



FATIMA APARECIDA DE MORAIS LINO

**PROPOSTA DE APROVEITAMENTO DO  
POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO  
SÓLIDO URBANO E DO ESGOTO  
DOMÉSTICO COM MINIMIZAÇÃO DOS  
IMPACTOS AMBIENTAIS**

41/2014

CAMPINAS  
2014



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

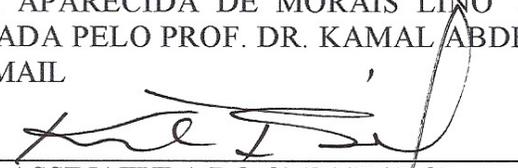
FATIMA APARECIDA DE MORAIS LINO

**PROPOSTA DE APROVEITAMENTO DO  
POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO  
SÓLIDO URBANO E DO ESGOTO  
DOMÉSTICO COM MINIMIZAÇÃO DOS  
IMPACTOS AMBIENTAIS**

Orientador: Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e de Fluídos.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA FATIMA APARECIDA DE MORAIS LINO E ORIENTADA PELO PROF. DR. KAMAL ABDEL RADI ISMAIL

  
\_\_\_\_\_  
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS  
2014

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

L649p Lino, Fatima Aparecida de Moraes, 1958-  
Proposta de aproveitamento do potencial energético do resíduo sólido urbano e do esgoto doméstico com minimização dos impactos ambientais / Fatima Aparecida de Moraes Lino. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Resíduos sólidos. 2. Esgoto. 3. Reciclagem. 4. Incineração. 5. Energia. 6. Água - Reutilização. I. Ismail, Kamal Abdel Radi, 1940-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Proposal to profit the energy potential of urban solid waste and domestic sewage and minimize their ambient impacts

**Palavras-chave em inglês:**

Solid waste

Sewer

Recycling

Incineration

Energy

Water - Reuse

**Área de concentração:** Térmica e Fluidos

**Titulação:** Doutora em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Kamal Abdel Radi Ismail [Orientador]

Carlos Salinas Sedano

Rogério Gonçalves dos Santos

Ricardo Nicolau Nassar Koury

Ricardo Fortes de Miranda

**Data de defesa:** 28-02-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

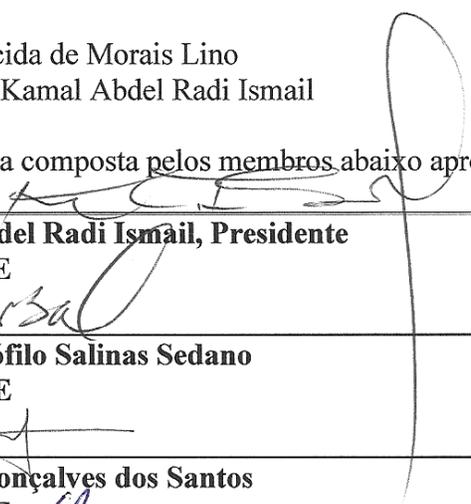
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

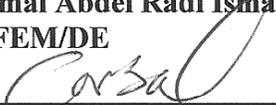
**TESE DE DOUTORADO**

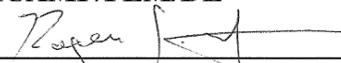
**Proposta de Aproveitamento do Potencial  
Energético do Resíduo Sólido Urbano e do  
Esgoto Doméstico com Minimização dos  
Impactos Ambientais**

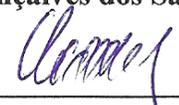
Autor: Fatima Aparecida de Moraes Lino  
Orientador: Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail, Presidente**  
UNICAMP/FEM/DE

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Carlos Teófilo Salinas Sedano**  
UNICAMP/FEM/DE

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Rogério Gonçalves dos Santos**  
UNICAMP/FEM/DE

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Ricardo Nicolau Nassar Koury**  
UFMG/Belo Horizonte

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Ricardo Fortes de Miranda**  
UFU/Uberlândia

Campinas, 28 de fevereiro de 2014.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho ao Brasil e às pessoas que acreditaram em mim.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus por ter-me dado saúde e disposição e por ter colocado em meu caminho pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram nesta trajetória, às quais preferi não citá-las aqui para não cometer injustiças por esquecimento de nomes.

Agradeço ao Brasil, minha Pátria tão querida e tão necessitada de filhos para defendê-la!

Agradeço ao meu orientador, Professor Kamal, que acreditou em mim e com sua visão de mundo, sabedoria e humildade não mediu esforços para que esse trabalho se tornasse realidade.

Agradeço à CPG

Ao CNPQ pelo apoio financeiro

Minha eterna gratidão

Fatima

“Coragem e perseverança têm um talismã mágico que faz as dificuldades desaparecerem e os obstáculos sumirem no ar.”

*John Quincy Adams*

## Resumo

Com o aumento da população mundial, nas últimas décadas, a geração de resíduo sólido e de esgoto doméstico tem aumentado. No Brasil, são gerados diariamente acima de 250 mil toneladas de resíduo sólido urbano e cerca de 28 milhões de metros cúbicos de esgoto, mas coletá-los e tratá-los tem sido um dos maiores desafios para os administradores municipais. Tanto o resíduo sólido quanto o esgoto doméstico sem tratamento impactam o ambiente e, conseqüentemente, a saúde pública. Este trabalho propõe técnicas de tratamento de RSU e ED com recuperação de energia e minimização dos impactos ambientais, com base na reciclagem, biodigestão e incineração, aplicadas ao Brasil e em seis municípios de regiões distintas. Os resultados mostram que a reciclagem de 10% do potencial de reciclável coletado no país pode render R\$ 110 milhões/mês, ganhos de 256.9 mil GJ / dia de energia e emissão evitada de cerca de 5,8 MtCO<sub>2</sub>/ano. Na incineração de resíduo sólido, a energia elétrica resultante equivale ao consumo de 16,5 milhões de residências com emissões de cerca de 12,9 MtCO<sub>2</sub>/ ano. A incineração do lodo de esgoto resulta em energia elétrica equivalente ao consumo de 1,3 milhão de residências e emissões de 0,875 MtCO<sub>2</sub> / ano. Além de recuperar água para reuso correspondente à metade do volume de esgoto gerado diariamente. Pelos resultados, conclui-se que municípios grandes geradores de RSU e de ED podem obter melhor aproveitamento energético e econômico com os sistemas de tratamento propostos enquanto municípios pequenos, a sugestão é que se agrupem para tratar o resíduo de forma comunitária visando à redução dos custos e aproveitamento dos benefícios.

Palavras chave: Resíduo sólido; esgoto doméstico; reciclagem, incineração; biodigestão; biogás fugitivo; energia, gases de efeito estufa, água para reuso, emissões.

## Abstract

During the last decades the world population increased and as a consequence the production of urban solid waste and domestic sewage also increased. The daily production of urban solid waste in Brazil is about 250 thousand tons while the domestic sewage is about 28 million cubic meters, whose collection and treatment turned to be one of the big challenges for the public administration. Intuitively, this work proposes techniques for treating the urban solid waste and domestic sewage minimizing the ambient impacts and producing energy by recycling, biodigestion and incineration which were used for Brazil and six municipalities in distinct regions. The results show that recycling only 10% of the available recyclables can provide a monthly sum of R\$ 110 million, daily energy economy of 257 mil GJ and avoid the emission of about 5.8 MtCO<sub>2</sub>/year. The incineration of the urban solid waste can generate electricity enough for 16.5 million residences and emitting 12.9 MtCO<sub>2</sub> / year. The incineration of sewage sludge can generate electricity enough for 1.3 million houses and emits 0.875 MtCO<sub>2</sub> / year. The recuperated water for reuse is about 50% of the daily consumed water. From the results it is possible to conclude that big municipalities can benefit from the innumerable energy, financial and ambient advantages by adequately treating their RSU and domestic sewage. It is recommendation that small municipalities can join together to use common installations to reduce costs and share benefits.

**Keywords:** Solid waste; domestic sewage; recycling; incineration; biodigestion; fugitive biogas; energy; greenhouse effect gases; reuse water, emissions.

## Lista de Figuras

### Figuras do Capítulo 2

Figura 2.1 Taxa de coleta de resíduo por economia	17
Figura 2.2 Identificação por cor de diferente tipo de material	19
Figura 2.3 Simbologia da reciclagem	19
Figura 2.4 Tratamento biológico e térmico para resíduo sólido	25
Figura 2.5 Subproduto da compostagem	25
Figura 2.6 Projeto de aterro sanitário em Maceió-AL	27
Figura 2.7 Detalhamento técnico de aterro sanitário	28
Figura 2.8 Dreno e queima livre de biogás	31
Figura 2.9 Fuga de gás no sentido vertical	32
Figura 2.10 Fuga de biogás no sentido horizontal	32
Figura 2.11 Sistema de recuperação de biogás em poço vertical	33
Figura 2.12 Diagrama de incinerador em massa	38
Figura 2.13 Incinerador modular com sistema de grelha	39

### Figuras do Capítulo 3

Figura 3.1 Diagrama de rede coletora de esgoto	52
Figura 3.2 Sistema alternativo de tratamento de esgoto em ETE	56
Figura 3.3 Sistemas de tratamento de esgoto e vias de descarga	61
Figura 3.4 Funcionamento de um tanque séptico conforme NBR 7229	62
Figura 3.5 Percentual da população no Canadá e respectivos tratamentos de ED	63
Figuras 3.6a e b Escoamento de esgoto em canal e vala	64
Figura 3.7 Tipo de lagoa não gerenciada	65
Figuras 3.8 (a) e (b) Evolução da coleta de esgoto e crescimento populacional	66
Figura 3.9 Percentual de domicílios com esgoto a céu aberto em capitais brasileiras	67
Figura 3.10 Esgotamento sanitário dos domicílios urbanos	68
Figura 3.11 Percentual de esgoto tratado por tipo de tratamento	69

Figura 3.12 Processo básico de tratamento de água em ETA	70
Figura 3.13a Desaguamento de esgoto	70
Figura 3.13b Desaguamento no Rio Iguaçu-PR	70
Figura 3.14 Mar em São Luís-MA recebe esgoto bruto	72
Figura 3.15 Sistemas de tratamento de lodo secundário	73
Figura 3.16 Captação e utilização do biogás	76
Figura 3.17 Sistema de cogeração de energia	77
Figura 3.18 Esquema de incinerador tipo leito fluidizado	83

#### **Figuras do Capítulo 4**

Figura 4.1 Localização das duas capitais brasileiras e do município de Campinas	93
Figura 4.2 Aterro Aurá no município de Belém (PA)	94
Figuras 4.3 (a) e (b) Esgoto no município de Belém: contato de pessoas e animais	95
Figura 4.4 Esgoto a céu aberto em rua de São Luís (MA)	96
Figura 4.5 Aterro municipal da Ribeira em São Luís (MA)	97
Figura 4.6 Localização do município de Campinas	98
Figura 4.7 Triagem de reciclável em cooperativa de Campinas	99
Figura 4.8 Vista aérea do aterro Delta A em Campinas	99
Figuras 4.9 Destino do esgoto não coletado em Campinas	100
Figura 4.11 Área limítrofe dos municípios	101

#### **Figuras do Capítulo 5**

Figura 5.1 Reciclagem e tratamento biológico de RSU	108
Figura 5.2 Incineração de RSU	112
Figura 5.3 Tratamento biológico de esgoto doméstico	115
Figura 5.4 Incineração de ED	117

## Lista de Tabelas

### Tabelas do Capítulo 2

Tabela 2.1 Aumento da geração de RSU em diversos países	10
Tabela 2.2 Ações e metas desenvolvidas e implantadas para RSU	11
Tabela 2.3 Destinação do resíduo sólido em vários países	23
Tabela 2.4 Valores limites de emissões na União Européia	42
Tabela 2.5 Limite de emissões conforme Resolução CONAMA 316/2002	43
Tabela 2.6 Comparação de limites máximos de emissão de poluentes (mg/Nm <sup>3</sup> )	44

### Tabelas do Capítulo 3

Tabela 3.1 Características do ED	49
Tabela 3.2 Padrões de lançamento de efluente	53
Tabela 3.3 População urbana com serviço de coleta e tratamento de ED	63
Tabela 3.4 Padrões de qualidade a serem mantidos no corpo receptor	71
Tabela 3.5 Poder calorífico do lodo e outros tipos de resíduo	82
Tabela 3.6 Parâmetros de funcionamento do incinerador tipo leito fluidizado	84
Tabela 3.7 Comparação dos métodos de tratamento do lodo secundário	85
Tabela 3.8 Vantagens e desvantagens dos métodos de tratamento	85
Tabela 3.9 Variação do consumo de energia com capacidade da planta de incineração	87

### Tabelas do Capítulo 5

Tabela 5.1 Dados e parâmetros técnicos e físicos	106
Tabela 5.2 Caracterização gravimétrica do RSU	106

## **Tabelas do Capítulo 6**

Tabela 6.1 Resultados da proposta de tratamento de RSU no Brasil	128
Tabela 6.2 Resultados da proposta de tratamento de ED no Brasil	132
Tabela 6.3 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de Belém (PA)	139
Tabela 6.4 Resultados da proposta de tratamento do ED para Belém (PA)	141
Tabela 6.5 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de São Luís (MA)	143
Tabela 6.6 Resultados da proposta de tratamento de ED para a cidade de São Luís (MA)	144
Tabela 6.7 Resultados da proposta de tratamento de RSU para Campinas (SP)	147
Tabela 6.8 Resultados da proposta de tratamento de ED para Campinas (SP)	148
Tabela 6.9 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de Mogi Guaçu (SP)	151
Tabela 6.10 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de Moji Mirim (SP)	152
Tabela 6.11 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de Itapira (SP)	152
Tabela 6.12 Resultados da proposta de tratamento de ED para a cidade de Mogi Guaçu (SP)	154
Tabela 6.13 Resultado da proposta de tratamento de ED para a cidade de Moji Mirim (SP)	154
Tabela 6.14 Resultados da proposta de tratamento de ED para a cidade de Itapira (SP)	155

## **Lista de abreviações e siglas**

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANA- Agência Nacional das Águas  
CEMPRE- Compromisso Empresarial para Reciclagem  
CETESB- Companhia de Saneamento Ambiental  
CEWEP- Confederation of European waste-to-energy plants  
CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente  
COV- compostos orgânicos voláteis  
DBO- Demanda bioquímica de oxigênio  
DO- Demanda de oxigênio  
DQO- Demanda química de oxigênio  
EC- European Commission  
ED- Esgoto doméstico  
EEA - European Environment Agency.  
EEEB- Estação Elevatória de Esgoto Bruto  
ENVIROSTATS- Environment Accounts and Statistics Division  
ETA- Estação de tratamento de água  
ETE- Estação de tratamento de esgoto  
EUROSTAT- European Statistic  
FUNASA- Fundação Nacional da Saúde  
GEE- Gases de efeito estufa  
GWP- Global Warming Potential  
IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IEA - International Energy Agency  
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change  
IPEA- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada  
IPT- Instituto de Pesquisa Tecnológica

MA- Maranhão  
MDL- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo  
MMA- Ministério do Meio Ambiente  
MNCR- Movimento Nacional dos Catadores de Recicláveis  
OECD - Organization for Economic Co-operation and Development  
ONU-United Nations Organization  
PA- Pará  
PEAD- Polietileno de Alta Densidade  
PMC- Prefeitura Municipal de Campinas  
PNAD- Pesquisa Nacional por Amostra de Domicilio  
PNSB- Pesquisa Nacional de Saneamento Básico  
RH- região hídrica  
RM- região metropolitana  
RSU- Resíduo sólido urbano  
SNIS- Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento  
SS- sólido suspenso  
UASB- Upflow Anaerobic Sludge Blanket  
UNFCCC- United Nations Framework Convention on Climate Change  
UNFPA- United Nations Population Fund  
UN-HABITAT-United Nations Human Settlements Programme  
UNSTAT- United Nation Statistic Division  
UNU- United Nation University  
UN-United Nations  
US EPA- United States Environmental Protection Agency  
WEF- Water Environment Federation  
WHO- World Health Organization  
WHO/UNICEF- World Health Organization / United Nations Children's Fund

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>xvii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xix</b>
<b>LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS</b>	<b>xxi</b>
<b><u>1 INTRODUÇÃO</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 OBJETIVO GERAL	4
1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	4
1.2 RELEVÂNCIA DA PESQUISA	5
1.3 JUSTIFICATIVA	5
1.4 RESUMO DOS CAPÍTULOS	5
<b><u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: RESÍDUO SÓLIDO URBANO</u></b>	<b><u>7</u></b>
2.1 DEFINIÇÃO, CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO	7
2.2 GERAÇÃO	9
2.3 COMPOSIÇÃO	10
2.4 MECANISMO DE CONTROLE: POLÍTICA PÚBLICA E GESTÃO DE RESÍDUO	11
2.4.1 POLÍTICA PÚBLICA	11
2.4.2 GESTÃO DE RESÍDUO	14
Aspectos legais na União Européia	14
Aspecto legal no Brasil	15
2.5 COLETA DE RSU	16
2.5.1 COLETA COMUM	16
2.5.2 COLETA E A SITUAÇÃO ECONÔMICA	17
2.5.3 RESÍDUO SÓLIDO GERADO E NÃO COLETADO	18
2.5.4 COLETA SELETIVA	18
Composição dos materiais recicláveis	20
Coleta seletiva em país desenvolvido	20
Coleta seletiva em país em desenvolvimento	22
Coleta seletiva no Brasil	22
2.6 DESTINAÇÃO DO RSU: PANORAMA NACIONAL E INTERNACIONAL	22
2.7 SISTEMAS DE TRATAMENTO	23
2.7.1 RECICLAGEM: DEFINIÇÃO E CONCEITO	24
2.7.2 TRATAMENTO BIOLÓGICO: COMPOSTAGEM	25
2.7.3 EXPERIÊNCIAS DE COMPOSTAGEM	26

2.7.4	ATERRO SANITÁRIO: BIOGÁS	27
	Produção de biogás	28
	Degradação da matéria orgânica	29
	Processo aeróbio e anaeróbio	29
	Composição do biogás	29
	Instalações em operação	30
	Queima livre de biogás “flaring”	30
	Emissões fugitivas de biogás	31
	Recuperação do biogás	32
2.7.5	TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUO SÓLIDO	34
	Incineração	34
	Produção de energia	34
	Composição química do resíduo sólido	34
	Parâmetros de queima	35
	Etapas de incineração	35
	Gases de combustão	36
	Controle de poluentes	36
	Incineradores em massa e modulares	37
	Incineração em país desenvolvido	39
	Incineração em país em desenvolvimento	40
	Incineração na China	41
	Cinza: subproduto da queima	41
	Comparação de emissões: incineração e aterramento	42
	Instalação do incinerador	44
2.7.6	PIRÓLISE	44
2.7.7	GASEIFICAÇÃO	45
2.7.8	TOCHA DE PLASMA	45

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: ESGOTO DOMÉSTICO** **49**

---

3.1	DEFINIÇÃO, CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO	49
3.1.1	DESCRIBÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO ED	49
3.1.2	COMPOSIÇÃO	51
3.1.3	GERAÇÃO	51
3.2	SISTEMA DE COLETA	51
3.3	TRATAMENTO DE EFLUENTE	52
3.3.1	DESINFECÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA	53
3.3.2	TRATAMENTO DO LODO	53
3.3.3	PROCESSOS DE TRATAMENTO	54
	Tratamento preliminar	54
	Tratamento primário	55
	Tratamento secundário	55
	Tratamento terciário	56
3.3.4	TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO	56
	Sistemas Anaeróbios	57
	Lagoa de Estabilização	58
	Reator Aeróbio com Biofilme	59

Disposição no Solo	59
Lodo Ativado	60
Flotação	60
Ultravioleta	60
3.4 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO	60
3.4.1 ASPECTO LEGAL	61
3.4.2 COLETA E SITUAÇÃO ECONÔMICA	62
3.4.3 TRATAMENTO EM PAÍS DESENVOLVIDO	62
3.4.4 COLETA, TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO EM PAÍS EM DESENVOLVIMENTO	64
3.4.5 ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL	65
3.5 RECURSOS FLUVIAIS: FONTE RECEPTORA DE ESGOTO E DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA	69
3.5.1 ÁGUA DE CAPTAÇÃO	71
3.5.2 ÁGUA CONTAMINADA	71
3.6 TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO	73
3.6.1 ATERRO SANITÁRIO	73
3.6.2 TRATAMENTO BIOLÓGICO DO LODO	74
3.6.3 FERTILIZANTE	75
3.6.4 BIOGÁS	75
3.7 CONSUMO DE ENERGIA NO TRATAMENTO DE ESGOTO	76
3.7.1 BIODIGESTÃO DO LODO SECUNDÁRIO	77
3.7.2 EXPERIÊNCIA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS E OUTROS SUBPRODUTOS	78
No âmbito internacional	78
No âmbito nacional	80
3.8 INCINERAÇÃO	81
3.9 CUSTO DO TRATAMENTO DE RESÍDUO	86
3.10 INVESTIGAÇÕES ACADÊMICAS	87
<b>4   INFORMAÇÃO SOBRE OS MUNICÍPIOS INVESTIGADOS</b>	<b>91</b>
4.1 INTRODUÇÃO	91
4.2 SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL	91
4.3 JUSTIFICATIVAS PARA ESCOLHAS DOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS	92
4.4 PERFIL DO MUNICÍPIO DE BELÉM (PA)	93
4.5 PERFIL DO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS (MA)	95
4.6 PERFIL DO MUNICÍPIO DE CAMPINAS (SP)	98
4.7 PERFIL DO MUNICÍPIO DE MOGI GUAÇU (SP)	101
4.8 PERFIL DO MUNICÍPIO DE MOJI MIRIM (SP)	102
4.9 PERFIL DO MUNICÍPIO DE ITAPIRA (SP)	102
<b>5   MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>105</b>
5.1 INTRODUÇÃO	105
5.2 MATERIAIS	105
5.2.1 SISTEMAS PROPOSTOS PARA TRATAMENTO DE RSU E DE ED	105
5.3 ESCOLHA DAS ROTAS DE TRATAMENTO	105
5.4 DADOS E PARÂMETROS	105
5.4.1 PREÇO DO MIX DE REICLÁVEL	106

5.4.2	ENERGIA E EMISSÕES EVITADAS NA RECICLAGEM	107
5.5	MÉTODOS	107
5.5.1	RECICLAGEM	107
5.5.2	ATERRAMENTO DE RSU COM RECUPERAÇÃO DE BIOGÁS	107
5.5.3	CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> E DO BIOGÁS DE ATERRO	110
5.5.4	INCINERAÇÃO DE RSU	111
5.5.5	TRATAMENTO BIOLÓGICO DE ED	114
5.5.6	TRATAMENTO TÉRMICO DE ED	116

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO** **119**

---

6.1	REALIDADE DO TRATAMENTO DE RSU E ED NO BRASIL	119
6.1.1	RESÍDUO SÓLIDO URBANO (RSU)	119
6.1.2	RECICLAGEM	120
6.1.3	ESGOTO DOMÉSTICO (ED)	121
6.2	PROPOSTAS PARA TRATAMENTO DE RSU	121
6.2.1	RECICLAGEM	121
6.2.2	ATERRAMENTO DE RSU	122
	Emissões	124
	Biogás fugitivo	124
6.2.3	INCINERAÇÃO DE RSU	125
	Emissões	127
6.3	PROPOSTAS PARA TRATAMENTO DE ED	128
6.3.1	TRATAMENTO BIOLÓGICO	128
	Emissões	129
	Água recuperada para reuso	130
6.3.2	PROPOSTA DE TRATAMENTO TÉRMICO: INCINERAÇÃO	130
	Emissões	131
	Água recuperada para reuso	132
6.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EM ÂMBITO NACIONAL	133
6.4.1	REALIDADE BRASILEIRA	133
6.4.2	PROPOSTAS DE TRATAMENTO DE RSU	133
	Reciclagem	133
	Aterramento de RSU	134
	Incineração	135
6.4.3	PROPOSTA DE TRATAMENTO DE ED	135
	Biodigestão	135
	Incineração	136
6.4.4	CONSIDERAÇÕES	136
6.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO MUNICÍPIO DE BELÉM (PA)	137
6.5.1	REALIDADE DO MANEJO DO RSU E DO ED	137
6.5.2	PROPOSTA DE TRATAMENTO DE RSU	138
	Reciclagem	138
	Aterramento	138
	Incineração	139
6.5.3	RESULTADOS DA PROPOSTA DE TRATAMENTO ED	140
	Biodigestão	140

Incineração	140
6.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS (MA)	141
6.6.1 REALIDADE DO MANEJO DO RSU E DO ED	141
6.6.2 PROPOSTA DE TRATAMENTO DE RSU	142
Reciclagem	142
Aterramento	142
Incineração	143
6.6.3 PROPOSTA DE TRATAMENTO DE ED	144
Biodigestão	144
Incineração	144
6.7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO MUNICÍPIO DE CAMPINAS (SP)	145
6.7.1 REALIDADE DO MANEJO DO RSU E DO ED	145
6.7.2 PROPOSTA DE TRATAMENTO DE RSU	145
Reciclagem	145
Aterramento	146
Incineração	146
6.7.3 PROPOSTA DE TRATAMENTO DE ED	147
Biodigestão	147
Incineração	148
6.8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS MUNICÍPIOS DE MOGI GUAÇU, MOJI MIRIM E ITAPIRA (SP)	149
6.8.1 PROPOSTA DE TRATAMENTO DE RSU	150
Reciclagem	150
Aterramento	150
Incineração	150
6.8.2 PROPOSTAS DE TRATAMENTO DE ED	153
Biodigestão	153
Incineração	153
6.8.3 INSTALAÇÕES E USO COMUNITÁRIO	155
<b>7 CONCLUSÕES</b>	<b>159</b>
7.1 CONSIDERAÇÕES	165
7.2 OUTRAS RECOMENDAÇÕES	166
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>167</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Com a revolução industrial e o desenvolvimento tecnológico, o padrão de consumo na sociedade moderna mudou. As pessoas estão consumindo mais produtos para satisfazerem suas necessidades e, conseqüentemente, estão gerando mais resíduo sólido. Com o aumento da população mundial, nas últimas décadas, a quantidade gerada de resíduo sólido urbano (RSU) tem se tornado um problema para os municípios que têm de coletá-lo e tratá-lo antes de sua destinação final. Worldbank (2012) estima a geração de 1,3 bilhão de toneladas de RSU por ano, com previsão de aumento para 2,2 bilhões até 2025.

Outro tipo de resíduo gerado diariamente pelas atividades humanas é o esgoto doméstico (ED), também denominado água residuária. Assim como o RSU, a tendência do ED é acompanhar o crescimento da população que, em 2013, totalizou 7,1 bilhões de habitantes no mundo (Unstat, 2013). Globalmente, são milhões de metros cúbicos de esgoto gerados diariamente que também precisam ser coletados e tratados antes da sua destinação final. O problema, segundo WHO/UNICEF (2013), é que muitas cidades do mundo ainda necessitam encontrar solução adequada para tratá-los.

Conforme IPCC (2007), países em desenvolvimento utilizam lixões como locais de disposição de RSU e corpos hídricos (rio, mar, lagoa) para eliminar o esgoto bruto. Os danos causados pela negligência com o subproduto das atividades humanas incidem sobre o ecossistema de forma geral, com ênfase à saúde pública. A ONU estima perda do PIB anual dos municípios entre 3% a 7% devido ao saneamento impróprio que afeta principalmente a população pobre dos países em desenvolvimento (UN, 2013; UN-Habitat, 2010).

A massa de RSU é composta por matéria orgânica degradável (restos animais e vegetais), matéria orgânica não degradável (plástico) e matéria inorgânica (vidro e metal). Durante o processo de decomposição, a matéria orgânica degradável, se não for tratada corretamente, libera gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, principalmente metano e dióxido de carbono. Gera ainda um líquido poluente (chorume) contaminante do solo e dos lençóis freáticos, além de atrair para o local, insetos, roedores e animais peçonhentos que são vetores de doenças. Enquanto o

esgoto, composto por líquido e sólido contêm milhões de bactérias, vírus e outros microorganismos, alguns inclusive, são patogênicos e responsáveis por diversas doenças como febre tifóide, tétano, hepatite, disenteria, gastroenterite, leptospirose e outras (Spellman, 2003).

A leptospirose especificamente é uma doença transmitida por contato com a água contaminada pela urina de ratos. No ano de 2008, cerca de 12% dos municípios brasileiros apresentaram casos confirmados dessa doença resultando em 3% de óbitos, com maior índice registrado nas regiões metropolitanas (WHO/UNICEF, 2013; UN-HABITAT, 2010; MMA, 2009).

Por isso, IPCC (2006) e Thobanoglous e Kreith (2002) advertem que todo o RSU e o ED gerado nos municípios devem ser coletados e tratados para evitar contaminação do solo, ar e água e a conseqüente proliferação de doenças.

