíduos, conforme indicado pelas Tabelas 10, 11, 13, e 14, vistas anteriormente.

4.2 Plantas de Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos

Quanto à geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no Brasil, ainda não é possível encontrar informações sistematizadas sobre projetos desenvolvidos ou em desenvolvimento no país. Desse modo, as informações agrupadas no presente trabalho foram compiladas a partir de: i) pesquisas de campo; ii) entrevistas com gerentes/ administradores das usinas térmicas de geração de energia que utilizam gás de aterro implantadas em território nacional; e iii) documentos e relatórios publicados relativos aos projetos aprovados no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (Documentos de Concepção de Projetos), disponível em MCT (2009).

Conforme já se mencionou anteriormente, a prática de incineração para tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil não é comum, sendo mais aplicada a resíduos de serviços de saúde e a resíduos industriais. O número de projetos de incineração de RSU com vistas à recuperação de energia é restrito. Segundo levantamento de dados da pesquisadora existe

apenas um projeto de incineração em operação (ver Tabela 15) e, ainda assim, em escala piloto.

Por outro lado, os primeiros projetos de geração de energia através da recuperação de metano produzido em aterros foram desenvolvidos no país já na década de 1970, em plena vigência da crise do petróleo. Contudo, foi a partir de 2004, com o incentivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, previsto no Protocolo de Quioto, que esse tipo de empreendimento ganhou impulso.

Com relação à geração de energia elétrica, o Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de 2010 indicava a existência de nove usinas operando a biogás (somando uma capacidade instalada de 45.522 kW), sendo que apenas duas delas eram térmicas movidas a gás de aterro – Aterro Bandeirantes e Aterro São João (com potência de 20.000 kW e 21.560 kW respectivamente). Essas nove usinas, operando juntas, contribuíam com 0,04% da matriz elétrica brasileira (referente ao ano de 2010). Neste ano existiam, porém, outros projetos implantados no país, gerando energia a partir de gás de aterro, e visando outros usos finais, como calor de processo, conforme apresentado na Tabela 17 (página 116).

A Tabela 15, a seguir, traz uma compilação de informações sobre as plantas de geração de energia a partir de RSU existentes no país. Cabe salientar, entretanto, que a mesma apresenta dados de projetos em operação e também daqueles em fase de desenvolvimento/implantação.

Tabela 15: Usinas de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos implantadas ou em fase de implantação no Brasil

Nome	Localização	Capacidade instalada	Implantação (início)	*Status* do projeto
Aterro Sanitário Nova Gerar	Nova Iguaçu, RJ	12MW	2004	fase de implantação
Aterro Sanitário de Salvador	Salvador, BA	8MW	2004	fase de implantação
Aterro Sanitário Marca Ambiental	Cariacica, ES	1MW	2004	fase de implantação

Tabela 15: Usinas de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos implantadas ou em fase de implantação no Brasil (continuação)

Nome	Localização	Capacidade instalada	Implantação (início)	*Status* do projeto
Aterro Sanitário Lara	Mauá, SP	10MW	2004	fase de implantação
Aterro Sanitário Bandeirantes	São Paulo, SP	20MW	2005	em operação
Aterro Sanitário São João	São Paulo, SP	22MW	2005	em operação
UsinaVerde (incineração)	Rio de Janeiro, RJ	440 kW	2005	em operação
Aterro Sanitário Tecipar-PROGAT	Santana de Parnaíba, SP	6,5MW	2009	fase de implantação

Fonte: Elaboração própria com base: dados do MCT (2009); pesquisa de campo; e entrevistas.

Dentre os projetos listados na Tabela 15 (projetos de geração de energia a partir de RSU), três usinas estão efetivamente em operação. Sendo que duas são de captura de metano (Aterro Bandeirante e Aterro São João) e a outra de recuperação de energia através de incineração (UsinaVerde). Abaixo, uma breve descrição das características dos projetos relativos a estas usinas é apresentada.

- **Projeto Aterro Bandeirantes**

A usina está instalada no Aterro Bandeirantes, em Perus, na Grande São Paulo (entre o Km 24 e 26 da Rodovia dos Bandeirantes). O aterro é composto de uma área de aproximadamente 1,35 milhão de m^2, que recebeu resíduos durante quase 30 anos (de 1978 até 2006). Nos últimos 15 anos, recebia cerca de 6.000 toneladas de resíduos por dia e teve suas atividades encerradas em 2006. O projeto de captura de metano e geração de energia foi desenvolvido pelo consórcio Biogás Energia Ambiental em parceria com a Prefeitura Municipal de São Paulo.

O empreendimento compreende a planta de extração/ tratamento do gás (usina de gás) e a usina de geração de energia. A usina de gás extrai cerca de 12 mil Nm³/h de gás do aterro e transporta para os motores na usina de geração. Este gás extraído é coletado por uma rede de tubos de 43 km e cerca de 200 drenos verticais que, por sua vez, passa por um processo de limpeza e secagem para apropriá-lo como combustível para ser usado nos motores na planta de geração de energia. Um eventual excedente de gás é eliminado nos queimadores. A Figura 26 apresenta um desenho esquemático do percurso do gás captado no aterro.

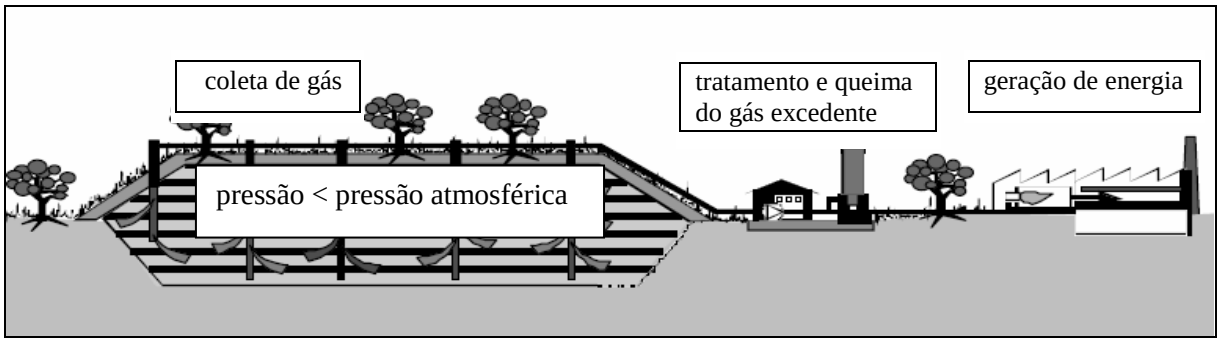


Figura 26: Percurso do gás de aterro.
Fonte: MCT (2009).

Para a geração de eletricidade, a usina do Aterro Bandeirantes utiliza 24 motores Caterpillar (modelo 3516 A), com capacidade nominal de 925 kW cada, produzindo 175.924,98 MWh/ano. A Tabela 16 resume as principais características dessa usina e as Figuras 27, 28 e 29 são respectivamente: o soprador (usado para o transporte de gás do aterro aos motores, sob correta sucção e pressão); as tubulações para envio do gás para os motores; e a sala de máquinas (motores Caterpillar).

Tabela 16: Características da usina termelétrica do Aterro Bandeirantes

Potência instalada	22,2 MW
Potência útil	19,98 MW
Energia total produzida	175.924,98 MWh/ano
Custo de geração	1000,00 – 1300,00 US$/kW
Custo de mão de obra e manutenção	1,8 US$/kW

Fonte: Elaboração própria, com base em entrevista realizada em junho de 2008[11].

[11] Entrevista concedida pelos senhores Antônio Carlos Delbin e Caio Takase à pesquisadora, durante a vista técnica da autora à usina.

Figura 27: Vista parcial de um dos sopradores da usina termelétrica do Aterro Bandeirantes.
Fonte: Foto referente à visita técnica realizada em junho de 2008.

Figura 28: Vista parcial do sistema de captação de gases da Termelétrica do Aterro Bandeirantes
Fonte: Foto produzida por ocasião da visita técnica realizada em junho de 2008.

Figura 29: Vista parcial da casa de máquinas da termelétrica do Aterro Bandeirantes.
Fonte: Foto referente à visita técnica realizada em junho de 2008.

▪ **Projeto Aterro São João**

O Projeto São João está instalado no aterro do mesmo nome, localizado na zona leste do município de São Paulo, no Km 33 da Estrada de Sapopemba, próximo da divisa do município de Mauá. O aterro cuja área é de 824 mil m^2 entrou em operação 1992 e cessou suas atividades em 2007, recebendo um total de 28 milhões de toneladas, sendo que nos últimos anos recebia uma média diária de 6.000 toneladas. Este empreendimento foi desenvolvido pelo mesmo grupo que criou o Projeto Aterro Bandeirantes – o consórcio Biogás Energia Ambiental, em parceria com a Prefeitura Municipal de São Paulo.

O sistema operacional é o mesmo utilizado no Aterro Bandeirantes (consiste no aterro, na planta de extração/tratamento do gás e na usina de geração de energia). Neste caso, são 126 poços de captura de gás conectados a uma rede de tubulação de 30 Km e são produzidos 15 mil N m^3/h de gás com metano a 50% de composição (aproximadamente).

Para a geração de eletricidade são utilizados 26 motores de combustão interna da marca Caterpillar (modelo G3520C), com capacidade nominal de 1,54 MW. A Figura 30 mostra a vista parcial da casa de máquinas da termelétrica do Aterro São João.

Figura 30: Vista parcial da casa de máquinas da termelétrica do Aterro São João.
Fonte: Foto referente à visita técnica realizada em junho de 2008.

Nos dois projetos (Bandeirantes e São João), a energia é transmitida diretamente para uma subestação especial da concessionária AES não há armazenamento de energia dentro da unidade.

▪ **Projeto UsinaVerde**

A usina está instalada no *campus* da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, na Ilha do Fundão, na cidade do Rio de Janeiro. Os responsáveis pelo desenvolvimento do projeto são: o grupo UsinaVerde/SA e o Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ.

O projeto consiste em uma planta piloto para incineração de 30 t/dia de resíduos sólidos urbanos (equivalente à geração de resíduos de uma cidade com cerca de 50.000 habitantes). A este forno é associado um sistema de geração elétrica, constituído de uma caldeira de recuperação de calor e turbina a vapor com potência de 440 kW. Como subproduto da queima, é obtido um precipitado salino que corresponde de 3% a 5% do volume inicial dos resíduos tratados.

O processo compreende quatro etapas: i) separação dos materiais recicláveis; ii) incineração com recuperação de energia; iii) lavagem de gases e vapores; iv) mineração e decantação.

Na primeira etapa, os resíduos são lançados pelos caminhões de coleta diretamente no silo de recepção da planta e seguem daí para esteiras horizontais, onde se processa a seleção manual de materiais não combustíveis (tais como vidros, cerâmicas e metais).

Concluída a etapa de separação, os resíduos são transportados por meio de uma esteira mecânica para o interior do forno que opera a temperatura acima de 850 °C. Os gases quentes (provenientes de uma câmara de pós-combustão) são conduzidos através de um duto a uma caldeira de recuperação de calor. No recuperador de calor, por sua vez, é gerado o vapor para acionar um turbo gerador e o vapor de exaustão da turbina é condensado e retorna ao sistema de geração.

Os gases quentes que saem da caldeira de recuperação de calor vão para o sistema de lavagem de gases antes de serem liberados pela chaminé. No sistema, a solução de lavagem de gases circula entre os lavadores e o decantador, sem que sejam gerados efluentes líquidos.

As cinzas resultantes do processo de incineração (cerca de 5% do volume inicial de resíduos tratados) são arrastadas do fundo do forno por uma corrente contínua de água e recolhidas em um tanque de decantação primária. A parte solúvel das cinzas (parte alcalina) passa para um decantador secundário que, por sua vez, recebe também as águas ácidas da lavagem dos gases. Ali ocorrem reações de neutralização e precipitação de sais.

Figura 31: Vista externa da caldeira e da casa do turbo gerador.
Fonte: Usinaverde (2009).

- **Outros Projetos**

Com relação à captura de metano em aterros, existem outras iniciativas desenvolvidas no Brasil no âmbito de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Porém, estes não preveem a geração de energia. O gás extraído do aterro é empregado para outros fins, tais como evaporação de chorume e a venda para uso direto por consumidores finais. Ou ainda, esses projetos limitam-se à queima do gás metano em *flare*[12] , como pode ser observado na Tabela 17 a seguir.

[12] A substituição do sistema de coleta passivo (drenos tradicionais) para um sistema de coleta ativo (*flare*) é passível de receber créditos de carbono, pois o *flare* é considerado um sistema de alta eficiência de coleta e queima. Com uma eficiência de queima de 98% ele converte o metano presente no gás de aterro em dióxido de carbono, que possui um potencial de aquecimento global 21 vezes menor que o metano.

Tabela 17: Projetos de captura e queima de metano no âmbito de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

Implantação (início)	Nome	Localização	Quantidade de resíduos tratados (t/d)	Uso final
2005	A.S Ônix-SASA	Tremembé, SP	500	queima e evaporação de *chorume*
2005	A.S Estre	Paulínia, SP	2500	queima
2005	A.S Caeiras	Caeiras, SP	2000	queima e venda de gás para indústrias locais
2005	A.S Anaconda	Santa Isabel, SP	419	queima
2006	A.S Aurá	Belém, PA	1200	queima
2006	A.S Canabrava	Salvador, BA	1600	queima
2006	A.S Bragança	Bragança Paulista, SP	164	queima
2006	A.S Sul (PROGAS)	Minas do Leão, RS	2300	queima
2006	A.S Pedreira	São Paulo, SP	360	queima
2006	A.S Manaus	Manaus, AM	2300	queima
2006	A.S Alto Tietê	Itaquaquecetuba, SP	1500	queima
2006	A.S Terrestre Ambiental	Santos, SP	1200	queima
2006	A.S Quitaúna	Guarulhos, SP	Não informada	queima
2006	A.S Estre Itapevi	Itapevi, SP	900	queima
2007	A.S Santech	Içara, SC	240	queima
2007	A.S Tijuquinhas-Proativa	Biguaçu, SC	250	queima
2007	A.S URBAM - Araúna	São José dos Campos, SP	Não informada	queima
2007	A.S Vila Velha	Vila Velha, ES	500	queima
2007	A.S Feira de Santana	Feira de Santana, BA	365	queima
2008	A.S Metropolitano Jardim Gramacho	Duque de Caxias, RJ	6500	queima e gás para produção de etanol
2009	A.S Horizonte	Belo Horizonte, MG	Não informada	queima
2009	A.S Natal	Ceará Mirim, RN	1000	queima

Legenda: A.S: Aterro Sanitário
Fonte: Elaboração própria com base em dados do MCT (2009), pesquisa de campo e entrevistas.

4.3 Potencial de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos

Neste item é estimado o potencial brasileiro de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU). A estimativa foi realizada considerando-se duas possibilidades: i) incineração dos resíduos com recuperação de energia; e, ii) através da captura do metano gerado em aterros. Os aspectos técnico-operacionais, ambientais e socioeconômicos foram analisados.

Inicialmente faz-se necessário destacar que a ausência de fontes de dados atualizados sobre a gestão de resíduos no país foi um ponto de dificuldade encontrado para a elaboração do presente exercício. Conforme discutido anteriormente, não há, na maioria dos municípios brasileiros, a sistematização de coleta e atualização de dados referentes à caracterização qualitativa ou quantitativa dos resíduos gerados. E em âmbito nacional, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), IBGE (2000), realizada no ano 2000, é a fonte de dados sobre resíduos sólidos de maior confiabilidade disponível no Brasil até o fechamento desta tese.

Especificamente sobre a quantidade diária de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados, conforme já discutido no Capítulo 3, as informações são escassas, antigas, e as mais atualizadas são discrepantes. Para minimizar os problemas acarretados por este fato, de forma a não comprometer e inviabilizar o desenvolvimento do presente trabalho, optou-se por utilizar dados populacionais (IBGE, 2007) e números de geração *per capita* de RSU[13] de PNSB para estimar a produção diária de RSU.

Com relação à abrangência das estimativas referentes ao potencial de aproveitamento de energia dos RSU, realizadas no presente trabalho, considerou-se três cenários diferentes. No primeiro cenário todas as cidades foram incluídas nos cálculos, não importando o porte do município, cujos números estão apresentados na Tabela 18. No segundo cenário, foram incluídos apenas aqueles municípios brasileiros que possuem mais de 500 mil habitantes. Os números por municípios, deste segundo cenário, estão apresentados na Tabela 19. No terceiro e último cenário foi avaliado o potencial apenas para aqueles municípios do país que possuem mais de 1 milhão de habitantes. Os municípios e os respectivos números populacionais deste terceiro cenário estão apresentados na Tabela 19.

[13] As pesquisas sobre RSU mais recentes – ABRELPE (2006); ABRELPE, (2008) – apontam uma variação pouco significativa em relação aos números de geração *per capita* apresentados na PNSB (2000).

Tabela 18: Quantidade de resíduos gerada por região do país

Região	Número de municípios	População (Nº de habitantes)	Quantidade de resíduos gerados (t/d)*	Geração *per capita* de RSU (kg/hab.dia)
Norte	449	14.623.316	13.892	0,95
Nordeste	1793	51.534.406	48.958	
Sul	1188	26.733.595	25.397	
Sudeste	1668	77.873.120	73.979	
Centro-Oeste	466	13.222.854	12.562	
Brasil	**5565**	***183.987.291***	***174.788***	

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do IBGE (2007).
*t/d: toneladas por dia

Tabela 19: Quantidade de resíduos gerada por região em municípios com população acima de 500 mil habitantes e acima de 1 milhão de habitantes

Região	*p> 500.000 (habitantes)	**p> 1000.000 (habitantes)	Geração de resíduos p> 500.000 (t/d)	Geração de resíduos p> 1000.000 (t/d)
Norte				
Manaus, AM	1.646.602	1.646.602	2.470	2.470
Belém, PA	1.408.847	1.408.847	2.113	2.113
Total	***3.055.449***	***3.055.449***	***4.583***	***4.583***
Nordeste				
São Luís, MA	957.515		1.647	
Teresina, PI	779.939		1.341	
Fortaleza, CE	2.431.415	2.431.415	4.182	3.647
Natal, RN	774.230		1.332	
João Pessoa, PB	674.762		1.161	
Jaboatão dos Guararapes, PE	665.387		1.144	
Recife, PE	1.533.580	1.533.580	2.638	2.300
Maceió, AL	896.965		1.543	
Aracaju, SE	520.303		895	
Feira de Santana, BA	571.997		984	
Salvador, BA	2.892.625	2.892.625	4.975	4.339
Total	***12.698.718***	***6.857.620***	***21.842***	***10.286***
Centro-Oeste				
Cuiabá, MT	526.830		906	
Campo Grande, MS	724.524		1.246	
Goiânia, GO	1.244.645	1.244.645	2.141	1.867
Distrito Federal, DF	2.455.903	2.455.903	4.224	3.684
Total	***4.951.902***	***3.700.548***	***8.517***	***5.551***
Sul				
Curitiba, PR	1.797.408	1.797.408	2.696	2.696
Porto Alegre, RS	1.420.667	1.420.667	2.131	2.131
Sudeste				
Belo Horizonte, MG	2.412.937	2.412.937	3.619	3.619
Contagem, MG	608.650		913	
Juiz de Fora, MG	513.348		770	
Uberlândia, MG	608.369		913	
Duque de Caxias, RJ	842.686		1.264	
Nova Iguaçu, RJ	830.672		1.246	
Rio de Janeiro, RJ	6.093.472	6.093.472	9.140	9.140
São Gonçalo, RJ	960.631		1.441	

Tabela 19: Quantidade de resíduos gerada por região em municípios com população acima de 500 mil habitantes e acima de 1 milhão de habitantes (continuação)

Região	*p> 500.000 (habitantes)	**p> 1000.000 (habitantes)	Geração de resíduos p> 500.000 (t/d)	Geração de resíduos p> 1000.000 (t/d)
Campinas, SP	1.039.297	1.039.297	1.559	1.559
Guarulhos, SP	1.236.192	1.236.192	1.854	1.854
Osasco, SP	701.012		1.052	
Ribeirão Preto, SP	547.417		821	
Santo André, SP	667.891		1.002	
São Bernardo do Campo, SP	781.390		1.172	
São José dos Campos, SP	594.948		892	
São Paulo, SP	10.886.518	10.886.518	16.330	16.330
Sorocaba, SP	559.157		839	
Total	***29.884.587***	***21.668.416***	***44.827***	***32.503***
Total Brasil	***53.808.731***	***38.500.108***	***84.596***	***57.750***
Geração *per capita* de RSU (kg/hab.dia) 500.000 ≤ p ≤ 999.999		1,72		
Geração *per capita* de RSU (kg/hab.dia) p > 1.000.000		1,50		
Total	***3.218.075***	***3.218.075***	***4.827***	***4.827***

Nota: *p> 500.000: municípios com população acima de 500 mil habitantes
**p> 1000.000: municípios com população acima de 1 milhão de habitantes

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do IBGE (2007).