Coleta, tratamento de RSU e de ED e abastecimento de água potável são atividades relacionadas ao saneamento básico de responsabilidade do poder público e constitui-se como direito humano fundamental para garantia de boa saúde. Entretanto, esse direito humano ainda é negado, conforme a Organização Mundial de Saúde para cerca de 2,6 bilhões de pessoas no mundo dos quais cerca de 780 milhões vivem sem água potável (WHO/UNICEF, 2013).

No Brasil, são 124 milhões de habitantes que não têm esgoto tratado. Apenas 1.961 dos 5.565 municípios brasileiros (MCidades, 2013a) dispõem de rede coletora. Cerca de 30,5% das cidades lança esgoto bruto em rio, lago, lagoa e mar e utilizam os mesmos corpos receptores para vários usos à jusante como abastecimento de água, recreação, irrigação e aquicultura. Tratar essa água contaminada para recuperar a qualidade para abastecimento da cidade gera custo adicional (IBGE, 2011).

Relatório publicado pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2013) mostra que, em 2012, a qualidade da água estava ruim ou péssima em 44% dos 148 pontos monitorados nas bacias hidrográficas que atravessam as áreas das principais regiões metropolitanas. Esse problema, conforme o relatório ocorre devido à inexistência ou ineficiência de sistema de coleta e tratamento de esgoto sanitário que, por sua vez, acaba refletindo sobre o abastecimento de água no município. Em 2011, a média nacional de consumo de água foi 162,6 l/hab./dia que, no pós-

uso, se transformou em esgoto, sendo a maior parte despejada sem tratamento em corpos d'água (MCidades, 2013a, IBGE, 2011).

Embora, o país disponha das maiores regiões hidrográficas do mundo, ainda falta água potável para cerca de 35 milhões de pessoas. Somam-se a isso, problemas de escassez hídrica em algumas regiões e perdas no sistema de distribuição em outras, que representa mais de 50% da água tratada (MCidades, 2013a). Se a água consumida for coletada por rede geral de esgoto e tratada para reuso, pode suprir outras demandas não atendidas.

Os impactos negativos relacionados ao RSU e ao ED podem ser minimizados com seu reaproveitamento na reciclagem e tratamentos térmico e biológico. Resíduo contém valor energético e comercial. Na reciclagem, papel, papelão, plástico, vidro e metal se transformam em insumo ou matéria secundária para geração de novos produtos. O retorno à cadeia produtiva reduz a extração de recursos naturais (matéria-prima, água e energia), aumenta a vida útil do aterro, evita o uso de energia e suas respectivas emissões na atmosfera e gera renda (Lino e Ismail, 2013). Enquanto a matéria orgânica (resto de alimento, poda de planta, madeira, estopa, tecido e lodo de esgoto) no processo biológico se transforma em biogás podendo ser convertido em combustível ou eletricidade para uso em diversas aplicações. O resíduo remanescente é rico em nutrientes e serve como fertilizante ou para corrigir solo.

Na incineração de RSU e de ED o vapor gerado pode ser convertido em eletricidade e calor. O resíduo remanescente que é a cinza pode ser usado como cobertura em aterro, ou aplicada na área da construção civil, setor cerâmico e outros. O reaproveitamento de RSU e de ED tem sido prática comum em países desenvolvidos há várias décadas.

No Brasil, programa de reciclagem foi implantado no início da década de 1980. Trinta e três anos após, a coleta seletiva representa 1,2% da massa total coletada (IBGE, 2010). Praticamente, a totalidade do RSU é disposta em lixão, aterro controlado e aterro sanitário.

Em vista das tecnologias disponíveis para tratamento de RSU e ED não se pode desprezar o resíduo pós-consumo como material sem valor. Esse entendimento pode construir um novo paradigma para mudar o perfil do saneamento, necessário na maioria dos municípios brasileiros.

Diante do desperdício do potencial energético, ambiental e econômico contido no RSU e no ED gerado no país, neste trabalho são propostos os seguintes tratamentos: RSU é aterrado ou

incinerado com recuperação de energia incluindo a reciclagem em ambos os processos. Enquanto o ED é incinerado ou biodigestado em condições anaeróbicas com recuperação de energia. Estas técnicas foram aplicadas para averiguação do potencial global de ganho energético, ambiental e social no Brasil e também em seis municípios: três de grande porte e três de pequeno porte. Os três grandes municípios brasileiros estão localizados em regiões distintas do país, ou seja, Belém (PA) na região Norte; São Luís (MA) na região Nordeste e Campinas (SP) na região Sudeste e os três municípios de pequeno porte são circunvizinhos, localizados no interior do Estado de São Paulo, próximos à Campinas que são: Mogi-Guaçu, Moji-Mirim e Itapira. Estes três últimos municípios foram incluídos no estudo com o objetivo de averiguar a viabilidade do uso comum da instalação e dos equipamentos de tratamento do RSU e do ED.

Esta proposta de saneamento básico para os municípios estudados pode ajudar os administradores públicos a proporcionar melhor qualidade de vida à população, na medida em que o saneamento deixa de ser um problema sério de saúde pública, e ainda possibilita aumentar o suprimento de água, energia, gera renda e aumenta a vida útil do aterro.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos deste trabalho se dividem em geral e específico.

### **1.1.1 Objetivo geral**

Objetivo geral deste trabalho consiste em propor rotas térmica e biológica de tratamento para RSU e ED com base na reciclagem, biodigestão e incineração. Essas técnicas foram aplicadas, neste trabalho, para avaliação do potencial global de ganhos energético, econômico e ambiental do Brasil e, também, em seis municípios, sendo três de grande porte que são Belém (PA), São Luís (MA) e Campinas (SP) e três de pequeno porte que são Mogi-Guaçu (SP), Moji-Mirim (SP) e Itapira (SP).

### **1.1.2 Objetivo específico**

Calcular e analisar nos municípios selecionados, os seguintes potenciais de RSU e ED:

- Energia evitada na reciclagem;

- Emissões evitadas na reciclagem;
- Renda estimada com a comercialização do reciclável;
- Geração de energia térmica e elétrica do biogás do RSU e do ED;
- Energia térmica e elétrica da incineração do RSU e do ED; e,
- Água residuária para reuso.

## **1.2 Relevância da pesquisa**

Este estudo apresenta propostas de tratamento para RSU e para ED que, se implantadas em âmbito nacional, devem minimizar os impactos ambientais e maximizar o aproveitamento do potencial energético e econômico contido no resíduo.

## **1.3 Justificativa**

O panorama de tratamento de RSU e de ED no Brasil e as dificuldades encontradas pelas administrações públicas em atender as necessidades de saneamento básico da população são a motivação principal desta pesquisa. Com o intuito de contribuir nesse sentido, esta pesquisa foi norteada para avaliar globalmente o potencial de RSU e de ED como fontes renováveis de energia limpa, além de contemplar aspectos críticos como preservação ambiental, saúde pública, inclusão social e geração de trabalho e renda.

## **1.4 Resumo dos Capítulos**

Capítulo 1 aborda os problemas gerais relacionados ao aumento da população mundial nos últimos 60 anos, a mudança no padrão de consumo da sociedade e o volume de resíduo sólido e de esgoto doméstico gerado diariamente pelas atividades humanas, bem como as implicações na saúde pública decorrentes do tratamento inadequado desses dois tipos de resíduo. Por se tratar de um problema que afeta milhões de brasileiros, apresenta proposta de tratamento para minimizar os impactos negativos enquanto aproveita os potenciais energético, ambiental e econômico contidos no resíduo.

Capítulo 2 apresenta revisão bibliográfica sobre como alguns países desenvolvidos estão resolvendo seus problemas de tratamento e disposição de resíduo sólido urbano. Dentro desse contexto, a revisão apresenta modelos de gestão de resíduo, as políticas públicas vigentes bem

como as tecnologias adotadas para tratamento e disposição final do resíduo sólido urbano e os esforços em reduzir a quantidade disposta no aterro.

Capítulo 3 apresenta revisão bibliográfica sobre a situação da coleta, tratamento e disposição do esgoto doméstico em âmbito nacional e internacional, as tecnologias adotadas em alguns países e os benefícios ambientais e energéticos oriundos do tratamento adequado.

Capítulo 4 apresenta informações sobre RSU e ED no Brasil e nos seis municípios selecionados no estudo.

Capítulo 5 Apresenta os matérias e métodos que compreendem dados técnicos, escolha e justificativa dos procedimentos, esquemas de tratamento de RSU e de ED com as respectivas equações e formulações adotadas nos cálculos para atingir os objetivos propostos neste trabalho.

Capítulo 6 apresenta os resultados e discussão dos modelos aplicados ao Brasil e em cada um dos seis municípios selecionados mostrando os ganhos energéticos, ambientais e econômicos da reciclagem e do tratamento térmico e biológico do RSU e do ED e as respectivas contribuições nas áreas de energia, abastecimento de água e esgotamento sanitário.

Capítulo 7 apresenta as conclusões mais importantes desta investigação, mostrando que a proposta de tratamento de RSU e de ED é passível de ser aplicada e oferece muitos ganhos à municipalidade na área de saneamento básico, energia e ambiente.

Bibliografia: este trabalho tem conteúdo multidisciplinar e envolve os aspectos acadêmicos e práticos que necessitam avaliação e análise contínuas. Por isso, foi feita uma ampla pesquisa bibliográfica de modo a abordar os aspectos relacionados a presente investigação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: RESÍDUO SÓLIDO URBANO

### 2.1 Definição, conceito e classificação

A palavra resíduo deriva do latim *residuu* e é definida como resto de substância. Sólido é seu diferencial das emissões gasosas e líquidas. Na etimologia da palavra, resíduo é entendido como lixo ou *lix* em latim que significa cinza ou lixívia (Nag e Vizayakumar, 2005).

CETESB (1997) define resíduo sólido domiciliar como aquele “produzido em residências, em estabelecimentos, comercial e industrial, em prestadores de serviços públicos e similares cujo volume é compatível ao de recipiente padronizado apresentado à coleta regular com referência à produção máxima diária de materiais que pelas suas características físico-químicas exigem tratamento diferenciado”.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), norma NBR 10004/2004, define resíduo sólido como aquele “em estado sólido e semi-sólido resultante de atividade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Essa definição inclui também o lodo proveniente de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição (ABNT, 2004).

ABNT (2004) classifica resíduo sólido quanto ao seu potencial risco ao ambiente:

- a) Classe I - Perigosos: apresenta risco à saúde pública ou ao ambiente, por conter as propriedades inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade; e,
- b) Classe II - Não perigosos: classificam-se em duas categorias A e B.

Classe II A – aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo classe I –Perigoso ou de resíduo classe II B – Inerte. Podem conter propriedade como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Classe II B – Inerte: Aquele resíduo que, quando amostrado de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetido ao contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiver nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se pelo aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Resíduo sólido é classificado segundo a zona de produção como sendo urbano ou rural e pela característica química como orgânico e inorgânico. Diversos tipos de resíduo podem ser gerados no ambiente urbano conforme PMC (1996):

- resíduo domiciliar: composto basicamente de restos de alimentos, embalagens de plástico, de metal, de vidro e de papelão, jornais e revistas originadas da atividade residencial;
- resíduo comercial: resíduo originário das atividades realizadas em escritório, hotel, loja, cinema, teatro, mercado, terminais e outros compostos basicamente de papel/ papelão e embalagem em geral;
- resíduo industrial: devido à sua diversidade e potencial risco à saúde pública, a coleta desse tipo de resíduo e disposição final é responsabilidade da indústria geradora que deve manipulá-lo adequadamente no sistema de tratamento correto e ou reutilização;
- resíduo hospitalar: também conhecido como séptico ou contaminado, origina-se dos sistemas de saúde. Legislação própria regulamenta a manipulação desde os procedimentos internos nos hospitais e clínicas até medidas de segurança quanto à sua destinação;
- resíduo de varrição: resíduo resultante da limpeza de via pública, praça e jardim. É composto principalmente de papel, embalagem, resto de cigarro, folhagem e outros; e,
- resíduo especial: aquele que não pode ser removido pela coleta regular, inclui grande volume (animal, móvel, carro) ou o que exige coleta especial devido à sua toxicidade ou ainda, o resultante da construção civil como entulho.

Resíduo sólido urbano (RSU) é definido por Eurostat (2012) como aquele recolhido por ou em nome do município. Inclui também o resíduo “coletado diretamente pelo setor privado (empresas ou instituições privadas sem fins lucrativas), mas não em nome do município, principalmente a coleta separada para fins de recuperação”. Em geral, as definições para RSU se diversificam entre os países. Uns incluem apenas resíduo domiciliar; enquanto outros incluem resíduo do tipo similar proveniente de atividades comerciais e de escritórios (EC, 2006; Franchetti, 2009; Reddy, 2011).

Essa falta de padronização na definição do RSU entre os países, conforme Tchobanoglous e Kreith (2002), demonstra que a geração de resíduo não é uma atividade muito controlada e, que a gestão de resíduo tem sido função de engenharia por estar relacionada com a evolução da

sociedade tecnológica. Esta mesma que se beneficiou com a produção em massa, agora tem o desafio de eliminar o subproduto. Esse tem sido um dos maiores desafios da modernidade porque o modo de vida produz enormes quantidades de resíduo e as pessoas querem preservar seu estilo de vida, ao mesmo tempo, querem proteger o ambiente e a saúde pública.

## **2.2 Geração**

O termo geração refere-se à quantidade de materiais e produtos que entram na massa de RSU. Para Tchobanoglous e Kreith (2002), a geração de resíduo engloba atividades e identificação dos respectivos materiais como sendo sem valor que são jogados fora ou reunidos juntos para eliminação.

A geração de resíduo surgiu com a civilização humana e está intrinsecamente relacionada à população, à urbanização e à riqueza. As fases do processo de evolução histórica do homem no contexto da geração de resíduo e suas implicações ambientais, sociais, econômicas e energéticas desde as antigas civilizações até final das décadas de ciclo 21 são assuntos multidisciplinares, com abordagem ampla na literatura, inclusive por UN-HABITAT, (2013); Kumar (2012); Unstat (2011); Patnaik (2010); IPCC (2007); EC (2006); Nag e Vizayakumar (2005); Tchobanoglous e Kreith (2002); Chandler et al. (1997); Rusbrook e Pugh (1999); Sachs (1986); Morin (1984) e Schumacher (1979).

Resíduo sólido é gerado em todo o ciclo de vida do produto, ou seja, desde a produção e a extração da matéria-prima e nas etapas subsequentes aos processos produtivos até o consumo final, e diante do volume gerado, países desenvolvidos têm criado mecanismos para envolver o setor produtivo e consumidores no processo de tratamento com o objetivo de reduzir a quantidade crescente de descartes e, com segurança e economia, reutilizá-lo ou eliminá-lo. Tabela 2.1 mostra o aumento progressivo da quantidade de RSU gerado em 10 países desde 1980 até 2011.

A análise geral mostra que o aumento da geração de RSU entre os 10 países selecionados variou de 9,6 a 95% no período entre 9 a 29 anos, sendo que Dinamarca e México tiveram aumento médio de 92% no período médio de 23 anos.

Tabela 2.1 Aumento da geração de RSU em diversos países

País	Período	Tempo (ano)	Aumento da geração de RSU (mil t)	Aumento da geração de RSU (%)
Canadá	1980-1990	10	5.510	44
China	2000-2009	9	40.790	33
Dinamarca	1980-2005	25	1.944	95
França	1990-2011	21	8.320	21
Japão	1980-2000	20	8.367	19
Korea	2000-2011	11	1.630	9.6
México	1990-2011	21	18.998	90
Reino Unido	1990-2005	15	7.977	29
Rússia	1990-2010	20	25.724	59
Suécia	1980-2009	29	1.976	79

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados de UN (2013); OECD (2012); Unstat (2011).

### 2.3 Composição

A massa de RSU constitui-se basicamente de matéria orgânica degradável também denominada resíduo úmido como restos de alimento, podas de planta, madeira, estopa, tecido e papel; de matéria orgânica não degradável como plástico e de matéria inorgânica não degradável ou resíduo seco como vidro, metal e outros (Reddy, 2011; PMC, 1996).

A composição da massa de resíduo gerada varia entre países, cidades e, nestas, entre as classes sociais. Vários fatores influenciam no percentual de geração como situação econômica, estrutura industrial e nível de avanço tecnológico, política nacional e regional de gestão de resíduo, estilo de vida e grau de urbanização. Países ricos geram mais resíduo de embalagem enquanto países pobres geram mais resíduo orgânico (restos de alimento) (Worldbank, 2012; OECD, 2012; PMC, 1996).

Diante do aumento da geração, da composição e da diversificação dos tipos de material contido na massa de RSU bem como das implicações relacionadas à coleta, tratamento e destinação final, a introdução de mecanismos de controle como política pública e plano de gestão tem sido necessária nos países.

## 2.4 Mecanismo de controle: política pública e gestão de resíduo

### 2.4.1 Política pública

Souza (2006) define política pública como o “campo do conhecimento que busca, ao mesmo tempo, colocar o governo em ação e/ou analisar essa ação (variável independente) e, quando necessário, propor mudanças no rumo ou curso dessas ações (variável dependente). A formulação de políticas públicas constitui-se no estágio em que os governos democráticos traduzem seus propósitos e plataformas eleitorais em programas e ações que produzirão resultados ou mudanças no mundo real”.

Dessa forma, as políticas públicas internacionais foram criadas desde 1980, têm sido aplicadas e constantemente revisadas conforme as prioridades políticas de cada país, no sentido de resolver problemas de coleta, tratamento e disposição de resíduo sólido. A Tabela 2.2 mostra o resumo das principais medidas aplicadas em alguns países.

Tabela 2.2 Ações e metas desenvolvidas e implantadas para RSU

País	Ano	Descrição
Alemanha	1990 1998 2010	Prioridade para a reciclagem; Sistema de rotulagem denominado “Ponto Verde”: informação se a embalagem do produto é reciclável; Lei estabelece metas de reutilização, recuperação e reciclagem; e, Meta de reciclagem de matéria orgânica atingida com proposta de mais avanço no sistema de coleta.
Áustria	1995	Prioridade para reciclagem; e, Lei determina que 95% da matéria orgânica e similar seja coletada seletivamente e encaminhada para compostagem e biodigestão.
Holanda	1994 2000	Metas para prevenção e reciclagem de 29 tipos de resíduo; Meta para reciclagem de 60% das embalagens; Aplicação de lei nacional para coleta seletiva de matéria orgânica; Ano-base para alcance da meta;

		Proibição do uso de aterros; e, Taxação ao resíduo como parte da estratégia que inclui campanhas públicas de informação e introdução de normas mínimas para garantir a qualidade do resíduo tratado.
Dinamarca	1982 1977	Prioridade para incineração com recuperação de energia; Proibição de recipiente não-retornável para cerveja e refrigerante; e, Aplicação de impostos sobre recipiente de bebidas.
Finlândia	1970	Implantação do sistema de depósito-reembolso e impostos sobre embalagens de bebidas.
Suécia	1970	Implantação do sistema de depósito-reembolso e impostos sobre embalagens de bebidas; e, Meta para coleta seletiva e recuperação de 35% da matéria orgânica para tratamento biológico.
Itália	1988 1993 1989	Implantação de metas para coleta seletiva de 50% do vidro, 60% dos metais, 40% do plástico e 40% de materiais misturados; Prazo para alcance das metas; e, Imposto sobre sacola plástica.
Japão	1990 2009	Meta de 40%-60% para reciclagem de diferentes tipos de resíduo; Medidas para redução do resíduo de embalagens: incluem premiações e restrições ao uso de sacolas plásticas; e, Aderência às medidas por 40% dos municípios japoneses.
Coréia	1993	Implantação de política de redução de embalagens; Proibição do uso de materiais como resinas sintéticas e PVC laminado; Limite máximo de 2 camadas de embalagens para determinados tipos de produtos alimentícios; e, Meta para reutilização de embalagens.
China		Implantação de políticas para disposição de RSU; e, Restrição ao excesso de embalagens.
EUA	1971	Restituições obrigatórias para recipientes de cerveja e refrigerante – adesão em 10 Estados; e,

	1987 a 1992	Aplicação de leis específicas para programas de coleta seletiva e reciclagem e para diminuição de metais pesados nas embalagens – adesão em 22 Estados.
Canadá	1990  2000	Redução em 50% da quantidade de resíduo de embalagens com base em reutilização, redução e reciclagem; Atribuição da responsabilidade ao fabricante; e, Ano-base para alcance da meta.
Espanha	1996  2008  2015	Implantação da coleta seletiva de matéria orgânica na Região da Catalúnia;  Implantação do plano de gestão de resíduo com metas para coleta seletiva de matéria orgânica; e, Ano-referência para cumprimento das metas.
França	2012	Imposição da coleta seletiva de matéria orgânica aos geradores de 50 e 80 t/ano.
Irlanda	  2010 2013 2016	Coleta seletiva domiciliar de matéria orgânica é realizada em 21 dos 26 Conselhos de Distritos; Prazo para cumprimento da meta de 59,4% de coleta seletiva de matéria orgânica; Prazo para alcance da meta de 72,9%; e, Previsão de meta de 80,1% .

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Eurostat (2012); OECD (2012); USEPA (2013); Unstat (2011); IPCC (2007) e EC (2006).

Resultados das políticas públicas adotadas nos 27 Estados-Membros da União Européia mostram que, entre o período de 2001-2010, foram desviadas do aterro cerca de 41 milhões de toneladas de RSU, enquanto a incineração aumentou quase 15 milhões de toneladas e, ambas, reciclagem e compostagem aumentaram 28 milhões de toneladas (EEA, 2013).

Uma das ferramentas de suporte à política pública e essencial para o alcance dos objetivos e metas propostos tem sido o plano de gestão de resíduo.

## 2.4.2 Gestão de Resíduo

Conforme MMA (2012), gestão de resíduo integra “o conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para o resíduo sólido de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob premissa do desenvolvimento sustentável”<sup>1</sup>.

Kumar (2010) considera como gestão eficiente do resíduo sólido a aplicação de vários métodos de tratamento, tecnologias e práticas. Além do aterro sanitário e da reciclagem, as tecnologias disponíveis para gestão de RSU incluem tratamento biológico (digestão anaeróbia, compostagem) e tecnologias de tratamento térmico (incineração, pirólise, gaseificação e tecnologia de plasma).

### Aspectos legais na União Européia

Há um número de conceitos sobre gestão de resíduo que variam, na prática, entre países ou regiões. Na União Europeia, os dois conceitos comumente usados são hierarquia de resíduo e responsabilidade extensiva ao produtor (EEA, 2013; EC, 2006):

**Hierarquia de resíduo:** propõe que o resíduo seja gerenciado por diferentes métodos de acordo com suas características, cujas opções preferenciais representam a estrutura hierárquica. Na Europa, a preferência tem sido prevenção, reuso, reciclagem e reaproveitamento com recuperação de energia e, como última opção, o aterro (Diretiva 2008/EC). A hierarquia objetiva assegurar o aspecto ambiental do resíduo sólido. Trata-se do aspecto mais importante da gestão, ou seja, deve maximizar os benefícios do produto e minimizar a geração de resíduo para disposição.

**Responsabilidade extensiva ao produtor:** representa a estratégia de embutir todos os custos associados ao produto e seu ciclo de vida (incluindo o custo da disposição no fim da vida útil) no preço de mercado do produto. Essa responsabilidade atribuída ao produtor é um meio de fazer a empresa assumir a responsabilidade pelo produto durante a manufatura até o pós-consumo.

---

<sup>1</sup> Na definição do Relatório Brundtland divulgado em 1987, Desenvolvimento Sustentável é aquele que “satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades” (Brundtland, 1987).

## Aspecto legal no Brasil

No Brasil, normatização sobre RSU e ED estão inseridas em um conjunto de normas e leis que formam a política nacional de saneamento básico. A Lei nº 5.318 de 26/09/1967 “Institui a Política Nacional de Saneamento e a criação do Conselho Nacional de Saneamento” e a Lei nº 6.938 de 31/08/1981 “dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente seus fins e mecanismos [...]” (MMA, 2010).

Especificamente, as atividades que envolvem coleta, tratamento e destinação final do resíduo sólido estão regulamentadas na recente Política Nacional de resíduo sólido (PNRS) aprovada em 2010, Lei nº 12.305 que inclui outras três Leis, as de nºs 11.445/2007; 9.974/2000 e 9.966/2000. Essa nova imposição, oriunda de diretivas europeias, estabelece, entre outros, o fechamento dos lixões até agosto de 2014, o aumento do índice de reciclagem para 20% e a inclusão dos catadores nos programas de coleta seletiva municipal (MMA, 2012).

Dois itens da Lei 12.305, Capítulo II, Art. 7º dos Objetivos e Capítulo III Art. 8º dos Instrumentos da PNRS estão relacionados a este trabalho que são:

*IV – adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais (Capítulo II);*

*VI – cooperação técnica e financeira entre setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão, reciclagem, reutilização, tratamento de resíduo e disposição final ambientalmente adequada de rejeito (Capítulo III).*

Tratamento de resíduo sólido é definido pela Resolução CONAMA nº 5/1993, como o “conjunto de unidades, processos e procedimentos que alteram as características física, química ou biológica do resíduo e conduzem à minimização do risco à saúde pública e à qualidade do ambiente” (CONAMA, 2013).

A mesma Resolução define disposição do resíduo sólido como “conjunto de unidades, processos e procedimentos que visam ao lançamento de resíduo no solo, garantindo-se a proteção da saúde pública e a qualidade do ambiente” (CONAMA, 2013). Mas, relatório do Instituto de

Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) mostra que, em 2008, 49% das unidades de disposição no solo eram lixões, 22% eram aterros controlados e 29% eram aterros sanitários.

Aterro controlado é o “local utilizado para despejo do resíduo coletado, em bruto, com cuidado de, diariamente, após a jornada de trabalho, cobrir o resíduo com uma camada de terra, de modo a não causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, bem como minimizar os impactos ambientais” (IBGE, 2010).

A mesma fonte define Lixão ou vazadouro a céu aberto como “local utilizado para disposição do lixo, em bruto, sobre o terreno, sem qualquer cuidado ou técnica especial. Caracteriza-se pela falta de medidas de proteção ao ambiente ou à saúde pública”. Isso significa que 71% dos locais de disposição do RSU do país é inadequado<sup>2</sup> (IBGE, 2010).

Tratamento e disposição final de resíduo sólido são, portanto, as duas últimas etapas finais do processo, antes disso, resíduo precisa ser separado, preferencialmente na fonte (domicílio), coletado e encaminhado para as etapas sequenciais (Lino, 2009). Para avançar e atingir as metas propostas, países têm investido em programas de informação ambiental sobre a importância da separação do resíduo na fonte para facilitar o tratamento e a destinação final. Tanto a reciclagem (papel/papelão, plástico, vidro e metal) quanto à compostagem (restos de alimento, podas de planta, madeira, estopa, e tecido) exigem coleta diferenciada (Rushbrook and Pugh, 1999).

## **2.5 Coleta de RSU**

A norma brasileira, NBR 12980/1993, define coleta de resíduo sólido como “ato de recolher e transportar resíduo sólido de qualquer natureza, utilizando veículos e equipamentos apropriados para tal fim. A mesma norma trata de coleta, varrição e acondicionamento de RSU” (ABNT, 1992).

### **2.5.1 Coleta comum**

Coleta comum ou misturada, conforme a Norma Brasileira, NBR 12980, compreende o “recolhimento do resíduo gerado em residência, estabelecimento comercial, indústria, público e

---

<sup>2</sup> IBGE (2002) considera tratamento inadequado a disposição de resíduo sólido em locais abertos (lixão, aterro controlado, áreas alagadas etc) que colocam em risco o ambiente e à saúde pública.

de prestação de serviços, cujo volume e característica sejam compatíveis com a legislação municipal vigente” (ABNT, 1992). Deve estar acondicionado em saco plástico e/ou recipiente, colocado na calçada ou logradouro para ser coletado, em dia e período pré-determinados (IBGE, 2002).

### 2.5.2 Coleta e a situação econômica

Dados do Wordbank (2012) mostram que nem todo RSU gerado nos países é coletado. A quantidade coletada varia entre as nações. Em geral, países economicamente desenvolvidos coletam mais resíduo, como mostra a Figura 2.1.

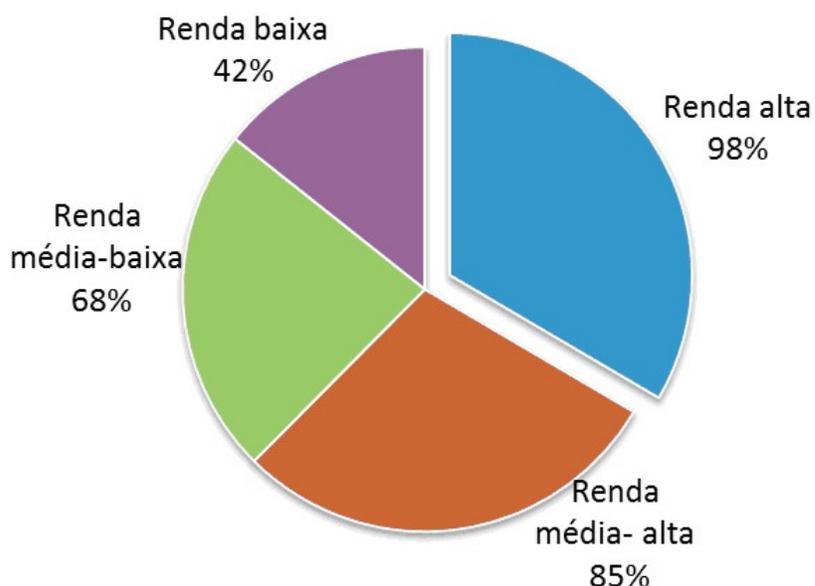


Figura 2.1 Taxa de coleta de resíduo por economia.

Fonte: Worldbank (2012).

Como pode ser observado, a taxa de coleta dos países economicamente desenvolvidos representa duas vezes mais à dos países de renda baixa. Nas duas faixas de renda (alta e média-alta) a taxa média de coleta ultrapassa 80%. Os principais geradores de RSU dos países de renda alta são Estados Unidos, Canadá e Japão. De renda média alta, os maiores geradores são México, Rússia e Líbano e na faixa de renda média-baixa que inclui Brasil, China, Índia e Turquia, a taxa de coleta não atinge 70%. Especificamente, no Brasil, conforme dados do Censo demográfico

2010, cerca de 97,3 dos domicílios urbanos são atendidos por coleta de resíduo. Países com faixa de renda baixa que inclui Etiópia e Tanzânia entre os principais geradores, a taxa de coleta fica abaixo de 50%. Isso demonstra que pobreza está aliada à falta de saneamento (UN-HABITAT, 2013; Worldbank, 2012).

### **2.5.3 Resíduo sólido gerado e não coletado**

Resíduo gerado e não coletado normalmente tem seu destino final em ruas, praças públicas, terrenos baldios, beiras de estradas, rios e outros locais inadequados que além de contaminar o solo e a água devido à decomposição da matéria orgânica, ainda atrai insetos e animais roedores e peçonhentos, criando ambiente favorável para multiplicá-los, resultando em impactos negativos ao ambiente e à saúde pública. Outra prática, bastante comum de resíduo não coletado tem sido a queima aberta. Nesse processo tem-se, principalmente, geração de CO<sub>2</sub> liberado na atmosfera que, por ser um gás de efeito estufa, contribui para o aquecimento global (Lino, 2009).

### **2.5.4 Coleta seletiva**

A NBR 12980 trata coleta seletiva como “remoção dos resíduos previamente separados pelo gerador, tais como: papel, plástico, lata, vidro e outros” (ABNT, 1992). Em IBGE (2002), coleta seletiva compreende separação e acondicionamento de materiais recicláveis em sacos. Preferencialmente, a separação deve ser realizada nos locais onde o resíduo é produzido, objetivando, inicialmente, separar resíduo orgânico (resto de alimento, cascas de frutas, legumes etc.) do resíduo inorgânico (vidro, plástico, metal etc.). Esta prática facilita a reciclagem, uma vez que material limpo aumenta o potencial de reaproveitamento e comercialização.

Coleta seletiva de resíduo é um processo que antecede a reciclagem, cujas experiências no mundo são diversificadas (Coltro e Madi, 1995). Na definição do IPT/CEMPRE (2000) e Grippi (2001), trata-se de um sistema de recolhimento de materiais recicláveis, tais como papel, plástico, vidro e metal previamente separados na fonte geradora.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 275/01 estabelece o código de cores para os diferentes tipos de resíduo a serem adotados na identificação de recipientes coletores e transportadores, bem como nas campanhas informativas para coleta seletiva (CONAMA, 2013).

Figura 2.2 mostra a identificação das cores para os diversos tipos de materiais.



Figura 2.2 Identificação por cor de diferente tipo de material.

Fonte: Share.pdfonline.com

O símbolo do material reciclado tem três setas. A primeira representa o produtor; a segunda o consumidor e a terceira, o responsável pela coleta e sua inserção no mercado. A Figura 2.3 mostra os símbolos do papel, lata de alumínio, aço, vidro e o plástico. O segundo símbolo (material reciclado) refere-se à embalagem produzida com material reciclado. Plástico tem numeração de 1 a 7 na parte interna do triângulo que corresponde à especificação de cada tipo de plástico.



Figura 2.3 Simbologia da reciclagem.

Fonte: Abre (2008).

## **Composição dos materiais recicláveis**

Plástico é derivado de petróleo, fabricado a partir de resina sintética, denominada polímero, subdivide-se em:

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| 1 - PET: Polietileno Tereftalato | 2 - PEAD: Polietileno de Alta Densidade  |
| 3 - PVC: Policloreto de Vinila   | 4 - PEBD: Polietileno de Baixa Densidade |
| 5 - PP: Polipropileno            | 6 - PS: Poliestireno                     |
| 7 – Outros                       |  |

Papel é composto por fibras de celulose produzidas a partir de espécies vegetais. No Brasil, as espécies mais utilizadas são eucalipto e pinus que, desde 1993, vem sendo plantada pela indústria brasileira, cujo montante tem ultrapassado 135 milhões de árvores (Grippi, 2001).

Vidro é composto de areia, barrilha, calcário e feldspato obtido pelo processo de fusão em altas temperaturas e resfriamento até o estado rígido, cujo principal componente é a sílica. Trata-se de material com alto poder de reciclabilidade. Seu retorno à cadeia produtiva pode acontecer infinitas vezes. É praticamente 100% reciclável, ou seja, o processamento na indústria de 1 kg de caco de vidro resulta em quase 1 kg da mesma matéria. Uma tonelada de vidro reciclado economiza 603 quilos de areia, 196 quilos de carbonato de sódio, 196 quilos de calcário e 68 quilos de feldspato. A inserção de cada 10% de caco utilizado na produção evita o consumo de 2,9% de energia. Disposto na natureza, o vidro tem seu tempo de decomposição indeterminado (Grippi, 2001).

Metal é classificado em dois grupos: ferroso e não ferroso. O ferroso é composto por ferro e aço e o não ferroso, composto por alumínio, cobre, chumbo, níquel e zinco. Assim como o vidro, o alumínio é praticamente 100% reciclável, ou seja, 1 kg de sucata de alumínio produz quase 1 kg do mesmo produto (Grippi, 2001).

## **Coleta seletiva em país desenvolvido**

Várias publicações sobre experiências internacionais com coleta seletiva estão disponíveis. Na França (Wenisch et al., 2004); na Suécia (Petersen e Berg, 2004); em Portugal (Magrinho et.

al., 2006); na Espanha (Tayibi et al., 2007, González-Torres et al., 2005), no Reino Unido (Read, 1999) e no Japão (Okuda e Thomson, 2007, Tanaka, 1999, Sakata, 2007).

### **Alemanha**

Na Alemanha, a decisão sobre a coleta seletiva é do consumidor, que pode optar entre pagar para ter o reciclável recolhido em seu domicílio ou entregá-lo no local designado. Cerca de 85% dos 82,6 milhões de habitantes daquele país preferem pagar pela coleta a ter que se deslocar até centrais localizadas em pontos estratégicos para depositar seu reciclável (Gonopolski, 2007).

### **França**

Na França, cerca de 20% do resíduo reciclável é coletado separadamente. O vidro e o metal são depositados voluntariamente pelos cidadãos em container de reciclável instalado em local determinado. O Plástico é coletado porta-a-porta e o papel/papelão coletado por empresa de triagem (Wenisch et al., 2004).

### **Reino Unido**

No Reino Unido, o governo criou uma estratégia de comunicação com os moradores no sistema porta-a-porta para aumentar a adesão à coleta seletiva e diminuir a quantidade de resíduo disposto no aterro que, no período de 11 anos, aumentou 10 mil toneladas. Essa estratégia trouxe resultados positivos na análise de Read, et al. (1999). No período de 4 semanas que compreendem pré e pós-programa, a taxa de adesão à coleta seletiva aumentou em 19% passando de 107 toneladas semanais para 132 toneladas (Read et al., 1999).

### **Japão**

Japão também busca solução para minimizar a disposição de resíduo em aterro. Com população de 128 milhões de habitantes, o total gerado contabiliza 51,6 milhões de toneladas/ano. Cerca de 74% é destinado a 1490 incineradores, cerca de 16% é reciclado e 10% aterrado em 2047 aterros (Tanaka, 1999; Okuda e Thomson, 2007; Sakata, 2007).

## **Coleta seletiva em país em desenvolvimento**

Experiências com coleta seletiva e reciclagem envolvendo a participação do poder público, entidades assistenciais e cooperativas de catadores em países em desenvolvimento também são abordadas na literatura como o caso da Colômbia, onde acima de 1000 catadores organizados em cooperativa são responsáveis pela limpeza urbana na cidade de Medellín (Medina, 2000; 1997).

Outras iniciativas importantes são desenvolvidas na Turquia (Kocasoy, 2002, Metin et al., 2003; em Taiwan (Lu et al., 2006; China (Wang et al., 2008, Zhang et al., 2007); na Índia (Sharholly et al., 2008, Talyan et al., 2008, Hayami et al., 2006, Agarwal, 2005); nas Filipinas (Medina 2000, 1997) e no México (Buenrostro, 2003).

## **Coleta seletiva no Brasil**

A coleta seletiva no Brasil foi iniciada no final da década de 1980. Em 2008, dos 5.565 municípios brasileiros apenas 994 haviam implantados programa de reciclagem. Pelos dados do IBGE (2010) foram coletadas seletivamente cerca de 3.122 t/dia de recicláveis. A taxa de reciclagem do país corresponde a 1,2%. Entretanto, a atividade tem sido impulsionada por catadores formais (cooperativas e associações) e informais que, em 2012, foi estimado entre 600 a 800 mil trabalhadores (IPEA, 2012; MNCR, 2012) que coletam os recicláveis nas ruas dos grandes centros urbanos e também nos lixões para garantir seu sustento. Nessas condições de coleta, o município não tem controle sobre a quantidade de reciclável coletado.

Importantes programas de coleta seletiva desenvolvidos por cooperativas e associações de catadores com apoio das prefeituras estão presentes em várias cidades brasileiras e são abordadas na literatura. Em Porto Alegre (Perin, 2003; Medina, 2000; Anderson, 2005; Cabral, 2001); em Florianópolis (Perin, 2003; Cruz, 2002); em Curitiba (Perin, 2003; Cruz, 2002); em Belo Horizonte (Perin, 2003, Medina, 2000, 1997); em São Paulo (Ribeiro et al., 2009; Perin, 2003; Cruz, 2002); em São Bernardo do Campo (Gonçalves et al., 2007); em Diadema (Gonçalves et al., 2007) e em Campinas (Lino, 2009; Lino et al., 2010).

## **2.6 Destinação do RSU: panorama nacional e internacional**

Em geral, os mecanismos adotados pelos países da União Europeia e Japão com base na

hierarquia do resíduo (prevenção, reuso, reciclagem, reaproveitamento com recuperação de energia e aterro como última opção) têm possibilitado o desvio de milhares de toneladas/ano de RSU do aterro, como mostra a Tabela 2.3.

Os dados mostram que dos 16 países selecionados na Tabela 2.3, em 7 (Áustria, Dinamarca, França, Alemanha, Holanda, Suécia e Suíça) com exceção do Japão, a média de incineração e compostagem atinge 40% e 20% respectivamente. A média de aterramento é de 6% e reciclagem corresponde a média de 32%. Áustria, Alemanha, Holanda e Suécia estão chegando próximos da independência de aterro. Pelo menos 9 dos 16 países ainda dependem fortemente de aterro.

Tabela 2.3 Destinação do resíduo sólido em vários países

País	Ano	RSU (mil t)	Aterro (%)	Incineração (%)	Reciclagem (%)	Compostagem (%)
Áustria	2009	4.941	0.7	29.4	30.2	39.7
China	2009	157.340	56.6	12.9	-	1.1
Dinamarca	2009	4.530	3.5	51.1	34.2	16.5
França	2009	34.540	32.3	33.9	18.2	15.6
Alemanha	2009	48.101	0.4	32.3	46.6	16.9
Irlanda	2009	3.300	60.6	2.6	31.8	3.5
Itália	2009	32.500	49.2	12.7	12.4	35.4
Japão	2003	54.367	3.4	74.0	16.8	-
México	2006	36.088	96.7	0.0	3.3	0.0
Holanda	2009	10.159	0.7	33.1	27.2	23.4
Portugal	2009	5.185	61.7	18.5	8.2	11.6
Suécia	2009	4.486	1.4	48.4	35.4	13.8
Suíça	2009	5.460	0.0	48.7	34.2	17.0
Turquia	2009	28.006	84.8	0.0	0.0	1.1
Reino Unido	2009	32.600	49.1	11.1	26.9	14.7
Brasil	2008	94.702	98	0.02	1.2	0.6

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados de Unstat (2011), OECD (2012), IBGE (2010).

## 2.7 Sistemas de tratamento

Os sistemas de tratamento de RSU envolvem reciclagem, tratamento biológico/compostagem; aterro sanitário/biogás; e tratamento térmico/incineração.

### **2.7.1 Reciclagem: definição e conceito**

Na definição etimológica da palavra reciclagem, o “re” é prefixo latino que significa repetição: recomeçar, ação retroativa. Ciclo é palavra grega, “kýklos”, exprime idéia de círculo, entendido como repetição do círculo. Na acepção da palavra, reciclagem significa reaproveitar. No caso do resíduo sólido, pode ser entendido como todo processo de transformação envolvendo alteração de suas propriedades física e físico-química para criação de produtos novos (Grippi, 2001).

IPT / Cempre (2000) define reciclagem como resultante de uma série de atividade, pela qual o material rejeitado ou encontrado nessa condição é desviado na coleta, separado e processado para ser usado como “matéria-prima” na manufatura de novos produtos.

Lino e Ismail (2012) e Dias (2001) consideram reciclagem como processo que se inicia com a coleta de resíduo sólido, pré-separado ou não na fonte (domicílio), sua triagem e beneficiamento para posterior transformação na indústria recicladora em matéria-secundária. Dessa forma, resíduo como papel, papelão, plástico, vidro e metal proveniente do descarte pode retornar à cadeia produtiva.

A reciclagem de resíduo, proveniente de embalagem pós-consumo foi iniciada nos países desenvolvidos como EUA, Japão e em países europeus após a Segunda Guerra Mundial (Figueiredo, 1995; Marchiori, 1995).

A reciclagem possibilita aumento da vida útil do aterro; preserva recursos naturais; reduz o consumo de energia e água; economiza recursos públicos destinados ao tratamento do resíduo e gera renda (IPCC, 2007; Lino, 2009; Lino et al., 2010; Lino e Ismail, 2013).

Além da reciclagem, o RSU pode ser tratado biologicamente ou termicamente como pode ser observado na Figura 2.4.

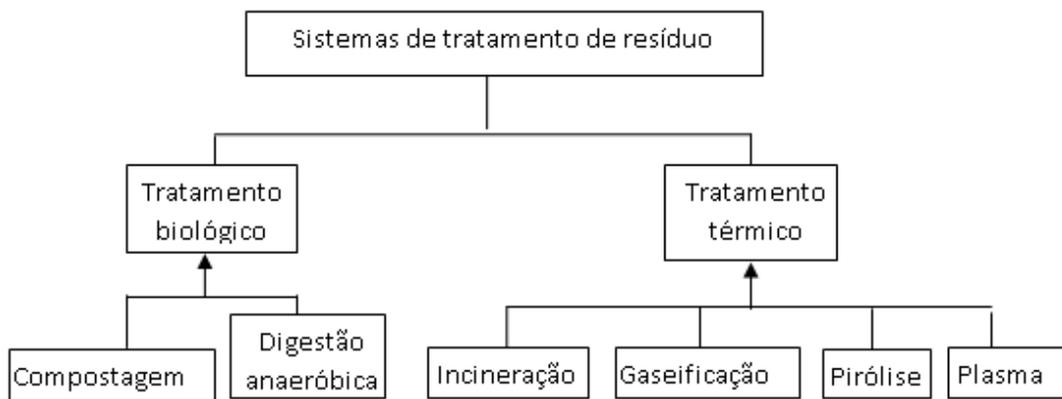


Figura 2.4 Tratamento biológico e térmico para resíduo sólido.

### 2.7.2 Tratamento biológico: Compostagem

Compostagem é a decomposição biológica do resíduo orgânico biodegradável, na presença de ar, cujo período para estabilização do produto varia entre 4-6 semanas. O processo é realizado por oxidação da matéria volátil onde o ar atua como uma fonte de oxigênio e as bactérias aeróbias atuam como catalisadoras. Os microrganismos agem naturalmente em ambiente quente e úmido no processo anaeróbico e ou aeróbico reduzindo em cerca de 50% o volume do resíduo inicial (Reddy, 2011; Nag e Vizayakumar, 2005; Cheresiminoff, 2003).

Após a digestão aeróbica, o composto orgânico (Figura 2.5) resultante requer maturação para estabilização do material. Em torno de 300 a 400 kg de composto é produzido por tonelada de matéria orgânica.



Figura 2.5 Subproduto da compostagem.

O CH<sub>4</sub> liberado na atmosfera no processo de compostagem é estimado em menos de 1% do carbono contido inicialmente no material (IPCC 2006). Conforme o teor de nitrogênio da matéria-prima e as condições de gerenciamento da pilha de composto pode haver emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) que está associada às condições anaeróbicas. As emissões variam entre menos de 0,5 a 5% do conteúdo inicial do material (IPCC 2006).

### **2.7.3 Experiências de compostagem**

Compostagem tem sido prática comum em vários países, por muitos anos, como mostrado na Tabela 2.3. Em pequena escala é realizada nos domicílios e, em grande escala, pelo poder público. Nos Estados Unidos, entre 1990 a 2011, a quantidade de resíduo compostado aumentou de 3,810 Mt para 18,449 Mt, aumento de cerca de 384% (EEA, 2013).

No Canadá, alguns municípios têm introduzido programas de compostagem doméstica para reduzir a quantidade de resíduo orgânico disposto nos aterros. Conforme Environment Accounts and Statistics Division (EnviroStats), em 2011, 61% dos domicílios canadenses participaram de alguma forma dos programas de compostagem (EnviroStats, 2013).

No Brasil, dados do IBGE (2010) mostram que 1365 t/dia de resíduo orgânico são encaminhadas para a compostagem. No entanto, conforme a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa, a qualidade do composto tem apresentado problemas em alguns programas que estão relacionados principalmente a três fatores (CETESB, 2001):

- 1) baixa qualidade do resíduo orgânico usado para produzir composto e dificuldades em controlar os processos de compostagem;
- 2) presença de metais pesados no resíduo compostado e, portanto, sua presença no composto final; e,
- 3) presença de elementos patogênicos no composto.

Nessas condições, o composto produzido deixa de ter a excelência como característica para tornar-se um risco à saúde pública.

#### 2.7.4 Aterro sanitário: biogás

Na definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT (1992) em sua NBR 8419, aterro sanitário compreende a “técnica de disposição de resíduo sólido urbano no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar o resíduo sólido à menor área possível e reduzi-lo ao menor volume permissível, cobrindo-o com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário”. A Figura 2.6 mostra um projeto de aterro em construção. Essa técnica de disposição de RSU no solo possibilita a captação do biogás e a coleta do chorume<sup>3</sup> e está gradativamente substituindo os antigos lixões em algumas cidades do mundo.

Esse assunto é abordado na literatura, dentre outros, por Abbasi et al. (2012); Karagiannidis (2012); Worrel e Vesilind (2012) Reddy (2011); Maczulak (2010); Franchetti (2009); Nag e Vizayakumar (2005); Pichtel (2005); Tchobanoglous e Kreith (2002); World bank (2000).



Figura 2.6 Projeto de aterro sanitário em Maceió-AL.

Fonte: gazetaweb.com (2010).

---

<sup>3</sup> Na definição da ABNT (1992) em sua NBR 8419, chorume é um líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, caracterizado pela cor escura, forte odor e elevada DBO (demanda bioquímica de oxigênio).

Tecnicamente, um projeto de aterro sanitário tem sua base forrada com manta de Polietileno de alta densidade (PEAD), onde o resíduo é disposto em células com altura entre 3 e 5 metros, ou dependendo da necessidade e sob avaliação técnica, pode haver redimensionamento de célula. Contém sistema de drenagem de lixiviado (chorume), sistema intermediário de cobertura de solo, sistema de cobertura final, sistema de drenagem superficial e sistema de coleta e controle de gases (Worrel e Vesilind, 2012; Pichtel, 2005). Figura 2.7 mostra esquema com detalhes de projeto de aterro.

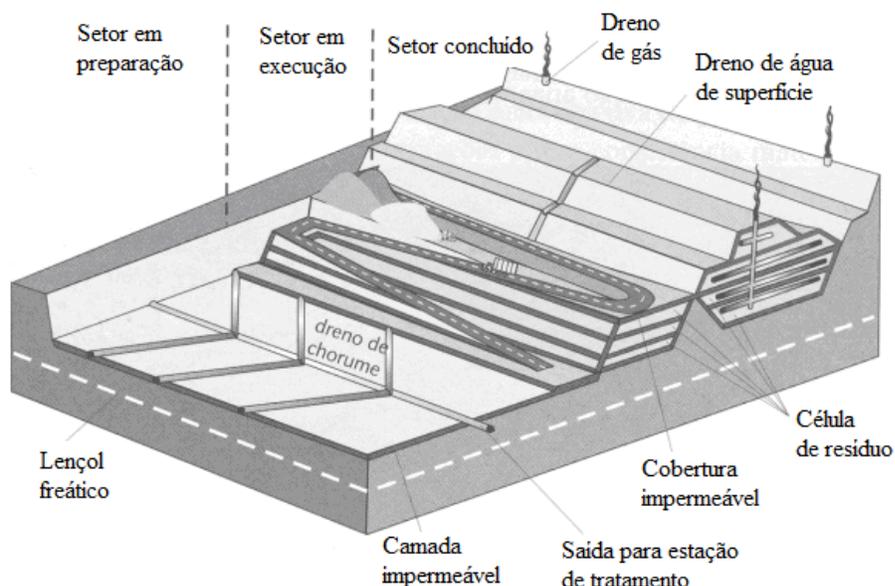


Figura 2.7 Detalhamento técnico de aterro sanitário.

Fonte: IPT / Cempre (2000).

### Produção de biogás

No aterro sanitário reúnem-se várias espécies de microrganismos. Os principais decompositores da matéria orgânica presente na massa de resíduo são bactérias e, em menor escala, fungos e protozoários. Os grupos de bactérias presentes na decomposição anaeróbia da matéria orgânica são bactérias: fermentativas, acidogênicas produtoras de  $H_2$ , acetogênicas consumidoras de  $H_2$  e as metanogênicas (Worrel e Vesilind, 2012; Reddy, 2011).

## **Degradação da matéria orgânica**

Processo de degradação de resíduo sólido acontece por mecanismos biológicos e físico-químicos na presença de umidade inicial e por água de precipitação. A produção do biogás pode ser realizada a partir da vaporização, decomposição biológica e reações químicas. A vaporização é a mudança de estado líquido para gasoso que ocorre até que sejam atingidas concentrações de equilíbrio nos gases do aterro. A decomposição biológica ocorre quando compostos orgânicos de grande massa molecular são decompostos por bactérias, gerando compostos voláteis. A reação química ocorre como resultado do contato entre o resíduo e os gases reativos gerados no aterro (USEPA, 1991; Reddy, 2011).

## **Processo aeróbio e anaeróbio**

A biodegradação que ocorre nos aterros sanitários é predominantemente anaeróbia, sem a presença de oxigênio, porém, em um período curto, acontece a degradação aeróbia, com presença de oxigênio, logo após o aterramento. Dessa forma, os microrganismos responsáveis pela degradação da massa orgânica são inicialmente aeróbios (necessitam do oxigênio para degradar a matéria orgânica) e anaeróbios (degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio) ou aeróbios facultativos (degradam a matéria orgânica na presença ou ausência de oxigênio) (IPCC, 2007; Cheremisinoff, 2003; Reddy, 2011).

A produção dos gases anaeróbios se dá em temperaturas de 38-54°C, com concentrações de CH<sub>4</sub> entre 45-57% e as concentrações de CO<sub>2</sub> entre 40-48%. A produção de gás continua até o esgotamento do material composto por carbono ou até a reintrodução de oxigênio no resíduo (Worrel e Vesilind, 2012; Reddy, 2011).

## **Composição do biogás**

Biogás gerado nos aterros é composto basicamente por metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S). Trata-se de gás inflamável, produzido a partir de recursos renováveis, que pode ser usado em várias aplicações em substituição ao combustível fóssil como energia elétrica ou combustível veicular, sendo que,

nesta última alternativa, o biogás precisa de ser enriquecido para aumentar seu teor de metano (Worrel e Vesilind, 2012).

Embora a produção e utilização de biogás seja uma tecnologia estabelecida com longa história, ainda representa pequena percentagem diante do total da energia utilizada nos países industrializados. Para Taglia (2010) isso se deve à falta de reconhecimento do potencial do biogás e à falta de políticas de energia renovável.

### **Instalações em operação**

Estados Unidos, Inglaterra e Itália detêm capacidades expressivas instaladas em biogás, com respectivos 790 MW, 680 MW e 220 MW. Alguns países em desenvolvimento, exemplo de Tailândia, detém capacidade de 51 MW em biogás e o Brasil tem potencial energético estimado em 311 MW (MMA, 2010).

Conforme relatório do *Global Methane Initiative* (2011), o aterro São João localizado na capital do Estado de São Paulo (SP) em operação no período de 1992 a 2008 acumulou acima de 24 milhões de toneladas de resíduo sólido e gerou grande quantidade de biogás, a maior parte foi para a atmosfera. No local, foi construída, em 2007, uma planta para gerar energia elétrica a partir do biogás como projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Em 2009, a planta captou do aterro 11,555 m<sup>3</sup>/h de biogás, gerando 22,4 MW reduzindo as emissões de GEE em 876.797 tCO<sub>2</sub>e.

### **Queima livre de biogás “flaring”**

Biogás gerado em aterro sanitário se não for aproveitado deve ser drenado e queimado (Figura 2.8) para mitigação de seus efeitos na atmosfera. A queima do biogás transforma o metano em dióxido de carbono e vapor d'água. Considerando o período de 100 anos, um grama de metano contribui 25 vezes mais para a formação do efeito estufa do que um grama de dióxido de carbono (IPCC, 2007).



Figura 2.8 Dreno e queima livre de biogás.

Fonte: ICLEI (2009).

### **Emissões fugitivas de biogás**

Mesmo que aterro sanitário seja projetado e construído sob normas técnicas de engenharia, com estrutura e material para confinamento do resíduo no solo sem causar danos ao ambiente, nem todo biogás gerado no local é recuperado. A quantidade de biogás fugitivo de aterro pode variar entre 25 a 50% do total produzido. A fuga de biogás ocorre devido às diferenças locais de pressão, flutuação devido às diferenças das massas específicas do metano em relação ao ar ou do dióxido de carbono e, finalmente, a difusão devido à diferença de concentração (Reddy, 2011).

Fuga de biogás em aterro acontece por trincas e fissuras na camada de cobertura que facilitam a passagem do gás para a atmosfera. A migração do gás acontece em direção vertical ou horizontal dentro do aterro de RSU e depende de vários fatores, como característica do tipo de aterro, tipo de solo próximo ao aterro, tipo de resíduo, compactação do resíduo, tipo de cobertura final e diária utilizada, entre outros. Se o aterro tem sistema de impermeabilização de fundo, como uma camada de argila ou geo membrana e a cobertura do resíduo for de solo arenoso, o gás tenderá a migrar verticalmente, como pode ser observado na Figura 2.9. O gás tende a migrar no sentido horizontal (Figura 2.10) em direção ao solo de alta permeabilidade caso o aterro não disponha de sistema de impermeabilização de fundo, solo ao redor apresentar alta permeabilidade e a cobertura for composta por geo membrana em conjunto com solo argiloso (Cheremisinoff, 2003, IPCC, 2007).

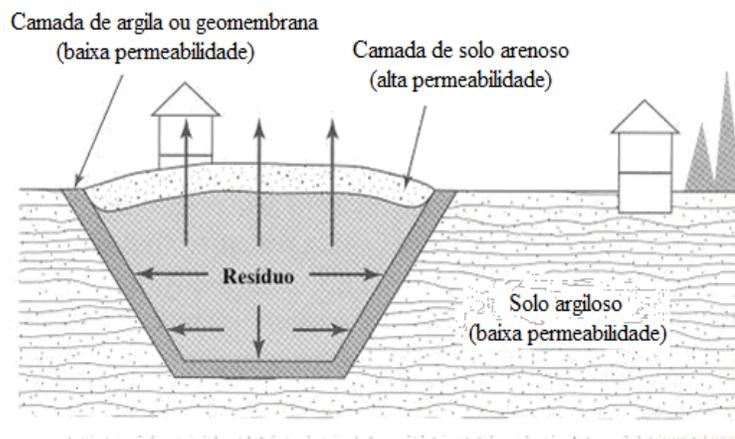


Figura 2.9 Fuga de gás no sentido vertical.