4.3.1 Potencial Energético a partir de Geração de Metano em Aterros Sanitários

Quanto ao levantamento das estimativas sobre o metano gerado em aterros, conforme discutido no Capítulo 3 (item 3.2.2.2), existem diferentes métodos para realizar este cálculo. Vários são os modelos matemáticos disponíveis, que diferem em sua complexidade e na quantidade de dados de *input* de que cada um deles necessita. Todavia, todos esses modelos visam à obtenção da curva de produção de gás gerado em aterro em função do tempo.

No presente trabalho utilizou-se o modelo matemático LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental Americana – *Environmental Protection Agency* (EPA) em 2005. O LandGEM é uma ferramenta utilizada pela EPA para verificar se os aterros operados nos Estados Unidos estão atendendo aos padrões de emissão de metano (e também de outros poluentes) preconizados pelas leis federais americanas.

Conforme já apresentado no Capítulo 3, o referido modelo (EPA, 2005) se baseia na seguinte equação de primeira ordem:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0,1}^{1} k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

Na qual:

Q_{CH_4} é a vazão de metano (m³/ano);

i é o incremento de tempo em um ano;

j é o incremento de tempo igual a um décimo de um ano;

k é a constante de geração de metano (anos^{-1});

L_o é o potencial de geração de metano (m³ CH_4 / t resíduo);

M_i é a massa de resíduo depositada no ano i (t).

O modelo referido pode utilizar dados específicos do aterro a ser estudado (para a constante k e para L_o) ou assumir parâmetros padrões (baseados em números empíricos), caso nenhum dado específico do local esteja disponível. Esses parâmetros, por sua vez, podem ser os já embutidos no modelo ou podem ser inseridos pelo usuário. Para recordar o que já foi abordado anteriormente, k representa a velocidade de geração do gás e de esgotamento do aterro e é decorrente da umidade, da disponibilidade de nutrientes, da temperatura e do pH. Já o L_o está relacionado com a quantidade de matéria orgânica existente nos resíduos. É importante salientar, entretanto, que não existem pesquisas no Brasil a respeito dos valores específicos para k e L_o.

Cabe ressaltar, ainda, que a escolha deste modelo se deu em função da confiabilidade dos resultados, de sua popularidade, uma vez que ele tem sido utilizado na maioria dos Documentos de Concepção de Projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, e também da facilidade de sua aplicação. Esta última qualidade é importante quando se trata da utilização deste instrumento por diferentes tipos de usuários, desde gestores e administradores públicos até especialistas em projetos de geração de energia a partir de gás de aterro.

A quantidade de energia produzida em um aterro sanitário é estimada a partir dos dados de geração e de captura de metano. Assim, neste estudo calculou-se a energia disponível ao ano através dos seguintes passos:

▪ Foram utilizados dados populacionais IBGE (2007) para estimar a quantidade gerada de resíduos por região, por ano, em um período de 20 anos. Aplicou-se uma taxa de crescimento populacional de 1,146% ano (referente à projeção do IBGE para o período de 2010-2030). Assumiu-se que 95% dos resíduos gerados fossem coletados e depositados em aterros sanitários.

▪ Através da quantidade teórica de resíduos depositada anualmente, estimou-se a vazão do metano gerada por ano utilizando-se o modelo LandGEM descrito acima.

▪ Multiplicou-se a vazão de metano obtida pelo modelo LandGem pela eficiência do sistema de coleta de gás, pois parte do gás gerado no aterro é capturada, e parte escapa para a atmosfera ou necessita ser queimado em *flare*. Para estimar a quantidade de metano capturada, um valor de eficiência de coleta foi adotado. O valor de eficiência de captura depende de diversos fatores, dentre os quais se destacam: a quantidade da cobertura do aterro, a fração do aterro afetada pelos poços de coleta de gás, a concepção dos poços e da sucção aplicada aos poços. Neste trabalho assumiu-se o valor de eficiência de captura igual a 75 %, com base no valor sugerido pela CETESB no programa Biogás Geração e Uso Energético.[14]

▪ O valor assumido para a constante de geração de metano (k) foi de 0,08 ano^{-1} e para potencial de geração e metano (L_o) foi de 120 m^3 CH_4/t com base no programa Biogás Geração e Uso Energético.[15]

Considerando-se os passos descritos acima, a potência disponível foi calculada a partir da Equação 6 descrita abaixo, CETESB (2006).

Equação 6: Px= [(Qx . PC(metano)/31.536.000) . Ec (k/1000)]

[14] Programa de computador utilizado para estimativa de geração de biogás e avaliação de recuperação e uso energético, desenvolvido pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) e pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA) através convênios firmados entre o Governo do Estado de São Paulo e o Governo Federal, por meio do Ministério da Ciência e Tecnologia.

[15] Ibidem, p.121.

Onde:

Px: potência disponível a cada ano (kW)

Qx: vazão de metano a cada ano (m^3CH_4/ano)

PC (metano): poder calorífico do metano = $35{,}53.10^6$ (J/m^3CH_4)

31.536.000: segundos em um ano (s/ano)

Ec: eficiência de coleta de gases

k: 1 (adimensional)

Sendo [J/s] = [W]

A Tabela 20 resume os dados de entrada para os cálculos de estimativa de geração de energia a partir do metano gerado em aterros.

Tabela 20: Parâmetros assumidos para a estimativa de potencial energético a partir de digestão anaeróbia em aterros sanitários

Parâmetro	Entrada	Unidade
Ano de início de operação do aterro	2007	ano
Ano de encerramento das atividades dos aterros	2027	ano
Taxa de crescimento populacional	1,146	%
Constante de geração de metano (k)	0,08	ano^{-1}
Potencial de geração de metano (L_o)	120	m^3 CH_4/t RSU
Geração diária de RSU	0,95	Kg/(hab.dia)
Taxa de coleta de RSU	95	%
Eficiência de coleta de metano	75	%
Percentual de metano no gás de aterro	50	%

Fonte: Elaboração própria.

Finalmente, são sintetizados na Tabela 21 os resultados obtidos, referentes ao potencial teórico de geração de energia a partir da digestão anaeróbia em aterros, considerando-se os três cenários propostos acima. Ou seja, um primeiro em que todas as cidades foram incluídas nos cálculos, não importando o porte do município. Um segundo cenário, em que foram incluídos apenas aqueles municípios brasileiros que possuem mais de 500 mil habitantes. E um terceiro e último cenário em que foi avaliado o potencial apenas para aqueles municípios do país que possuem mais de 1 milhão de habitantes.

Tabela 21: Potencial teórico de geração de energia a partir da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários

Todas as cidades	
Região	Potencial disponível (MW)
Norte	467
Nordeste	1646
Sul	854
Sudeste	2487
Centro-oeste	422
Municípios com população acima de 500 K habitantes	
Região	Potencial disponível (MW)
Norte	98
Nordeste	406
Sul	108
Sudeste	954
Centro-oeste	158
Total Brasil	**1724**
Municípios com população acima de 1M de habitantes	
Região	Potencial disponível (MW)
Norte	98
Nordeste	219
Sul	108
Sudeste	692
Centro-oeste	118
Total Brasil	**1235**
Total Brasil	**5876**

Nota: os resultados apresentados nesta tabela representam o ano de maior geração de metano.
Fonte: Elaboração própria.

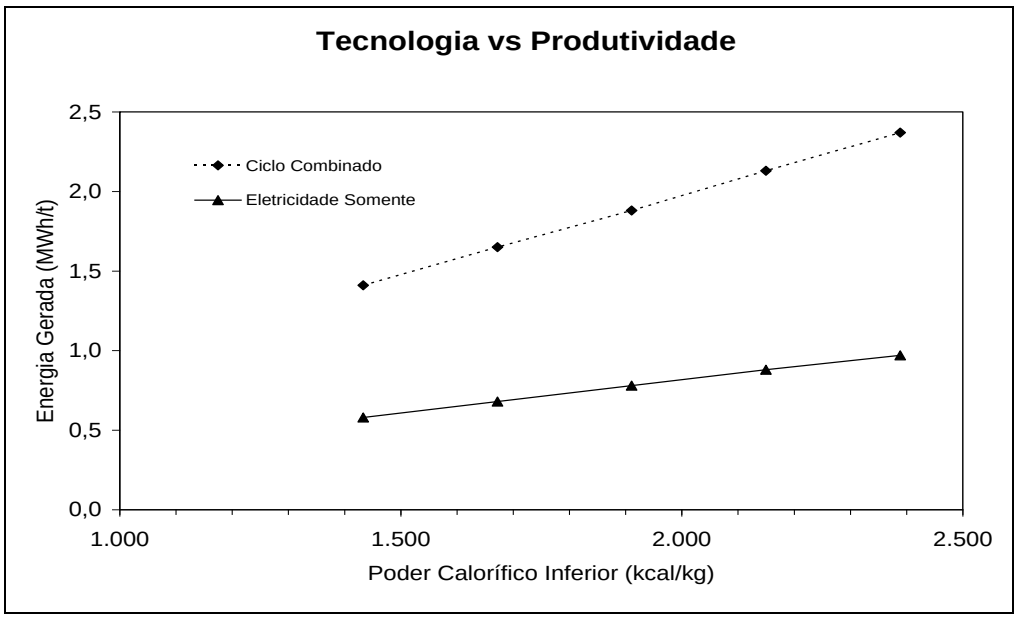
As curvas representando o comportamento da vazão de metano e da potência disponível ao longo do período de 20 anos, assumindo-se os três cenários descritos acima, referentes ao porte dos municípios, encontram-se no ANEXO deste trabalho.

4.3.2 Potencial de Geração de Energia a partir da Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos

A eficiência total de uma unidade de incineração depende do uso final que se pretende para a energia a ser recuperada. Além disso, a eficiência do processo é fortemente dependente do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos materiais a ser incinerados. O cálculo do Poder Calorífico do RSU, porém, é bastante complexo e sujeito a grandes variações, devido à heterogeneidade dos materiais (o que faz diferir fortemente os RSU de outros combustíveis convencionais), sendo a representatividade das amostras um fator crítico. Com relação ao PCI dos RSU brasileiros, não existe nenhuma pesquisa recente, em âmbito nacional, que tenha feito esta avaliação. Em 2007, Cançado *et al*. (2007) calcularam o PCI dos resíduos sólidos

urbanos da cidade de Belo Horizonte como sendo 3.536,8 kcal/Kg (14,80 MJ). No mesmo ano, Poletto (2007) estimou o PCI dos RSU da cidade de Bauru (São Paulo) como 1.572,0 kcal/Kg (6,58 MJ). Numa outra pesquisa, da Secretaria do Meio Ambiente – *apud* Paro *et al*. (2008) –,[16] o valor para os PCI dos resíduos sólidos urbanos da cidade de São Paulo é de 2.431,0 kcal/Kg (10,18 MJ). Neste trabalho, para o cálculo teórico do potencial energético de geração de energia a partir da incineração, assumiu-se o PCI de 2.388,5 kcal/Kg (10,00 MJ) tomando-se como base a média do PCI dos trabalhos aqui citados que foi de 2.513,27 kcal/Kg (10,52 MJ).

Utilizando-se o PCI acima referido, estimou-se o potencial de geração de energia a partir de incineração. Para este cálculo foram considerados os valores teóricos de produção de energia por tonelada de resíduos urbanos, indicados pelo Banco Mundial (1999) e apresentados na Figura 32 abaixo.



OBS: A eficiência do sistema é de 76%.
Figura 32: Produtividade de energia a partir de incineração.
Fonte: Banco Mundial (1999).

Assim, neste estudo calculou-se a energia disponível ao ano pelo processo de incineração através dos seguintes passos:

[16] SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. "Total costs of ownership: Comparison Incineration Plant-Landfill – Technical Co-Operation Project Bavaria-Sao Paulo". São Paulo. Governo de São Paulo. Governo do Estado da Baviera: Secretaria do Meio Ambiente, Saúde Pública e Proteção ao Consumidor, 2006.

▪ Foram utilizados dados populacionais (IBGE, 2007) para estimar a quantidade gerada de resíduos por região, por ano (Tabelas 18 e 19). Assumiu-se que 95% dos resíduos gerados fossem coletados e incinerados;

▪ Foram utilizados dados de produtividade para tecnologia de ciclo combinado conforme apresentado na Figura 32

▪ Adotou-se o PCI de 2.388,5 kcal/Kg (10 MJ). Não se consideraram variações no valor do PCI.

Portanto, para o cálculo do potencial de geração de energia a partir da incineração de RSU para o Brasil, utilizou-se a metodologia descrita e considerando-se os três cenários mencionados anteriormente. No primeiro cenário todas as cidades foram incluídas nos cálculos, não importando o porte do município. No segundo cenário, foram incluídos apenas aqueles municípios brasileiros que possuem mais de 500 mil habitantes. Já no terceiro cenário foi avaliado o potencial para apenas aqueles municípios do país que possuem mais de 1 milhão de habitantes. A Tabela 22 apresenta os parâmetros utilizados esta estimativa.

Tabela 22: Parâmetros assumidos para a estimativa de potencial energético a partir de incineração de resíduos sólidos urbanos

Parâmetro	Valor	Unidade
Geração diária de RSU	0,95	Kg/(hab.dia)
Taxa de Coleta de RSU	95	%
Poder Calorífico Inferior	2.388,5	kcal/Kg
Produtividade	2,37	MWh/t

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 23 mostra os resultados obtidos para o cálculo do potencial de geração de energia a partir da incineração de RSU, considerando-se os três cenários populacionais descritos.

Tabela 23: Potencial teórico de geração de energia a partir da incineração de resíduos sólidos urbanos

Todas as cidades	
Região	Potencial Disponível (MW)
Norte	1.303
Nordeste	4.593
Sul	2.383
Sudeste	6.940
Centro-oeste	1.179
Total Brasil	**16.398**
Municípios com população acima de 500 K habitantes	
Região	Potencial Disponível (MW)
Norte	430
Nordeste	2049
Sul	453
Sudeste	4.205
Centro-oeste	799
Total Brasil	**7.936**
Municípios com população acima de 1M de habitantes	
Região	Potencial Disponível (MW)
Norte	430
Nordeste	965
Sul	453
Sudeste	3.049
Centro-oeste	521
Total Brasil	**5.418**

Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 33, 34 e 35 apresentam os potenciais teóricos de geração de energia obtidos a partir dos dois processos – de incineração ou digestão anaeróbia em aterro sanitário – e considerando-se os cenários já mencionados, ou seja, incluindo-se todos os municípios (Figura 33); abrangendo apenas aqueles municípios com mais de 500 mil habitantes (Figura 34); e considerando-se apenas os municípios com mais de 1 milhão de habitantes (Figura 35).

Através dos resultados obtidos nota-se que a região Sudeste é a que apresenta o maior potencial de geração de energia a partir de RSU, independente do porte do município que se considera e da tecnologia de recuperação de energia empregada (Figuras 33, 34 e 35). Esse fato se justifica porque é nesta região que se produz a maior quantidade de RSU. Por outro lado, se for considerada a geração de energia a partir de RSU apenas naqueles municípios com população acima de 1 milhão de habitantes, o potencial teórico encontrado, para região Sudeste, seria de 3.049 MW, utilizando-se a tecnologia de incineração, e de 692 MW, através da digestão anaeróbia em aterros sanitários (Figura 35).

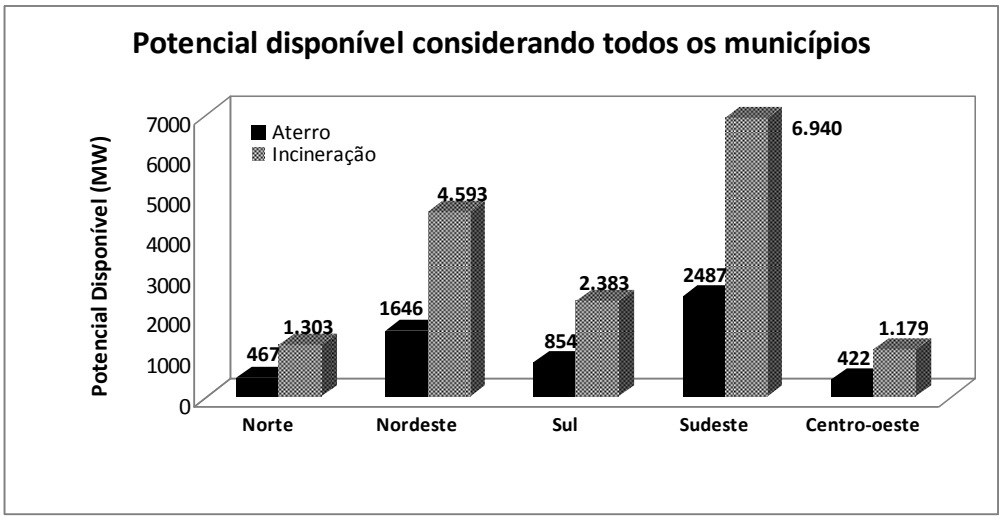


Figura 33: Potencial de energia disponível para o Brasil – cenário em que participam todos os municípios.
Fonte: Elaboração própria.

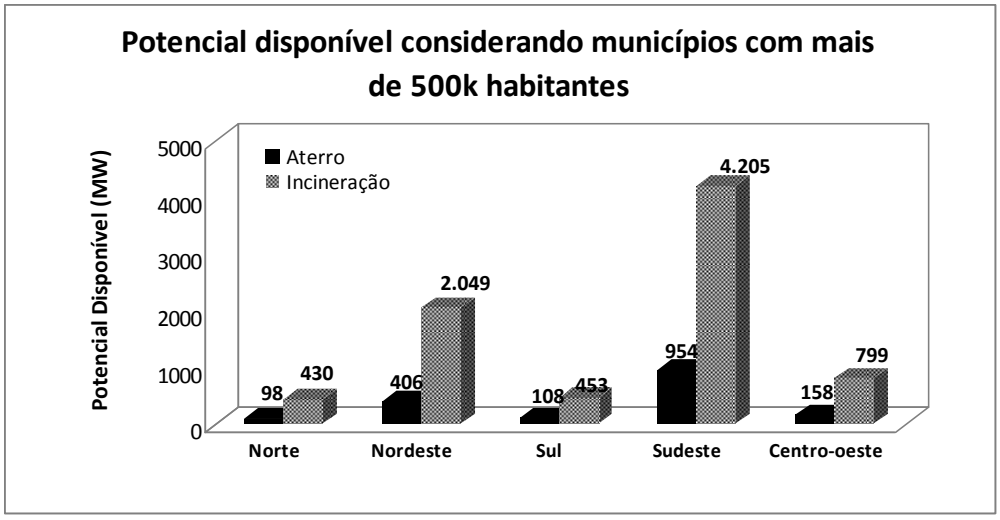


Figura 34: Potencial de energia disponível para o Brasil – cenário em que participam apenas os municípios com mais de 500 mil habitantes.
Fonte: Elaboração própria

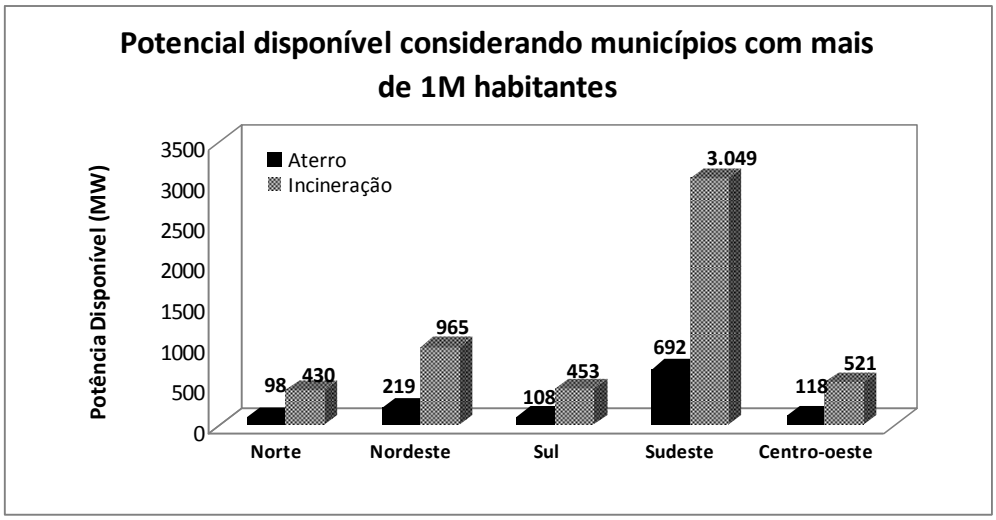


Figura 35: Potencial de energia disponível para o Brasil – cenário em que participam apenas os municípios com mais de 1 milhão de habitantes
Fonte: Elaboração própria

4.4 Considerações Finais sobre o Capítulo 4

O presente capítulo analisou a situação do RSU no Brasil tendo como destaque a questão da sua disposição. Ou seja, mais de 20% dos resíduos gerados no país são dispostos em lixões ou vazadouros a céu aberto.