Fonte: U. S. EPA (1994).

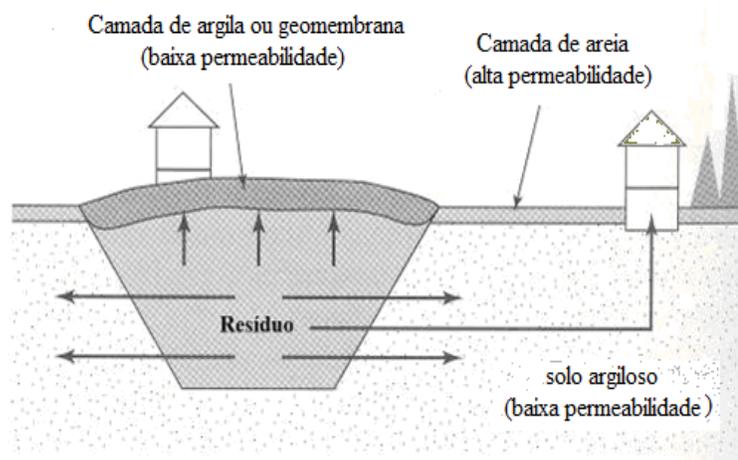


Figura 2.10 Fuga de biogás no sentido horizontal.

Fonte: U. S. EPA (1994).

### Recuperação do biogás

A geração de biogás em aterro se inicia em torno do 3º mês após o início do aterramento do resíduo e continua por cerca de 15 anos após o encerramento de sua atividade. Entretanto, a recuperação energética do biogás requer infraestrutura no aterro sanitário (IPCC, 2006):

- sistema de impermeabilização superior para evitar a fuga do biogás para a atmosfera. Cobertura superior em aterro sanitário normalmente é feita com argila de baixa permeabilidade compactada;
- poços de drenagem de biogás são escavados na massa de resíduo. Os poços normalmente são feitos com brita e podem ser vertical, horizontal ou misto;
- rede de coleta e bombas de vácuo levam o biogás drenado para a unidade de geração de energia elétrica. Os tubos da rede coletora normalmente são de polietileno de alta densidade e devem ser aterrados para evitar acidentes. Enquanto as bombas de vácuo têm a função de compensar as perdas de carga nas tubulações e garantir a vazão regular de biogás para a unidade de geração de energia elétrica;
- grupos geradores são equipamentos que normalmente utilizam motores de combustão interna desenvolvidos especialmente para trabalharem utilizando biogás como combustível. Também é possível a geração de energia elétrica com utilização de turbinas.

Um esquema de aterro e os elementos essenciais para recuperação do biogás é mostrado na Figura 2.11

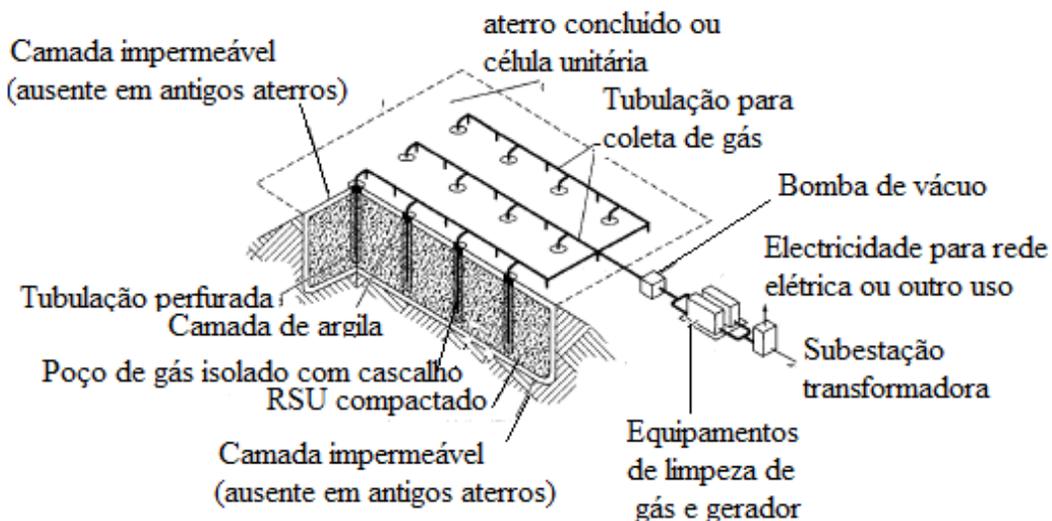


Figura 2.11 Sistema de recuperação de biogás em poço vertical.

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous e Kreith (2002).

Contudo, a implantação de unidades de geração de energia elétrica em aterro sanitário deve preceder de estudo de viabilidade técnica e econômica para indicar o potencial de geração de biogás em função da quantidade e da composição do resíduo aterrado, bem como avaliar o custo de geração de energia elétrica comparando-o com o valor cobrado pela concessionária local (CETESB, 2013; 2001; Worrel e Vesilind, 2012).

### **2.7.5 Tratamento térmico de Resíduo sólido**

Tratamento térmico é definido como todo e qualquer processo operacional realizado em temperatura mínima acima de 800 °C em conformidade com a Resolução CONAMA n° 316/2002 (MMA, 2012). As tecnologias para processos térmicos são incineração, pirólise, gaseificação e tocha de plasma.

#### **Incineração**

Incineração é definida como a combustão de resíduo sólido e líquido em incineradores controlados. Os tipos de resíduo incinerados em países desenvolvidos incluem RSU, resíduo industrial, resíduo perigoso e resíduo do serviço de saúde (RSS).

A queima reduz o volume e o peso do resíduo em cerca de 90% e 75%, respectivamente, elimina os patógenos, destrói as substâncias potencialmente danosas e, ainda, gera calor que pode ser transformado em energia elétrica (WEF, 2009; EC, 2006; Spellman, 2003).

#### **Produção de energia**

A quantidade média de energia que pode ser produzida por tonelada de resíduo doméstico corresponde a cerca de 0.7 MWh de eletricidade (Considerando o consumo médio de energia elétrica por residência brasileira em torno de 170 kWh/mês), uma tonelada de RSU incinerada pode abastecer em torno de 4 residências no mês (Lino e Ismail, 2013).

#### **Composição química do resíduo sólido**

Resíduo sólido (RS) é composto por substâncias orgânicas, minerais, metais e água. As substâncias orgânicas contêm componentes combustíveis que se oxidam (queimam) quando

atingem temperatura de ignição em contato com o oxigênio. Enquanto as substâncias inorgânicas (minerais e metais) são convertidas em cinza. Os principais elementos contidos no RS são: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), e enxofre (S). Sob condições ideais, os subprodutos gasosos derivados da combustão incluem dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>) (Cheremisinoff, 2003).

### **Parâmetros de queima**

Oxidação completa de resíduo depende do tempo de combustão, temperatura e turbulência, isto é, em cerca de 2 segundos a 850 °C e alta turbulência. Esses parâmetros são estabelecidos pela União Européia para garantir a queima completa dos hidrocarbonos voláteis e manter o controle do odor (*EC Waste Incineration Directive 2000*). A temperatura inicial dos gases na entrada da câmara de combustão atinge cerca de 538 °C e a temperatura de saída varia entre 816 °C e 982 °C (EC, 2006).

Nos Estados Unidos, o RSU é queimado à temperatura de cerca de 1100 °C e o resíduo resultante permanece na grelha por 45 a 70 minutos para garantir a combustão completa (Cheremisinoff, 2003; Tammemagi, 1999; Chandler et al., 1997).

### **Etapas de incineração**

As etapas no processo de incineração de RSU com recuperação de energia são descritas por Williams (2005); Spellman (2003) e Chandler et al. (1997):

- Resíduo é depositado em um fosso onde um pegador o mistura para distribuir a umidade entre os materiais e, na sequência, remove-o até a grelha para pré-secagem e queima na câmara de combustão;
- Ar combustão é introduzido debaixo da grelha e nos bocais localizados no forno sobre a grelha. O ar debaixo da grelha inicia a combustão e esfria a grelha. O ar de cima da grelha ajuda a misturar os gases de combustão garantindo a combustão completa e reduzindo os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>);

- A matéria inerte e a cinza são deslocados para um tanque com água no final da grelha de onde são removidos para tratamento e, posterior recuperação para uso em construção ou outros aplicativos ou descarte no aterro.
- A energia é transferida dos gases quentes da combustão para a água que flui no tubo rente à parede da caldeira, gerando água quente e vapor. O vapor gira a turbina e o gerador gera eletricidade ou calor e/ou combinações de energia.

### **Gases de combustão**

Gases de combustão gerados no processo de incineração retêm a maior parte da energia disponível no resíduo em forma de calor. A manutenção da combustão depende do poder calorífico do resíduo e da disponibilidade do oxigênio em quantidade suficiente, caso contrário, torna-se necessária a utilização de combustível auxiliar (Maczulak, 2010).

Antes de ser liberado para a atmosfera, os gases quentes da combustão cedem sua energia térmica na caldeira gerando vapor, em seguida, passam por equipamentos de controle de poluição como purificadores que removem os gases ácidos, precipitadores eletrostáticos que removem poeira e particulados e filtros que removem partículas finas e o carbono ativado para controle do mercúrio e das dioxinas (Cheremisinoff, 2003).

### **Controle de poluentes**

Para Tchobanoglous and Kreith (2002) um moderno incinerador contém sistema eficiente de combustão com limpeza de gás sofisticado, produz energia, reduz o resíduo transformando-o em material inerte com o mínimo de poluição. Há vários tipos de incineradores disponíveis no mercado como incinerador de massa municipal; incinerador tipo forno rotativo, incinerador tipo leito fluidizado e incinerador com câmara fixa, entretanto, incinerador em massa é o mais usado para RSU. Cheremisinoff (2003) salienta que a escolha da tecnologia específica mais adequada para determinada região depende de uma série de fatores que inclui métodos locais de coleta, processamento e disposição dos RSU, bem como regulamentos ambientais locais.

## **Incineradores em massa e modulares**

Incinerador de massa (Figura 2.12) é um modelo dotado de sistemas de grelhas que, conforme Tchobanoglous and Kreith (2002) é o mais viável economicamente para tratamento térmico de grandes quantidades de RSU entre 10 e 50 t/h.

Os modelos convencionais, conforme Tchobanoglous e Kreith (2002), geralmente não são economicamente viáveis para comunidades com população entre 50 a 100 mil habitantes. Para essa faixa de população, Tamemmagi (1999) recomenda o tipo modular pré-fabricado com capacidade relativamente menor entre 5 a 120 t/dia de resíduo sólido. Normalmente, as usinas de incineração têm entre 1 a 4 unidades na instalação para tratar entre 15 a 400 toneladas por dia. Ambos incineradores, em massa e modular, são semelhantes e diferem apenas na capacidade de queima do resíduo sólido (Tamemmagi, 1999; Chandler et al. 1997). Figura 2.13 mostra detalhe do processo de alimentação e queima de resíduo sólido.

Tchobanoglous and Kreith (2002) consideram que a incineração de resíduo sólido em cidades pequenas, aldeias, edifícios de apartamentos, escolas, instituições, acampamentos e hotéis apenas torna-se viável se houver garantia de supervisão e bom desempenho do equipamento e que o fator custo não seja considerado. Além disso, o aterro sanitário é um complemento necessário para dispor o resíduo resultante da incineração e do resíduo sólido não reciclável.

No entanto, vários estudiosos do assunto como Williams (2005) e Tamemmagi (1999), reconhecem a importância do incinerador simples com bom desempenho ambiental e o de pequeno porte para 1 ou 2 t/h para tratamento do resíduo sólido em comunidade isolada, fábrica e hospital. A simplicidade inerente ao sistema e o *design* modular permitem, inclusive, a incorporação de dispositivos adicionais de controle de poluição ou, então, a construção de unidades maiores para extrair e usar o calor que é gerado.

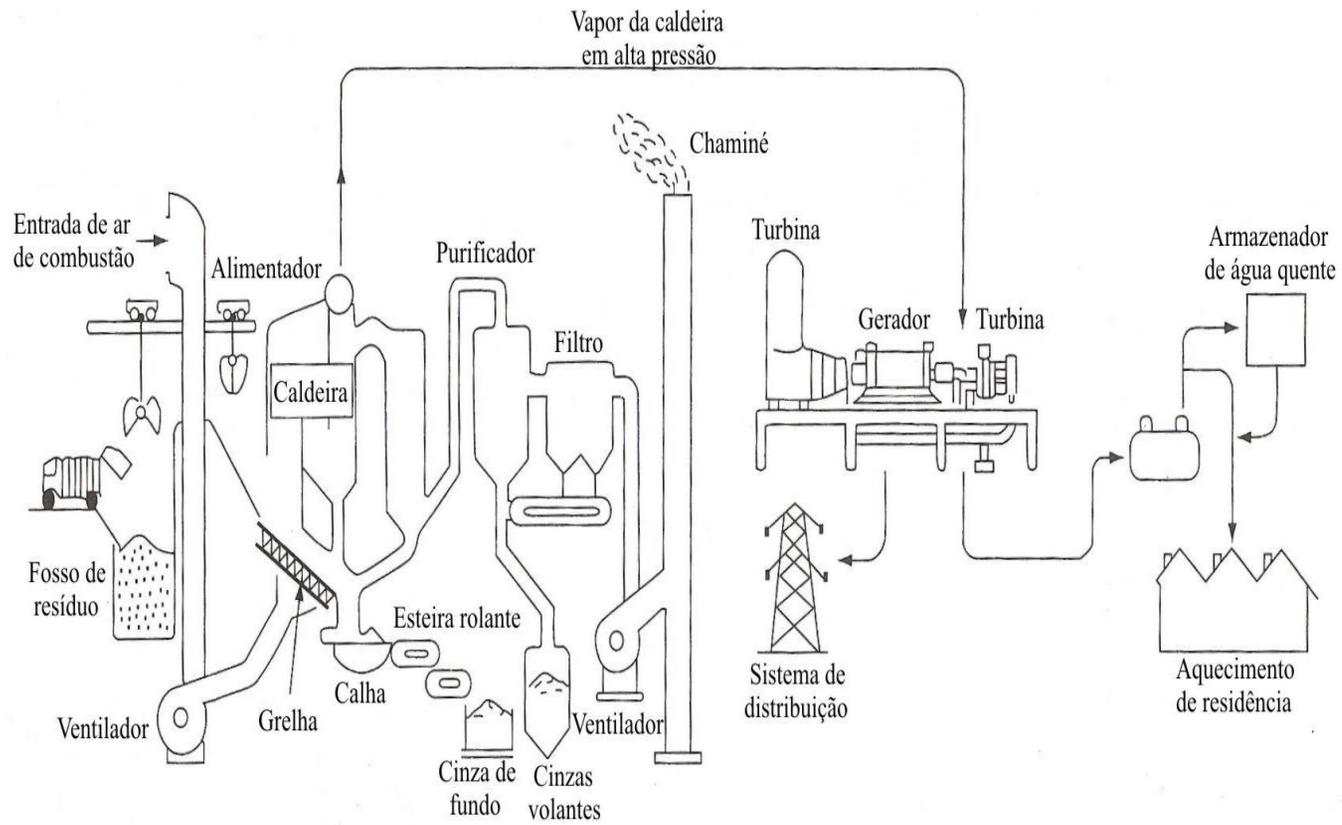
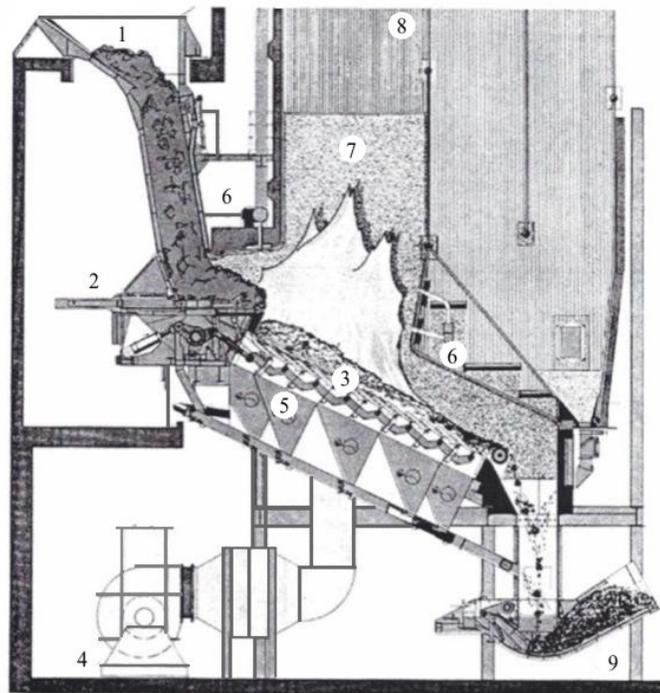


Figura 2.12 Diagrama de incinerador em massa.

Fonte: Adaptado de Best Practice Guide (1996), apud Williams (2005).



- |                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1.Funil alimentador             | 6.Bocais de ar secundário    |
| 2.Alimentação                   | 7.Forno                      |
| 3.Grelha de aço reversa         | 8.Caldeira                   |
| 4.Sistema de ventilação forçada | 9.Descarga de cinza de fundo |
| 5.Área de ar sob a grelha       |                              |

Figura 2.13 Incinerador modular com sistema de grelha.  
 Fonte: Chandler et al. (1997).

### Incineração em país desenvolvido

Países como Alemanha, Japão e Estados Unidos incineram resíduo sólido bruto ou pré-selecionado. Na Alemanha, entre 2005/2006, a incineração de RS resultou em cerca de 6 TWh de eletricidade e 17 TWh de calor, suficiente para suprir a demanda energética da cidade de Berlim. Nas últimas três décadas, o país tem expandido a capacidade de incineração e da reciclagem para garantir a correta destinação dos resíduos que não podem ser depositados em aterros. Nos 27 países da União Europeia, a produção de energia da incineração de RSU, nos últimos dez anos, teve aumento de 140%. Em 2010, Alemanha representou 29% da produção total de energia, França representou 16% e Itália e Holanda, ambas com 10% cada. Na última década, todos os Estados-membros registraram aumento na produção de energia da incineração de RSU (EEA, 2013; OECD, 2012).

Países europeus dependem amplamente da incineração. Na Europa Ocidental, essa dependência varia entre 35% a 80% do fluxo de RSU. Em 2005, a incineração de resíduo na Dinamarca produziu 4,8% do consumo de eletricidade e 13,7% do consumo total nacional de calor. Dinamarca e Suécia são altamente dependentes de incineração em massa para geração de energia. A Inglaterra incinera resíduo desde 1874. Nos Estados Unidos, o primeiro incinerador foi construído em 1885 (Reddy, 2011; Young, 2010).

Na América do Norte, os sistemas de incineração de RSU incorporam recuperação de energia sob a forma de vapor e também para geração de eletricidade ou diretamente para aquecimento/resfriamento. O nordeste dos Estados Unidos incinera e recupera energia acima de 40%. Há mais usinas de resíduo para energia nos EUA do que no Canadá (Reddy, 2011).

Processos térmicos para tratamento de resíduo como combustível em grande e em pequena escala, avanços tecnológicos bem como vantagens e desvantagens são exaustivamente discutidas na literatura internacional, dentre outros por ISWA (2012); Karagiannidis (2012); Worrel e Vesilind (2012); Young (2010); Moustakas and Loizidou (2010); Franchetti (2009); EC (2006); Pichtel (2005); Williams (2005); Cheremisinoff (2003); Tchobanoglous and Kreith (2002) e Worldbank (1999).

### **Incineração em país em desenvolvimento**

Conforme Reddy (2011), países em desenvolvimento como Singapura, Coreia do Sul, Taiwan e Hong Kong na Região Sudeste da Ásia e do Pacífico tem conhecimento técnico considerável e capital necessário para instalar e operar incineradores. Singapura, por exemplo, opera três incineradores de RSU para tratar cerca de 90% do RSU gerado. Tailândia tem dois incineradores de RSU com capacidade para 250 e 70 toneladas/dia em operação, desde 1998, mas processa menos de 1% do total de resíduo gerado no país. A falta de aterros em cidades como Singapura, Hong Kong, Taipei e Tóquio tornou a incineração uma prática. Nas cidades de Meca e Medina, na Arábia Saudita há vários incineradores em operação.

## **Incineração na China**

Na China, a primeira usina moderna de incineração tem origem japonesa com capacidade de tratamento para 300 t/dia em operação na cidade de Shengzhen, desde 1989. Como as indústrias chinesas não conseguem atender à demanda de equipamentos, as instalações de incineração são construídas usando tecnologias americanas, europeias e japonesas. Existem cerca de 36 unidades de incineração em todo o país para tratar cerca de 2% do RSU. Pelo menos 8 municípios chineses têm construído usinas de incineração para gerar eletricidade (Reddy, 2011; Themelis, 2003).

Durante 2001 e 2007, a capacidade de incineração de resíduo para geração de energia aumentou em cerca de 4 milhões de toneladas por ano. Japão e China construíram diversas plantas. O Japão é o maior usuário no tratamento térmico de RSU no mundo, com 40 milhões de toneladas. Para isso, o país conta com mais de 100 plantas (Reddy, 2011).

## **Cinza: subproduto da queima**

Todo processo de queima de resíduo sólido gera cinza como subproduto que corresponde em cerca de 10% do volume e cerca de 20 a 30% do peso do material que entra no forno. Dois tipos de cinza são produzidos: cinza de fundo e cinza suspensa. Cinza de fundo (ou cinza pesada) resulta da queima incompleta do resíduo combustível e do não combustível que se concentra na parte inferior da câmara de combustão. Enquanto a cinza suspensa, oriundas do papel carbonizado, fuligem e outros materiais leves que corresponde a cerca de 10 a 25% do total de cinza gerada, sobe com os gases quentes e são capturados para tratamento. Em geral, até 30% de cinza, em peso, pode ser usada como aditivo para fabricação de cimento, em materiais de construção e solidificação, em cerâmica ou vidro (Tammemagi, 1999; Tchobanoglous e Kreith, 2002).

Cheremisinoff (2003) salienta que a geração de cinza pode diminuir o percentual de peso para até 5% com os recicláveis desviados do forno no processo de pré-seleção. Essa ação possibilita aumentar, ainda mais, o tempo de vida útil do aterro. Além disso, materiais compostos por combustíveis cancerígenos, materiais com conteúdo patologicamente contaminantes e componentes orgânicos tóxicos ou materiais biologicamente ativos ao serem submetidos ao

tratamento térmico têm suas periculosidades eliminadas e, finalmente, podem ser dispostos no aterro sem oferecer riscos ao ambiente e à saúde pública.

### Comparação de emissões: incineração e aterramento

Estudo na Grã-Bretanha sobre aterros e incineradores (Royal Commission, 1993), mostram que a incineração de 1 milhão de toneladas de RSU produz emissões líquidas correspondentes a 15 mil toneladas de carbono na forma de CO<sub>2</sub>, enquanto aterro com recuperação de energia produz emissões de GEE correspondentes a 50 mil toneladas de carbono como CO<sub>2</sub>. Na França, a incineração de resíduo evita entre 4 a 7 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente a cada ano (OECD, 2012).

A União Europeia, desde 1990, vem estabelecendo uma série de normas rígidas que regulamentam a atividade. Tabela 2.4 mostra os valores limites de emissão de poluentes para as plantas de incineração conforme a Diretiva da EU 2000/76/CE (EC, 2006).

Tabela 2.4 Valores limites de emissões na União Europeia

<b>Poluentes</b>	<b>Limite</b>
Dioxinas e Furanos	0,1 ng/m <sup>3</sup>
Material Particulado	10 mg/m <sup>3</sup>
Substâncias Orgânicas em estado gasoso e de vapor, expressa em carbono orgânico total	10 mg/m <sup>3</sup>
Cloreto de Hidrogênio (HCl)	10 mg/m <sup>3</sup>
Fluoreto de Hidrogênio (HF)	1 mg/m <sup>3</sup>
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	50 mg/m <sup>3</sup>
Monóxido de Nitrogênio (NO) e Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) expressos como dióxido de nitrogênio, para instalações existentes de capacidade nominal superior a 6 ton/hora, ou para instalações novas	200 mg/m <sup>3</sup> (*)
Monóxido de Nitrogênio (NO) e Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) expressos como dióxido de nitrogênio, para instalações existentes de capacidade nominal igual ou inferior a 6 ton/hora	400 mg/m <sup>3</sup> (*)

Fonte: EC (2006).

No Brasil, planta de incineração para queima de resíduo deve passar pelo processo de licenciamento previsto nas Resoluções CONAMA n<sup>o</sup> 237 de 1997 e n<sup>o</sup> 316/2002. Esta última

dispõe sobre os procedimentos e critérios para funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduo e estabelece limite máximo de emissão de poluentes lançados na atmosfera, na água e no solo por sistemas de tratamento térmico.

A Resolução CONAMA nº 316/2002 normatiza os processos de tratamento térmico de resíduo, estabelecendo procedimentos operacionais, limites de emissão e critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição final de efluentes (MMA, 2013). A Tabela 2.5 mostra os limites de emissões permitidos, conforme a resolução brasileira.

Tabela 2.5 Limite de emissões conforme Resolução CONAMA 316/2002

<b>Poluentes</b>	<b>Limite</b>
Material Particulado (MP)	70 mg/Nm <sup>3</sup>
Substâncias inorgânicas na forma particulada Classe 1 (Cd, Hg e Tl)	0,28 mg/Nm <sup>3</sup>
Substâncias inorgânicas na forma particulada Classe 2 (As, Co, Ni, Te e Se)	1,4 mg/Nm <sup>3</sup>
Substâncias inorgânicas na forma particulada Classe 3 (Sb, Pb, Cr, CN, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh e V)	7 mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	280 mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	560 mg/Nm <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono	100 ppm/Nm <sup>3</sup>
Compostos Clorados Inorgânicos (medido como HCl)	80 mg/Nm <sup>3</sup>
Compostos Fluorados Inorgânicos (medido como HF)	5 mg/Nm <sup>3</sup>
Dioxinas e Furanos (expressos em TEQ)	0,50 ng/Nm <sup>3</sup>

Fonte: MMA (2013).

Para efeito de comparação, a Tabela 2.6 mostra os limites de emissões estabelecidos por regulamentações no Brasil, EUA e países da UE para o uso de incineradores.

Pela Tabela, pode-se observar que os valores de emissão permitidos no Brasil estão muito acima do que é permitido na Alemanha e nos Estados Unidos.

Tabela 2.6 Comparação de limites máximos de emissão de poluentes (mg/Nm<sup>3</sup>)

	Brasil <sup>1</sup>	União Européia <sup>2</sup>	EUA <sup>3</sup>
Ácido Clorídrico (HCl)	80	10	29
Ácido Fluorídrico (HF)	5	1	
Óxido de Nitrogênio (NOx)	560	200	305
Óxido de Enxofre (SOx)	280	50	85
Material Particulado	70	10	20
Dioxinas e Furanos	0,50 ng/Nm <sup>3</sup>	0,10 ng/Nm <sup>3</sup>	0,13 ng/Nm <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Resolução CONAMA N° 316/2002; <sup>2</sup> Diretiva 2000/1976/CE; <sup>3</sup> 40 CFR 60

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados de MMA (2013); EC (2006) e U.S.EPA, 2011.

### Instalação do incinerador

Tchobanoglous and Kreith (2002) recomenda que as unidades de incineração devem estar localizadas na área do próprio aterro ou em locais mais distantes da comunidade para evitar problemas de impacto da operação.

#### 2.7.6 Pirólise

Pirólise é uma forma de tratamento termo-química de material orgânico na ausência de oxigênio, com a possibilidade da oxidação de pequena fração de resíduo em função da presença de algum oxigênio contido no reator. Trata-se de tecnologia antiga utilizada para destruir os componentes orgânicos voláteis, combustíveis e pesticidas no solo. Entretanto, sua aplicação para biomassa e resíduo sólido é uma técnica recente (Young, 2010; Nag and Vizayakumar, 2005).

Os produtos resultantes da pirólise podem ser líquido, sólido e gasoso. A quantidade depende da composição do resíduo sólido e dos parâmetros como temperatura, pressão e tempo de permanência do material sólido e dos gases voláteis. Durante o processamento, o material orgânico é transformado em gás de síntese ou singás, que é uma mistura de gases e componentes inflamáveis como CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros compostos orgânicos voláteis (COV) com poder calorífico variando entre 10 e 20 MJ/Nm<sup>3</sup>. Parte desses voláteis pode ser condensada para produção de óleo, cera e alcatrão coletados na fase do resfriamento do singás e usado como

combustível líquido. Resíduo remanescente é um tipo de cinza e carvão. Cada tonelada de resíduo sólido contém 11 kg de sulfato de amônia, 12 litros de alcatrão, 9,5 litros de óleo, entre outros (Gidakos, 2006; Porter and Roberts, 2005).