Foram analisados os projetos de geração de energia a partir de RSU implantados no país. Segundo informações levantadas na presente pesquisa, constatou-se que existiam três projetos efetivamente em operação até setembro de 2010, sendo dois deles de geração de energia a partir de metano gerado em aterros – Aterro Bandeirantes e Aterro São João, ambos implantados no Estado de São Paulo – e o terceiro, UsinaVerde, utilizava a incineração de RSU. Este último, operando em escala piloto, foi instalado na cidade do Rio de Janeiro..

Por fim, realizou-se uma estimativa do potencial teórico de geração de energia a partir de RSU, considerando-se a captação de metano gerado em aterros ou a incineração desse tipo de resíduo. O potencial estimado para o Brasil foi de 16.398 MW, através da tecnologia de incineração, ou de 5.876 MW a partir da digestão anaeróbia em aterros sanitários. O destaque desta análise ficou com a região Sudeste, aquela com maior potencial para esse tipo de aproveitamento energético. Nessa região, se for considerada a geração de energia a partir de RSU apenas naqueles municípios com população acima de 500 mil habitantes, o potencial teórico seria da ordem de 4 GW, utilizando-se a tecnologia de incineração, e de 954 MW através da digestão anaeróbia em aterros sanitários.

5. ROTAS TECNOLÓGICAS, GARGALOS E DIRETRIZES PROPOSTAS

Neste capítulo são propostas diretrizes para a geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil. Tais diretrizes combinam aspectos tecnológicos, econômicos e socioambientais, tendo em vista as especificidades da gestão de resíduos no país. O capítulo parte de uma análise comparativa, sob os aspectos técnico-econômicos e socioambientais, entre as duas rotas tecnológicas para recuperar energia a partir de RSU – recuperação de metano gerado em aterros e incineração. Também são apontados gargalos existentes no país que dificultam a implantação e a operação destas tecnologias, e finalmente são propostas as diretrizes para o aproveitamento energético.

5.1 Comparação entre as duas Rotas Tecnológicas de Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos

Neste item faz-se uma comparação sobre os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e socioeconômicos entre as duas tecnologias de geração de energia analisadas, quais sejam: a incineração e a digestão anaeróbia de RSU em aterros sanitários.

5.1.1 Aspectos Técnico-econômicos

A quantidade e a composição dos RSU disponíveis para tratamento são fatores importantes a se avaliar quando se comparam as duas tecnologias estudadas (digestão anaeróbia em aterros e incineração). No caso da incineração, uma quantidade adequada de resíduos é necessária para manter a operação contínua. Isso implica a existência de um sistema maduro de gerenciamento integrado de resíduos, sobretudo, sistemas que sejam capazes de fazer a separação de materiais. Por outro lado, a formação de gases em aterros está diretamente ligada à quantidade de matéria orgânica aterrada. Assim, quanto mais matéria orgânica presente na massa de resíduos, maior o potencial de geração de metano.

Além disso, para que seja possível determinar o volume de investimentos e os custos operacionais, devem ser levados em conta outros fatores, entre os quais o tamanho da planta, sua localização, o custo da mão de obra local e a que distância fica situada em relação ao centro gerador de resíduos.

No que diz respeito à incineração, o método mais comum para a produção de energia é o sistema de turbina a vapor com cogeração. O sistema pode produzir de 0,33 a 2,37 MW/t de RSU, a depender do poder calorífico dos resíduos incinerados. Por outro lado, a produção de metano no processo de digestão anaeróbia varia em função das técnicas operacionais praticadas no aterro, das condições climáticas, do índice pluviométrico da região, entre outros fatores. As tecnologias mais empregadas para esse processo são motores de combustão interna, turbinas a gás e microturbinas (EPA, 2007; BANCO MUNDIAL, 1999).

Para o processo de digestão anaeróbia em aterros, os valores estimados para os investimentos em projetos instalados no Brasil encontram-se entre US$ 1.000 e US$ 1.800 /kW. Já os custos de operação/manutenção (O&M) situam-se entre US$ 1,30 e US$ 1,80/ kW[17].

Já os volumes de investimento para uma usina de incineração com recuperação de energia variam de US$ 100.000 a 140.000/t/dia de RSU incinerado, produzindo de 500 a 600 kWh de energia elétrica/tonelada de RSU incinerado. E os valores de O&M encontram-se em cerca de US$ 12/t de RSU tratado. Estes valores oscilam em função do poder calorífico dos RSU e do equipamento de controle de emissões adotado, segundo dados do Banco Mundial (1999) e do *Waste-to-Energy Research and Technology* (WTERT).

5.1.1.1 Análise Econômica Estudo de Caso: Incineração com Recuperação de Energia

Nesta etapa do trabalho é realizada uma análise econômica para uma usina de incineração hipotética.

- *Premissas sobre custos de investimento e O&M (operação e manutenção)*

A capacidade da usina analisada é de 200.000 toneladas por ano (547,94 t/dia ou 22,83 t/h). Este porte da usina foi assumido com base no volume de resíduos gerados por uma cidade de cerca 550 mil habitantes, ou seja, uma cidade brasileira de porte médio. Quanto ao Poder Calorífico Inferior (PCI) dos resíduos, assumiu-se o valor de 9,0 MJ/Kg (2.149,65

[17] Valores obtidos através de entrevista durante visita técnica ocorrida em junho de 2008.

Kcal/Kg)[18]. Pressupôs-se que a usina irá operar 7.008 h/ano, sendo o fator de capacidade igual a 0,8[19].

A estimativa dos custos de investimento teve como referência uma planta para a produção de energia elétrica com ciclo combinado (calor e eletricidade), por representar a modalidade mais promissora de usina de incineração de RSU, em países em que esta prática é corrente (AUTRET et. al, 2006; HOLMGREN & GEBREMEDHIN, 2004). A estimativa desses custos, bem como a proporção destinada a cada categoria, tiveram por base os dados da literatura pertinente (BANCO MUNDIAL, 1999). Assim, o custo de investimento total foi estimado em US$ 100 milhões, distribuídos da seguinte forma: 10% para a aquisição de terreno, incluindo taxas com licenciamento; 35% para a construção civil; e 55% para a aquisição dos maquinários. Não foram inclusos os custos de conexão com a rede elétrica e dos impostos.

Os custos de O&M (operação e manutenção), por sua vez, foram distribuídos da seguinte maneira: 6% do investimento total são destinados aos custos operacionais fixos e variáveis; 1% dos custos de investimento em construção civil são destinados à manutenção de prédios e dependências; e 2,5% dos investimentos em equipamentos são destinados à manutenção destes (IBIDEM). Os custos operacionais compreendem os custos operacionais fixos (administração e salários) e os custos operacionais variáveis. Estes últimos são representados por: custo dos produtos químicos para a limpeza do sistema de gases de combustão; custo do consumo de eletricidade da planta; custo de tratamento de água residuárias; custo de disposição das cinzas resultantes da queima e dos resíduos do sistema de limpeza dos gases. Já os custos de manutenção compreendem aqueles referentes à manutenção do equipamento e das obras civis.

- *Premissas sobre as receitas do projeto*

Quanto à receita do projeto, advém da venda de energia por ele gerada. Para o estabelecimento do preço da venda de energia foram utilizadas três alternativas: i) a usina hipotética, objeto do estudo de caso, em concordância ao disposto na Lei 10.762/2003,

[18] Este valor foi definido tendo como base a média dos PCI calculados nos trabalhos: Cançado (2007); Poletto (2007); SMA (2006). Sendo o PCI médio encontrado igual a 10,52 MJ, para um cálculo mais conservador. assumiu-se o valor de 9,0 MJ/Kg tendo em vista a heterogeneidade dos RSU.
[19] A definição do Fator de Capacidade baseou-se em dados da literatura de projeto similar (KLEIN et. al, 2003).

participaria do PROINFA. Assim, toda a energia gerada teria garantia de compra pela Eletrobrás ao valor econômico da tecnologia de geração de biomassa, isto é, R$ 126,88/ MWh[20] ou US$ 72,09[21]/MWh; ii) a usina venderia a energia no mercado de contratação livre, como fonte de energia renovável, ao valor de R$ 200,00[22]/MWh (US$ 113,64/MWh); iii) a planta comercializaria a energia nos leilões promovidos pela ANEEL, no âmbito das Leis 10.848/04 e 11.934/09, ao valor de 147,37/MWh (US$ 83,73/MWh)[23]. Considerando-se as três alternativas, o estudo determinou um valor mínimo, US$ 72,09/MWh; um valor médio, US$ 83,73/MWh; e um valor máximo, US$ 113,64/MWh, para o preço da energia.

Para estimar as receitas esperadas em virtude da venda dos serviços de tratamento dos RSU (tratamento/incineração), foram utilizados preços de mercado para a disposição de resíduos desta natureza em aterros, tendo em vista que a incineração de RSU não é corrente no país. Segundo informações da Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (ABLP) e da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE),[24] os valores de disposição de RSU em aterros sanitários variam de R$35/t a R$ 70/t. Já para o depósito em aterros controlados, os valores cobrados giram em torno de R$25/t, a depender da região do país e das condições de operação do local. Com base nestes preços, para o estudo aqui desenvolvido, estipulou-se um valor mínimo (US$ 17,05/t); um valor médio US$ 28,41/t) e um valor máximo (US$ 42,61/t) para o preço de tratamento/incineração dos RSU.

Em função dos valores mínimo, médio e máximo para o preço da energia e da venda de serviços (tratamento/incineração), foram feitas três suposições para as fontes de receitas, considerando-se um cenário pessimista, um de referência e um cenário otimista, conforme é apresentado na Tabela 24 a seguir.

---

[20] Este valor refere-se aos contratos fechados em julho de 2010. Esta informação foi cedida, via telefone, pela área de comercialização de energia da Eletrobrás no dia 24.08.2010.
[21] Referente a cotação de R$1,76 (25.08.2010).
[22] Preço médio de compra e venda praticado no ambiente de contratação livre para energia 100% renovável no período de 25.08.09 a 20.08.2010 para contrato de 60 meses (fonte: < www.energiadireta.com.br> 25.08.2010).
[23] Valor médio contratado no 2º Leilão de Fontes Alternativas (A3), realizado em agosto de 2010). Fonte: www.ccee.org.br
[24] Informações obtidas através de contato com a instituição, por *e-mail*, em agosto de 2010.

Tabela 24: Estimativas das receitas do projeto - incineração

Variáveis	Suposições	Fonte de Receita	
		tratamento/incineração dos resíduos	**venda de energia**
Preço	Cenário pessimista	US$ 17,05/t	US$ 72,09/MWh
	Cenário de referência	US$ 28,41/t	US$ 83,73/MWh
	Cenário otimista	US$ 42,61/t	US$ 113,64/MWh
Receita	Cenário pessimista	US$ 3.410.000,00	US$ 5.766.935,00
	Cenário de referência	US$ 5.682.000,00	US$ 6.698.092,00
	Cenário otimista	US$ 8.522.000,00	US$ 9.090.782,00

Fonte: Elaboração própria.

- *Premissas sobre os desembolsos do projeto*

Os desembolsos do projeto consistem dos investimentos iniciais de capital e dos custos anuais para a operação e manutenção do sistema.

- *Parâmetros usados para análise econômica*

A avaliação econômica foi feita para um período de 20 anos (de 2007 a 2027). Determinou-se o período de 20 anos com base no período da garantia de contratação/aquisição de energia pela Eletrobras para projetos do PROINFA. Para a análise do valor presente líquido (VPL) usou-se a taxa de juros de 6%[25]. A taxa utilizada teve como referência a Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP) do Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), tendo em vista que o BNDES apoia projetos de geração de energia a partir de fontes alternativas no âmbito do PROINFA. Para efeito desta análise considerou-se que o projeto levantou 100% do capital necessário ao investimento junto a terceiros, sendo o Custo Médio Ponderado de Capital igual à taxa do BNDES.

Na Tabela 25 encontram-se resumidas as características da usina de incineração hipotética, objeto deste estudo. Em seguida, na Tabela 26, apresenta-se o quadro da análise econômica para o cenário de referência. A Tabela 27, por sua vez, mostra os resultados da análise de sensibilidade considerando-se os cenários otimista, de referência e pessimista anteriormente mencionados. A análise se concentra no comportamento da Taxa Interna de

[25] Esta taxa equivale ao valor da Taxa de Juros de Longo Prazo – TJLP (do BNDES) vigente no período de julho a setembro de 2010.

Retorno (TIR) em função das variações dos preços da venda da energia e de serviços (tratamento/disposição de RSU).

Tabela 25: Características da usina de incineração hipotética

Capacidade da Usina (t/ano)	200
Fator de Capacidade da Usina	0,80
Poder Calorífico dos RSU (MJ/kg)	9,00
Potência Instalada (MW)	11,42
Potência Útil (MW)	9,13
Produtividade de energia elétrica por tonelada de RSU (MWh/t)	0,50
Energia total produzida (MWh/ano)	79.996

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 26: Quadro de análise econômica para o cenário de referência – incineração

	Anos (1-10)									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
	(US$1.000,00)									
Receitas de serviços		5.682	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682
Venda de energia elétrica		6.698	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698
Receitas totais	**0**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**
Custos de operação		3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Manutenção civil		350	350	350	350	350	350	350	350	350
Manutenção de equipamento		1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375
Custos totais	0	4.725	4.725	4.725	4.725	4.725	4.725	4.725	4.725	4.725
Terreno	10.000									
Obras civis	35.000									
Equipamentos	55.000									
Custos de investimentos totais	**100.000**									
Despesas totais	**100.000**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**
Fluxo de Caixa Líquido	**-100.000**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**
	Anos (11-20)									
	11	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
Receitas de serviços	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682	5.682
Venda de eletricidade	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698	6.698
Receitas totais	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**	**10.678**
Custos de operação	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Manutenção civil	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Manutenção de equipamento	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375

Tabela 26: Quadro de análise econômica para o cenário de referência – incineração (continuação)

Custos totais	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**
Terreno										
Obras civis										
Equipamentos										
Custos de Investimentos totais	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
Despesas totais	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**	**4.725**
Fluxo de Caixa Líquido	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**	**5.953**
Taxa Interna de Retorno (TIR)	4,06%									
Valor Presente Líquido (VPL)	-13.758									

Fonte: Elaboração própria

Os resultados da análise mostram que o projeto é atraente apenas quando se aplicam preços diferenciados para energia e para a disposição e o tratamento dos resíduos (cenário otimista). O projeto não é atraente, inclusive com relação aos preços aplicados para a geração de energia produzida a partir de biomassa segundo a regulamentação do PROINFA, embora, neste caso, a TIR atinja um patamar mais próximo de 6% (taxa de retorno estabelecida). Deste modo, os dados mostram que a rentabilidade do projeto depende de preços diferenciados para a energia ou para o tratamento/disposição de resíduos. Um retorno superior é possível em caso de coincidência de ambas as circunstâncias.

Tabela 27: Análise de sensibilidade para o processo de incineração

Cenários	TIR (%)	VPL (US$1.000,00)
Pessimista	-1,62	-47.476
Referência	4,06	-13.758
Otimista	11,16	41.324

Fonte: Elaboração própria.

Outra análise de sensibilidade evidencia a forte dependência de uma planta de incineração em relação ao Poder Calorífico Inferior (PCI) dos resíduos sólidos urbanos. A Figura 36 apresenta o comportamento da TIR em função da variação do PCI a partir do cenário de referência. A Tabela 28 resume os resultados desta análise, evidenciando que quanto maior for o PCI, maior será a TIR e, portanto, melhor a atratividade do projeto.

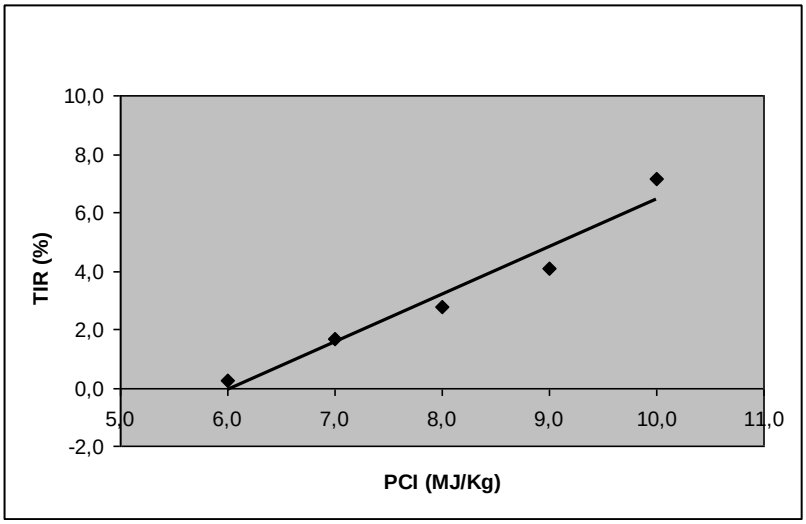


Figura 36: Análise de sensibilidade ao Poder Calorífico Inferior
Fonte: Elaboração própria

A alta sensibilidade dos custos de incineração (com recuperação de energia) em função do PCI e do preço da energia salienta a importância de uma profunda pesquisa sobre a composição dos resíduos. A demanda estável de resíduos sólidos urbanos pode, em alguns casos, ser fundamental para assegurar a viabilidade do projeto, daí a necessidade um sistema de gestão integrada de resíduos institucionalizado e maduro.

Tabela 28: Análise de sensibilidade para o processo de incineração variando-se o Poder Calorífico Inferior

PCI (MJ/Kg)	TIR (%)	VPL (US$1.000,00)
6	0,22	-37.730
7	1,66	-29.270
8	2,79	-22.219
9	4,06	-13.758
10	7,17	8.804

Nota: A partir do cenário de referência
Fonte: Elaboração própria.

5.1.1.2 Análise Econômica – Estudo de caso: Recuperação Energética a partir de Metano Gerado em Aterros Sanitários

Nesta etapa do trabalho é realizada uma análise econômica para um projeto hipotético de geração de energia a partir de gás de aterro.

- *Premissas sobre custos de investimento e O&M (operação e manutenção)*

A presente análise econômica foi elaborada a partir do estudo de caso de um projeto hipotético. A estimativa dos custos de investimentos e de O&M se baseou em dados do relatório técnico de viabilidade, realizado pelo Banco Mundial para o Aterro Sanitário de Muribeca, localizado no Estado de Pernambuco, próximo a Recife (BANCO MUNDIAL, 2005). O local é caracterizado como aterro controlado e não dispõe de um sistema ativo[26] de captação de gás. Assim, a opção por utilizar dados desse estudo deu-se em virtude de os custos de investimentos e os custos operacionais apresentados no documento serem típicos para esses casos, levando-se em conta que a maioria dos locais de disposição existentes no país tem estas características, ou seja, não possuem sistema ativo de coleta e queima de gás.