### **2.7.7 Gaseificação**

Gaseificação é o processo de conversão do material orgânico em gás combustível na presença de ar ou oxigênio em quantidade controlada e alta temperatura. O gás combustível resultante é chamado de gás síntese ou singás, consiste de hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, hidrocarbonos, carvão e cinza. Gaseificação é uma tecnologia de conversão térmica endotérmica para extração de energia de diferentes tipos de material orgânico (Reddy, 2011; Chandler et al., 1997).

Vários processos de gaseificação para tratamento térmico de resíduo sólido estão sendo desenvolvidos como alternativa à incineração. Entretanto, conforme Reddy (2011), o maior desafio dessa tecnologia consiste em obter eficiência aceitável devido ao alto consumo de energia no pré-processamento de resíduo, consumo de grandes quantidades de oxigênio puro (frequentemente usado como agente de gaseificação), e limpeza de gás. Esses são os fatores que afetam a eficiência da conversão de singás para energia elétrica. O autor enfatiza que vários processos de gaseificação de resíduo sólido têm sido propostos, mas muito pouco tem sido construído e testado.

### **2.7.8 Tocha de plasma**

Tecnologia de plasma é um processo térmico que usa altas temperaturas em ambiente abundante de oxigênio para decompor totalmente os resíduos em moléculas simples. Trata-se de tecnologia, utilizada há varias décadas, para processamento de metais que tem como fonte de calor uma tocha de plasma que produz gás ionizado com variação de temperatura entre 1480°C a 6650 °C (Kumar, 2010).

A tecnologia de plasma pode ser usada para o tratamento térmico de qualquer tipo de resíduo, exceto resíduos nucleares tendo a energia gasta como parâmetro dominante e a quantidade de energia que necessita para destruir o resíduo. O tratamento por plasma permite a

destruição térmica, fusão, inertização e vitrificação de resíduo sólido permitindo o reciclo de produtos obtidos no tratamento. O jato ou tocha de plasma é gerado pela formação de um arco elétrico, pela passagem de corrente entre o catodo e o anodo e a injeção de um gás qualquer projetado sobre o resíduo. O método tem sido utilizado na fusão de sucata de metais e ligas, alumínio contido nos resíduo sólido, lama de eletrodeposição, recuperação de metais de catalisadores gastos e cinza de incineração. Este processo não resulta em cinza para dispor no aterro. As desvantagens estão no custo alto da tecnologia, manutenção frequente e obra adequada para as operações (Reddy, 2011).

Por esta revisão bibliográfica, torna-se possível identificar e avaliar os melhores métodos e técnicas, até então implantadas, para tratamento de RSU com aproveitamento do seu potencial energético em vários países. Em contrapartida, o panorama brasileiro mostra a necessidade de mais pesquisa e desenvolvimento para melhorar o aproveitamento do RSU no país. Questões relacionadas à coleta, tratamento e disposição de resíduo sólido no contexto energético, ambiental e socioeconômico são assuntos abordados em várias pesquisas acadêmicas como Lucke (2012) que realizou um trabalho sobre RSU como fonte renovável de geração de energia elétrica onde aborda os aspectos econômico e socioambiental.

Carneiro (2006) realizou um estudo para caracterização e avaliação da potencialidade econômica da coleta seletiva e reciclagem coletiva dos resíduos sólidos domiciliares gerados nos municípios de Belém e Ananindeua.

O gerenciamento do RSU na Cidade de Ribeirão Preto-SP foi estudado por Cardoso (2004), com o objetivo de obter um levantamento histórico do resíduo e os métodos de disposição adotados.

Nagle (2004) realizou um estudo sobre o potencial de minimização do material biodegradável contido no RSU em municípios da Região Metropolitana de Campinas como Valinhos, Vinhedo e na macrozona três do município de Campinas com objetivo de avaliar o potencial de minimização do material biodegradável de alimentação.

Streb (2004) estudou a coleta informal de resíduo no município de Campinas - SP sob a perspectiva energética e social demonstrando o potencial de minimização do RSU e da conservação de energia no município.

Ensinas (2003) realizou um estudo sobre geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP onde concluiu que o aterro atingirá seu potencial máximo de geração de biogás que é de 4 MW, um ano após o fechamento do aterro.

Ferrucci (2003) apresentou os resultados de um estudo de avaliação dos sistemas de gerenciamento de resíduo sólido em doze municípios paulistas avaliados pelos órgãos ambientais como sistema de tratamento e disposição adequados.

Piunti (2001) pesquisou sobre a coleta seletiva de RSU sob as perspectivas energéticas, ambientais e sociais para a região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari - SP abordando a composição, a quantidade de reciclável gerado, programas de coleta seletiva implantado e o potencial energético do resíduo. O estudo considerou também a possibilidade de incineração (com geração de eletricidade) de parte do resíduo.

Outros trabalhos e resultados de pesquisas desenvolvidas no país são encontrados em Santos (2011), Tarazona (2010) e Zanette (2009).

Enfim, esta revisão bibliográfica mostra que o objetivo principal do tratamento de resíduo consiste em aproveitar seu conteúdo energético, minimizar os impactos ambientais e melhorar a qualidade de vida da população por meio dos métodos disponíveis. Tanto a reciclagem, como os tratamentos biológico e térmico entram nesse contexto como forma de tratamento seguro, adequado e necessário do resíduo não evitado, além de otimizar o uso do conteúdo energético de forma mais eficiente possível com reaproveitamento do resíduo remanescente. Resíduo sólido é submetido à queima desde que os humanos descobriram o fogo, entretanto, a queima em incinerador controlado é um método que data apenas de um século. Os benefícios da incineração são desfrutados há várias décadas em países da Europa, Japão e Estados Unidos. Incineração, juntamente com programa eficiente de reciclagem pode diminuir consideravelmente a necessidade de aterros sanitários e, por isso, deve ser considerado em qualquer sistema de gestão de resíduo municipal. O método japonês de pré-separação de resíduo na fonte em diversos tipos para remoção de materiais perigosos e não incineráveis poderia ser introduzido como modelo nas políticas públicas brasileiras. Acredita-se que experiências externas podem servir como base para melhorar o tratamento e disposição de RSU no Brasil e contribuir para melhores condições sanitárias e de saúde no país.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: ESGOTO DOMÉSTICO

#### 3.1 Definição, conceito e classificação

Esgoto sanitário também denominado água residuária é definido pela norma brasileira NBR 9648 (ABNT, 1986) como "despejo líquido constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e contribuição pluvial parasitária". Conforme a mesma norma, esgoto doméstico compreende o "despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas".

Spelman (2003) e Brasil/MCidades (2013a) definem e classificam esgoto doméstico (ED) como descarga líquida e sólida provenientes de humano e de animal, cujas substâncias são perigosas à saúde humana por conter milhões de bactérias, vírus e outros microorganismos, alguns inclusive, são patogênicos e, portanto, responsáveis por doenças como febre tifóide, tétano, hepatite, disenteria, gastroenterite e outras. Na mesma categoria de ED, está incluído o resíduo gerado na residência como papel, produto de limpeza, detergente e substâncias afins. A Tabela 3.1 mostra dados sobre a característica física, química e biológica do esgoto doméstico.

Tabela 3.1 Características do ED

Cor	Cinza
Odor	Mofo
Demanda de oxigênio (DO)	> 1.0 mg/l
pH	6.5 – 9.0
Total sólido suspenso (SS)	100-300 mg/l
DBO	100 – 300 mg/l
DQO	200 – 500 mg/l
Taxa de geração de esgoto	100 – 300 l/pessoa/dia
Nitrogênio	20 – 85 mg/l
Fósforo	6 – 20 mg/l

Source: Spellman (2003).

#### 3.1.1 Descrição das características do ED

- Cor cinza indica esgoto fresco; cinza escuro indica esgoto velho.

- Odor é proveniente do gás sulfídrico e amônia gerados no processo de digestão anaeróbia do lodo. Odor também pode ser causado por ácidos voláteis na digestão incompleta do lodo.
- Demanda de oxigênio (DO) é a forma menos usada para caracterizar a presença de matéria orgânica no esgoto.
- pH - significa "potencial Hidrogeniônico". Trata-se de uma escala logarítmica usada para medir grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de determinada solução. O pH varia de acordo com a temperatura e a composição de cada substância (concentração de ácidos, metais, sais etc.). A escala tem valores de 0 a 14, sendo que 7 é considerado o valor neutro, zero representa acidez máxima e 14, alcalinidade máxima.
- Total sólido suspenso ou SS refere-se a pequenas partículas sólidas que se mantêm suspensas na água. É utilizado como indicador da qualidade da água.
- Demanda química de oxigênio (DQO) é a forma menos utilizada para caracterizar e medir a presença de material biodegradável e não biodegradável disponível para oxidação química.
- Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) consiste na forma mais utilizada para medir a quantidade de matéria orgânica no esgoto e a respectiva quantidade de oxigênio necessária para estabilizá-la biologicamente.
- Taxa de geração de esgoto é considerado pelo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) como o mesmo volume de água consumida ou "taxa de consumo per capita" MCidades (2013a).
- Nitrogênio e Fósforo são dois componentes encontrados em detergente de uso doméstico, fertilizante e esgoto industrial. São os principais responsáveis pelo processo de eutrofização da água doce. A eutrofização é um problema que afeta principalmente os ambientes aquáticos com fluxo reduzido e pouca renovação de água (ambiente lântico), como lagos, açudes e reservatórios que recebem em excesso esses dois tipos de nutrientes (ANA, 2013).

### **3.1.2 Composição**

Cerca de 99,9% do ED é líquido e 0,1% sólido orgânico e inorgânico. Sólido orgânico contém carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Sólido inorgânico é o mineral (areia, terra etc.).

### **3.1.3 Geração**

O volume de esgoto gerado varia entre países, regiões e localidades e depende do consumo de água e do tipo de alimentação das pessoas. Em geral, a taxa de produção do lodo de esgoto varia entre 20 a 30 kg/pessoa/ano. Na Europa, a produção média de lodo em peso seco per capita corresponde a 90g/dia (EC, 2006, IPCC, 2006).

Conforme UNU/INWEH (2013), em 26 países da União Europeia são gerados acima de 10 milhões de metros cúbicos de ED. Na América do Norte, a geração está estimada em 85 Mm<sup>3</sup>/ano de ED, com tratamento de 61 Mm<sup>3</sup> ou 75% sendo que 2,3 Mm<sup>3</sup>/ano ou 3,8% da água residuária tratada foi usada.

Entretanto, a falta de dados completos e atualizados sobre saneamento básico em vários países torna impossível estimar o volume de esgoto gerado no mundo, conforme relatório publicado pela Universidade das Nações Unidas (UNU/INWEH, 2013).

## **3.2 Sistema de coleta**

O sistema de esgotamento sanitário nos centros urbanos é composto por (MMA, 2006):

- a) Rede coletora é formada por conjunto de canalizações destinadas a receber e conduzir o esgoto. O sistema de esgoto predial é ligado diretamente à rede coletora por tubulação chamada coletor predial ou ramal ligado ao coletor tronco, principal coletor de uma bacia de drenagem;
- b) Interceptor refere-se à canalização que recebe coletores ao longo de seu comprimento, mas não recebe ligações prediais diretas;
- c) Estação Elevatória de Esgoto Bruto (EEEB) compreende um conjunto de instalações destinadas a transferir o esgoto da cota mais baixa para outra mais alta;

- d) Emissário é um tipo de canalização destinada a conduzir o esgoto à estação de tratamento de esgoto (ETE) sem receber contribuições em marcha;
- e) ETE refere-se ao conjunto de instalações destinadas ao tratamento do esgoto antes de seu lançamento, conforme Figura 3.1; e,
- f) Corpo receptor consiste no corpo d'água que recebe o esgoto tratado.

A atividade de uma ETE compreende o tratamento da água residuária com objetivo de estabilizar o lodo formado durante o tratamento, que normalmente contém 0,25 a 12% de sólido. A estabilização reduz o conteúdo de microrganismos patogênicos bem como inibe, reduz ou elimina o potencial de putrefação e de produção de odores (WEF, 2009; EC, 2006).

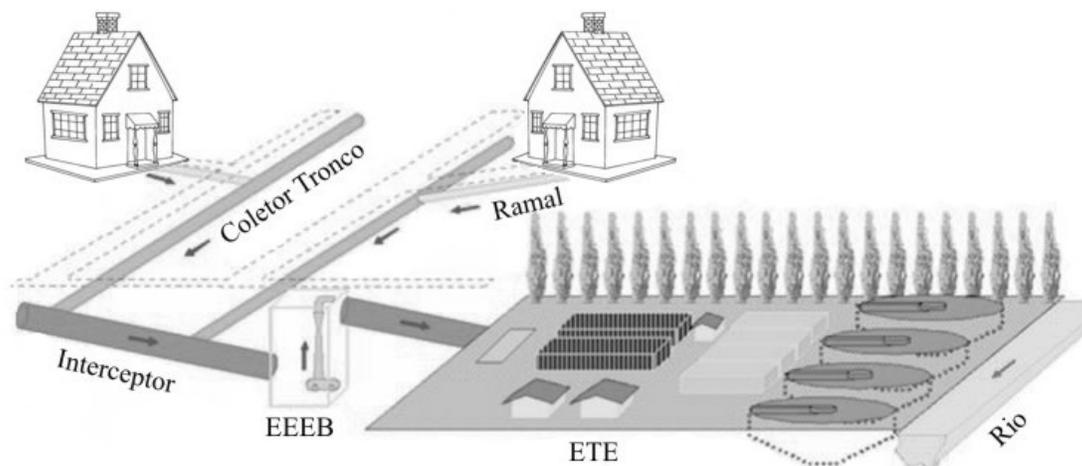


Figura 3.1 Diagrama de rede coletora de esgoto.

IPCC (2006) salienta que esse sistema de tubulação subterrânea para escoamento do esgoto é comum em áreas urbanas de renda alta. O tratamento de esgoto em ETE, obrigatoriamente começa pela parte líquida e se estende à parte sólida que contém a maior parte dos poluentes e patógenos presentes no esgoto sanitário.

### 3.3 Tratamento de efluente

O efluente líquido, após tratamento para atender os padrões de qualidade e de lançamento conforme a legislação vigente específica de cada nação, é desaguado no mar, rio, córrego e lagoa.

No Brasil, a Resolução CONAMA n° 20/1986 estabelece como padrões de lançamento de efluente, os valores apresentados na Tabela 3.2 (MMA, 1986)

Tabela 3.2 Padrões de lançamento de efluente

Parâmetro	Valor limite
pH	Entre 5 e 9
Materiais Sedimentáveis <sup>(1)</sup>	≤ 1 mg/l
Óleos e graxa	≤ 20 mg/l ≤ 50 mg/l
Óleos minerais	
Óleos vegetais e gorduras animais	
Materiais flutuantes	ausentes
Amônia	≤ 5 mg N/l

<sup>(1)</sup>em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes.

Fonte: MMA, 1986).

### 3.3.1 Desinfecção de água residuária

Conforme Spellman (2003) efluentes de água residuária devem ser desinfetados não apenas para proteger o abastecimento de água potável, mas proteger a saúde pública em geral. Isto é importante quando o efluente secundário é descarregado em corpo d'água utilizado para nadar e captado à jusante para abastecimento. No tratamento da água para consumo humano, a água tratada é tipicamente clorada (embora a ozonização também seja aplicada em muitos casos). Cloração é a desinfecção preferencial no abastecimento de água potável devido à sua capacidade de fornecer um resíduo importante de proteção quando a água tratada deixa as instalações e entra no sistema de distribuição, até chegar à torneira do consumidor.

### 3.3.2 Tratamento do lodo

*Water Environment Federation* (WEF) sugere o termo biossólido para designar o lodo produzido por sistemas de tratamento biológico de esgoto desde que tenha aplicação útil após estabilizado, caso contrário, são empregados os termos torta, lodo ou sólidos (WEF, 2009).

As principais etapas de tratamento do lodo antes da sua disposição final, de acordo com WEF (2009) são: adensamento ou espessamento, estabilização, condicionamento, desaguamento ou desidratação e higienização.

Resumindo, adensamento ou espessamento é um processo físico de concentração de sólidos no lodo. Estabilização atenua maus odores. Condicionamento prepara o lodo para desidratá-lo por adição de produtos químicos. Desidratação ou desaguamento produz lodo denso. Higienização possibilita a aplicação do lodo na agricultura. Para incineração ou disposição do lodo em aterro sanitário, higienização não é necessária (WEF, 2009; IPCC, 2006; Spellman, 2003).

### **3.3.3 Processos de Tratamento**

Os processos de tratamento de esgoto em ETE descritos por MMA (2009), WEF (2009), IPCC (2006) e Spellman (2003) consistem de uma série de operações unitárias associadas ao nível e à eficiência do tratamento como: preliminar, primário, secundário ou terciário, dos quais podem gerar os seguintes subprodutos:

- Sólidos do tratamento preliminar: sólido grosseiro (madeiras, tecidos, plásticos etc.) e sólido predominantemente inorgânico (areia ou terra);
- Lodo de esgoto: sólido predominantemente orgânico (lodo primário); sólido predominantemente orgânico de origem biológica (lodo secundário); e, sólido gerado pela precipitação química (lodo terciário).

#### **Tratamento preliminar**

No tratamento preliminar, os sólidos maiores como estopa, papel e outros que escoam juntamente com o afluente são retidos por um sistema de grade grossa e fina e pelo desarenador para retirada da areia e, em seguida, encaminhados para o aterro sanitário enquanto o afluente segue para outra unidade onde é submetido aos tratamentos primário e secundário (Spellman, 2003).

## **Tratamento primário**

Tratamento primário promove a sedimentação das partículas em suspensão e/ou decompõe a matéria orgânica por ações das bactérias em lagoas ou reatores anaeróbios originando o lodo primário, cuja massa específica varia entre 1,0 a 1,03 g/cm<sup>3</sup>. O lodo primário não é um produto estabilizado sendo removido do tanque de decantação com elevado teor de água, de organismos patogênicos e de matéria orgânica que o caracteriza como matéria putrescível, de forte odor propiciando a proliferação de vetores. Antes de sua disposição final, o lodo primário deve passar por etapas sequenciais de tratamento, uma vez que representa risco à saúde pública e ao ambiente, por ser bastante poluente para o solo e os recursos hídricos (Spellman, 2003).

## **Tratamento secundário**

Tratamento secundário promove a degradação biológica da matéria orgânica nos reatores biológicos originando o lodo secundário, com massa específica de 1,0 g/cm<sup>3</sup>, que é gerado na fase biológica do processo e se constitui por biomassa de microorganismos desenvolvidos durante a digestão ou biodigestão da matéria orgânica presente no esgoto. Devido a seu elevado teor de matéria orgânica, pode requerer estabilização adicional para disposição final, uma vez que o lodo secundário apresenta as mesmas características do lodo primário. Somente após a etapa de estabilização ou digestão completa é que o lodo pode ser disposto no solo, embora Spellman (2003) alerta que o número de patógenos nem sempre é reduzido a patamares aceitáveis nesses finais de processos. A estabilização pela digestão diminui a quantidade de lodo, uma vez que parte da substância orgânica transforma-se em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> reduzindo o valor calorífico de cerca de 17,5 MJ/kg de massa de lodo bruto para cerca de 10,5 MJ/kg de massa de lodo digerido. Normalmente, o valor calorífico do lodo na ETE varia entre 12 800 a 19 750 kJ/kg (WEF, 2009). Lodo seco livre de cinza tem poder calorífico correspondente a 21,3 MJ/kg.

Figura 3.2 mostra um esquema de ETE que combina os dois estágios, primário e secundário, em uma operação básica (Spellman, 2003).

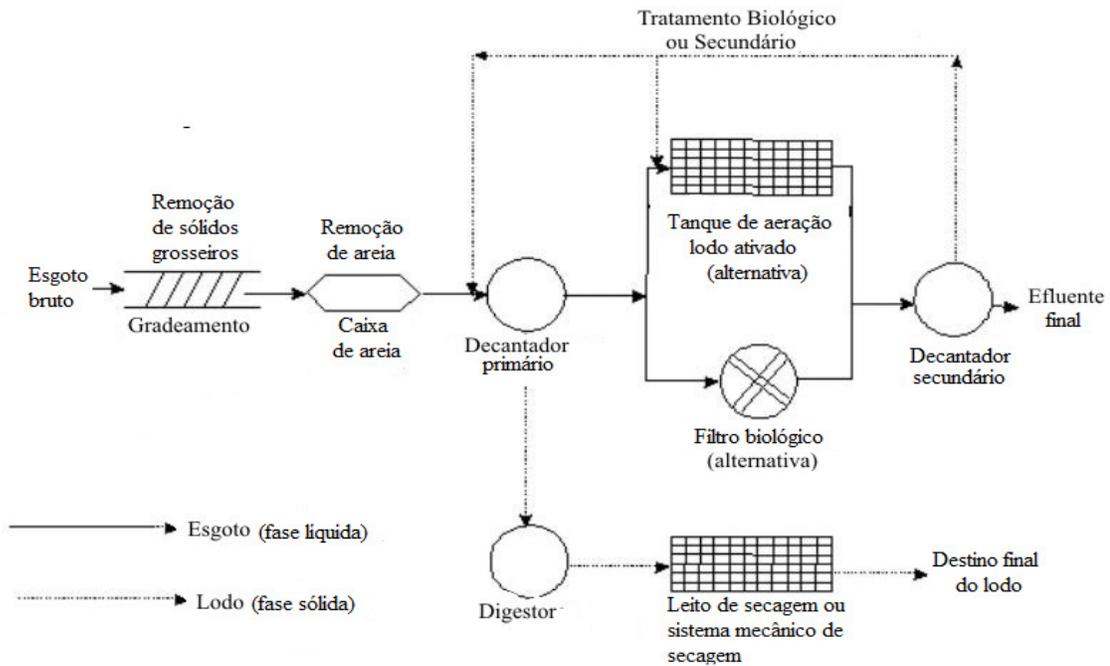


Figura 3.2 Sistema alternativo de tratamento de esgoto em ETE.

### Tratamento terciário

Tratamento terciário é a fase mais avançada, onde o nitrogênio restante é removido no processo de lodo ativado e o fósforo é removido por meio de tratamento químico até os percentuais exigidos na norma ambiental. Organismos patogênicos são removidos por desinfecção com uso de cloro, ozônio ou radiação ultravioleta resultando no lodo terciário ou lodo químico cuja precipitação é obtida por adição de sais metálicos ou cal ao esgoto em sua fase líquida do processo de tratamento. Nessa fase, o lodo apresenta baixo teor de matéria orgânica, o que diminui o risco da produção de odores (MMA, 2009; WEF, 2009; IPCC, 2006; Spellman, 2003).

### 3.3.4 Tecnologias de tratamento

Tratamento do lodo tem basicamente dois objetivos: reduzir o volume e o teor de matéria orgânica. Para alcançar esses objetivos, o tratamento do lodo normalmente inclui uma ou mais das seguintes etapas (Reddy, 2011; Turovskiy e Mathai, 2006; Cheresiminoff, 2003; Spellman, 2003):

## **Sistemas Anaeróbios**

Tratamento anaeróbio é realizado por bactérias que não necessitam de oxigênio para sua respiração. Os três tipos mais comuns são: tanque séptico, filtro anaeróbio e reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*);

### **a) Tanque séptico**

Tanque séptico é um reator de fluxo horizontal onde ocorrem simultaneamente várias ações como: decantação, flotação, desagregação e digestão parcial dos sólidos sedimentáveis (lodo) e da crosta constituída por material flutuante (escuma).

### **b) Filtro Anaeróbio**

Neste reator, a matéria orgânica é estabilizada através de microrganismos que se desenvolvem e ficam retidos nas frestas ou aderidos ao meio suporte que constitui o leito fixo (usualmente pedras ou material plástico) por onde o esgoto flui. Trata-se de reator com fluxo de lodo ativo e biomassa aderida ou retida no leito fixo. Filtro anaeróbio pode ser de fluxo ascendente ou descendente. No filtro de fluxo ascendente, o leito é submerso e no fluxo descendente, pode trabalhar submerso ou não.

### **c) Reator UASB**

No reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) ou manta de lodo, o processo consiste na estabilização da matéria orgânica, anaerobicamente, por microrganismos que crescem dispersos no meio líquido. A parte superior do reator UASB tem separador trifásico, que apresenta formato cônico ou piramidal, permitindo a saída do efluente clarificado, a coleta do biogás gerado no processo e a retenção do sólido dentro do sistema. O sólido retido constitui a biomassa que permanece no reator para que a matéria orgânica seja degradada. O lodo retirado periodicamente do sistema se encontra estabilizado, requer secagem e disposição final.

## **Lagoa de Estabilização**

Lagoa de estabilização é um sistema de tratamento biológico onde a estabilização da matéria orgânica acontece por oxidação bacteriológica (oxidação aeróbia ou fermentação anaeróbia) e/ou redução fotossintética das algas. Os tipos de lagoa são: facultativa, anaeróbia, aerada e de maturação.

### **a) Lagoa Facultativa**

Neste processo, o esgoto afluyente entra continuamente em uma extremidade da lagoa e sai na extremidade oposta em percurso que demora tempo para purificação do esgoto. Parte da matéria orgânica em suspensão tende a sedimentar formando lodo de fundo que se decompõe no processo anaeróbio. A matéria orgânica dissolvida, juntamente com a matéria orgânica suspensa não sedimenta e se dispersa na massa líquida, decompondo-se por ação das bactérias facultativas na presença ou ausência de oxigênio.

### **b) Lagoa Anaeróbia**

Lagoa de menor dimensão e maior profundidade onde predomina a condição anaeróbia. As bactérias anaeróbias têm taxa metabólica e de reprodução mais lenta do que as bactérias aeróbias.

### **c) Lagoa Aerada Facultativa**

Processo predominantemente aeróbio e de dimensões reduzidas. Aerador fornece oxigênio suficiente apenas para oxigenação. Assim, os sólidos tendem a sedimentar e formar uma camada de lodo de fundo para ser decomposta anaerobicamente.

### **d) Lagoa de Maturação**

Este processo possibilita um polimento no efluente de qualquer dos sistemas descritos. Trata-se de lagoa rasa própria para remover os organismos patogênicos. Estes são eliminados a partir de fatores como temperatura, insolação, pH, escassez de alimento, organismos predadores, competição, compostos tóxicos etc.

## **Reator Aeróbio com Biofilme**

Nesse processo, a matéria orgânica é estabilizada por bactérias que crescem aderidas ao meio suporte (geralmente pedras ou material plástico). Há sistemas que aplicam esgoto na superfície, com fluxo de esgoto descendente e necessidade de decantação secundária; há também sistemas submersos com introdução de oxigênio e fluxo de ar ascendente, fluxo de esgoto ascendente ou descendente.

### **a) Filtro Biológico Percolador**

Neste reator, a matéria orgânica é estabilizada por via aeróbia, por meio de bactérias que crescem aderidas ao meio suporte, constituído de pedras, ripas, material plástico ou qualquer outro que favoreça a percolação do esgoto aplicado. Normalmente, o esgoto é aplicado por meio de braços giratórios e o fluxo contínuo em direção ao fundo do tanque permite o crescimento bacteriano na superfície do meio suporte, possibilitando a formação de camada biológica denominada biofilme. O contato do esgoto com a camada biológica possibilita a degradação da matéria orgânica. A aeração desse sistema é natural, ocorre nos espaços vazios entre os constituintes do meio suporte.

## **Disposição no Solo**

O esgoto aplicado ao solo fornece água e nutrientes necessários para o crescimento das plantas. Parte do líquido evapora, parte infiltra no solo e parte é absorvida pelas plantas. Em alguns sistemas, a infiltração no solo é elevada e não há efluente. Em outros sistemas, a infiltração é baixa e o esgoto tratado (efluente) sai na extremidade oposta do terreno. Os tipos de disposição no solo mais comuns são: infiltração lenta, infiltração rápida, infiltração sub-superficial, escoamento superficial e terras úmidas construídas.

### **Escoamento superficial no solo**

Esta forma de disposição/tratamento consiste na aplicação controlada de efluente no solo com escoamento rampa abaixo até alcançar canais de coleta. A aplicação deve ser intermitente.

## **Lodo Ativado**

Este processo acontece em reator onde grande concentração de biomassa fica em suspensão no meio líquido. A quantidade de bactérias em suspensão representa maior consumo de alimento. A biomassa (bactérias) que cresce no tanque de aeração, devido à sua propriedade de flocular, é removida por sedimentação do decantador secundário, permitindo a saída do efluente clarificado. Para garantir a elevada concentração de biomassa no reator, o lodo sedimentado é recirculado para a unidade de aeração. Este é o princípio básico do lodo ativado.

## **Flotação**

Neste processo, o ar é dissolvido sob pressão no esgoto a ser tratado, em tanque de pressurização e, em seguida, liberado no tanque de flotação à pressão atmosférica. O ar liberado ganha a superfície do tanque, carreando a matéria sólida que tende a flotar. Esta matéria flutuante forma uma camada superior que é raspada por um braço apropriado e coletada em dispositivos especiais para ser removida. Alguns processos utilizam produtos químicos para auxiliar a formação dos flocos.

## **Ultravioleta**

Este processo objetiva a remoção de organismos patogênicos. O esgoto tratado entra em uma das extremidades do reator, passa por um conjunto de lâmpadas ultravioleta e sai pela extremidade oposta. A energia ultravioleta é absorvida pelos microrganismos causando alterações estruturais no DNA que impedem a reprodução. A baixa concentração de sólidos é de grande importância para a eficiência do tratamento.

### **3.4 Tratamento e disposição final do Lodo**

Todos os processos de tratamento de esgoto geram subprodutos como espuma, material gradeado, areia, lodo primário e lodo secundário. Os três primeiros devem ser dispostos em aterro sanitário, mas o lodo primário e o secundário necessitam de tratamento antes da disposição final.

### 3.4.1 Aspecto legal

No Brasil, a Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007, regulamentada pelo Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010, estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, mais especificamente o art. 3º diz, (MMA, 2010):

*I – Saneamento básico trata do conjunto de serviços de infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento entre outras.*

*b) esgotamento sanitário: constituído pelas atividades de infraestrutura e instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados do esgoto sanitário, desde as ligações prediais até seu lançamento final no ambiente.*

Em geral, os procedimentos comumente adotados para tratamento e/ou eliminação de ED entre países desenvolvidos e em desenvolvimento são mostrados na Figura 3.3.

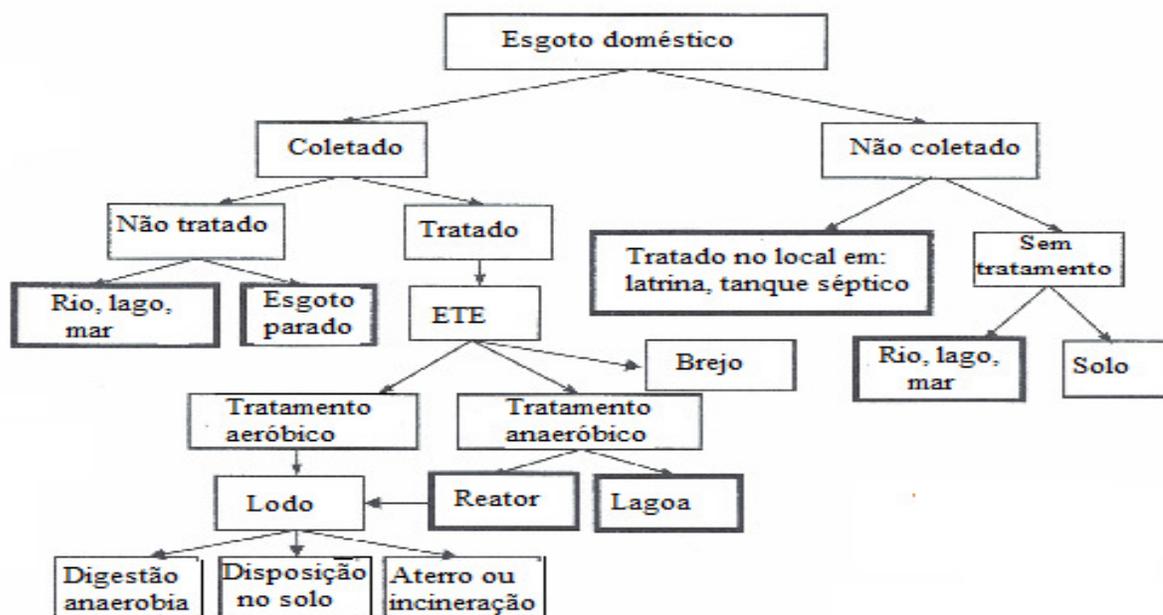


Figura 3.3 Sistemas de tratamento de esgoto e vias de descarga.

Fonte: Adaptado de IPCC (2006).

### 3.4.2 Coleta e situação econômica

UNU/INWEH (2013) mostra que país com renda alta coleta e trata cerca de 70% do esgoto, enquanto país com renda média alta coleta e trata 38% e país de renda média baixa coleta e trata 28%. Apenas 8% do esgoto gerado em país com renda baixa é coletado e submetido a algum tipo de tratamento.

### 3.4.3 Tratamento em país desenvolvido

Os métodos mais comuns de tratamento de esgoto utilizados em país desenvolvido são ETEs aeróbias, lagoas anaeróbicas e sistema séptico no local. Nos EUA, aproximadamente 20% do esgoto doméstico é tratado em sistema séptico ou outro sistema no local, enquanto o restante coletado é tratado em ETEs. Figura 3.4 mostra o funcionamento de um sistema séptico.

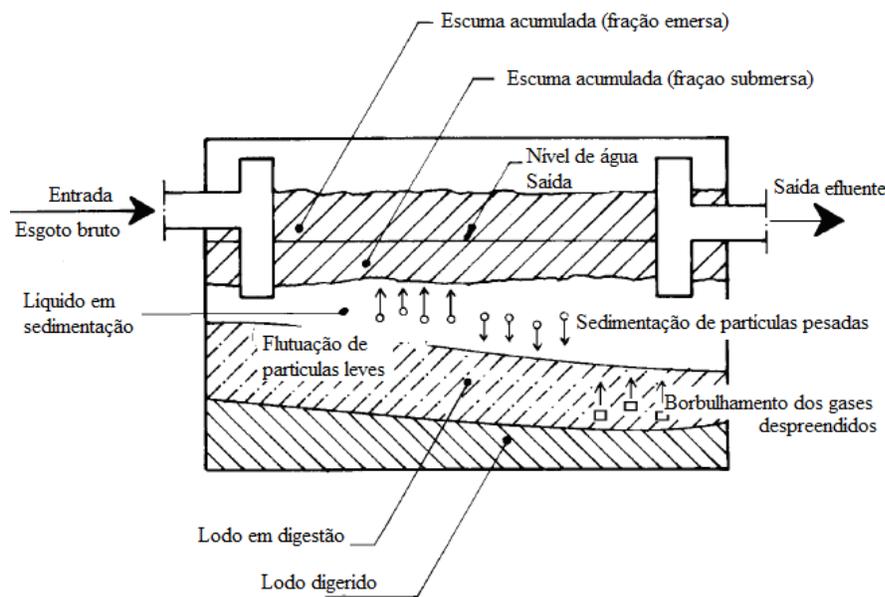


Figura 3.4 Funcionamento de um tanque séptico conforme NBR 7229.

Fonte: Adaptado de ABNT/ 1993.

Neste, pode ser tratado o esgoto de uma ou várias famílias. Trata-se de um sistema avançado, composto por tanque subterrâneo anaeróbico e área de drenagem para tratamento de efluente (IPCC, 2006). A Tabela 3.3 mostra o percentual da população atendida por rede geral de esgoto e o percentual de esgoto tratado em 7 países selecionados.

Tabela 3.3 População urbana com serviço de coleta e tratamento de ED

Ano	País	População atendida com rede de ED (%)	População com ED tratado (%)
2010	Alemanha	97	96
2010	Áustria	94	94
2006	Japão	82	82
2008	Estados Unidos	74	74
2010	Dinamarca	90	90
2010	Reino Unido	100	100
2009	Canadá	82	82

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Unstat, 2011; Government of Canada, 2013.

Os dados mostram que nos países selecionados, todo ED coletado é tratado, mas o sistema de coleta não está disponível para toda a população. Dos 7 países selecionados, apenas o Reino Unido tem 100% da população atendida com rede geral de coleta. Os EUA com a quarta maior população do mundo no ano mencionado ainda faltava coletar o esgoto gerado por 26% da população.

No Canadá, em 2006, foram gerados 5.4 Mm<sup>3</sup> de esgoto dos quais 17% não foram tratados (Sato et al., 2013). Em 2009, cerca de 3% da população não tinha seu esgoto tratado e somente 13% da população tinha seu esgoto tratado quimicamente, ou seja, na fase terciária, como mostra a Figura 3.5.

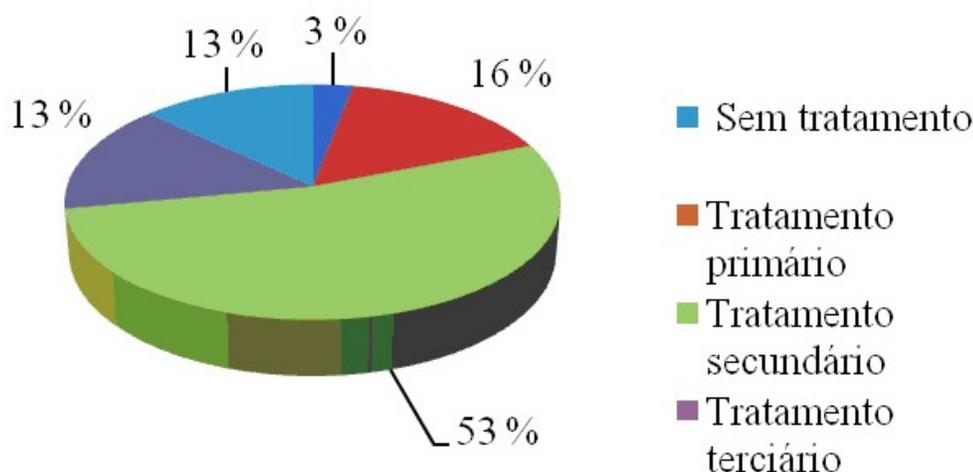


Figura 3.5 Percentual da população no Canadá e respectivos tratamentos de ED.

Fonte: Government of Canada (2013).

### 3.4.4 Coleta, tratamento e disposição em países em desenvolvimento

Países em desenvolvimento e alguns países desenvolvidos, conforme IPCC (2007), têm sistema de coleta de esgoto escoado em redes de canais, calhas e valas abertas. Figuras 3.6 (a) e (b) mostram dois exemplos típicos de sistema de escoamento de esgoto.



Figuras 3.6a e b Escoamento de esgoto em canal e vala.

Nesses tipos de escoamento, o esgoto não recebe nenhum tipo de tratamento e, tem como destino os corpos d'água mais próximos. Em geral, os métodos comumente adotados para eliminação variam com tratamento no próprio local de geração (tanque séptico); escoado para ETE ou descartado sem tratamento nas proximidades ou por emissário (MMA, 2006).

O grau de tratamento e descarga de esgoto também varia em países em desenvolvimento. ED é tratado em ETEs, fossa rudimentar, sistemas sépticos ou escoado de forma aberta ou fechada para rio, mar ou lagoa não gerenciada do tipo brejo ou pântano (Figura 3.7). IPCC (2006) afirma que em algumas cidades costeiras, o ED é disposto diretamente no oceano sem nenhum tipo de tratamento (IPCC, 2006).



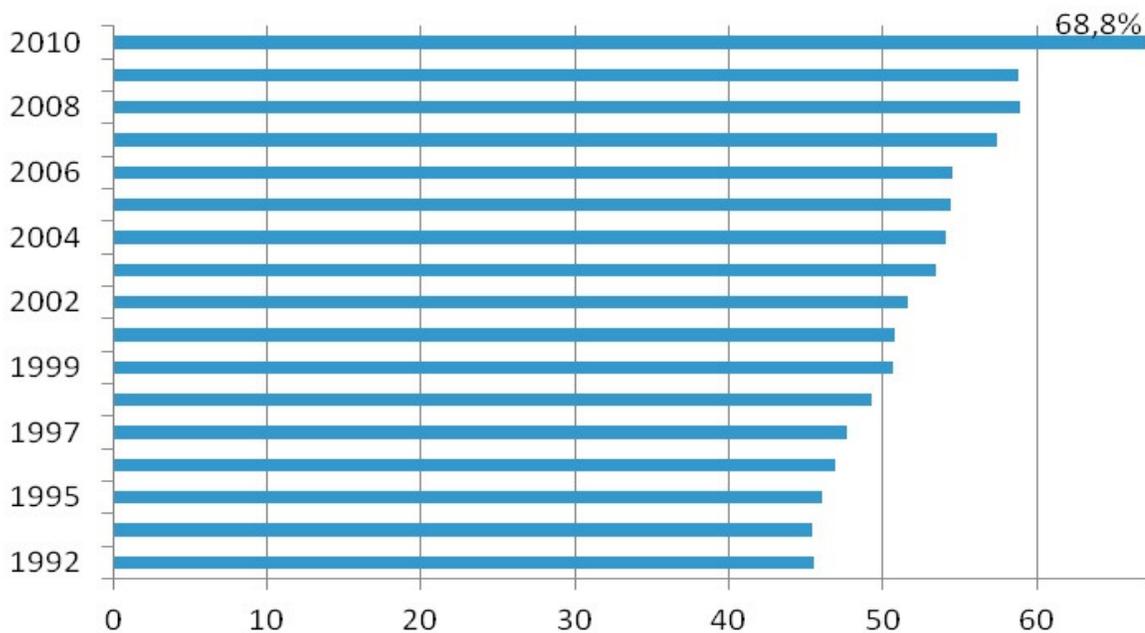
Figura 3.7 Tipo de lagoa não gerenciada.

Conforme UN/INWEH (2013), a realidade em países mais pobres tem sido problemática. A maior parte do esgoto gerado pelos habitantes nem sempre é coletada e o tratamento representa pequeno volume. Em 2009, Cuba coletou esgoto de 35,9% de seus habitantes, mas tratou o correspondente a 24% dos habitantes. No mesmo ano, Venezuela coletou esgoto de 86% dos seus habitantes, mas tratou apenas 23,8% (Unstat, 2011). Entretanto, essa imprudência com coleta e tratamento de esgoto não se restringe apenas aos países pobres. Conforme IPCC (2006), alguns países desenvolvidos ainda dispõem o esgoto doméstico não tratado por emissário submarino ou gasoduto em corpos d'água como oceano.

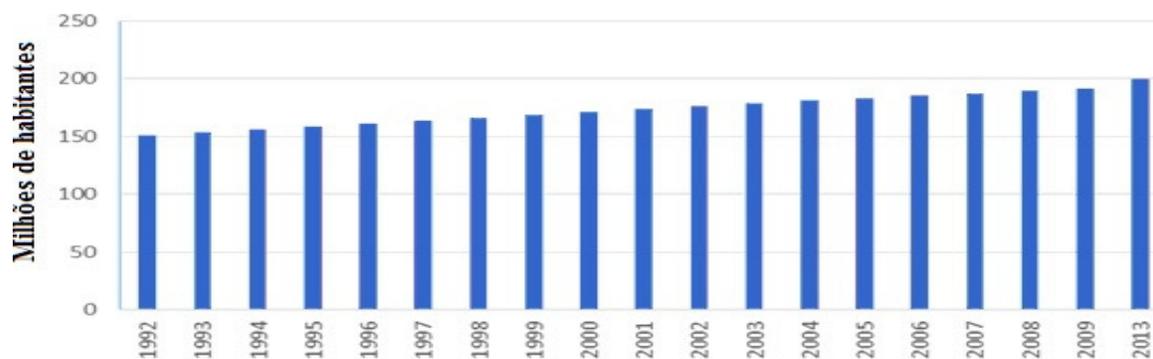
#### **3.4.5 Esgotamento sanitário no Brasil**

No Brasil, a geração de esgoto é correspondente ao mesmo consumo de água cuja média nacional, em 2011, foi de 162,6 l/hab./dia (MCidades, 2013a). O consumo variou nas cinco regiões brasileiras. No Norte, o consumo médio de água foi 151,2 l/hab./dia; no Nordeste foram consumidos 120,6 l/hab./dia, no Sudeste o volume aumentou para 189,7 l/hab./dia, enquanto no Sul foram consumidos 147,9 l/hab./dia e no Centro-Oeste o consumo correspondeu a 157,5 l/hab./dia. A cidade do Rio de Janeiro extrapolou a média da Região Sudeste com o consumo diário de 237,8 l/hab./dia. Em contrapartida, no estado de Alagoas, o consumo ficou abaixo da média da Região Nordeste, ou 100 l/hab./dia, MCidades (2013a).

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico do MCidades, (2013a) mostram que dos 5.565 municípios apenas 1.961 dispõem de rede geral de esgoto sendo que o tratamento corresponde a 37,5% do volume gerado. Figuras 3.8 (a) e (b) mostram a evolução da rede coletora no país e o crescimento populacional no país nos últimos 18 anos (1992-2010).



(a)



(b)

Figuras 3.8 (a) e (b) Evolução da coleta de esgoto e crescimento populacional.

Fonte: IBGE/PNAD, 2013.

Os dados mostram que em 18 anos, a rede coletora aumentou apenas 23,8% ou 1,3% ao ano enquanto o crescimento populacional foi de 33% no mesmo período. Figura 3.9 mostra o percentual de domicílios em 11 capitais brasileiras com esgoto a céu aberto.



Figura 3.9 Percentual de domicílios com esgoto a céu aberto em capitais brasileiras.

Fonte: Censo 2010 (IBGE, 2013).

Como pode ser observado, Belém capital do estado do Pará lidera no *ranking* com a presença de esgoto nas ruas abrangendo cerca de 154.533 domicílios, conforme o censo 2010.

O volume de esgoto gerado no país, em 2008, foi de 28.249,154 m<sup>3</sup>/dia dos quais foram coletados 12.304.128 m<sup>3</sup>/dia e receberam algum tipo de tratamento 8.460.590 m<sup>3</sup>/dia (ANA, 2012; IBGE/PNAD, 2012; IBGE, 2012). Figura 3.10 mostra os sistemas predominantes de tratamento de esgoto nas 27 unidades da federação.

Como pode ser observado, o país tem três tipos de destinação final predominante para esgoto que são rede de coleta geral, fossa rudimentar e fossa séptica. Fossa rudimentar é um sistema de disposição final de esgoto inadequado pelo fato da sua construção não se enquadrar nas normas técnicas de engenharia, sendo, portanto, fonte de contaminação do lençol freático e de doenças. Outro fator preocupante é que cerca de 7 milhões de habitantes não tem acesso a banheiro e 17,6% não tem acesso à água potável.

As regiões mais desprovidas de saneamento básico adequado são Norte e Nordeste. Grande parte dos municípios brasileiros de pequeno porte, onde a densidade populacional é baixa, o índice de tratamento de esgoto também o é. No entanto, cidades localizadas nas regiões metropolitanas com densidade demográfica alta, apresentam melhores condições de tratamento do efluente doméstico. Mas, isso não significa que a quantidade de esgoto lançado no curso d'água sem tratamento adequado nas regiões metropolitanas seja menor que nos municípios de pequeno porte (ANA, 2013).

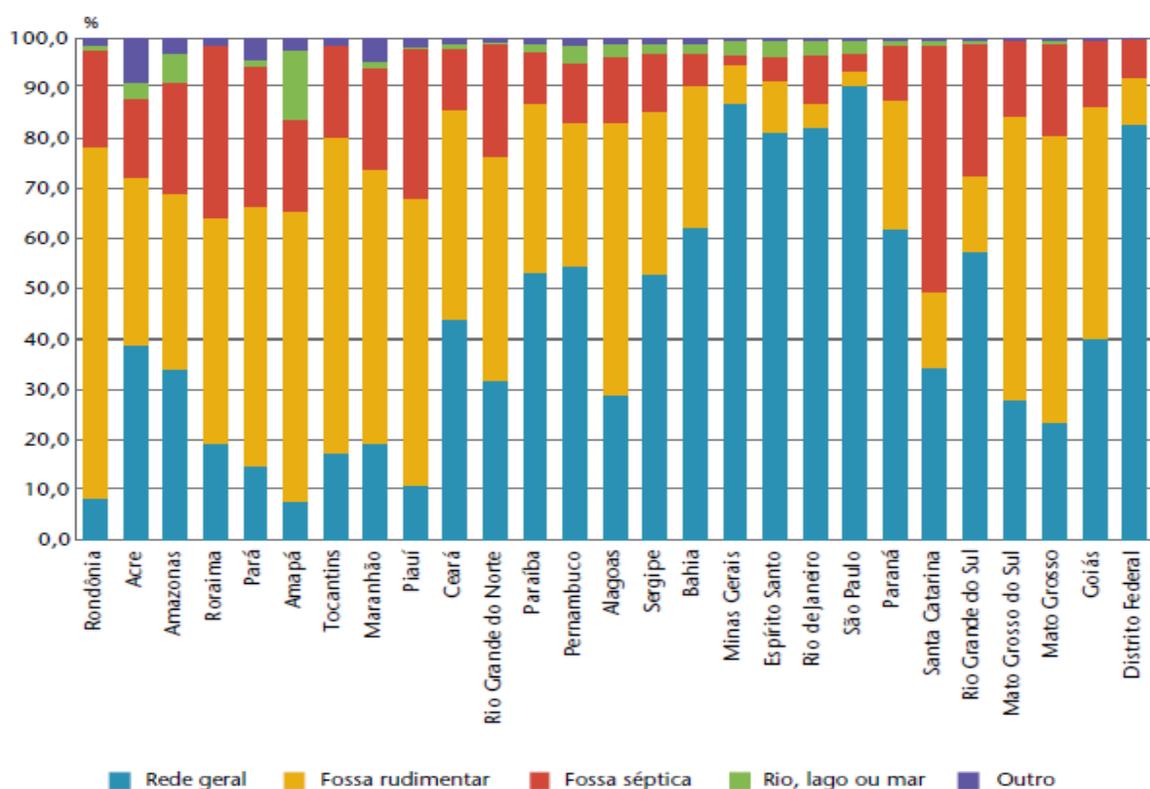


Figura 3.10 Esgotamento sanitário dos domicílios urbanos.

Fonte: IBGE (2013).

Do volume total de esgoto tratado diariamente no Brasil, a maior parte chega até o tratamento secundário para lançamento em corpos receptores. Para Spellman (2003), essa fase de tratamento não garante matéria orgânica estabilizada. Apenas 10% do esgoto tratado chega à fase mais avançada de tratamento ou terciário como mostra a Figura 3.11.

Análise dos dados mostram que em 21% do esgoto que chega na ETE é retirado apenas os sólidos grosseiros para despejá-lo bruto nos corpos d'água. No total, 73% recebe tratamento primário e secundário. Conforme Spellman (2003), tratamento secundário nem sempre garante a eliminação total dos patógenos contidos no esgoto.

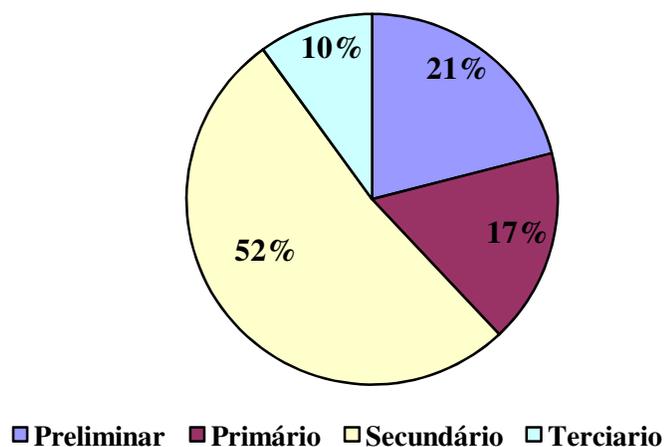


Figura 3.11 Percentual de esgoto tratado por tipo de tratamento.

Fonte: ANA (2012); IBGE (2010).

### 3.5 Recursos fluviais: fonte receptora de esgoto e de captação de água

Conforme IBGE (2011), cerca de 30,5% dos municípios lança esgoto não tratado em rios, lagos ou lagoas e utilizam os mesmos corpos receptores para vários usos à jusante como abastecimento de água, recreação, irrigação e aquicultura. Entre esses municípios, 23% lança o esgoto não tratado em corpos hídricos e os utilizam à jusante para irrigação e 16% usa para abastecimento humano. Isso eleva o custo para recuperar a qualidade da água de abastecimento em ETA (estação de tratamento de água), cujos processos são mostrados na Figura 3.12.

ANA (2013) ressalta que a quantidade de carga orgânica lançada nos rios das várias bacias brasileiras é grande, da ordem de 5,5 mil t DBO/dia como mostram as Figuras 3.13 (a) e (b). A carga de DBO está localizada principalmente nas regiões do Paraná, Atlântico Sudeste e Atlântico Nordeste Oriental onde vive cerca de 64% da população urbana (ANA, 2013, IBGE, 2011).

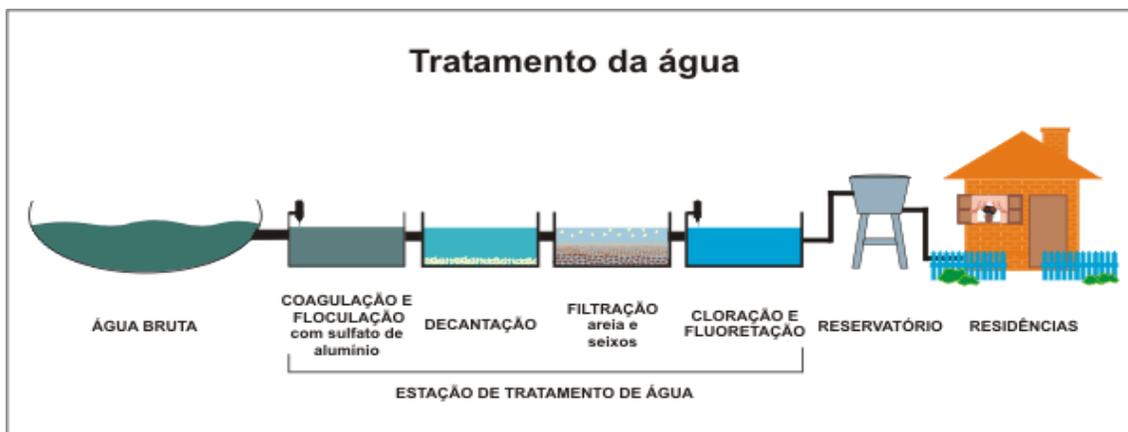


Figura 3.12 Processo básico de tratamento de água em ETA.



Figura 3.13a Desaguamento de esgoto<sup>(a)</sup>; Figura 3.13b Desaguamento no Rio Iguaçu-PR<sup>(b)</sup>.  
 Fonte: (a) info.opersan.com.br; (b) Polícia Federal/divulgação (2012).

Na região hídrica (RH) do Paraná, entre as bacias mais críticas estão as do Alto Tietê e Piracicaba, ambas na bacia do Rio Tietê, devido às cargas oriundas das regiões metropolitanas (RM) de São Paulo e Campinas e a Bacia do Rio Grande, pelas cargas recebidas dos municípios de São José do Rio Preto (SP) e Uberaba (MG). A RH Atlântico Sudeste apresenta duas bacias hidrográficas críticas. A Bacia do Rio Paraíba do Sul, com cargas remanescentes geradas principalmente nos municípios de Juiz de Fora em Minas Gerais; São José dos Campos, Taubaté

e Jacareí no estado de São Paulo e nos municípios fluminenses de Campos dos Goytacazes, Volta Redonda, Petrópolis, Barra Mansa, Nova Friburgo e Teresópolis. A outra é a bacia Litorânea São Paulo/Rio de Janeiro com cargas maiores das duas RMs: Rio de Janeiro e Baixada Santista. Na RH Atlântico Nordeste Oriental, a bacia mais crítica é a Litorânea Pernambuco por causa das cargas de esgoto recebida da RM de Recife e do município de Caruaru (ANA, 2013).

### 3.5.1 Água de captação

Relatório apresentado pela Agência Nacional das Águas (ANA) mostra que a qualidade da água nas bacias hidrográficas que atravessam as áreas urbanas brasileiras em 12% dos 148 pontos monitorados, em 2012, estava em condições péssimas e 32% em condições ruins (ANA, 2013). Legislações, federal e estadual, classificam seus corpos d'água em função de seus usos preponderantes tendo sido estabelecidos, para cada classe de água, os padrões de qualidade a serem obedecidos e os valores são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Padrões de qualidade a serem mantidos no corpo receptor

(Resolução CONAMA nº 20, 18/06/1986)	
Parâmetro	Valor limite no corpo receptor
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	≤ 5 mg/L
Oxigênio dissolvido (OD)	≥ 5 mg/L
Nitrogênio amoniacal	≤ 3,0 <sup>(1)</sup> mg/L
Nitrato	≤ 10 mg/L
Fósforo	≤ 0,025 mg P/L
Coliformes fecais	≤ 1.000 CF/100 mL
Coliformes totais	≤ 5.000 CT/100 mL

<sup>(1)</sup> Para pH = 7 e temperatura de 20°C, correspondente à concentração máxima de amônia, não ionizável, de 0,02 mg/L NH<sub>3</sub>.

Fonte: MMA (2013).

### 3.5.2 Água contaminada

O maior problema do consumo de água contaminada é seu potencial de doenças transmissíveis. A OMS estima que, em 2008, cerca de 2,5 milhões de pessoas foram vítimas fatais de doenças diarreicas sendo que cerca de 1,5 milhão de crianças menores de 5 anos no

mundo são vítimas fatais dessa doença, provocadas em grande parte pela falta de saneamento básico (WHO/UNICEF, 2012).