A capacidade instalada da usina objeto deste estudo de caso é de 7,42 MW, sendo o sistema constituído de sete motores de combustão interna de 1,06 MW cada. Para operar com capacidade total seriam necessários aproximadamente 4.485 m3/h de gás de aterro,[27] O Fator de Capacidade (FC) assumido foi de 0,9.[28]

As estimativas apresentadas incluem os custos de construção do sistema de coleta e queima de gás (poços de drenagem de gás, cabeçote, tubulação lateral, gestão do condensado, instalação de uma estação de ventilação e de queima), que corresponde a 40% do total do investimento, e os custos para a geração elétrica (motor de combustão interna), representando 60% do investimento. A estimativa de custo total de investimento é de US$ 10.850.000.

Quanto aos custos anuais de operação e manutenção (O&M) do sistema de coleta e queima de gás e da usina de geração de energia estimou-se que estes correspondem a cerca de 10% do valor total do investimento, ou seja, US$ 1.333.000. Estes custos compreendem mão de obra, testes, manutenção de rotina e reparações.

- *Premissas sobre as receitas do projeto*

As receitas deste projeto correspondem à venda da energia. Para o estabelecimento do preço da venda de energia foram utilizadas as mesmas três alternativas do estudo anterior, ou seja: i) a usina hipotética, objeto do estudo de caso, em concordância ao disposto na Lei

[26] No sistema ativo, que compreende a instalação de compressores, sopradores e *flare*, a eficiência de coleta de gases produzidos no aterro pode chegar a 80% e a eficiência de queima de metano pode atingir 98%.
[27] Projeto Muribeca, Pernambuco, Brasil – Relatório Técnico de Estudo de Viabilidade preparado pelo Banco Mundial.
[28] A suposição deste valor para o Fator de Capacidade teve como referência os projetos do Aterro Bandeirante e São João, cujos sistemas são semelhantes e operam com o FC de 0,9.

10.762/2003, participaria do PROINFA. Assim, toda a energia gerada teria garantia de compra pela Eletrobras ao valor econômico da tecnologia de geração de biomassa (R$ 126,88/ MWh[29] ou US$ 72,09[30]/MWh); ii) a usina venderia a energia no mercado de contratação livre, como fonte de energia renovável, ao valor de R$ 200,00[31]/MWh (US$ 113,64/MWh); iii) a planta comercializaria a energia nos leilões promovidos pela ANEEL no âmbito das Leis 10.848/04 e 11.934/09, ao valor de 147,37/MWh (US$ 83,73/MWh).[32] Considerando-se as três alternativas, o estudo determinou um valor mínimo, US$ 72,09/MWh; um valor médio, US$ 83,73/MWh; e um valor máximo, US$ 113,64/MWh, para o preço da energia.

Em função dos valores mínimo, médio e máximo para o preço da energia foram feitas três suposições para as fontes de receitas, em que se considerou um cenário pessimista, um de referência e um cenário mais otimista, conforme apresentado na Tabela 29.

▪ *Premissas sobre as despesas do projeto*

As despesas do projeto são: i) investimento inicial de capital para o sistema de coleta de gás e implantação da usina; ii) custo anual para a operação e manutenção do sistema de coleta de gás e expansão do sistema de coleta; e, iii) compra de gás do proprietário do aterro.

Para o estabelecimento do preço da compra do gás foram avaliadas três situações: i) a empresa que implanta o sistema de captura e uso de gás é a proprietária do aterro, portanto, considerou-se o custo zero;[33] ii) o valor do preço de compra do gás é balizado pelo valor do gás natural. De acordo com o estudo realizado para o projeto de Caeiras, o valor do gás de aterro é 16% mais barato que o gás natural.[34] Considerou-se o valor de R$ 0,6/MMBTU (US$ 0,34 MMBTU) para o gás natural. Assim, segundo esta alternativa, o valor para a compra do gás de aterro seria de R$ 0,5/MMBTU (US$ 0,28 MMBTU); iii) noutra alternativa, no contexto do MDL, a empresa pagaria para o proprietário um percentual dos créditos de carbono. De acordo com Banco Mundial (2005) este percentual varia de 10% a 30%. Neste

[29] Este valor refere-se aos contratos fechados em julho de 2010. Esta informação foi cedida, via telefone, pela área de comercialização de energia da Eletrobrás no dia 24.08.2010.
[30] Referente a cotação de R$1,76 (25.08.2010).
[31] Preço médio de compra e venda praticado no ambiente de contratação livre para energia 100% renovável no período de 25.08.09 a 20.08.2010 para contrato de 60 meses. Fonte: www.energiadireta.com.br
[32] Valor médio contratado no 2º Leilão de Fontes Alternativas (A3), realizado em agosto de 2010). Fonte: www.ccee.org.br
[33] Isto não foi o que aconteceu nos dois projetos em operação no país (Projeto Aterro Bandeirante e Aterro São João). Nos dois casos a empresa que implantou o sistema de geração de energia não é a mesma que gerencia o aterro.
[34]Documento de Concepção de Projeto. Redução de Emissões de Gás de Aterro, Caeiras, SP, 2004.

caso, assumiu-se um percentual de 20% representado por R$ 1,23/MMBTU (US$0,7 MMBTU).

Em função dos valores mínimo, médio e máximo do preço para a compra de gás, foram feitas três suposições para as despesas, em que se considerou um cenário pessimista, um de referência e um cenário mais otimista, conforme é apresentado na Tabela 29 abaixo.

Tabela 29: Estimativas das receitas e despesas do projeto hipotético de geração de energia a partir de gás de aterro

Variáveis	Suposições	Receitas	Despesas
		Venda de energia	**Compra de gás**
Preço	Cenário pessimista	US$ 72,09/MWh	US$0,7 MMBTU
	Cenário referência	US$ 83,73/MWh	US$ 0,28 MMBTU
	Cenário otimista	US$ 113,64/MWh	0,0
Receita/ despesas	Cenário pessimista	US$ 4.218.476	US$ 484.428
	Cenário referência	US$ 4.899.612	US$ 193.171
	Cenário otimista	US$ 6.649.849	0,0

Nota: Consumo do motor 79MMBTU/h.[35]
Fonte: Elaboração própria.

▪ *Parâmetros usados para análise econômica*

A avaliação econômica foi feita para um período de 20 anos (de 2007 a 2027). Determinou-se o período de 20 anos com base no período da garantia de contratação pela Eletrobrás para projetos do PROINFA. Para a análise do valor presente líquido (VPL) usou-se a taxa de juros de 6%.[36] A taxa utilizada teve como referência a Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP), do Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), tendo em vista que o BNDES apoia projetos de geração de energia a partir de fontes alternativas no âmbito do PROINFA. Foi considerado 100% de capital de terceiro, sendo o Custo Médio Ponderado de Capital igual à taxa do BNDES. A seguir, na Tabela 30, encontra-se o quadro da análise econômica para o cenário de referência. Já na Tabela 31 são mostrados os resultados da análise de sensibilidade considerando-se os cenários: otimista, de referência e pessimista, anteriormente referenciados. A análise fixa-se sobre o comportamento da Taxa Interna de Retorno (TIR) em função das variações dos preços da venda da energia e dos gastos com a compra de gás.

[35] Com base nos dados no Relatório de Pré-viabilidade para Recuperação de Biogás no Aterro Muribeca, Pernambuco, Brasil- Banco Mundial, 2005.
[36] Valor da TJLP no período de julho a setembro de 2010.

Tabela 30: Quadro de análise econômica para o cenário de referência – digestão anaeróbia em aterro sanitário

	Anos (1-10)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	(US$1.000,00)									
Venda de energia elétrica		4.899	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899
Receitas totais	**0**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**
Despesas com compra de gás		194	194	194	194	194	194	194	194	194
O&M do sistema de coleta do gás		354	354	354	354	354	354	354	354	354
O&M da usina de geração de energia		979	979	979	979	979	979	979	979	979
Custos totais de exploração		1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527
Custos de implantação do sistema de coleta de gás	3.550									
Custos de implantação da usina	7.300									
Custos de investimentos totais	**10.850**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
Despesas totais	**10.850**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**
Fluxo de Caixa Líquido	-10.850	3373	3373	3373	3373	3373	3373	3373	3373	3373
	Anos (11-20)									
	11	12	13	14	15	16	1 7	18	1 9	20
Venda de eletricidade	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899	4.899
Receitas totais	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**	**4.899**
Despesas com compra de gás	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194
O&M do sistema de coleta do gás	354	354	354	354	354	354	354	354	354	354
O&M da usina de geração de energia	979	979	979	979	979	979	979	979	979	979
Custos totais de exploração	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527
Custos de investimentos totais	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
Despesas totais	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**	**1527**
Fluxo de Caixa Líquido	3373	3373	3373	3373	3373	3373	3373	3373	3373	3373
Taxa Interna de Retorno (TIR)	30,90%									
Valor Presente Líquido (VPL)	25.268									

Fonte: Elaboração própria.

Nos três cenários avaliados, o projeto mostrou-se atraente do ponto de vista do investidor. Ou seja, a TIR encontrou-se acima dos 6% estabelecidos para a taxa de retorno. Ressalte-se que a prática de preços mais elevados do que os utilizados nas situações estudadas

pode melhorar a TIR. Para tanto, pode haver casos particulares, como a produção descentralizada de energia, que reduz o esforço de transmissão a longas distâncias, e outros casos especiais, como a venda direta para consumidores industriais ou a produção para consumo próprio.

Tabela 31: Análise de sensibilidade para o processo digestão anaeróbia em aterro sanitário

Cenários	TIR (%)	VPL (US$1.000,00)
Pessimista	26,28	20.138
Referência	30,90	25.268
Otimista	48,98	45.732

Fonte: Elaboração própria.

5.1.2 Aspectos Ambientais e de Regulamentação

A maior contribuição com a implantação de projetos de recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos, quando se trata de sustentabilidade ambiental, está relacionada ao esforço global no combate à mudança climática. Esta contribuição se verifica tanto em plantas de incineração com vistas à recuperação de energia, quanto na recuperação de metano gerado em aterros. Isto porque, no primeiro caso, deixa-se de lado a prática de aterramento (através da qual são gerados os gases de efeito estufa) e opta-se por geração de energia por fonte advinda de uma fonte renovável. No segundo caso, minimiza-se a emissão de poluentes com a geração de energia a partir do metano.

Não obstante, efeitos concretos sobre a redução dos impactos negativos ao meio ambiente, provenientes da disposição inadequada dos resíduos sólidos, também podem se verificar. Isto decorre do fato de que a instalação e operação de qualquer sistema de tratamento de resíduos, quando respeitadas as normas técnicas e a legislação ambiental vigentes, por si só já representam um compromisso com a mitigação dos impactos ambientais locais.

Já que no diz respeito aos impactos locais de emissão de poluentes, o processo de incineração de RSU gera grandes volumes de gases de combustão. Estes gases, por sua vez, transportam produtos da combustão incompleta dos resíduos com uma carga significativa de poluentes (que dependem da composição dos resíduos e das condições de combustão). Os principais poluentes são materiais particulados, dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de

nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), cloreto de hidrogênio (HCl), dioxinas, furanos e hidrocarbonetos aromáticos.

Vale observar que esses poluentes podem ser removidos através de tecnologias de tratamento. Os sistemas de tratamento mais utilizados são: precipitadores eletrostáticos; filtros manga e alguns tipos de catalisadores. A seleção do sistema de tratamento, por sua vez, vai depender dos limites de emissão exigidos no local. Neste sentido, os diferentes sistemas podem ser agrupados em controle de emissão básico, médio ou avançado, e os custos de investimentos nesses equipamentos vão variar em função do nível de controle adotado. Geralmente, os limites de emissão se baseiam na qualidade do ar do local.

No Brasil, especificamente no Estado de São Paulo, foi publicada a Resolução SMA-079 (04.11.2009) que estabelece diretrizes e condições de operação e licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em usinas de recuperação de energia. A Resolução define os limites de emissão para particulados em 10mg/Nm^3, já para NO_x limita a emissão em 200 mg/Nm^3. Em nível Federal, a Resolução CONAMA 316 (29.10.02) regula os limites de emissão para os sistemas de tratamento térmico de resíduos. Além dos poluentes aéreos, a disposição das cinzas resultantes da combustão também é um fator crítico em função da periculosidade destes resíduos e como conseqüência dos custos elevados para sua disposição final.

Quanto à emissão que ocorre devido à digestão anaeróbia de aterros, os gases produzidos e liberados para a atmosfera contêm compostos orgânicos voláteis e sulfeto de hidrogênio, além de metano, dióxido de carbono e outros compostos em menor porcentagem. Entretanto, não existem no país regulamentações que estabeleçam limites de emissões para gases liberados em aterro. Ressalta-se que neste contexto é que os projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) têm sido viabilizados no país, ou seja, sendo a recuperação de metano em aterros uma prática espontânea, não imposta por leis. Contudo, para os equipamentos dedicados à geração de energia através do metano, esses limites de emissão devem ser respeitados. A EPA (2007) publicou um documento com referência de emissão de NO_x para cada tipo de tecnologia de geração, cujos resultados estão apresentados na Tabela 32 a seguir. No Brasil, a Resolução CONAMA 003 (28.06.90) estabelece os padrões de qualidade do ar.

Tabela 32: Emissão de NO_x por tecnologia de conversão

Tecnologia de conversão	Emissão de NO_x (ppm)
Motor de combustão interna	250 - 3000
Turbina a gás	35 - 50
Microturbinas	< 9

Fonte: EPA (2007).

5.1.3 Aspectos Socioeconômicos

A aceitação da população é fundamental no processo de instalação de plantas de geração de energia a partir de resíduos. Questões como o tráfego, odor, ruído, poluição do ar, poluição visual e outros riscos percebidos à saúde desempenham um papel importante na aceitação de tais projetos pelo público. Neste aspecto a escolha adequada do local para a instalação da planta é essencial para a viabilização do projeto, inclusive em termos legais.

Com relação à utilização de área, projetos que envolvam a implantação de aterros necessitam de uma quantidade de área bem maior do que aquela necessária para a instalação de um incinerador. Ressaltando-se que os incineradores podem ser uma ótima solução para os municípios de grande porte e com restrição de áreas, já que os aterros exigem uma área de instalação muito maior.

Além disso, em geral, os sistemas que geram quantidades importantes de oportunidades de emprego são mais susceptíveis à aceitação por parte da população local. Como conseqüência, o treinamento de profissionais para a operação e manutenção dos equipamentos possibilita a abertura de um mercado nacional propício ao estabelecimento de fabricantes de equipamentos no Brasil.

Outra contribuição importante que a implantação de sistemas desta categoria traz é o exercício de atividade econômica relacionada ao manejo dos resíduos sólidos e incentivada por meio da implantação ou ampliação de um sistema de coleta seletiva maduro, que envolva a agregação de valor aos materiais, o que pode (e deve) ocorrer quando da implantação de ambos os sistemas.

Cabe ainda destacar que o processo de incineração de RSU leva vantagem sobre os aterros, sobretudo em regiões onde haja restrições de áreas disponíveis, como no caso de

grandes cidades ou regiões metropolitanas. Porém, no caso do Brasil, a aplicação precisa ser vista com ressalvas e a implantação de projetos necessita de estudos criteriosos em função das características dos resíduos, e, principalmente, da prática de gestão de resíduos que se verifica no país. Isto porque o sistema é fortemente dependente das características dos resíduos (PCI) e da regularidade de alimentação da planta. As questões ambientais associadas com o sistema de incineração implicam sistemas caros. Todos esses fatores têm efeito negativo sobre a utilização das tecnologias de incineração de resíduos com vistas à recuperação de energia aplicadas para o Brasil.

5.2 Gargalos no Processo de Implantação de Projetos Brasileiros de Geração de Energia a partir de RSU

Através dos números diagnosticados, de entrevistas e vistas técnicas realizadas no decorrer do presente trabalho, contatou-se que os gargalos existentes para a implantação de projetos de geração de energia a partir de RSU no país passam por aspectos políticos, técnicos, econômicos e socioculturais.

Um dos principais entraves à implantação deste tipo de projeto é a inexistência de uma política nacional de resíduos sólidos. Ou seja, a problemática sobre os resíduos não está equacionada no país no que diz respeito a questões básicas, como saúde pública e contaminação dos meios físicos, o que torna a perspectiva do uso de RSU como recurso energético restrita a poucos municípios/ regiões.

A ausência de regulamentações que obriguem os gestores a implantar sistemas de captação de metano em aterros também colabora para o desinteresse de empresários no sentido de empreenderem projetos dessa natureza, haja vista que a imensa maioria de projetos de MDL (apresentados na Tabela 17 deste texto) se dá em função da simples queima de *flare*.

O valor pago pelas prefeituras para o tratamento/disposição final dos resíduos é baixo se comparado com o que pagam outros países, onde as usinas termelétricas movidas a RSU são comuns. No Brasil, esse valor varia de R$ 35,00/t (US$ 20,00/t) a R$ 70,00/t (US$ 43,00/t)[37]

[37] Ibidem, p.132.

dependendo da região do país. Nos EUA, por exemplo, este valor oscila entre US$ 50,00 e US$ 80,00/t[38], dependendo da região do país.

O preço da energia também é um fator importante. No Brasil, a Portaria nº 45/2004, do Ministério de Minas e Energia (MME), estabeleceu valores econômicos correspondentes às tecnologias de geração de energia específicas, com base em 01 de março daquele ano. Foram também definidos pisos em função de percentuais distintos aplicados a cada fonte. No caso de biogás de aterro sanitário o valor econômico e o piso estabelecido foram respectivamente de R$169,08/MWh e R$ 83,8/MWh. Segundo informações do setor de comercialização da Eletrobrás, até o ano de 2010, nenhum projeto de biogás de aterro havia sido inscrito no âmbito do PROINFA. A definição desses valores torna o investimento em tecnologias de geração de energia não competitivas, como as estudadas, pouco atrativas ao produtor independente.

Além disso, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) financia, com suporte do Banco Nacional de Desenvolvimento Social (BNDES), 70% do investimento (os outros 30% do projeto têm que ser garantidos pelo investidor), mas exclui bens e serviços importados, o que aumenta os custos de investimentos devido às linhas de financiamentos não subsidiadas.

A falta de política de incentivo às fontes de geração de energia baseadas em tecnologias não amadurecidas/estabelecidas (no país) e que estejam fora do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), como no caso da incineração, também se apresenta como um gargalo para o desenvolvimento de projetos de geração de energia a partir de resíduos.

No caso particular da incineração há outro conflito com relação à definição do combustível utilizado para queima de resíduos sólidos urbanos (RSU). Se o processo for considerado como queima de biomassa, deverá haver um processo de separação de materiais, retirando-se plásticos, por exemplo. Em contrapartida, haverá uma diminuição do PCI. Por outro lado se a queima dos resíduos ocorrer em estado bruto, outros recursos estão sendo

[38] Informações recebidas através de empresas do segmento: *Waste Management* e *Environmental Solution, INC.*

queimados, não somente a biomassa. Este também é um aspecto que dificulta o enquadramento do processo de incineração de RSU no PROINFA.

Outro obstáculo importante é a questão ambiental no transcurso do processo de licenciamento. Ou seja, os processos são morosos, e os empreendimentos ligados à disposição/tratamentos de resíduos não são bem aceitos culturalmente pela população, o que implica grande risco ao empreendedor. No caso da instalação de novos aterros, a seleção por áreas para implantação é cada vez mais difícil em função das características do empreendimento confrontadas com as exigências legais.

Por fim, ressalta-se que a falta de políticas públicas para o setor acarreta na sua desinformação por parte das prefeituras, as quais, por sua vez, são as responsáveis pela gestão dos resíduos.

5.3 Diretrizes para Elaboração de Projetos com Vistas à Recuperação de Energia de RSU

A situação dos resíduos sólidos no Brasil, retratada no presente estudo, reflete o modo como a gestão de resíduos sólidos urbanos vem sendo conduzida no país. Os números apresentados evidenciam a lacuna deixada pela falta de uma política nacional de resíduos sólidos, uma vez que, entre outros problemas, mais de 20% dos RSU gerados no Brasil diariamente são depositados em vazadores ou lixões a céu aberto.[39] Os resultados desta falta de política de tratamento dos RSU se refletem em poluição atmosférica, contaminação de solo, de água e, no contexto do presente trabalho, reflete-se também em desperdício, sobretudo de energia.