Municípios brasileiros localizados nas regiões Norte e Nordeste lideraram, em 2008, as taxas de internações por diarreia. Cidades como Belém (PA), Campina Grande (PB), Maceió (AL), Teresina (PI) e Vitória da Conquista (BA) estão entre os 10 piores municípios brasileiros na questão de saneamento básico (WHO/UNICEF, 2013; IBGE, 2011).

Existem outras formas de transmissão que podem levar à doença. A OMS estima que acima de 200 milhões de pessoas estejam afetadas por esquistossomose e cerca de 800 milhões vivem sob o risco de contrair infecção. Doenças devido à poluição nas praias recreativas mundiais (Figura 3.14) são significativas, mas devido a dados limitados ou inexistentes torna-se difícil quantificar a real população exposta (WHO/UNICEF, 2013).



Figura 3.14 Mar em São Luís-MA recebe esgoto bruto.

Fontes: diariodonordeste.com.br; blogsoestado.com

Outro impacto à saúde pública refere-se a inundações. De acordo com a Organização Mundial de Saúde, em 2010, mais de 200 milhões de pessoas foram vítimas de doenças transmitidas pela água e relacionadas com a água (WHO/UNICEF, 2013). Inundações quando associadas ao lançamento de esgoto não tratado em rios bem como a disposição inadequada do resíduo sólido podem causar sérios problemas sanitários e de saúde pública.

### 3.6 Tratamento e destinação final do lodo

Conforme Tchobanoglous (1993), processamento e disposição do esgoto têm sido um dos mais complexos problemas da engenharia ambiental e que a escolha da melhor alternativa ambientalmente correta e segura demanda avaliação integrada de ordem técnica, social, ambiental e econômica. Entretanto, Reddy (2011) salienta que na prática isso não ocorre e a disposição do lodo, muitas vezes, é feita com base em solução local. Dentre as práticas comuns de disposição estão despejo em rio e mar, aterro sanitário, tratamentos biológico e térmico.

#### 3.6.1 Aterro sanitário

A disposição final do lodo de esgoto em aterro tem predominado em todo o mundo. Cerca de 40% do lodo produzido na União Europeia é disposto em aterro (EC, 2006) que geralmente ocupa cerca de 16% da área (MMA, 2009). O despejo de lodo em aterro tem ao menos duas implicações: uma é a contribuição para reduzir a vida útil do aterro e a outra é a possibilidade do lodo disposto produzir chorume. Uma alternativa para essa questão, segundo o MMA (2009), é a construção de aterro sanitário exclusivo para recebimento do resíduo resultante do tratamento do esgoto como lodo, areia e detritos grosseiros do gradeamento, com capacidade de armazenamento para todo o período de projeto da ETE. Para Tammemagi (1999) essa opção deve ser usada apenas como último recurso, caso o lodo não sirva como fertilizante para a agricultura ou para produção de energia. A Figura 3.15 mostra os métodos e respectivos produtos originários do tratamento do lodo secundário.

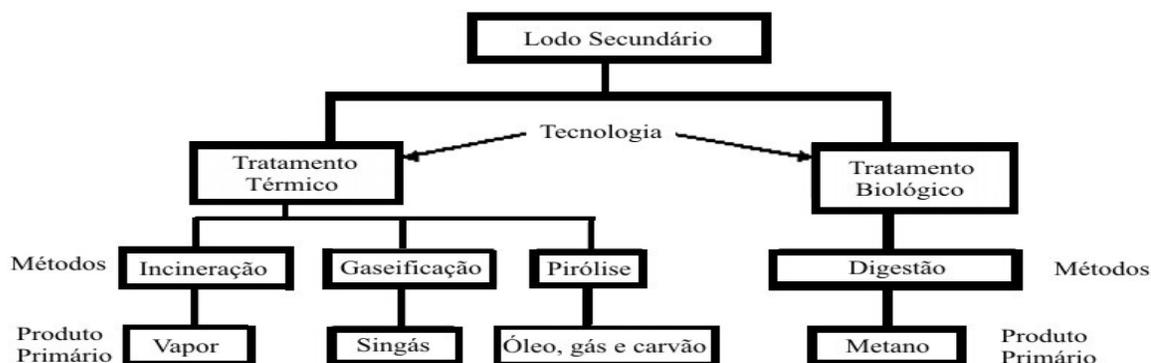


Figura 3.15 Sistemas de tratamento de lodo secundário.

### 3.6.2 Tratamento biológico do lodo

A remoção do material orgânico presente no esgoto consiste em dois métodos biológicos distintos: mecanismo aeróbico e mecanismo anaeróbico: No mecanismo aeróbico, o material é oxidado para produtos minerais (compostos orgânicos) e no mecanismo anaeróbico, o material se desenvolve sem oxidante como oxigênio livre.

Ambos os processos, aeróbico e anaeróbico, reduzem a atividade biológica do lodo e, conseqüentemente, reduzem seu volume além de estabilizá-lo e mantê-lo em condições higienicamente seguras pela decomposição das substâncias orgânicas. Isso, porém, depende do tempo de retenção adequado para a digestão, da temperatura de digestão apropriada e da mistura do lodo a ser digerido (Spellman, 2003; EC, 2006). Alguns sistemas de digestão anaeróbica completam o ciclo de tratamento do lodo incorporando a compostagem<sup>4</sup> e a maturação no processo. Lodo digestado é rico em nutrientes e pode ser usado em substituição ao fertilizante químico na agricultura (Reddy, 2011).

Para Andrade Neto et al (2002), no Brasil a tecnologia anaeróbia encontra-se praticamente consolidada e, nos últimos anos, as análises das alternativas de tratamento geralmente incluem reatores anaeróbios, mas nestes, o efluente dificilmente atende aos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação ambiental brasileira. Por isso, na maioria das vezes, torna-se necessário o pós-tratamento do efluente. Em regiões de clima quente, uma opção técnica e economicamente viável é o uso de sistemas totalmente anaeróbios, compostos por sistemas de filtro anaeróbio antecedido de decanto-digestor ou reator de manta de lodo (UASB), que facilita a desinfecção, com ótimo aspecto visual e sem problemas de maus odores.

Historicamente, o primeiro tanque duplo para sedimentação e tratamento de lodo foi instalado na Inglaterra, em 1904. Em 1907, foi patenteado o primeiro “Tanque de Imhoff”, um tipo inicial de digestor na Alemanha. Digestão anaeróbia ganhou reconhecimento acadêmico na década de 1930, quando pesquisa científica levou à descoberta das bactérias anaeróbias e microorganismos que facilitam o processo (Reddy, 2011). Desde então, a digestão anaeróbica tem sido aplicada no tratamento de vários tipos de resíduo no mundo inteiro.

---

<sup>4</sup> Compostagem é entendida como processo de decomposição aeróbia controlada da matéria orgânica para produção de composto orgânico (MMA, 2010).

### **3.6.3 Fertilizante**

Os compostos orgânicos são transformados em fertilizantes somente quando submetidos à fase de maturação podendo ser utilizados na agricultura (Milieu et al., 2008). Como material rico em nutrientes, lodo de esgoto serve para recuperação do solo e como adubo na agricultura. Na primeira alternativa, o lodo pode ser aplicado na terra no sistema de incorporação controlada em áreas pré-determinadas, onde a área utilizada permanece isolada durante um período de aproximadamente dois anos a partir do recebimento do lodo. Após esse período, a área fica liberada novamente para plantio e o solo enriquecido com matéria orgânica e nutrientes contidos no lodo. Na segunda alternativa, os nutrientes são incorporados à estrutura do solo, mas nesse caso, há riscos de contaminação com metais pesados, agentes patogênicos, além da contaminação das águas superficiais e subsuperficiais a partir da lixiviação do fósforo e nitrogênio presente no lodo. No Brasil, a Resolução nº 375 do CONAMA, de 2006, define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodo de esgoto gerado em ETE (MMA, 2009).

### **3.6.4 Biogás**

Biogás é o principal produto da decomposição anaeróbica do sólido orgânico, composto por cerca de 50-75% de metano, 25-50% de dióxido de carbono, 0-10% de nitrogênio, 0-1% de hidrogênio, 0-3% de ácido sulfídrico e 0-2% de oxigênio. Seu poder calorífico corresponde a cerca de 5.000 kcal/m<sup>3</sup>. Cada tonelada de resíduo produz entre 50 a 150 m<sup>3</sup> de biogás. Na relação de equivalência, 1m<sup>3</sup> de biogás corresponde a 1.2 kWh de eletricidade ou outro tipo de energia para diversas aplicações (Bodík e Kubaská, 2013). Figura 3.16 mostra o sistema de conversão de energia do biogás e as possíveis aplicações.

Reddy, 2011salienta que a opção mais simples e mais econômica para o uso do biogás (inclusive o do aterro) é sua utilização local. Esta opção requer sistema de tubulação instalada do ponto de coleta até o ponto de utilização do gás. Biogás também pode servir para o sistema de cogeração de energia com utilização dos gases de exaustão para aquecimento dos digestores e do secador de lodo, aumentando a eficiência do processo com concomitante redução de custos de instalação e possibilidade de comercialização do excedente de eletricidade (CENBIO, 2001).

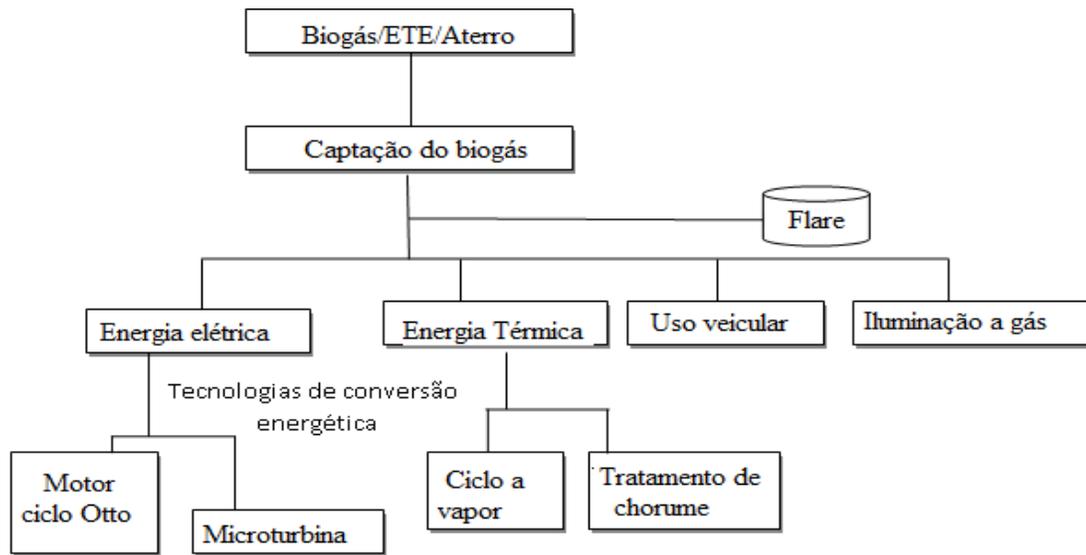


Figura 3.16 Captação e utilização do biogás.

### 3.7 Consumo de energia no tratamento de esgoto

Dados sobre consumo de energia no processo de tratamento primário disponível na literatura para coleta de esgoto bruto e bombeamento variam desde 0,02 a 0,1 kWh/m<sup>3</sup> no Canadá, de 0,045 a 0,14 kWh/m<sup>3</sup> na Hungria e de 0,1 a 0,37 kWh/m<sup>3</sup> na Austrália. O maior consumo é o da tecnologia convencional de aeração para ativação do lodo que varia desde 0,46 kWh/m<sup>3</sup> na Austrália, 0,269 kWh/m<sup>3</sup> na China, 0,33–0,60 kWh/m<sup>3</sup> nos EUA e 0,30–1,89 kWh/m<sup>3</sup> no Japão. Na oxidação, etapa parcial do tratamento secundário, a demanda de energia é de 0,5 kWh/m<sup>3</sup> na Austrália, 0,302 kWh/m<sup>3</sup> na China e 0,43 a 2,07 kWh/m<sup>3</sup> no Japão (Bodík e Kubaská, 2013).

No tratamento terciário de efluente, a demanda de energia também é alta devido a intensificação dos processos de remoção de nutrientes (nitrificação, desnitrificação e remoção de fósforo). Para esse processo no Japão, a demanda de energia varia de 0,39 a 3,74 kWh/m<sup>3</sup>. Nos EUA, ETE municipal convencional consome, em média, 0,43 kWh/m<sup>3</sup>, consumo este semelhante ao apresentado na literatura para Taiwan (0,41 kWh/m<sup>3</sup>), Nova Zelândia (0,49 kWh/m<sup>3</sup>) e Hungria (0,45–0,75 kWh/m<sup>3</sup>). Em Cingapura, as ETAs (Estações de Tratamento de Água)

consomem entre 0.72 a 0.92 kWh/m<sup>3</sup> para produzir água potável de efluentes municipais (Bodík e Kubaská, 2013).

### 3.7.1 Biodigestão do lodo secundário

No processo de biodigestão em ETE, o lodo proveniente do segundo estágio de tratamento é encaminhado para o digestor (tanque) que se mantém a temperatura constante adequada para facilitar a proliferação dos microorganismos que consomem a biomassa, produzindo CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. O biogás produzido é armazenado nos gasômetros à pressão constante e, após passar por processos de tratamento, limpeza e secagem é queimado. Caldeira instalada rente ao forno produz vapor que pode ser usado em turbina a vapor e gerador elétrico, usado também para máquina térmica com gerador acoplado ou em turbina a gás com gerador elétrico acoplado.

Figura 3.17 mostra um esquema específico de vapor usado na turbina a gás e gerador elétrico acoplado.

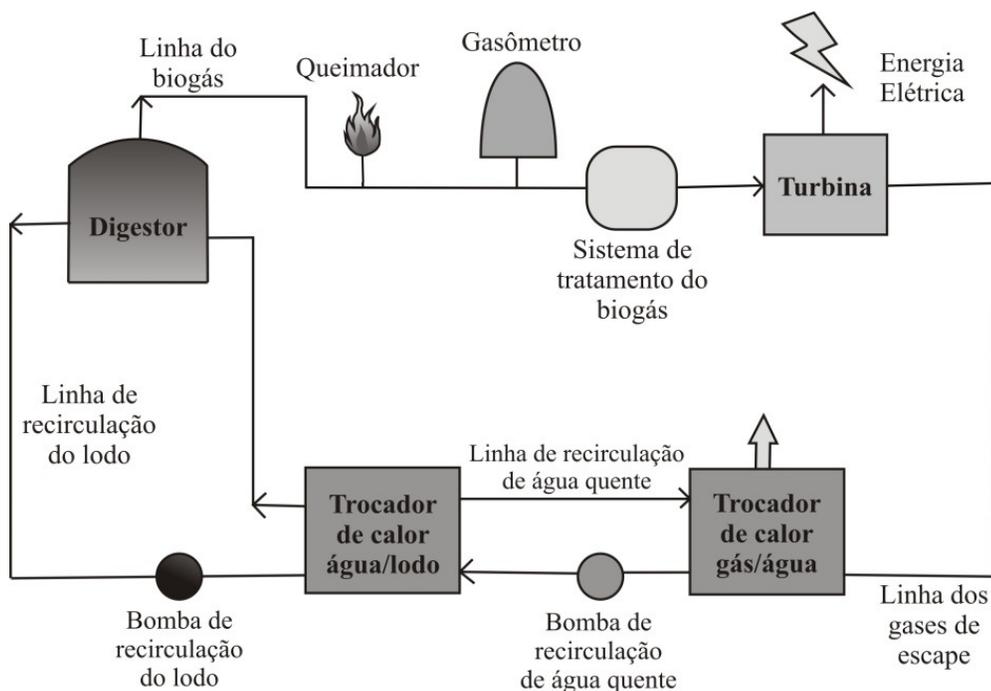


Figura 3.17 Sistema de cogeração de energia.

Após a queima do biogás, os produtos de combustão a alta temperatura e pressão passam pelas rodas da turbina girando-as, que em processo simultâneo, giram o gerador acoplado convertendo a energia mecânica em energia elétrica para alimentar a rede de distribuição elétrica.

Os gases relativamente quentes que saem da turbina passam por trocador de calor aquecendo a água para ser usada em outro trocador de calor e, finalmente, são liberados para a atmosfera. Como em um ciclo, a água aquecida passa em outro trocador de calor, troca calor com o lodo que sai do fundo do biodigestor sendo bombeado de volta para o digestor com o objetivo de manter constante a temperatura do material dentro do digestor para acelerar a proliferação dos microorganismos com menor tempo de retenção do lodo.

### **3.7.2 Experiência de aproveitamento do biogás e outros subprodutos**

#### **No âmbito internacional**

Estudos realizados por Bodík e Kubaská (2013) na Eslováquia mostram que o consumo médio de energia em ETE de grande porte é de 0.485 kWh/m<sup>3</sup> e de 0.915 kWh/m<sup>3</sup> em pequenas ETEs. A demanda média de energia relacionada à carga de DBO é de 2.27 kWh/kg de DBO. No balanço geral, a produção de energia específica produzida e consumida no tratamento de esgoto, em média, é de 1,2 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup> de biogás produzido e 0.1 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup> consumido. ETE tem eficiência média de energia de 25,2%, entretanto, algumas estações chegam à eficiência maior que 65%.

Conforme Bodík e Kubaská (2013), o consumo específico de energia em ETE normalmente diminui com tratamento de cargas cada vez maiores. Na Eslováquia existem treze estações municipais de pequeno porte que operam com 40% da capacidade, ou seja, com fluxo diário real abaixo de 5000 m<sup>3</sup>/dia. Nestas, há demanda relativamente alta de energia específica, média de 0.768 kWh/m<sup>3</sup> (varia entre 0.264 a 1.422 kWh/m<sup>3</sup>) esse fator tem encarecido o tratamento, considerando o custo de 0,110 €/ kWh de energia elétrica naquele país, em 2011. Além da baixa carga para tratamento em relação à projetada, os autores salientam que a demanda alta de energia em ETE pode também estar vinculada a idade da planta entre 15 a 25 anos.

Bodík e Kubaská (2013) comentam que a produção de energia a partir do tratamento do lodo de esgoto começou recentemente na Eslováquia e está prosperando, no entanto, a digestão anaeróbia utiliza apenas cerca de 20% do índice de energia do lodo. Para os autores, subprodutos do tratamento de esgoto combinado com resíduo sólido orgânico pode ser fonte valiosa de energia se gerenciado e efetivamente utilizado. Cerca de 1/3 da energia química do biogás pode

ser transformada em energia mecânica e a energia residual (calor) pode ser reciclada e utilizada para aquecimento.

No Egito, a digestão anaeróbia começou recentemente e tem sido uma opção promissora para estabilizar o lodo de esgoto ao menor custo e impactos ambientais. As 303 ETEs existentes no país tratam  $11.85 \times 10^6 \text{ m}^3$  /dia de lodo produzindo cerca de  $2.4 \times 10^3 \text{ t}$ /dia de sólido seco à taxa de produção de  $0.225 \text{ kg/m}^3$  de lodo tratado. A geração diária de lodo seco corresponde a  $60 \text{ g/ capita}$ . O processo de digestão anaeróbia é geralmente usado nas ETEs com fluxo de esgoto menor que  $4000 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

Experiências com digestão anaeróbica têm sido realizadas em ETE com fluxo de esgoto variando entre  $4000 \text{ m}^3/\text{dia}$  até mais de  $757.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ . Porém, os fluxos médios superiores a  $8000 \text{ m}^3/\text{dia}$ , conforme estimativa de Ghazi et al. (2011), são rentáveis no Egito, uma vez que a energia elétrica consumida no tratamento do lodo corresponde a  $3565 \text{ kWh/t}$  de sólidos secos digeridos enquanto a energia elétrica produzida é estimada em  $1694 \text{ kWh/t}$ . Contudo, WEF (1992) reporta que a produção de eletricidade a partir da recuperação do gás digestado torna-se mais rentável em ETEs com fluxos diários superiores a  $38.000 \text{ m}^3$ .

Conforme Turovskiy e Mathai (2006), uma ETE requer  $0.3 \text{ kWh}_e/\text{m}^3$  para tratar esgoto. Considerando que substância orgânica contida no lodo tem poder calorífico correspondente a  $0.7 \text{ kWh}/\text{m}^3$  e se essa energia for recuperada, ETE com eficiência pode economizar energia. Com este sistema, pode-se recuperar cerca de  $0,1 \text{ kWh}_e /\text{m}^3$  de água residuária (igual a cerca de  $7 \text{ kWh}/\text{m}^3$  de lodo produzido com 1% de concentração).

Em Gotemburgo, segunda maior cidade da Suécia, uma ETE trata o esgoto de 590 mil habitantes, onde produz anualmente 16 mil toneladas de lodo em matéria seca, operado por processo de pre-precipitação com sulfato ferroso, lodo ativado e remoção de nitrogênio. O lodo proveniente dos tratamentos biológico e químico resulta em biogás que é usado para produzir eletricidade e aquecimento para residência e o lodo digerido seco é armazenado e usado para recuperação do solo urbano ou melhoria da terra (Petersen, 2001).

Tradicionalmente, os 27 estados-membros da união europeia aproveitam na agricultura cerca de 4 milhões de toneladas de lodo seco do total de 10 milhões de toneladas geradas

anualmente (Milieu et al., 2008). Países como França, Dinamarca, Espanha e Reino Unido aplicam acima de 50% do lodo na agricultura (Tchobanoglous e Kreith, 2002).

### **No âmbito nacional**

Tratamento biológico do lodo de 1 milhão de habitantes na ETE Arruda em MG, conforme Copasa (2013), resultou na produção média de 12.430 Nm<sup>3</sup>/dia de biogás e o consumo de 13,0 GWh/ano de energia elétrica em 2012. No mês de janeiro de 2013, a média de energia gerada com biogás composto por 68% de metano foi 19,9 MWh e a consumida foi 37,4 MWh. O percentual de autoprodução de energia elétrica na ETE Arruda representa 52% e consumo específico de biogás é de 1.75 kWh/Nm<sup>3</sup>.

Na Região Metropolitana de São Paulo, em 2007, as cinco maiores ETEs com vazão média tratada de 12.810 l/s de esgoto geraram 485 t/dia de lodo que foram encaminhados ao aterro sanitário. O lodo é tratado no sistema ativado convencional em nível secundário, com grau de eficiência de cerca de 90% de remoção de carga orgânica (SABESP, 2007). Conforme Tsutya (2000), a produção de lodo de esgoto em base seca naquela região deve alcançar 785 toneladas diárias em 2015. Oliveira (2000) estima a produção de lodo no Brasil entre 150 a 220 mil t/ano de matéria seca. Segundo Pegorini et. al., (2003), no estado do Paraná a produção de lodo em 4 anos aumentou de 2000 m<sup>3</sup>/mês em 1999 para 4000 m<sup>3</sup>/mês, em 2003, sendo que apenas a cidade de Curitiba gerou 9,6 t/ano de matéria seca.

ETE de Barueri, na região do ABC, aproveita o biogás do lodo de esgoto para geração de energia elétrica por meio de motores e microturbina para suprir parte da energia elétrica consumida na ETE (SABESP, 2007).

Lodo de ETE apresenta constituinte e características físicas semelhantes às matérias primas utilizadas nas peças cerâmicas. Pode também ser utilizado na produção de substrato para plantas, incorporado em matriz de concreto, fabricação de agregados leves como matéria prima para a indústria de cimento, como agente de recuperação de área degradada e como material de cobertura de célula de aterro sanitário (PROSAB, 2006).

Em resumo, a digestão anaeróbica opera em temperatura relativamente baixa e sem necessidade de desidratação/espessamento e evaporação completa da água do lodo. Por isso, tem

sido um método considerado promissor para o tratamento secundário do lodo sob o aspecto ambiental e energético.

### **3.8 Incineração**

Incineração é a combustão dos elementos combustíveis do lodo que, uma vez desidratado, inflama a temperatura entre 420 a 500 °C na presença de oxigênio. Temperaturas acima de 850 °C e tempo de residência de gás maior que 2 segundos são requisitos necessários para a completa combustão do sólido orgânico. Na incineração do lodo, o sólido orgânico é convertido principalmente em dióxido de carbono, vapor de água e cinzas. O objetivo do processamento térmico do lodo é a utilização do seu conteúdo de energia e minimização dos impactos ambientais (Reddy, 2011; IPCC, 2007; EC, 2006; Turovskiy e Mathai, 2006).

A temperatura alcançada durante a incineração depende do conteúdo de energia, da quantidade de lodo a ser incinerado e a quantidade de oxigênio. O calor liberado depende do tipo e dos elementos combustíveis contidos no lodo primário (e nos combustíveis auxiliares disponíveis) são carbono, hidrogênio e enxofre. Carbono queimado se converte em CO<sub>2</sub> com poder calorífico de 34 MJ/kg, o do hidrogênio corresponde a 144 MJ/kg e o do enxofre, 10 MJ/kg. Assim, quaisquer alterações no teor do carbono, hidrogênio e enxofre aumenta ou diminui seu poder calorífico (EC, 2006; Turovskiy e Mathai, 2006).

Para ser economicamente viável, incineração deve ser autotérmica, ou seja, a água deve ser removida mecanicamente para que a queima do lodo aconteça sem necessidade de combustível auxiliar. Torta de lodo com 30 a 50% de sólido cerca de 50 a 70% de umidade pode ser queimada sem combustível auxiliar. Torta de lodo com 20 a 30% de sólido, com cerca de 70 a 80% de umidade pode exigir combustível auxiliar para combustão (Turovskiy e Mathai, 2006; EC, 2006).

Valores caloríficos do lodo para incineração autotérmica estão entre 3,5 MJ/kg e 6,5 MJ/kg. Valores entre 2,2 MJ/kg e 4,8 MJ/kg de lodo são encontrados onde o esgoto é tratado. A necessidade de combustível adicional pode ser reduzida com sistemas eficientes de recuperação de energia interna, ou seja, recupera o calor contido nos gases de combustão para aquecer o ar na incineração e/ou uso do calor para prover a secagem de lodo (EC, 2006).

Lodo combinado com outros materiais combustíveis de baixa concentração de água e valor calorífico maior pode sustentar a incineração com pouco ou nenhum combustível auxiliar. Material comum para co-combustão são: carvão, RSU, madeira e resíduo de agricultura. Para queimar lodo junto com RSU existem duas tecnologias básicas: uso da tecnologia de combustão do RSU com adição do lodo desidratado ou seco e uso da tecnologia de combustão do lodo pela adição do RSU processado como combustível suplementar no forno com lodo (Reddy, 2011, EC, 2006).

Se o lodo tem alto conteúdo de umidade, o processo de secagem consome a maior parte da energia liberada. Problemas relacionados ao processo térmico incluem: excesso de energia para alcançar altas temperaturas; custo alto e necessidade de equipamentos de controle de poluição (Tabela 3.5) (Karagiannidis, 2012, EC, 2006; Spellman, 2003).

Tabela 3.5 Poder calorífico do lodo e outros tipos de resíduo

Tipo de lodo	Poder calorífico (MJ/kg)
Lodo bruto	23 - 29
Lodo bruto primário quimicamente precipitado	14-18
Lodo primário	20-28
Lodo primário anaerobicamente digestado	9-13
Lodo ativado	16-22
Lodo digestado	10-15
Lodo do filtro biológico	16-23
Graxa e escória	39

Fonte: Turovskiy e Mathai (2006).

Incineração tem sido a opção de tratamento de lodo de esgoto mais utilizado em países europeus, Japão e Estados Unidos. A maioria dos Estados-Membros incinera uma porcentagem do lodo e a cinza residual, normalmente é disposta em aterro sanitário em conformidade com as exigências do órgão ambiental para tratamento de gases de escape produzidos e dos efluentes líquidos. A Bélgica incinera mais de 70% do lodo, Holanda incinera cerca de 60% e Áustria, Dinamarca e Alemanha incineram cerca de 40% do lodo, enquanto a Eslovênia seca cerca de 50% do lodo e o exporta para incineração (ISWA, 2012; EC, 2006).

Incineradores de lodo do tipo leito fluidizado (Figura 3.18) operam em temperaturas perto de 820 °C sem interferência no desempenho da incineração ou aumento das emissões. Este tipo de incinerador tem sido sucessivamente desenvolvido para incineração de lodo de esgoto por ser uma tecnologia simples, de baixo custo de capital e baixo custo de manutenção (Reddy, 2011; WEF, 2009; EC, 2006; Turovskiy e Mathai, 2006).