De acordo com a última contagem divulgada pelo IBGE,[40] o Brasil tem uma população de cerca de 180 milhões habitantes, distribuídos em 5.565 municípios. Juntos, estes municípios produzem aproximadamente 170 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia (dados estimados pela autora a partir da contagem populacional), sendo a Região Sudeste responsável por mais de 40% do total dos resíduos produzidos no país. Estimativas realizadas neste estudo apontam um potencial de geração de energia, a partir de resíduos urbanos

[39] PNSB (2000).
[40] Contagem Populacional, IBGE (2007).

produzidos no Brasil, da ordem de 16 GW (utilizando o processo de incineração) ou 5,8 GW (pela digestão anaeróbia em aterros).

Entretanto, se restringirmos esse potencial aos municípios da Região Sudeste com mais de 500 mil habitantes, o total de geração de energia é da ordem de 4 GW (pelo processo de incineração) ou 954 MW (pela digestão anaeróbia em aterros). Tal geração representaria, respectivamente, 3,5% e 0,8% da matriz elétrica nacional, tendo como referência os dados do Banco de Informação sobre Geração (BIG), de agosto de 2010.

Considerando-se este potencial como teórico, as diretrizes propostas a seguir visam a contribuir com os conhecimentos gerais necessários à avaliação/adequação de projetos com vistas à recuperação de energia de RSU, a partir do cenário corrente de gestão de resíduos sólidos no país.

De acordo com o que foi analisado anteriormente, as tecnologias mais importantes de conversão de resíduos em energia são as baseadas em métodos biológicos ou térmicos. As tecnologias propostas neste estudo são: digestão anaeróbia de aterros e a incineração. A primeira proposição tecnológica considerada é a prática atual de gestão de resíduos no país, que é fundamentada em aterramento (ou seja, a deposição dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários). A segunda proposição tecnológica, a incineração, é feita em função do desenvolvimento maduro desta tecnologia e de sua grande aplicabilidade já testada em outros países.

5.3.1 Diretrizes Quanto à Identificação das Fases do Projeto

Embora seja possível pensar várias outras subdivisões nesse caso, vale a pena considerar quatro fases quando se trata projetos de geração de energia a partir de RSU. Estas fases são: i) identificação do problema (diagnóstico da situação); ii) avaliação de opções tecnológicas; iii) avaliação da viabilidade técnico-operacional, ambiental e econômica; e iv) implantação.

i) Fase de identificação do problema

A fase de identificação dos problemas se caracteriza pela realização do diagnóstico da situação-problema. Nesta fase deve ser avaliada a situação dos resíduos sólidos no município

ou região onde se pretenda estabelecer uma planta para a recuperação de energia a partir de resíduos. Deve-se fazer previamente um levantamento sobre a gestão dos resíduos, incluindo a quantidade gerada e os locais utilizados para a disposição final.

ii) Fase de avaliação de opções tecnológicas

Para a seleção da tecnologia a ser empregada, alguns critérios necessitam ser avaliados/ponderados. Esses critérios compreendem as características dos resíduos, incluindo composição gravimétrica, porcentagem de umidade, Poder Calorífico Inferior (PCI) e fluxo de geração, além de fatores ambientais, custos e aspectos socioeconômicos.

A quantidade e as características dos resíduos disponíveis para tratamento, de fato, são fatores importantes a se considerar. Isso porque essa quantidade irá decidir a capacidade da planta para a recuperação de energia e o tipo de tecnologia a ser empregada. As características dos resíduos, por sua vez, serão determinantes para o potencial de energia disponível. O sistema de incineração, por exemplo, é altamente sensível ao PCI dos resíduos sólidos urbanos. Assim, a implantação bem-sucedida de projetos de recuperação de energia a partir de resíduos demanda um sistema eficiente de gestão de resíduos.

Para o processo de incineração, em certos casos, deve-se considerar se que haverá necessidade de um pré-tratamento/pré-seleção dos resíduos, com objetivo de otimizar ou mesmo viabilizar a operação do sistema. Em situações nas quais a escala de operações de uma unidade individual é pequena, em função do porte do município ou da população atendida, a regionalização de estações de tratamento deve ser levada em conta, com vistas a viabilizar o projeto de aproveitamento energético.

iii) Avaliação da viabilidade técnico-operacional, ambiental e econômica

Na fase de avaliação da viabilidade técnico-operacional e ambiental, esta deve ser feita através da estimativa de quantidade de resíduos e de sua composição, com vistas a determinar o seu poder calorífico. A capacidade da planta deve ser dimensionada em função do fluxo de resíduos/geração de gás.

A localização do empreendimento é um aspecto importante, tanto do ponto de vista de gastos com transporte dos resíduos, quanto do ponto de vista das questões ambientais. Deve-se considerar o zoneamento ambiental do município e avaliar as possíveis restrições ambientais para a instalação do empreendimento, por exemplo, a existência de núcleo populacional próximo ao local.

A viabilidade do empreendimento também tem que ser analisada/avaliada quanto à questão da venda da energia gerada. É preciso verificar as opções para o destino da energia: se a produção será para consumo próprio; direcionada para um consumidor final, ou ainda se fornecida diretamente à rede.

É também preciso que se faça uma análise financeira para determinar a viabilidade econômica do projeto. Nessa análise devem estar inclusos: custos com equipamentos; custos com mão de obra; receita dos serviços de disposição ou incineração; e receita da venda de energia. Há outras questões que devem ser consideradas, como:

▪ informações sobre uso e ocupação do solo e avaliação de alternativas locacionais para instalação da planta. Ou seja, para se definir o local de instalação devem-se levantar alternativas considerando-se as vocações predefinidas no zoneamento ambiental do município (quando existir) e as restrições de caráter socioambiental.;

▪ informações sobre o segmento de resíduos. Neste caso, devem-se identificar as alternativas existentes no mercado regional para a realização do tratamento/disposição dos RSU e também se devem levantar os valores praticados na região para a execução destes serviços;

▪ identificação de partes interessadas no serviços de tratamento/disposição dos resíduos e na compra de energia, bem como identificação do padrão de consumo desses usuários. Isto significa verificar junto às prefeituras qual a demanda deste tipo de serviço e diagnosticar a existência de indústrias próximas à planta que poderiam utilizar a energia gerada;

▪ identificação sobre o sistema de gestão de resíduos existente. É importante saber se há ou não sistema de coleta seletiva, sobretudo nos sistemas de incineração.

iv) Fase de implantação

Na fase de implantação deve estar contemplado o contrato de prestação de serviço, ou seja, contrato da prestação dos serviços de disposição/tratamentos dos RSU e o contrato de venda de energia para concessionária ou diretamente para os usuários finais. Nesta fase também deve ser iniciado o processo de licenciamento ambiental junto ao órgão competente, incluindo o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). Por fim, devem ser identificadas quais as fontes de financiamentos, e algumas são apresentadas no item 5.3.7.

5.3.2 Diretrizes para a Geração de Energia a partir de Gás de Aterros

A identificação de alternativas de captura e uso do gás metano gerado nas áreas de disposição final varia em função do porte, da estrutura física, das condições de operação de cada área, do tempo de disposição dos resíduos e da disponibilidade de recursos financeiros. Para tanto, alguns parâmetros devem ser avaliados, sendo os mais importantes: i) fluxo de metano e ii*)* técnicas operacionais do aterro.

i) Fluxo de metano:

Para estimativa de fluxo de metano, deve ser conhecido o histórico de disposição de resíduos no aterro. Caso não haja tais dados, pode ser feita uma estimativa a partir do fluxo atual de resíduos e de uma taxa média de variação da geração (crescente no tempo), desde a sua abertura até o fechamento. Ainda, caso não se conheça nem o fluxo atual de resíduos, pode-se fazer uma estimativa a partir da população atendida pelo serviço de coleta de resíduos e da taxa de geração individual de resíduos. Sendo assim, as estimativas de fluxo de metano podem ser calculadas com base em dados populacionais ou a partir de informações sobre o aterro. Existem vários modelos utilizados para o cálculo do fluxo de metano. Seguem, aqui, duas sugestões: LANDGEM[41] e BIOGÁS.[42]

[41] LandGEM: Landfill Gas Emissions Model – versão 3.02 – U.S. Environmental Protection Agency.
[42] Biogás: geração e uso energético – aterros – versão 1.0 – CETESB, Secretaria do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <http:www.cetesb.sp.gov.br>.

ii) Técnicas operacionais do aterro

Deve ser realizada uma avaliação a respeito das técnicas operacionais praticadas no local. É preciso avaliar a eficiência de cobertura e captação de coleta de gás, que varia em função do tipo de cobertura utilizada no aterro e do sistema de coleta implantado.

5.3.3 Diretrizes Quanto às Opções de Uso do Gás do Aterro

Quanto à opção de uso direto do gás de aterros, várias são as formas de fazê-lo, sem que, inclusive, haja necessidade de pré-tratamento. Cada uma apresenta suas vantagens e desvantagens, dependendo geralmente da localização específica do aterro e da distância dos usuários finais. A maior vantagem do uso direto do gás de aterro é a simplicidade dos sistemas. A desvantagem é encontrar usuários finais nas proximidades do aterro. A queima direta do gás em uma caldeira para a produção de vapor ou para a geração de calor apresenta muitas vantagens quando esta opção é viável. Se for identificado um usuário próximo, a vantagem desta tecnologia é que ela é simples e há pouca necessidade de limpeza do gás. Isto pode reduzir o custo de investimento do projeto. Dependendo do local onde o aterro esteja localizado, é viável a instalação de um centro de trabalho com a disponibilização de água quente, vapor ou calor, estimulando a vinda de pequenos negócios que envolvam esses recursos.

O gás de aterro também poder ser utilizado para uso direto para evaporar o chorume[43] *in situ*. Geralmente o tratamento do chorume antes de seu despejo em corpos d'água é alternativa onerosa. Entretanto, o primeiro ponto a ser analisado é se o aterro gera gás suficiente para a evaporação. Há equipamentos disponíveis comercialmente com capacidade de operação variáveis.[44]

No que diz respeito à opção de geração de energia elétrica a partir do gás de aterro, esta é uma alternativa para quando o uso direto não é viável ou efetivo. As vantagens da geração de energia elétrica incluem a possibilidade de transmissão a longas distâncias, a disponibilidade de tecnologias para praticamente qualquer tamanho de aterro e a alta

[43] Todos os aterros geram *chorume*, apesar da quantidade variar dependendo de diversos fatores. A cobertura superior e a drenagem de águas pluviais afetam a quantidade de água que atinge os resíduos e a eficiência da camada impermeabilizante do fundo contribui para a quantidade de chorume coletado.
[44] Fonte Ecologix Environmental Systems

eficiência energética, especialmente quando a geração de eletricidade é feita em combinação com a geração de calor (ciclo combinado). As desvantagens são o maior investimento de capital e a necessidade de pré-tratamento do gás. As principais opções tecnológicas para geração de energia são os motores de combustão interna, ou microturbinas e turbinas a gás. A seguir são descritas, sucintamente, as principais características destas opções.

Os motores de combustão interna existem comercialmente como unidades modulares, variando de 0,5 MW a 3,0 MW por unidade (a depender do fornecedor). Os motores de combustão interna têm um custo de capital comparativamente mais baixo por kW e uma eficiência maior do que as de turbinas a gás de acordo com EPA (2007). A natureza modular dos sistemas de motores proporciona flexibilidade, possibilitando a expansão do sistema. As desvantagens desta tecnologia incluem maiores custos de manutenção do que para as turbinas a gás e uma exigência de pessoal de manutenção especializado. Os gases de exaustão podem conter alguns produtos de combustão incompleta e há um alto consumo de óleo lubrificante.

Já as microturbinas são pequenas turbinas que operam na faixa de 30kW de potência, utilizando o mesmo princípio de funcionamento das turbinas a gás de maior porte. As microturbinas são equipamentos muito eficientes e possuem baixas emissões de dióxido de enxofre e óxidos nitrosos. As microturbinas são muito sensíveis a impurezas, tornando-se necessária a utilização de equipamentos de limpeza do gás, o que incrementa os custos do sistema.

As turbinas a gás, por sua vez, têm aplicação para aterros com taxas de produção de gás maiores, mais estáveis. As turbinas a gás são geralmente maiores do que os motores de combustão interna com produção de energia elétrica variando de l MW a 8 MW para cada unidade. Também oferecem flexibilidade de expansão modular para atender a mudanças na produção do gás gerado. Estas geralmente têm um custo de capital maior e eficiência menor em comparação com motores de combustão interna. No entanto, elas geralmente apresentam custos de operação e manutenção mais reduzidos se comparados aos motores de combustão interna. Além disso, esses equipamentos oferecem flexibilidade para proceder diretamente à opção de ciclo combinado.

5.3.4 Diretrizes quanto à Geração de Energia a partir de Incineração de RSU

A unidade de incineração pode fornecer a energia a partir da queima dos RSU sob a forma de calor ou energia, a depender da demanda local. O sistema pode trabalhar de duas maneiras: com a queima do resíduo “como recebido”, consistindo de uma massa heterogênea, ou através da queima de resíduos pré-tratados e homogeneizados. A queima de resíduos pré-tratados e homogeneizados exige redução de tamanho, fragmentação e triagem manual.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) dos resíduos deve ser pelo menos 6 MJ/Kg, independentemente das variações sazonais, sendo que a média anual do PCI não deve ser inferior a 7 MJ/Kg de acordo com Banco Mundial (1999). Além disso, a quantidade anual de resíduos a incinerar não deve ser inferior a 50 mil toneladas.

O tipo de caldeira utilizada para a recuperação de energia depende do uso final que se deseja, ou seja, se o uso da energia será para aquecimento de água, para calor de processo ou para a geração de energia elétrica. As soluções mais comuns para a recuperação de energia a partir da incineração de RSU são: i) caldeira de água quente para produção apenas de calor; ii) caldeira de baixa pressão para produção de vapor; e, iii) ciclo combinado, que reúne produção de energia com a de calor ou de vapor. São apresentadas a seguir as principais características dessas opções.

A caldeira de água quente consiste em um sistema bastante simples, com custos de operação e manutenção relativamente baixos, quando comparada a outros sistemas. A utilização deste tipo de energia geralmente é aplicada para aquecimento residencial. Já a caldeira de vapor de baixa pressão é semelhante ao sistema da caldeira de água quente em termos de complexidade do sistema. Neste caso, as indústrias com demandas de processo de vapor devem estar localizadas perto da usina para impedir perda de calor extenso e eliminar a necessidade de gasoduto.

Quanto ao sistema de ciclo combinado (geração simultânea de vapor e energia elétrica) também conhecido como cogeração, o vapor gerado é expandido em uma turbina e ao sair é totalmente condensado. Na cogeração, a expansão de vapor se dá até uma pressão intermediária (normalmente 3 atm) e, ao sair da turbina, é enviado para a unidade consumidora desse vapor. O condensado gerado pela unidade é retornado à usina de incineração e o rendimento energético de uma usina operando em cogeração pode atingir

85%. Este rendimento é bem maior que uma unidade com geração exclusiva de energia elétrica, que atinge cerca de 35%.

5.3.5 Diretrizes quanto às Estratégias para Implantação

Para facilitar e aumentar as chances de sucesso no processo de implantação de projetos de geração de energia a partir de RSU são sugeridas algumas estratégias que devem ser adotadas pela iniciativa pública em parceria com o empreendedor:

▪ estabelecer parcerias entre prefeituras, universidades e centros de pesquisa para a obtenção de subsídios técnicos para realização de estudos confiáveis sobre os resíduos produzidos na cidade, além de parcerias com o setor privado, a fim deste contribuir com subsídios para viabilização dos projetos;

▪ incentivar a formação de consócios intermunicipais para a discussão dos problemas relacionados aos resíduos produzidos na região, promovendo benefícios para motivar os municípios a aceitarem sistemas de tratamento e disposição de resíduos em seus territórios com vistas à recuperação energética;

▪ incentivar os municípios a levantar dados sobre a situação de resíduos sólidos dentro de seus territórios, fornecendo recursos financeiros àqueles que apresentarem planos/projetos visando à recuperação energética dos RSU;

▪ utilizar os serviços de Organizações Não Governamentais (ONGs) para criar a consciência entre os municípios menores sobre projetos de geração de energia a partir de resíduos;

▪ fornecer apoio técnico e financeiro através de consultoria para a elaboração de projetos de geração de energia a partir de resíduos;

▪ promover incentivos governamentais para parcerias entre o setor privado e público;

▪ incentivar a regionalização dos resíduos gerados em cidades menores para alcançar economia de escala;

▪ fomentar a formação de fóruns compostos por representantes dos diversos setores da sociedade (governo municipal, comitê de bacias, consórcio intermunicipal e sociedade civil organizada), com o objetivo de elaborar propostas para os resíduos sólidos gerados no município;

▪ promover junto às prefeituras a difusão de informações sobre programas de recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos utilizando-se de *workshops* e programas de formação e capacitação profissional.

5.3.6 Diretrizes quanto ao Processo de Licenciamento Ambiental

O processo de licenciamento ambiental é um procedimento administrativo no qual o órgão ambiental competente analisa a localização, instalação e operação de empreendimentos e de atividades que utilizam de recursos ambientais e que sejam, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras. Neste contexto, os projetos de geração de energia a partir de resíduos devem ser submetidos ao processo de licenciamento ambiental. Quer seja para instalação de uma usina de incineração, para a implantação de um aterro sanitário, bem como para a instalação de sistema de geração de energia a partir de metano em aterros já existentes.

O processo de licenciamento ambiental deve ser realizado junto ao órgão competente na esfera estadual. As características do empreendimento irão determinar os dispositivos legais que devem ser atendidos. Entretanto, a Resolução CONAMA 237/97 que trata do Processo de Licenciamento e a Resolução CONAMA 001/86 dispõe sobre as diretrizes gerais para o uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental que devem ser atendidas em qualquer caso. A seguir encontram-se listados os principais dispositivos legais aplicáveis direta ou indiretamente ao processo de licenciamento de empreendimentos com características dos estudados:

Resolução CONAMA 237/97 de 19 de Dezembro de 1997: dispõe sobre o Licenciamento Ambiental.

A citada Resolução disciplinou o processo de licenciamento ambiental em todo o país. Em seu Art. 2º e § 1º, estabelece que "*A localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais*

consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras, bem como os empreendimentos capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, dependerão de prévio licenciamento do órgão ambiental competente, sem prejuízo de outras licenças legalmente exigíveis."

Resolução CONAMA 001/86, de 23 de Janeiro de 1986: dispõe sobre as diretrizes gerais para o uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental.

Resolução CONAMA 09/87, de 03 de Dezembro de 1987: dispõe sobre a realização de Audiências Públicas.

Resolução CONAMA 05/89, de 15 de Junho de 1989: institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR) e dá outras providências.

Resolução CONAMA 003/90 de 28 de Junho de 1990: estabelece padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR, que são: os de qualidade do ar, as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Resolução CONAMA 008/90 de 06 de Dezembro de 1990: estabelece, em nível nacional, limites máximos de emissão de poluentes do ar para processos de combustão externa em fontes novas fixas de poluição.

Resolução CONAMA 001/90: estabelece critérios e padrões para a emissão de ruídos em decorrência de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política.

5.3.7 Diretrizes quanto a Financiamento e Fomento

Existem várias instituições financeiras nacionais e internacionais e linhas de fomento que podem financiar projetos nos setores da energia e meio ambiente, sobretudo com vistas à mitigação de gases de efeito estufa, como é o caso dos sistemas estudados. Uma série de linhas de créditos pode ser obtida a partir dessas instituições. A seguir são descritas algumas delas.

i) Financiamentos advindos de créditos de carbono

Além de reduzir os impactos ao meio ambiente e minimizar a demanda energética por fontes não renováveis, a recuperação energética dos RSU possibilita e mitigação de gases de efeito estufa. Deste modo, os projetos de geração de energia a partir de RSU podem se enquadrar no financiamento externo chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), previsto no Protocolo de Quioto. Este mecanismo é um instrumento de flexibilização, que tem como objetivo viabilizar o cumprimento das metas de redução da emissão de GEE dos países listados no Anexo I da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima. Sendo assim, os países em desenvolvimento, como o Brasil, podem implementar projetos que contribuam para a redução dos gases de efeito estufa, e obter os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) e comercializá-los no mercado global.

ii) Financiamentos advindos de apoio do governo

A Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), empresa pública vinculada ao Ministério da Ciência e Tecnologia, conta com o Programa de Apoio a Projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), chamado Pró-MDL. Este programa financia o desenvolvimento científico e tecnológico de atividades de projetos no âmbito de MDL e possui duas modalidades de financiamento: reembolsável e não reembolsável. Essas primeiras compreendem o apoio a projetos de pré-investimento e o desenvolvimento tecnológico de soluções, enquanto as não reembolsáveis possuem uma linha focada em criação de novas tecnologias e outra em pesquisa de metodologia de cálculo de emissões e monitoramento.

Em fevereiro de 2008 foi criado pelo BNDES o Fundo Brasileiro Sustentabilidade (FBS), uma linha de crédito exclusiva para projetos no âmbito do MDL. A Caixa Econômica Federal também possui uma linha de crédito para o financiamento integral de projetos de MDL em áreas de saneamento.

A Bolsa de Mercadorias Futuros (BM&F), em parceria com o Ministério do Desenvolvimento, lançou em 2005 o projeto do Mercado Brasileiro de Redução de Emissão (MBRE), objetivando desenvolver um eficiente sistema de negociação de CER’s (Certificados de Emissão Reduzida).

iii) Financiamentos advindos de bancos internacionais

O Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) é uma das principais fontes de financiamento de projetos voltados para o desenvolvimento econômico e social sustentável da América Latina e Caribe.

O Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento (BIRD) destina a maior parte de seus recursos a países em desenvolvimento. Este banco tem como característica a assistência financeira atrelada ao cumprimento de compromissos na área social.

O *Japan Bank for International Cooperation* (JBIC) financia projetos de desenvolvimento econômico e social de países em desenvolvimento. Através da Official Development Assistance (ODA), esse banco oferece recursos para projetos ambientais, de infraestrutura social e econômica e desenvolvimento social, entre outros.

O KfW Bankengruppe investe em projetos de infraestrutura social e econômica, sistemas financeiros e proteção ambiental, mais especificamente em projetos de conservação e manejo dos recursos naturais e energias renováveis dos países em desenvolvimento.

5.3.8 Outras Proposições

Em função das dificuldades encontradas durante a coleta de dados para este estudo, propõe-se o desenvolvimento de procedimentos direcionados às prefeituras para a medição, o registro e o arquivamento de dados sobre geração, coleta e disposição dos RSU e treinamento de funcionários para a identificação e avaliação dos sistemas propostos. De fato, o fácil acesso a dados consistentes permite ao governo, às agências ambientais, aos municípios e aos investidores privados tomarem decisões fundamentadas acerca de orçamento, programas e políticas destinados ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.

A estratégia de regionalização da gestão dos resíduos, com a implantação de grandes aterros sanitários ou usinas de incineração de RSU visando ao atendimento de vários municípios da região, pode viabilizar a implantação destes sistemas através de economia de escala e da alavancagem de recursos.

Cabe também ressaltar que as autoridades municipais, no contexto da legislação brasileira, são responsáveis pela coleta, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados pela população. Sendo assim, a promoção de projetos de recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos passa, em primeira instância, pelas prefeituras.

5.4 Considerações Finais sobre o Capítulo 5

Este capítulo estruturou-se em três partes. Na primeira fez-se uma análise comparativa, sob os aspectos técnico-econômicos e socioambientais, entre as duas rotas tecnológicas para a recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU): a captação de metano gerado em aterros e a incineração.

O destaque desta análise ficou para as questões econômicas. Os resultados mostraram que o projeto hipotético analisado – de geração de energia a partir do processo de incineração – é atraente apenas quando se aplicam preços diferenciados para energia e para a disposição/tratamento dos resíduos. Esta situação de viabilidade foi alcançada apenas no contexto do cenário otimista. Neste cenário, o valor da taxa interna de retorno (TIR) foi de 11,16%. Tal projeto não se mostrou atraente, entretanto, no cenário de preços indicados pela regulamentação do PROINFA para a energia advinda de biomassa. Tal contexto de preço de energia indicado pelo PROINFA configurou o cenário pessimista referente ao projeto hipotético analisado, em que a TIR obtida foi de -1,62%.

Já com relação ao projeto hipotético de geração de energia a partir da rota tecnológica de recuperação de gás metano, os três os cenários avaliados (pessimista, referência e otimista) mostraram-se atraentes do ponto de vista do investidor. As taxas internas de retorno encontradas foram de 26,28%; 30,90% e 48,98% para os respectivos cenários.

Na segunda etapa deste capítulo constatou-se que os gargalos referentes à implantação de projetos de geração de energia a partir de RSU no país possuem dimensões políticas, técnicas, econômicas e socioculturais. Dentre os gargalos identificados, destacam-se a falta de políticas públicas para a gestão dos RSU e a insuficiente remuneração para a disposição/tratamento dos RSU. Além desses aspectos, constatou-se que o preço determinado para a energia vendida nem sempre é competitivo, especialmente no caso da rota tecnologia de incineração. Tais gargalos dificultam a implantação de projetos dessa natureza.

Finalmente, foram propostas diretrizes para a elaboração de projetos com vistas à recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos (RSU). Essas diretrizes trataram da identificação das fases do projeto; das alternativas de geração de energia a partir de gás de aterros e de incineração de RSU; e das opções de uso do gás de aterro. Essas diretrizes trataram, ainda, das estratégias de implantação e do processo de licenciamento ambiental dos projetos, bem como dispuseram sobre as fontes de financiamentos e fomento para os projetos de geração de energia a partir de RSU.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal desta tese foi analisar tecnologias para a geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU), tendo em vista propor diretrizes que possam combinar aspectos ambientais, tecnológicos e socioeconômicos adaptáveis à realidade brasileira. Para tanto, o trabalho foi estruturado em seis capítulos.

No primeiro capítulo realizou-se uma contextualização sobre resíduos sólidos urbanos e geração de energia a partir de biomassa. Também foram apresentados os objetivos do trabalho e as justificativas e motivações que levaram ao desenvolvimento do tema proposto, bem como a metodologia utilizada.

No segundo capítulo foram expostos os conceitos básicos de resíduos sólidos e as práticas utilizadas para sua disposição e tratamento. Dentre essas práticas foi dado destaque ao aterramento sanitário por ser uma das técnicas mais utilizadas no Brasil e em vários outros países. Nessa etapa constatou-se que a gestão de resíduos sólidos praticada no país está longe de ser a ideal, isso porque uma grande parte dos RSU ainda são dispostos em lixões ou vazadouros a céu aberto. No contexto internacional, foram descritas as novas tendências para a gestão do lixo. Assim, constatou-se que a redução na fonte, as novas formas de taxação em função da quantidade gerada e a utilização para a geração de energia através de incineração constituem as modalidades de gestão mais promissoras. Ainda no segundo capítulo discutiu-se a relação direta entre energia, resíduos e meio ambiente, dando-se relevância para questões globais, como o efeito estufa, tendo em vista os efeitos nocivos dos gases originados em aterros.

Já o terceiro capítulo apresentou as tecnologias existentes de conversão de biomassa em energia. Nele deu-se ênfase àquelas tecnologias mais utilizadas para o caso dos resíduos sólidos urbanos, tais como a digestão anaeróbia de aterros sanitários e a incineração.

O quarto e o quinto capítulos foram voltados à análise e às discussões dos resultados obtidos. O quarto capítulo dedicou-se à discussão da situação dos RSU no Brasil, tendo como destaque a questão da disposição desses resíduos, dos quais mais de 20% do total gerado no país seguem sendo dispostos em lixões ou vazadouros a céu aberto. Além disso, foram analisados os projetos de geração de energia a partir de RSU implantados no país. Segundo

informações levantadas na presente pesquisa, constatou-se que existiam três projetos efetivamente em operação até setembro de 2010, sendo que dois deles eram de geração de energia a partir de metano gerado em aterros – Aterro Bandeirantes e Aterro São João, ambos implantados no Estado de São Paulo – e o terceiro, UsinaVerde, utilizava a incineração de RSU. Este último, por sua vez, encontrava-se operando em escala piloto na cidade do Rio de Janeiro.

Ainda no capítulo quarto, realizou-se uma estimativa do potencial teórico de geração de energia a partir de RSU, considerando-se as rotas tecnológicas de captação de metano gerado em aterros ou de incineração desse tipo de resíduo. Assim, chegou-se ao potencial estimado para o Brasil como sendo da ordem de 16 GW, através da tecnologia de incineração, ou de 5,8 GW, a partir da digestão anaeróbia em aterros sanitários. O destaque desta análise ficou para a Região Sudeste, pois se fossem considerados na estimativa do potencial os municípios dessa região com mais de 500 mil habitantes, a energia gerada seria da ordem de 4 GW pelo processo de incineração, e de 954 MW pela digestão anaeróbia em aterros. Essa geração representaria respectivamente 3,5% e 0,8% da matriz elétrica nacional (referente ao ano de 2010).

No quinto capítulo fez-se uma análise comparativa, sob os aspectos técnico-econômicos e socioambientais, entre as duas rotas tecnológicas para a produção de energia a partir de RSU: a recuperação do metano gerado em aterros e a incineração. Os resultados mostraram que no projeto hipotético analisado, a geração de energia a partir do processo de incineração é atraente apenas quando se aplicam preços diferenciados para a energia e para a disposição/tratamento dos resíduos, apresentado no cenário otimista. A taxa interna de retorno (TIR) calculada para este caso foi de 11,2%. Tal projeto não se apresentou atraente, sequer no cenário de preços aplicados para a geração energia produzida a partir de biomassa segundo a regulamentação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, cuja TIR calculada foi de -1,6%. Já com relação ao projeto hipotético de geração de energia a partir de gás metano, os três cenários avaliados (pessimista, referência e otimista) mostraram-se atraentes do ponto de vista do investidor. As taxas internas de retorno encontradas para os respectivos cenários na rota de aproveitamento do gás metano em digestão anaeróbia foram: 26,3%, 30,9%, 49,0%, todas bastantes elevadas e economicamente atraentes.

Também neste capítulo constatou-se que os gargalos existentes para a implantação de projetos de geração de energia a partir de RSU no país passam por aspectos, políticos, técnicos, econômicos e socioculturais. O retorno obtido na disposição/tratamento e o preço auferido na venda da energia foram apontados como gargalos importantes que dificultam a implantação de projetos dessa natureza, especialmente na rota tecnológica de incineração. Outro importante entrave verificado para a implantação deste tipo de projeto diz respeito à inexistência de uma política nacional de resíduos sólidos. Ou seja, o fato de a problemática sobre os resíduos não ter sido equacionada no país no que se refere a questões básicas, como saúde pública e contaminação dos meios físicos, torna a perspectiva do uso de RSU como recurso energético restrita a poucos municípios/ regiões.

Outro fator de entrave avaliado referiu-se ao baixo valor pago pelas prefeituras para o tratamento/disposição dos RSU, fazendo desta atividade um investimento pouco atrativo ao capital privado. A ausência de regulamentações que obriguem os gestores a implantarem sistemas de captação de metano em aterros também colabora para o desinteresse de empresários da área de energia em investir em projetos desta natureza.

A falta de políticas de incentivo para fontes de geração de energia baseadas em tecnologias não amadurecidas/estabelecidas (no país) e que estejam fora do PROINFA, como no caso da incineração, apresenta-se, também, como um gargalo para o desenvolvimento de projetos de geração de energia a partir de RSU. Constatou-se que a legislação neste setor ainda é inexpressiva e o PROINFA não contempla outro tipo de geração de energia oriunda de resíduos sólidos urbanos que não seja a geração a partir de gás de aterros, ainda que considere o processo de incineração de resíduos rurais (setores sucroalcooleiro, arrozeiro, madeireiro).

Outro obstáculo importante à implementação de projetos de aproveitamento energético de RSU está na questão ambiental, especialmente no âmbito do processo de licenciamento. De fato, constatou-se que os processos ligados à disposição/tratamentos de resíduos são morosos, e tais empreendimentos, culturalmente, não são bem aceitos pela população, o que implica um grande risco ao empreendedor. No caso de novos aterros, a seleção de áreas para a sua instalação torna-se cada vez mais difícil, em função das características do empreendimento e das exigências legais.

Deve-se ainda ressaltar que a falta de políticas públicas e diretrizes federais para o segmento de gestão de RSU e de geração energética a partir deles leva à desinformação por parte das prefeituras, que por sua vez é a instância federativa responsável pela gestão dos resíduos no Brasil. Neste sentido, as diretrizes propostas por este trabalho visam a contribuir com a implantação de políticas públicas que fomentem projetos de geração de energia a partir de resíduos, ampliando a oferta de energia renovável disponível no país.

Por fim, na última parte do capítulo quinto foram propostas diretrizes para a elaboração de projetos com vistas à recuperação de energia oriunda de resíduos sólidos urbanos (RSU). Essas diretrizes trataram da identificação das fases do projeto, das alternativas de geração de energia a partir de gás de aterros e de incineração de RSU e das opções de uso do gás de aterro. Também foram direcionadas às estratégias de implantação e ao processo de licenciamento ambiental dos projetos. As diretrizes propostas dispuseram ainda sobre as fontes de financiamentos e fomento a projetos de geração de energia a partir de RSU.

Uma das principais conclusões deste trabalho foi constatar a existência de oportunidades no Brasil para a implantação de projetos de geração de energia utilizando RSU, com a ressalva, porém, de que ainda existem gargalos/barreiras a serem ultrapassadas, sendo as barreiras políticas e de incentivos as mais significativas, conforme apontado anteriormente.

Como recomendação geral, e considerando-se o cenário atual da gestão de resíduos no país, sugere-se a regularização (quando possível) de locais para a disposição de resíduos, transformando-os em aterros sanitários ou, pelo menos, em aterros controlados com vistas à captação do metano gerado para uso energético, sendo que tais projetos devem ser embasados em estudos de viabilidade da exploração do gás de aterro. Destacam-se aqui outras recomendações para o incentivo de implantação de projetos com vistas à recuperação energética dos resíduos:

i) simplificação do sistema de licenciamento ambiental, que é complexo, burocrático e demorado;

ii) adoção de incentivos fiscais, privilegiando municípios que se enquadrem em critérios de preservação ambiental, como é o caso da implantação de sistemas de aproveitamento energético dos gases gerados em aterros já em operação;

iii) disseminação de informações técnicas sobre a construção e operação de aterros sanitários com aproveitamento de biogás e sobre outras opções tecnológicas de geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos;

iv) estabelecimento de linhas de crédito através de bancos de fomento, com taxas e esquemas de garantias adequados à construção de aterros sanitários com sistemas de aproveitamento energético;

v) penalização das prefeituras que mantêm lixões, sem nenhum controle ambiental ou aproveitamento energético, introduzindo-se no setor o conceito de "poluidor-pagador";

vi) regionalização da disposição e tratamento de resíduos com vistas a aglomerar pequenos municípios para a obtenção de escala que viabilize a implantação de projetos de geração energia a partir de RSU.

Quanto às recomendações para trabalhos futuros, tendo em vista que um entrave importante para o desenvolvimento da presente tese foi a dificuldade de obter dados sistematizados sobre resíduos sólidos urbanos, recomenda-se limitar a área de estudo a determinada região do país, com o objetivo de obter dados primários. Adicionalmente, estudos que visem à determinação do Poder Calorífico Inferior dos resíduos sólidos urbanos no país também merecem ser elaborados, o que proporcionará estimativas mais precisas sobre a geração de energia a partir da rota tecnológica de incineração para o aproveitamento energético dos resíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. W. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos. Dissertação (Mestrado)** – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo.142 p., 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro. 7p. 1992.

_____. **NBR 12.808**: Resíduos sólidos de serviços de saúde - classificação. Rio de Janeiro. 1993.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Banco de Informações de geração**. Disponível em: <http: www.aneel.gov.br>. Acesso em 14 jun. 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. **RDC nº 306**. Regulamento técnico para gerenciamento de serviço de saúde, Brasília. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELP. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 157 p., 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELP. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 196 p., 2008.

AUTRET, E.; BERTHIER, F.; LUSEZANEC, A.; NICOLAS, F**.** Incinetation of municipal and assimilated wastes in France: assessment of latest energy and material recovery performances. **Journal of Hazardous** Material, v. B19, p. 569-574, 2006.

BANCO MUNDIAL. **Estudo de pré-viabilidade para recuperação de biogás no aterro Muribeca, Pernambuco, Brasil**. Relatório Técnico. 2005.

BANCO MUNDIAL. **Manual para preparação de gás de aterros sanitário para projetos de energia na América Latina e Caribe**. 248 p. Washington, 2006.

BANCO MUNDIAL. **Municipal Solid Waste Incineration – world bank technical guidance repor**t. Washington, D.C. first printing, 103 p. 1999.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO – BNDES. **Consulta geral ao *site***. Disponível em: <www. bndes.gov.br>. Acesso em 29. dez. 2005.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil** (2005). Disponível em<http: www.mme.gov.br>. Acesso em 20 ago.2006.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – BEN. Resultados preliminares: ano base 2008. Disponível em<http: www.mme.gov.br>. Acesso em 12 mai.2009.

BEDUSCHI, L. C.; ORTOLANI A. F.; COAN, O. **Considerações gerais sobre a estação da UNESP de biogás automotivo a baixa pressão,** *In*: II encontro sobre biogás automotivo. Coletânea dos trabalhos apresentados, UNESP, Jaboticabal, 1985.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J.**Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: EESC/USP, Projeto REENGE.120p.1999.

BIRGEMER, H.G., CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, .1987.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. 4ª ed., Humanitas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 348 p., 2003.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projetos de Lei e outras Proposições**. Disponível em: <http://www.camara.gov.br/proposicoes/>. Acesso em 19.08.2007

CANÇADO C. J; LESSA, E. R; PARREIRA, F.V**. Avaliação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos com características domiciliar e comercial da cidade de Belo Horizonte, MG**. *In*: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, MG 02-07 setembro, 2007.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE. Disponível em: <www.cempre.org.br>. Acesso em: 25 maio. 2008.

CERINO, A.P. **Tratamento térmico de resíduos industriais**. 2000.

COMPANHIA DE GÁS DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO - COMGÁS. **Aproveitamento de biogás nos aterros sanitários do município de São Paulo**: **experiências da COMGÁS e perspectivas de utilizaç**ão. São Paulo, 1985.

CONNET, P. **Incineração do lixo municipal: uma solução pobre para o século 21**. *In:* Anais da Conferência Anual de Administração Internacional de Waste-to-Energy, Amsterdã, 1998.

CONFEDERATION OF EUROPEAN OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS - CEWEP. **Heating and lighting the way to sustainable future**. Disponível em: <http://www.cewep.com.br>. Acesso em 01 jun 2007.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL - CESTESB **Inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**, Ministério da Ciência e Tecnologia, 1994.

_____. **Resíduos sólidos domiciliares e de serviços de saúde**: **tratamento e disposição final** São Paulo, 34p.1997.

_____. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares**. São Paulo, 45p. 2006a.

_____. **Biogás projetos e pesquisas no Brasil**. 2006b. Disponível em: < www.cetesb.sp.gov.br> Acesso em: 05 jan. 2009.

_____. **Manual do usuário do programa de computador**. Biogás: **geração e uso energético – aterros, v.1.0**. 2006. Disponível em: < www.cetesb.sp.gov.br> Acesso em: 05 fev. 2009.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução Nº 307**, Brasília, Julho, 2002.

_____. **Resolução nº 358**. Brasília, Abril, 2005.

_____. **Resolução nº 308**. Brasília, Março, 2002.

CONSELHO EUROPEU DE ENERGIA RENOVÁVEL – EREC. **Revolução energética**: **perspectivas para uma energia global sustentável**. 98.p. 2007.

CONSTITUIÇÃO FEDERAL DO BRASIL, Brasília, D.F, 1988.

CUNHA, M.E.G. **Análise do setor de saneamento ambiental no aproveitamento energético de resíduos: o caso do município de Campinas, SP**. Dissertação (mestrado)- Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Energia da UNICAMP. São Paulo. 125p., 2002.

DEMAJOROVIC J. Da política tradicional de tratamento do lixo a política de gestão de resíduos sólidos – as novas prioridades. **Revista de Administração de Empresas**. V.35, p.88-93., 1995.

DEMPSEY, C.; OPPELT, E.T. **Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica**. Tradução: Sogabel, M.N, Air and Waste Management Association, São Paulo, 1999.

ELETROBRAS. Programas e fundos setoriais. Disponível em <http://www.eletrobras.com> Acesso em 22 nov 2005.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Municipal solid waste generation, recycling and disposal in the United States: facts and figures for 2005. EPA-430/3-80-11, April 2005.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Landgem gas emissions model**, **version 3.02 user's guide**, 2005.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Biomass combined heat and power catalog of technologies**. Combined Heat and Power Partnership, Washington, 2007.

EUROPEAN RENEWABLE ENERGY COUNCIL – EREC. Ambiente: Gestão dos resíduos. atividades da União Européia. Disponível em:<http:Europa.eu/seadplus/leg/pt.htm>. Acesso em: 21 ago 2007.

EUROPEAN COMISSION. **Waste generated and treated in Europe**. Oficce for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 2003.

FAAIJ, A.P.C. Bio-energy in Europe: changing technology choices. **Energy Policy**, v.34, p. 322-342, 2006.

FERNANDES-ASIN, F. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Diponível em: <worldbank.org>. Acesso em: 25.06.2007.

FIGUEIREDO, P. J. M .A. **A Sociedade do lixo: os resíduos, a questão energética e a crise ambiental.** 2ª ed. Piracicaba: UNIMEP, 1995.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. 2ª Ed. EDUSP, São Paulo, 2003.

GOLDEMBERG, J., NIGRO, F. E.B.; COELHO, S.T. **Bioenergia no Estado de São Paulo**: **situação atual, perspectivas, barreiras e propostas**. 150p. Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008.

HOLMGREN, K.; GEBREMEDHIN, A. Modelling a district heating system: Introduction of waste incineration, policy instruments and co-operation with an industry. **Energy Policy**, v.32 , p. 1807–1817, 2004.

HOOGWIJK, M.; FAAIJ, A. VAN DEN BROEK, R.; BERNDES, G. Exploration of the ranges of the global potencial of biomass for energy. **Biomass and Bioenergy**, v. 25, p. 119-133., 2003.

INTERNATIONAL ENERGY AGENGY - IEA. Renewables in power generation: towards a better environment, 1997.

INTERNATIONAL ENERGY AGENGY – IEA. Energy statistics. 196p. 2005. Disponível em: <http://www.iea.org/>. Acesso em: 29.11.08.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines on greenhouse gas inventory**. Chapter wastes, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Contagem populacional**., 2007. Disponível em: <www. ibge.gov.br/home/estatística/populacao.shtm>. Acesso em: 28 jan 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2ª ed., São Paulo: Publicação, 370p., 2000.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for national greenhouse inventories: reference manual**, *v.3*, 1997. Disponível em: < http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs >. Acesso em: 20 abr. 2007.

JAFFRIN, A. ; BENTOUNES, N.; JOAN, A. M. (2003). Landfill biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth. **Biosystems Engineering**, França, 2003.

JOHANNESSEN, L. M. **Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills**. Working Paper Series n.4., Urban Development Division, World Bank, Washingt, 2004.

JUCÁ, J.F.T.; MARIANO, M.O.H.; CAVALCANTI, R.C; SOBREIRA, A. **Diagnóstico de resíduos sólidos no estado de Pernambuco**. *In*: Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 12-18 de Setembro, João Pessoa, PB, 2001.

JUCÁ, J.F. **Destinação final dos resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas**. *In:* Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Braga, Portugal, 2002.

GOMES, L. P. **Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários**. 159p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1989.

KLEIN, A.; ZHANG, H.; THEMELIS; N.J. **Analysis of a waste-to-energy power plant with CO_2 sequestration.** *In:* North American Waste to Energy Conference, Proceedings, ASME International, Tampa FL, p. 263-270, 2003.

KESSLER, T. Utilização de gás metano de aterros sanitários: recomendações para seu aproveitamento prático. **Revista Engenharia**. São Paulo, n. 54, 2000.

KNOX, P. R.; DOUGHTY, C. A.; HOVORKA, S. **Impacts of buoyancy and pressure gradient on field-scale geological sequestration of CO_2 in saline formations**. Meeting, Salt Lake City, Utah, May, 2003.

KLIGERMAN, D.C. A **Era da reciclagem e a era do desperdício**. *In*. Sisinno, Cristina Lúcia Silveira (org.). Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: Uma Visão Multidisciplinar. 1ªed. Fiocruz, Rio de Janeiro. 2000.

KUMAR, S. Technology option for municipal waste-to-energy. **Environmenteal Science**, v.5, p. 1-11., 2000.

LAJOLO, R.D. (Coord.). **Cooperativa de catadores de materiais recicláveis: guia para implantação.** São Paulo: IPT, 2003.

LARKIN, S., RAMAGE, J. SCURLOCK, J. Bioenergy . *In:* Renewable energy: power for a sustainable future. Godfrey Boyle (coord). 2ª edition, Oxford, 452p., 2004.

LEI ESTADUAL Nº 12.300. São Paulo, Março, 2006. Disponível em: <www.ambiente.sp.gov.br> Acesso em: 24 jun 2008.

LEI FEDERAL Nº 1.445. Brasília, Janeiro, 2007. Disponível em: <www.planalto.gov.br/.htm>. Acesso em: 24 mai 2008.

LEI FEDERAL Nº 9605. Brasília, Fevereiro, 1998. Disponível em: <www. Planalto.gov.br/htm>. Acesso em 21 maio 2008.

LEITE, W. C. A. **Estudo da gestão de resíduos sólidos: uma proposta de modelo tomando a unidade de gerenciamento de recursos hídricos (UGHI-5) como referência**. São Carlos 270p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

LIMA, J. D. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Paraíba: Inspira Comunicação e Design. 267p. 2003.

LIMA, L.M.Q. **Tratamento de lixo.** São Paulo: Hemus, 2ª ed., 1991.

LOPEZ, A.A. **Estudo da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos na bacia Tietê-Jacaré (UGRHI-13).** São Carlos 370p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

LOPEZ-REAL. Agroindustrial waste composting and its agricultural significance. **Proceeding of the Fertilizer Society** 1990; 293:1-26.

MACHADO, C. J. S. Mudanças conceituais na administração pública do meio ambiente, ciência e cultura: **Gestão das Águas**. Ano 55, n.4. out-nov, p. 24-26. 2003.

MANCINI, P. J. P. **Uma Avaliação do sistema de coleta informal de resíduos sólidos recicláveis no município de São Carlos, SP**. São Carlos. 150p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

MARTINS, L. **Selling cities as ecosystem a sustainable strategy for solid waste in two cities** – Curitiba, Brasil and Munich, Germany. London, 2002.

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

MENDES, L. G. G. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá**. Dissertação (mestrado) - Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia - Universidade Estadual Paulista, 2005.

MENEZES, R.A.; MENEZES, M.A; GERLACH, J.L. **Estágio atual da incineração no Brasil**. *In* Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, Associação Brasileira de Limpeza Pública, Curitiba, 3-7 de abril, 2000.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Disponível em:< http://www.cidades.gov.br >. Acesso em: 28 ago 2005.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Relatórios de referência: emissões de metano no tratamento e na disposição de metano**. 84p., 2006. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/clima/ >. Acesso em: 21 jan. 2008.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. Documentos de Concepção de Projeto – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Disponível em <http: www. mct.gov.br>. Acesso jun. 2009.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. Projeto Bandeirantes de gás de aterro e geração de energia. Documento de Concepção do Projeto – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. 2004. Disponível em <http: www. mct.gov.br>. Acesso jun. 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Manual do MDL para desenvolvedores de projetos e formuladores de políticas. 117 p., 2006. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 28 set 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Fomento a projetos de ordenamento da coleta, tratamento e disposição final adequada de resíduos sólidos: manual para obtenção de recursos. <Disponível em www.mma.gov.br/pot/sqa/urbana.cfm>. Acesso em: 18 set 2007.

MOTTA, F. S. **Produza sua energia: biodigestores anaeróbios**. Gráfica Editora 3ªed, 144 p., 1986.

NAZAROFF, W.W.; ALVAREZ-COHEN, L. **Environmental engineering science**. New York, United States. John Wiley & Sons, Inc. 690p. 2001.

OLIVEIRA, L.B., **Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil.** Rio de Janeiro. Tese (Doutorado) – Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, COPPE .2004. 237p.

POLETTO, J.A.; SILVA, C.L. **Influência da separação de resíduos sólidos urbanos para fins de reciclagem no processo e incineração com geração de energia** .*In*: 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco, Peru, 23-25 outubro, 2007.

OONK, J.; BOON, *A.*, **Landfill gas formation, recovery and emissions**, Institute of Environmental and Energy Technology. Apeldoorn, The Netherlands, p. 95-203, 1995.

ORGANIZATIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD - OPS - **Informe regional sobre la evaluación de los servicios de manejo de resíduos sólidos em la región de la America Latina y El Caribe**.Washington, D.C, 2005.

PARO, A. C.; COSTA, F. C; COELHO, S.T. Estudo comparativo para o tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, v.14, nº2, 2º sem. 2008, p. 113 -125.

PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO – PNSB. Instituto Brasileiro e Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2002.

PRO EUROPE. Packaging recovery organization Europe. 2005. Disponível em: <www.pro-e.org>. Acesso em: 10 dez 2007.

PDH ENGINEER. Consulta Geral a Homepage. Disponível em:<http://pdhengineer.net.htm>. Acesso em 13 ago.2007.

RENÓ, F. A. G.; STREB, C. S.; PIUNT, R. C. **Conservação e produção de energia a partir de resíduos sólidos – alternativa para dois problemas: lixo e resíduos**. *In*: IX Congresso Brasileiro de Energia – CBE, *In*: IV Seminário Latino Americano de Energia. Anais. Vol. IV. Rio de Janeiro, 2002.

ROCCA, A. C.C. **Resíduos sólidos industrial,** 2ª ed. São Paulo, 1993.

RUBERG, C. A **Destinação dos resíduos sólidos domiciliares em mega cidades: o caso de São Paulo**. Tese (doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 196 p., 2006.

SCHNEIDER, V. **Manual de gerenciamento de resíduos sólidos de serviço de saúde**. CLR Balieiro, 1ª ed. São Paulo, 2002.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – SEMA. **Relatório técnico n.º 2 do convênio SMA/MCT n.º 01.0052.00/2001 - aterros**, São Paulo, SP, 349 p. 2003.

SILVA, F. M.. **Sistema de alimentação de motores com duplo combustível: metano e diesel**. 121p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1995.

SOGABE, M. N. **Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica**, 1999.

SOUZA, M. P. **Instrumentos de gestão ambiental: fundamentos e prática.** São Carlos: Editora Riani Costa. 112 p. 2000.

STANIFORTH, J., KENDALL, K. Biogás powering a small tubular solid oxide fuel cell. **Journal of Power Sources** (71) 275-277, 1998.

STANIFORTH, J., ORMEROD, M. Running solid oxide fuel cell on biogas. **Ionics**, (9) 336-341, 2003.

TAUK-TORNISIELO, S.M., GOBBI, N., FORESTI,C., LIMA,S.T., **Análise ambiental***:* **estratégias e ações**. ed: UNESP**.** São Paulo, 1995.354p.

TCHOBANOGLOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S. **Integrated solid waste managements**: **engineering, principles and management issues**. New York: McGraw-Hill, ISBN 0-07-063237-5. 978p.1993.

TEIXEIRA, E. N. **Resíduos Sólidos: minimização e aproveitamento energético**. *In*: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem e Resíduos Sólidos Industriais, 29 a 31 de agosto, 2000, São Paulo. Anais. 2000.

TRIGÁS. *Site* da Empresa Trigás. Disponível em: <http://www.trigas.com.br> Acesso em 10 mai 2006.

TURKENBURG, W.C. (coord.). **Renewable energy technologies** *In* World Energy Assessment of the United Nations, UNDP, New York, 2000.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY – USEPA. Air emissions from municipal solid waste landfills. background information for proposed standards and guidelines. emission standards division. EPA-450/3-90-011a, March 1991.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY- USEPA Turning aliability into an asset: A landfill gas-to-energy project development handbook. , EPA430-B-96-0004. Sep. 139p., 1996.

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

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. Appendix A: Glossary. EPA's Recycling guide for native american nations. Environmental Protection Agency United States. 2001a. Disponível em: < www. epa.gov>. Acesso em: 20 mai 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Powering microturbines with Landfill Gas, EPA430—02-012 DRAFT. March, 2002.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. Energy project landfill Gas utilization software (E-PLUS) User´s Manual*;* EPA-30-B-97-006,1998.

USINAVERDE. *Site* da empresa. <http: www.usinaverde.com.br>. Acesso: 29 de jun. 2009.

VERMA, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes**. Department o Earth and Environmental Engineenring, Columbia Universith, US, 89 p. 2002.

WAITE, R. **Household waste recycling**. London: Earth Publication, 1995.

WASTE AGE. **Measuring michigan: canadian imports up, but landfill disposal**. Drops Overall. 14-15, apr. 2007.

WENDT, H; GÖTZ, M; LINARDI, M. Tecnologias de células a combustível. **Química Nova**, 23 (4), 538-546, 2000.

WENISCH, S.; ROUSSEAUX, P.; MÉTIVIER-PIGNON, H. Analysis of technical and environmental parameters for waste-to-energy and recycling: household waste case study. **International Journal of Thermal Sciences**, n. 43 p. 519–529, 2004.

WIEDEMANN, H. **Lixo na Alemanha**: **manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. IBAM, Rio de Janeiro. 2001. Disponível em: <www.ibam.org. br> Acesso em 25 out 2008.

WILLIAMS, P. T. **Waste treatment and disposal**. Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd. England. 380p. 2005.

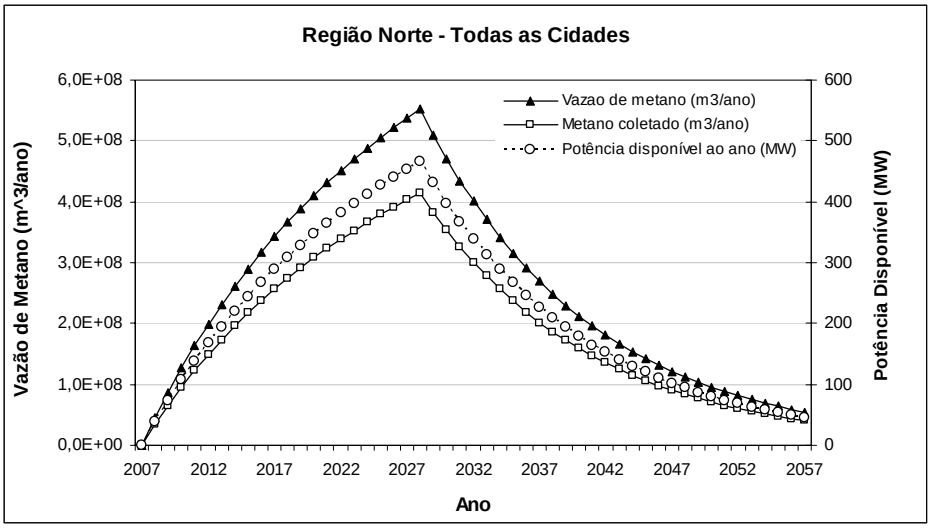
WILLIAMS, R.B.; JENKINS, B. M.; NGUYEN, D. **Solid waste conversion: a review and database of current and emerging technologies**. Berkeley: Interagengy Agreement, University of California, USA, 2003.

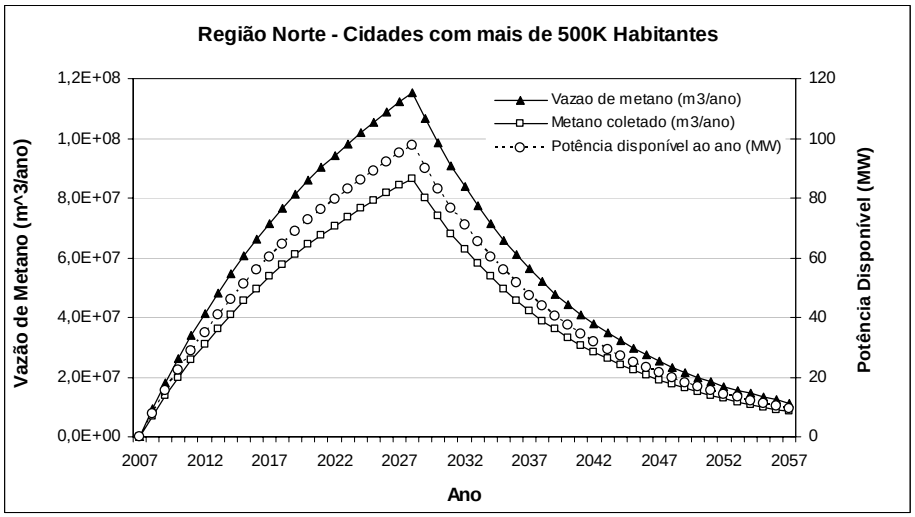
WORLD BANK. Indústria: Energia e Meio Ambiente. Relatório de Desenvolvimento Mundial, 1992.

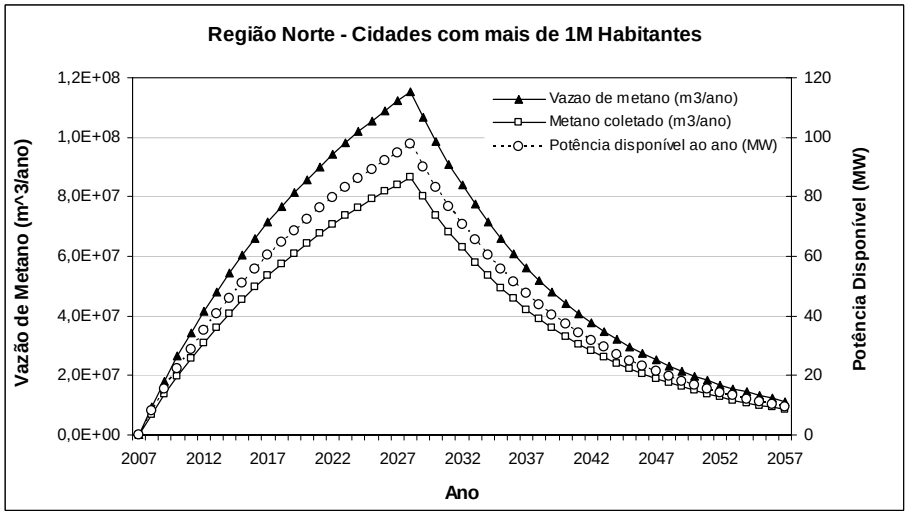
WORLD BANK. Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean. USA,. October. 125p., 2003.

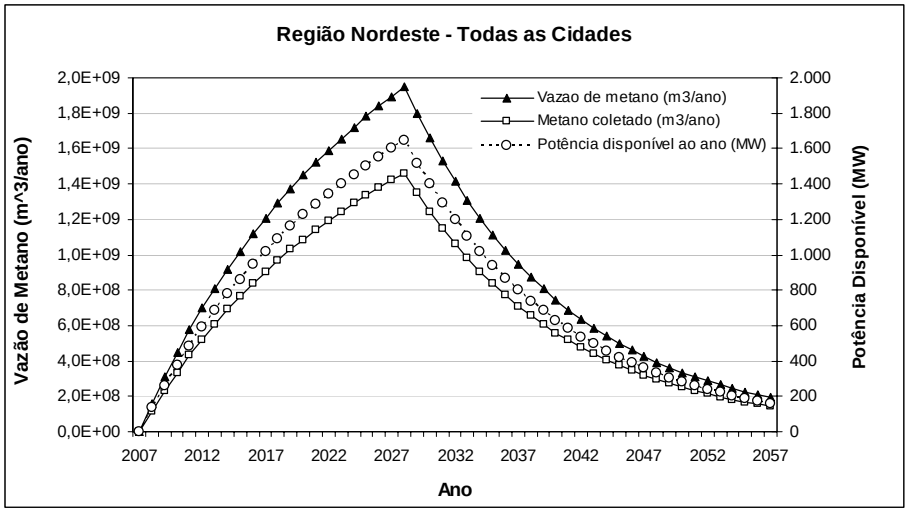
ANEXO

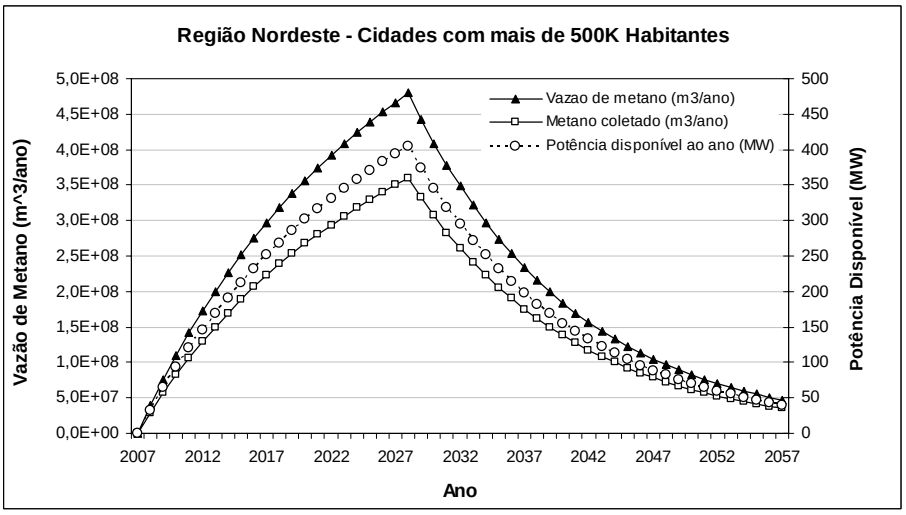
Curvas do Comportamento da Vazão de Metano e da Potência Disponível

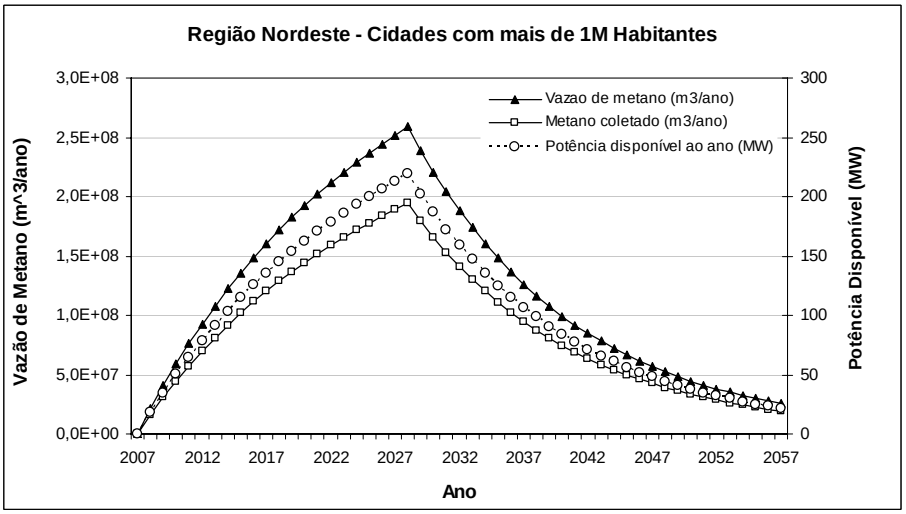


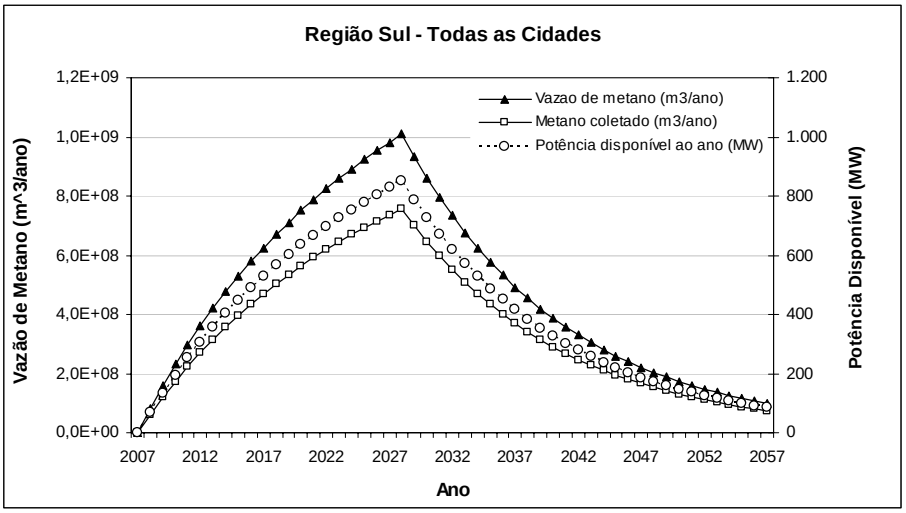


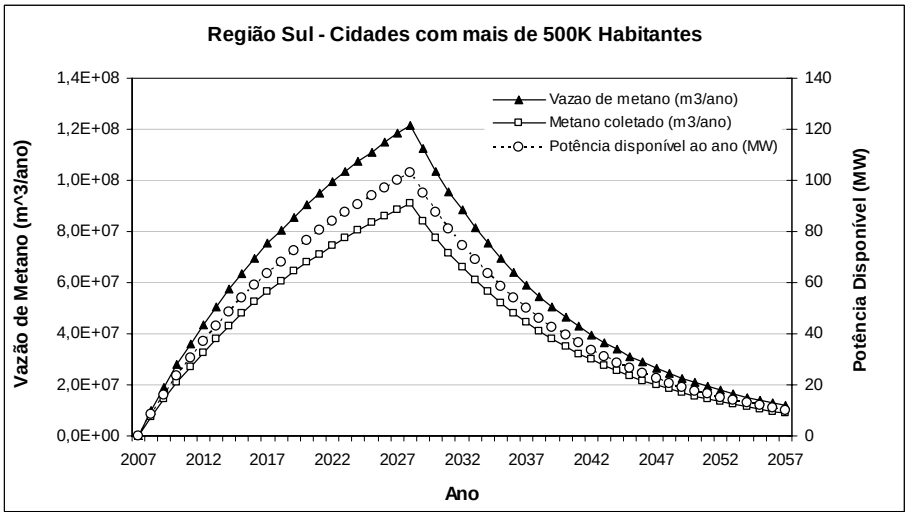


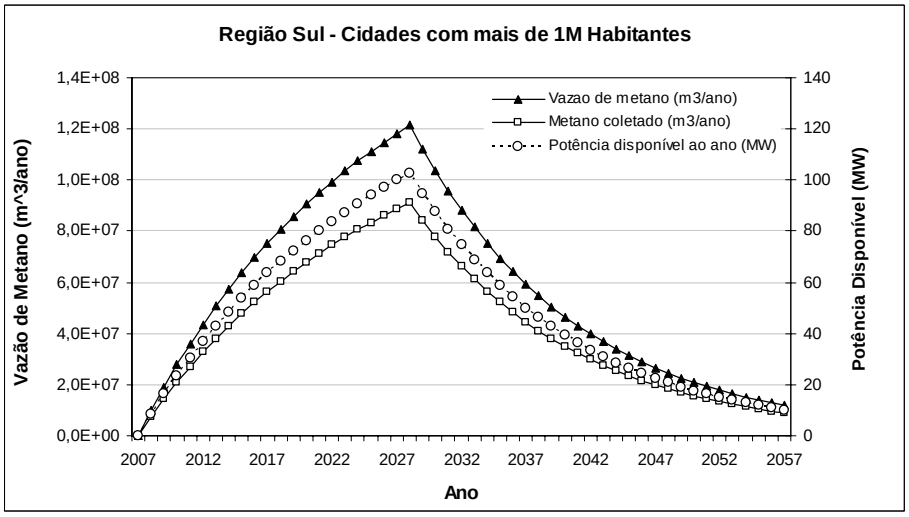

Região Nordeste - Todas as Cidades
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
2,0E+09
1,8E+09
1,6E+09
1,4E+09
1,2E+09
1,0E+09
8,0E+08
6,0E+08
4,0E+08
2,0E+08
0,0E+00
2.000
1.800
1.600
1.400
1.200
1.000
800
600
400
200
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057

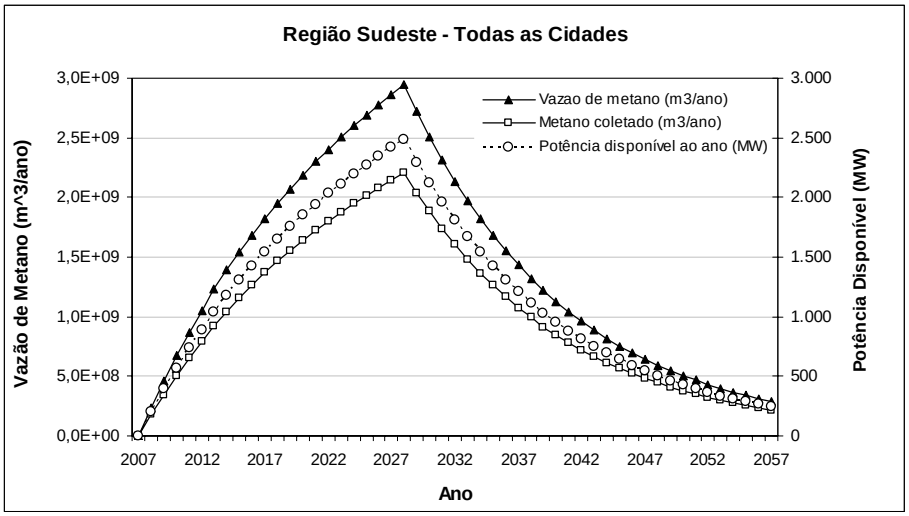

Região Nordeste - Cidades com mais de 500K Habitantes
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
5,0E+08
4,5E+08
4,0E+08
3,5E+08
3,0E+08
2,5E+08
2,0E+08
1,5E+08
1,0E+08
5,0E+07
0,0E+00
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057

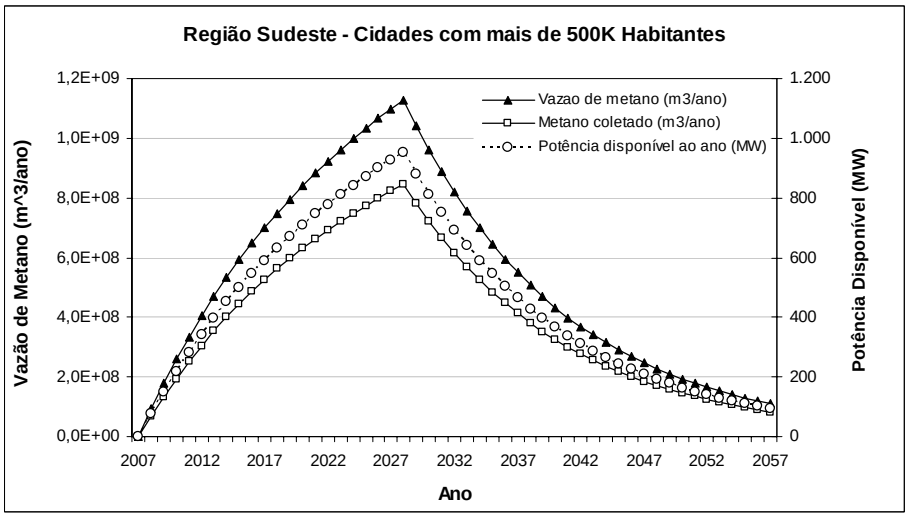

Região Nordeste - Cidades com mais de 1M Habitantes
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
3,0E+08
2,5E+08
2,0E+08
1,5E+08
1,0E+08
5,0E+07
0,0E+00
300
250
200
150
100
50
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057

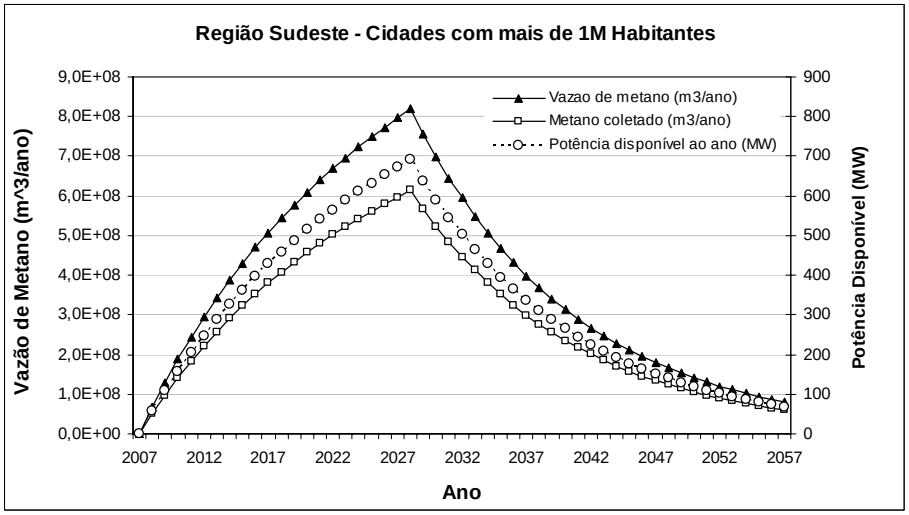

Região Sul - Todas as Cidades
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
1,2E+09
1,0E+09
8,0E+08
6,0E+08
4,0E+08
2,0E+08
0,0E+00
1.200
1.000
800
600
400
200
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057

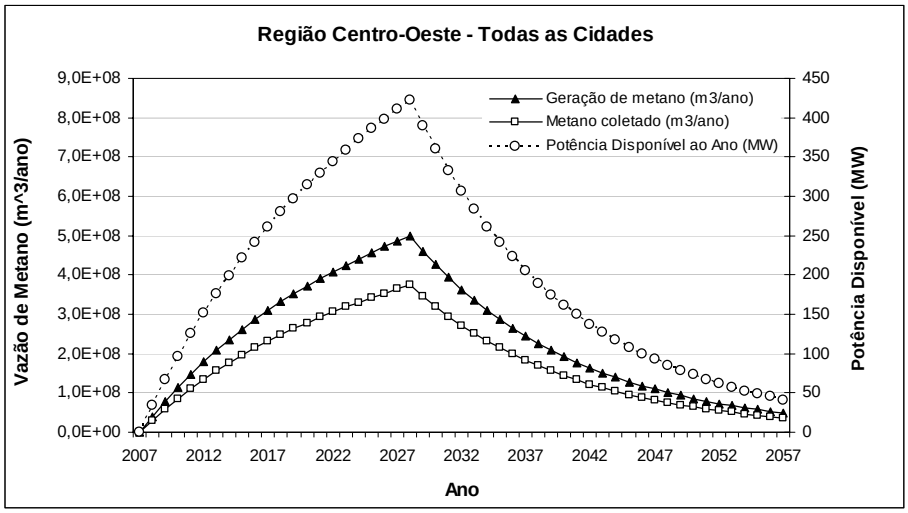

Região Sul - Cidades com mais de 500K Habitantes
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
1,4E+08
1,2E+08
1,0E+08
8,0E+07
6,0E+07
4,0E+07
2,0E+07
0,0E+00
140
120
100
80
60
40
20
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057

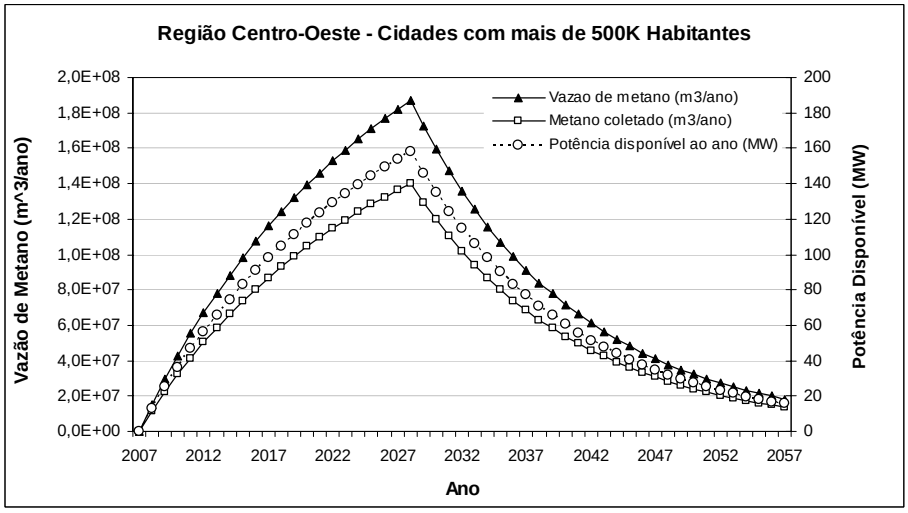

Região Sul - Cidades com mais de 1M Habitantes
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
1,4E+08
1,2E+08
1,0E+08
8,0E+07
6,0E+07
4,0E+07
2,0E+07
0,0E+00
140
120
100
80
60
40
20
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057

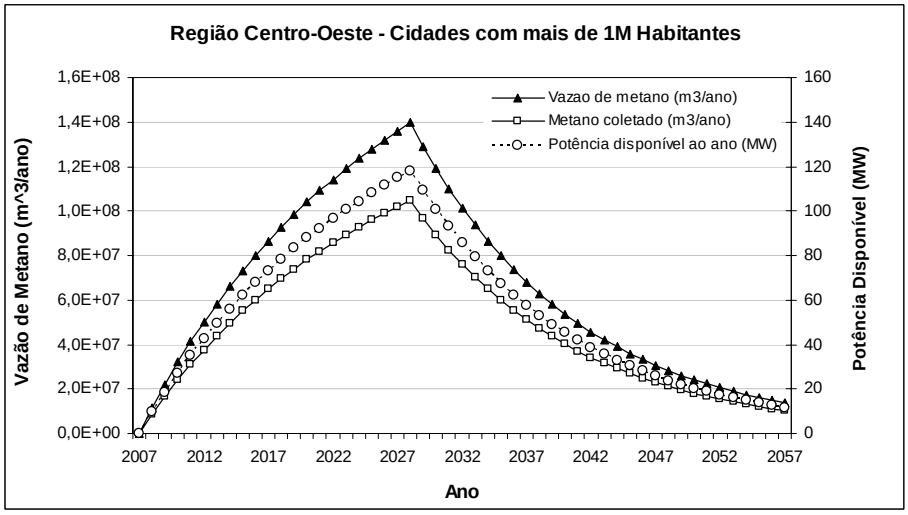

Região Sudeste - Todas as Cidades
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
3,0E+09
2,5E+09
2,0E+09
1,5E+09
1,0E+09
5,0E+08
0,0E+00
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
500
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057


Região Sudeste - Cidades com mais de 500K Habitantes
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
1,2E+09
1,0E+09
8,0E+08
6,0E+08
4,0E+08
2,0E+08
0,0E+00
1.200
1.000
800
600
400
200
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057


Região Sudeste - Cidades com mais de 1M Habitantes
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
9,0E+08
8,0E+08
7,0E+08
6,0E+08
5,0E+08
4,0E+08
3,0E+08
2,0E+08
1,0E+08
0,0E+00
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057


Região Centro-Oeste - Todas as Cidades
Geração de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência Disponível ao Ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
9,0E+08
8,0E+08
7,0E+08
6,0E+08
5,0E+08
4,0E+08
3,0E+08
2,0E+08
1,0E+08
0,0E+00
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057


Região Centro-Oeste - Cidades com mais de 500K Habitantes
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
2,0E+08
1,8E+08
1,6E+08
1,4E+08
1,2E+08
1,0E+08
8,0E+07
6,0E+07
4,0E+07
2,0E+07
0,0E+00
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057


Região Centro-Oeste - Cidades com mais de 1M Habitantes
Vazao de metano (m3/ano)
Metano coletado (m3/ano)
Potência disponível ao ano (MW)
Vazão de Metano (m^3/ano)
Potência Disponível (MW)
Ano
1,6E+08
1,4E+08
1,2E+08
1,0E+08
8,0E+07
6,0E+07
4,0E+07
2,0E+07
0,0E+00
160
140
120
100
80
60
40
20
0
2007
2012
2017
2022
2027
2032
2037
2042
2047
2052
2057