Geralmente, o reator é um recipiente de aço vertical, com forro refratário contendo no leito material granular, como areia de sílica, calcário, alumina ou material cerâmico que se concentram sobre uma grelha por onde passa o ar injetado por difusores localizados abaixo da grelha. O ar que entra no leito se expande por 80 a 100% tornando-o fluidizado. Resíduo pode ser injetado no leito pneumaticamente, mecanicamente ou por gravidade. A ação do movimento constante no leito fluidizado provoca a mistura rápida e uniforme de ambos, resíduo e material do leito, resultando na combustão e altas taxas de transferência de calor. Além disso, o movimento no leito e sua capacidade de armazenamento térmico aumentam a queima do resíduo e minimiza a geração de cinza de fundo que é transportada para fora do leito pelo movimento do ar no forno. Este sistema geralmente exige dispositivos adicionais de remoção de partículas do fluxo de gás à frente da caldeira e sistemas de controle de poluição do ar. O material do leito é capaz de absorver grandes quantidades de calor gerado durante o processo de combustão (Chandler et al., 1997).

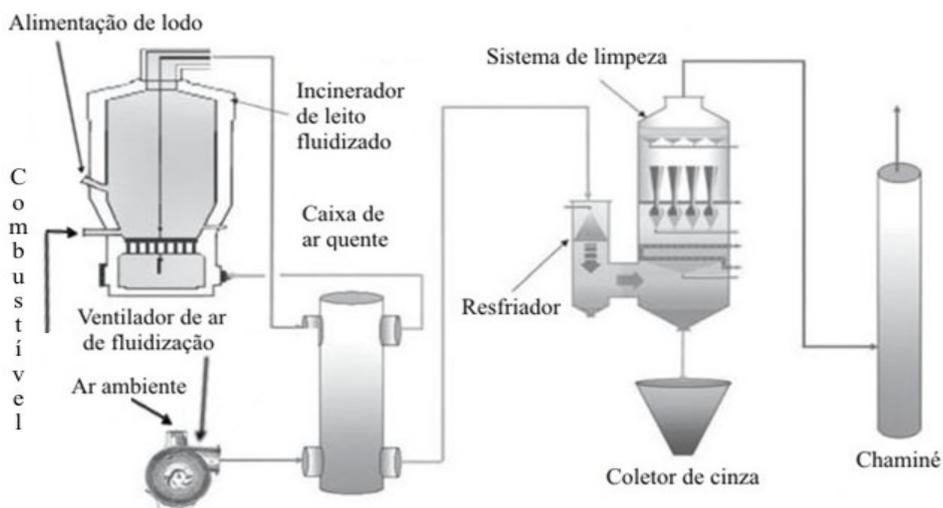


Figura 3.18 Esquema de incinerador tipo leito fluidizado.

Fonte: WEF (2009).

Sistema de leito fluidizado pode exigir queimadores auxiliares localizados acima ou abaixo do leito para manter a temperatura, no entanto, estão disponíveis outras opções para maximizar a eficiência térmica. O reator pode ser operado como uma caixa de vento frio em que o ar fluidizado é injetado diretamente no reator ou como uma caixa de vento quente em que o ar é pré-aquecido no recuperador ou trocador de calor antes da injeção, dependendo da natureza do resíduo e a necessidade de calor adicional. Os parâmetros de concepção do processo são determinados experimentalmente para cada caso específico (Chandler et al., 1997). Tabela 3.6 mostra os parâmetros operacionais de um incinerador do tipo leito fluidizado.

Tabela 3.6 Parâmetros de funcionamento de incinerador tipo leito fluidizado

Parâmetro	Variação
Temperatura	
Câmara de combustão (°C)	500–600
Secagem de lodo (°C)	300–900
Gás na área de combustão (°C)	800–1100
Gases expelidos (°C)	120–250
Tempo do processo (min)	10–15
Capacidade de evaporação da umidade (kg/h por unidade de volume)	80–140
Consumo específico por quilograma de ar úmido evaporado (kg)	10–25
Calor (J)	3770–5870
Velocidade do carregador de calor na entrada do incinerador (m/s)	15–25

Fonte: (Reddy, 2011; EC, 2006; IPCC, 2006; Turovskiy e Mathai, 2006 ).

Aquecimento a temperaturas muito altas requer grande quantidade de energia; por isso a secagem térmica precisa de um dispositivo de recuperação de energia (Turovskiy e Mathai, 2006).

As principais vantagens de secadores de leito fluidizado são: capacidade de controlar o tempo de secagem do lodo, intensidade da transferência de calor e simplicidade do projeto. A desvantagem é o alto teor de poeiras dos gases de escape, aproximadamente de 0,6 a 0,7 g/m<sup>3</sup> (Turovskiy e Mathai, 2006). Tabela 3.7 mostra a comparação entre métodos diferentes de tratamento térmico.

Enfim, incinerador tipo leito fluidizado tem sido usado principalmente para queima de lodo gerado por usinas de tratamento de esgoto municipal. Este sistema de combustão começou recentemente a ser aplicado na incineração de resíduos perigosos e tem sido extensamente usado

no Japão. As plantas japonesas são tipicamente de escala média, processando entre 50 a 150 toneladas por dia (Reddy, 2011).

Tabela 3.7 Comparação dos métodos de tratamento do lodo secundário

Parâmetro de comparação	Incineração	Pirólise	Gaseificação
Exige pré-aquecimento /Secagem	Não	25% sólido~ 150 °C	Não
Temperatura de operação (°C)	850-900	400-800	800 - 1400
Pressão de funcionamento	ambiente	ambiente ou pouco >	ambiente
Ambiente operacional	ar	Sem oxigênio	Ar ou oxigênio
Produtos da energia primária	vapor	óleo, gás e carvão	singás

Fonte: Kumar (2012)

Esse método de tratamento térmico que utiliza areia e calcário ajuda a distribuir o calor durante a queima. O calcário ajuda a neutralizar os ácidos; combinando eficiência de combustão com menores emissões quando comparado a outros tipos de incineradores. Trata-se de tecnologia de pequeno porte que exige pré-processamento de resíduo e, por isso, é considerada por Reddy (2011); EC (2006) e Chandler et al. (1997) apropriada para pequenas comunidades. Em geral, incineração de lodo de esgoto tem suas vantagens e desvantagens assim como outros processos térmicos e são resumidos na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 Vantagens e desvantagens dos métodos de tratamento

Método de tratamento	Vantagem	Desvantagem
Incineração	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduz o volume do lodo em cerca de 90%</li> <li>- Eliminação completa dos materiais orgânicos</li> <li>- Possibilidade de utilização da cinza obtida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibilidade do processo ser deficiente de energia</li> <li>- Poluição atmosférica com emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub></li> <li>- Necessidade de secagem / espessamento do lodo</li> <li>- Emissão de compostos clorados</li> <li>- Alto custo dos sistemas de limpeza de gases de combustão</li> </ul>
Pirólise	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é processo de combustão</li> <li>- Produz uma mistura de combustível líquido e gasoso e resíduo sólido inerte</li> <li>- Reduz o volume em mais de 90% e produz <i>char</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de desidratação / espessamento do lodo</li> </ul>
Gaseificação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior eficiência de recuperação de energia</li> <li>- Redução das emissões ambiental</li> <li>- Capacidade de lidar com a maioria dos compostos inorgânicos do lodo</li> <li>- Produção de resíduo sólido inerte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de desidratação e secagem do lodo</li> <li>- Tecnologia complexa</li> </ul>
Digestão anaeróbia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta eficiência de recuperação de energia</li> <li>- Baixa temperatura de funcionamento</li> <li>- Sem necessidade de desidratação/secagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processo lento, tempo longo de permanência;</li> <li>- Não permite novas cargas durante a digestão;</li> <li>- Excessiva formação de espuma</li> </ul>

Fonte: Kumar (2010; Turovskiy e Mathai, 2006; Chandler et al., 1997).

### 3.9 Custo do tratamento de resíduo

Incineração do lodo é uma prática comum na Europa e Japão podendo ser incinerado misturado com RSU ou separadamente nas condições digerido, desaguado ou seco. Na Europa central, a incineração da mistura lodo/RSU na planta de incineração em massa é uma técnica conhecida e praticada (ISWA, 2011).

Incineração do lodo, como citado na revisão bibliográfica, é comum em sistema tipo leito fluidizado e necessita combustível auxiliar para iniciar e manter a incineração. Conforme Hogg (2001), na Alemanha e Dinamarca, essa tecnologia tem sido adaptada para queimar a mistura de lodo/RSU.

O custo de investimento de uma planta de incineração em massa para RSU varia entre € 60 - 100 milhões e de uma planta de incineração do tipo leito fluidizado está na faixa de € 20-40 milhões (Hogg, 2001).

Conforme EC (2006), os custos operacionais em plantas de incineração de RSU na Alemanha dependem da sua capacidade e da sofisticação do equipamento de controle e sistemas de monitoramento das emissões.

Conforme WRAP (2012) o custo de incineração por tonelada de RSU varia entre € 84-175 enquanto o custo de aterramento é de € 50 (Hogg, 2001). O custo da incineração na Bélgica varia entre € 82,57 e € 86,88 por tonelada de RSU (Hogg, 2001). Nesse custo total está embutido, custo de capital / t de RSU de € 37, custo de operação / t de RSU de € 40 e taxas € 9,8. O custo operacional de uma planta de incineração em massa varia em função da sua capacidade, quanto maior a capacidade da planta menor o custo operacional.

Tabela 3.9 mostra a variação da demanda de energia com a capacidade da planta de incineração. Como pode ser observado, o aumento da capacidade reduz a demanda de energia da planta.

Tabela 3.9 Variação de consumo de energia com capacidade da planta de incineração

Capacidade da planta de incineração (RSU t / ano)	Demanda de energia no processo de incineração (kWh / t de RSU)
Abaixo de 150.000	300-700
150.000-250.000	150-500
Acima de 250.000	60-200

Fonte: EC (2006).

### 3.10 Investigações acadêmicas

Até cerca de duas décadas, o esgoto era tema de pesquisa acadêmica restrita às engenharias civil e química. Entretanto, após a publicação do primeiro relatório do IPCC, em 1987, alertando sobre o aquecimento global devido às emissões dos gases de efeito estufa oriundos, inclusive, das atividades antropogênicas, essa realidade mudou. A população mundial aumentou e as demandas também, consequentemente os problemas urbanos vêm se agravando e temas como energia e saneamento básico deixaram de ser específicos e entraram no âmbito da multidisciplinariedade e são intensamente estudados.

O objetivo da interação das áreas acadêmicas é a busca por mecanismos que promovam a sustentabilidade ambiental, energética e econômica. Nesse contexto, vários estudos sobre ED e seu conteúdo energético despertaram interesse, inclusive das universidades brasileiras, embora ainda falta muito por fazer, tendo em vista a escassez de dados técnicos e operacionais necessários à elaboração de projetos para implantação. Dentre os trabalhos de pesquisa desenvolvidos sobre tratamento de ED no país cita-se Silva (2005) que estudou propostas para subsidiar o planejamento da ampliação da coleta, tratamento e destino final de esgoto no município de Belém para área de maior densidade populacional e baixo índice de atendimento em esgotamento sanitário. Concluiu que são necessárias ações voltadas à expansão de infraestrutura, o que deve ocorrer de forma sustentável, eficiente, integrada e planejada.

Lima (2005) estudou sobre fatores de interferência e forma de cobrança pela utilização dos serviços de esgotamento sanitário. Para representar os fatores foram adotados parâmetros urbanístico, técnicos e ambientais. As áreas selecionadas para estudo foram as bacias hidrográficas do Reduto e do Una, localizadas no município de Belém, onde parte da população residente é atendida por serviço de infraestrutura de esgoto sanitário.

Vinagre (2006) em seu estudo verificou as relações entre mortalidade na infância, população urbana, provisão de serviços urbanos de abastecimento de água, esgotamento sanitário e coleta de RSU. Foram verificadas as relações explicativas entre a variável dependente constituída pelo produto mortalidade na infância x população urbana e as variáveis independentes populações urbanas atendidas com abastecimento de água, rede de esgoto e coleta de resíduo. O trabalho conclui que critério de priorização no planejamento e alocação de recursos para ampliação da provisão de serviços urbanos de saneamento básico tem de considerar a mortalidade na infância.

Costa (2006) realizou uma investigação sobre o uso de biogás para produção de energia elétrica. A pesquisa teve como objetivo avaliação do potencial de geração de energia elétrica por meio do uso do biogás derivado do tratamento de esgoto da ETE da SABESP, em Barueri / SP. O projeto teve como objetivo a instalação, operação e a realização de estudos comparativos de desempenhos entre as duas tecnologias (microturbina e motor) para uma mesma faixa de potência de 30 kW.

Mocelin (2007) investigou a possibilidade da produção de adsorventes e óleos combustíveis a partir da pirólise do lodo de ED, conferindo a este resíduo uma destinação adequada e a obtenção de produtos de grande valor econômico. Foram produzidos até 17% de óleos combustíveis, com 4,5 % de hidrocarbonetos e poder calorífico de 34,54 kJ/g e também 60 - 80% de sólidos com características adsorventes. Tais resultados mostram as potencialidades do emprego do lodo de ED na produção de óleo combustível e de adsorventes de baixo custo.

Faedo (2010) realizou um estudo que avalia os serviços de saneamento básico, sendo que coleta e tratamento de ED são os menos presentes nos municípios brasileiros. Mostrou que o desenvolvimento de tecnologias para o tratamento de efluentes domésticos vem principalmente da necessidade de manter os padrões de qualidade dos corpos receptores e mananciais de abastecimento, preservando o ecossistema aquático. O objetivo foi exemplificar os processos de tratamento de esgoto doméstico convencionais e os alternativos, ou seja, os que priorizam simplicidade e sustentabilidade.

O objetivo do estudo realizado por Zilotti (2012) foi avaliar o potencial de produção de biogás em um reator anaeróbio de leito fluidizado para a geração de energia elétrica. Tal reator encontra-se na Estação de Tratamento de Esgoto Norte (ETE Rio das Antas) da Companhia de

Saneamento do Paraná (SANEPAR), localizada na cidade de Cascavel. Os principais resultados encontrados permitiram concluir que o biogás produzido apresentou concentração média de gás metano de 74,8%, com volume de produção diária de biogás de 624 m<sup>3</sup> e potencial de disponibilidade de energia elétrica para atendimento a ETE de 35.459 kWh/mês.

A partir dessa revisão bibliográfica, conclui-se que as questões inerentes à geração, coleta, tratamento e destinação final de esgoto são abrangentes e requerem soluções locais. A incineração e a digestão anaeróbica completa do lodo de esgoto são formas de tratamento usadas em países desenvolvidos e propostos, neste trabalho, para os municípios brasileiros, cuja população sofre diretamente os efeitos do tratamento inadequado do esgoto. Ambas as opções oferecem vantagens e desvantagens, no entanto, conforme Reddy (2011) e Tchobanoglous and Kreith (2002) a escolha deve ser feita conforme as conveniências para cada caso.



## **4 INFORMAÇÃO SOBRE OS MUNICÍPIOS INVESTIGADOS**

### **4.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentados o panorama de saneamento básico no Brasil e nos seis municípios selecionados para estudo. Os três primeiros municípios que são Belém (PA), São Luís (MA) e Campinas (SP) têm população acima de um milhão de habitantes e os outros três que são Mogi Guaçu (SP), Moji Mirim (SP) e Itapira (SP), juntos têm população total de 276.133 habitantes.

### **4.2 Saneamento básico no Brasil**

Brasil é o quinto país mais populoso do mundo. Em 2011, registrou população de 192.379.287 habitantes e de 198,4 milhões, em 2012, com concentração urbana de 84,9% da população (IBGE, 2012). Resíduo sólido urbano (RSU) coletado, em 2008, totalizou 259.547 mil t/dia, sendo que 33 % foi disposto em 2906 lixões e em 1310 aterros controlados, correspondendo a 86,5 mil t/dia de resíduo tratado inadequadamente. Cerca de 64,5% foi disposto em 1254 aterros sanitários, 3122 t/dia foram coletadas seletivamente e encaminhadas para reciclagem e 1635 t/dia encaminhada para compostagem. A cobertura da coleta no país abrange 97,8% da população urbana. Em 3195 municípios, a frequência da coleta é diária; em 962 municípios ocorre três vezes/semana; em 498 municípios ocorre 2 vezes/semana e, em 478 municípios, a coleta nos domicílios é realizada 1 vez/semana. O custo do manejo de RSU às prefeituras corresponde a R\$ 11,8 bilhões (MCidades, 2013b; IBGE, 2010).

Programa de coleta seletiva no país foi implantado, em 1980, com adesão de 994 dos 5565 municípios, em 2008. A coleta seletiva de materiais recicláveis (papel e papelão, plástico, vidro e metal) corresponde a 1,2% da massa total de RSU coletado diariamente (IBGE, 2010).

Quanto ao esgoto doméstico (ED), o volume coletado, em 2011, foi 12.948.625 m<sup>3</sup>/dia e o volume que recebeu algum tipo de tratamento foi 8.788.896 m<sup>3</sup>/dia (MCidades, 2013a). Rede coletora de esgoto existe em 1961 municípios e o índice de população com coleta de esgoto no país, em 2011, corresponde a 55,5%. Quatro municípios não têm nenhum tipo de tratamento para

o esgoto gerado pela população que são: Ananindeua (PA), São João do Meriti (RJ), Porto Velho (RO), Santarém (PA) e Governador Valadares (MG) (MCidades, 2013a; ANA, 2012).

Rede de distribuição de água no país, conforme MCidades (2013a), abrange 4.975 municípios, com atendimento de 82,4% da população total ou 93% da população urbana. O volume de água consumido, em 2011, correspondeu a 25.632.268 m<sup>3</sup>/dia, ou 162,6 l/hab./dia. Nesse mesmo ano, a média de perda no sistema de distribuição correspondeu a 38,8 l/hab./dia. O custo médio da água de abastecimento ao consumidor foi de R\$ 2.30/m<sup>3</sup>.

Com relação à emissão de metano proveniente do tratamento inadequado do resíduo sólido, em 2010, totalizou em 2.096,1 Gg. O esgoto contribuiu com emissão de 705,5 Gg (IBGE, 2011).

Na seqüência, são apresentadas as justificativas para escolha dos municípios estudados e seus perfis.

#### **4.3 Justificativas para escolhas dos municípios estudados**

Belém (PA) foi selecionado para estudo por apresentar um dos piores índices de coleta e tratamento de esgoto do país (menos de 2%), conforme o censo 2010 (IBGE, 2013 e MCidades, 2013a).

São Luís (MA) foi selecionado para estudo, por estar entre os municípios brasileiros que trata menos de 10% do esgoto (IBGE, 2013). Além disso, a área litorânea apresenta escoamento do esgoto doméstico em valetas, em direção às praias, como mostrado na Figura 3.13, que são o bem público disponível, com alta frequência populacional, portanto, locais de risco de doenças como salienta WHO/UNICEF (2013).

Campinas foi incluída no estudo por estar relacionado a diversas pesquisas de Lino (2009); Lino et al. (2010); Lino e Ismail (2011; 2012; 2013).

Mogi Guaçu, Moji Mirim e Itapira foram selecionados para estudo, pelo fato do segundo município não ter aterro e dispor o RSU no município de São Pedro, distante a 147 km. O objetivo do estudo é, sobretudo, demonstrar a possibilidade da utilização da mesma instalação e equipamentos para tratamento em comum do RSU e do ED entre municípios pequenos visando à redução de despesas.

#### 4.4 Perfil do município de Belém (PA)

Belém é a capital do Pará, localizada na região Norte do país (Figura 4.1), incluída entre os 13 maiores municípios brasileiros com população urbana, em 2010, de 1.393,399 habitantes. O Município tem 425.263 domicílios e densidade demográfica de 1.315,26 hab./km<sup>2</sup>. Fundada em 1616, o município de Belém ocupa área de 1.059.406 km<sup>2</sup>, apresenta Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM-2010) correspondente a 0.746 (IBGE, 2013; MCidades, 2013b).



Figura 4.1 Localização das duas capitais brasileiras e do município de Campinas.

Dados do censo 2010, divulgados pelo IBGE (2013), mostram que Belém tem 53,4% dos domicílios com saneamento adequado<sup>5</sup>. O município coleta 388.643 t/ano de RSU em 97% da área urbana com frequência diária de coleta para 44% da população e 56% tem coleta 2 a 3 vezes por semana. A mesma fonte registra acúmulo de RSU nas ruas de 35.471 domicílios abrangendo 142.606 pessoas. O custo total do manejo de RSU é de R\$ 77,31/tonelada. O município tem coleta seletiva realizada por catadores com apoio da prefeitura onde foram recolhidos, em 2011, cerca de 600 toneladas de recicláveis. O restante do RSU coletado tem como destino final o Aterro Controlado do Aurá (MCidades, 2013b; IBGE, 2013) onde catadores informais trabalham coletando recicláveis para se auto sustentar, como mostra Figura 4.2.

<sup>5</sup> Conforme Ministério das Cidades, saneamento adequado significa existência de coleta de resíduo, rede de abastecimento de água e coleta de esgoto (MCidades, 2013b).



Figura 4.2 Aterro Aurá no município de Belém (PA).

Fonte: O Liberal *apud* Militância Viva (2012)<sup>6</sup>.

Dados divulgados pelo censo 2010 mostram que o estado do Pará trata 1,5% do esgoto. Em Belém, a rede de esgoto é disponível para 6,4% da população urbana ou 8,1% dos domicílios e o tratamento corresponde a 1,6% do esgoto gerado ou 27,2% do coletado. Escoamento de esgoto na rua a céu aberto abrange 154.533 domicílios onde vivem 466.435 pessoas (IBGE, 2013; MCidades, 2013a). Figuras 4.3a e 4.3b mostram crianças, adultos e animais expostos ao esgoto a céu aberto.

O volume de água tratada e distribuída corresponde a 455.255 m<sup>3</sup>/ dia para abastecer 82% da população sendo que 4.800 m<sup>3</sup> de água são distribuídos sem tratamento (IBGE, 2010). A média de consumo de água em Belém, em 2011, foi de 140l/hab./dia (MCidades, 2013a). Conforme o Atlas de Saneamento (IBGE, 2011), o município está incluído entre os 10 que apresentam as maiores taxas de internação sobre o total das hospitalizações por diarreia. Esta doença, que afeta principalmente crianças na idade até cinco anos, tem custo maior em relação ao gasto total da hospitalização para todas as endemias.

Na análise de WHO/UNICEF (2013) existe uma clara associação entre saneamento básico precário, pobreza e índices de internação por diarreia. Municípios com maiores percentuais de esgotamento inadequado têm as maiores taxas de hospitalização por essa doença específica,

---

<sup>6</sup> Extraída do site: <http://militanciaviva.blogspot.com.br/2012/05/para-deixa-12toneladas-de-lixona-rua.html>

que atinge regiões pobres e periferias de grandes cidades. Município com melhor índice de esgoto coletado tem taxa quatro vezes menor que os com pior índice de coleta e tratamento de esgoto.



Figuras 4.3 (a) e (b) Esgoto no município de Belém: contato de pessoas e animais.  
Fonte: (a) Saneamento básico (2013)<sup>7</sup>; (b) Menegon (2011)<sup>8</sup>.

Com base nos dados apresentados, pode-se concluir que o saneamento básico no município de Belém é precário e está longe de oferecer boa qualidade de vida à sua população. Dentre as necessidades básicas não atendidas, iluminação pública ainda falta em 15.571 domicílios, conforme o Censo 2010 (IBGE, 2013).

#### 4.5 Perfil do município de São Luís (MA)

São Luís é a capital do Maranhão, fundada em 1612, está localizada na região Nordeste do país, como mostrado na Figura 4.1. Trata-se da principal cidade da região metropolitana que ocupa área territorial de 834,79 km<sup>2</sup> e tem população registrada, em 2013, de 1.053.922 habitantes, dos quais, 970.416 vivem no espaço urbano. A densidade demográfica nesse município é de 1.215,7 hab./km<sup>2</sup> e o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), em 2010, correspondeu a 0,768 (IBGE, 2013).

Dados do Censo 2010 e do Ministério das Cidades mostram que em todo estado do Maranhão, o índice de atendimento urbano com rede coletora de esgoto corresponde a 9,6%. Em

<sup>7</sup> Figura obtida na internet no site: <http://www.saneamentobasico.com.br/portal/index.php/geral/o-brasil-medieval-um-retrato-atual-do-tratamento-de-agua-e-esgoto-no-brasil/>

<sup>8</sup> Figura obtida na internet no site: <http://www.crismenegon.com.br/portal/meio-ambiente.html?start=516>

São Luís, menos da metade ou 48,2% da população urbana é atendida com rede de esgoto ou 127.408 domicílios. Do total de esgoto coletado, cerca de 12,9% é tratado o que representa 8% do total gerado no município. Escoamento de esgoto a céu aberto abrange cerca de 66 mil domicílios ou cerca de 290 mil pessoas (Figura 4.4), além disso, cerca de 3.894 domicílios ou 12.729 pessoas não dispõem de banheiro (IBGE, 2013); MCidades (2013a).



Figura 4.4 Esgoto a céu aberto em rua de São Luís (MA).

Fonte: Ferreira (2013)<sup>9</sup>.

Com relação ao abastecimento de água, dados fornecidos pelo MCidades (2013a) mostram atendimento a 89,9% da população urbana em São Luís, porém, a água tratada atende 85% da população. Em 2011, o consumo médio de água foi de 196,5 l/hab./dia. O município apresenta taxa de 67% de perda na distribuição de água tratada, isso o classifica entre os quatro piores municípios do Brasil no controle de falhas na transmissão.

Sobre RSU, os dados do Ministério das Cidades mostram que 413.852 t/ano são coletadas referentes a 95,3% da população e encaminhadas ao aterro municipal da Ribeira (lixão) que opera desde 1995, como mostra a Figura 4.5. A coleta diária atende apenas 10% da população e 90% tem coleta 2 a 3 vezes por semana. A prefeitura paga R\$ 92,47 por tonelada de resíduo

---

<sup>9</sup> Jornal Pequeno disponível em: <http://jornalpequeno.com.br/2013/01/23/caema-ainda-nao-resolveu-problema-de-esgotos-estourados-em-sao-luis/>

sólido coletado sendo que o custo do manejo, em 2011, foi de R\$ 47.926,313. Mesmo assim, dados do censo 2010 mostra acúmulo de resíduo sólido nas ruas abrangendo 23.260 domicílios (MCidades, 2013b; IBGE, 2013).



Figura 4.5 Aterro municipal da Ribeira em São Luís (MA).

Fonte: Batista (2013)<sup>10</sup>.

Pelos dados do MCidades (2013a), o serviço de água e esgoto em São Luís arrecada anualmente R\$ 94 milhões e o investimento no setor, em 2011, correspondeu a R\$ 7,03 milhões que representa 8% do total arrecadado (MCidades, 2013a).

Os dados oficiais apresentados demonstram que São Luís e Belém são municípios que necessitam encontrar solução adequada para tratar o RSU e o ED como enfatiza WHO/UNICEF (2013). Além disso, iluminação pública é outro serviço essencial que ainda falta para a população de 4.776 domicílios ou 15.187 pessoas, conforme dado do Censo 2010 (IBGE, 2013).

---

<sup>10</sup> Figura obtida na internet no site: <http://geisabatista.blogspot.com.br/2013/04/aterro-da-ribeira-deve-ser-desativado.html>

#### 4.6 Perfil do município de Campinas (SP)

Campinas é o terceiro município do Estado de São Paulo, com população de 1.144.862 habitantes, em 2013, (Guarulhos tem 1,3 milhão e a capital têm 11,8 milhões) sendo que 98,6% estão concentrados na área urbana. Fundado, em 1774, o município está localizado a 99 km da capital e sua extensão territorial abrange 887 km<sup>2</sup>. O IDHM é 0,805. Desde 2000, o município foi transformado em sede administrativa da Região Metropolitana (RMC) (IBGE, 2013). Figura 4.6 mostra a localização do município no Estado.



Figura 4.6 Localização do município de Campinas.

Fonte: Adaptado de Seade (2006).

Conforme MCidades (2013b), foram coletados, em 2011, a quantidade de 308.506 toneladas de RSU proveniente de 98% da população urbana em Campinas. Desse total, 50% é atendida com coleta diária e 50% tem coleta 2 a 3 vezes por semana. O resíduo coletado é disposto no Aterro Sanitário Delta A. O manejo de RSU custa aos cofres públicos R\$ 100,38 por tonelada. O censo 2010 registra acúmulo de resíduo sólido nas ruas de 11.834 domicílios.

Com relação à coleta seletiva, o programa municipal foi implantado, em 1991 e, em 2011, o total de material reciclável reaproveitado correspondia a 1,2% da massa recolhida diariamente. O resíduo coletado seletivamente fora distribuído entre 13 cooperativas participantes do programa de coleta seletiva do município. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram o sistema de triagem de reciclável em uma das cooperativas e o aterro sanitário municipal.



Figura 4.7 Triagem de reciclável em cooperativa de Campinas.

Fonte: Agencia Anhanguera<sup>11</sup> (2012).



Figura 4.8 Vista aérea do aterro Delta A em Campinas.

Fonte: Granzotto (2012)<sup>12</sup>.

De acordo com Mcidades (2013a), o estado de São Paulo trata 48,1% do esgoto coletado. Em Campinas, a rede de esgoto atende 85% da população urbana, sendo que a coleta representa 73,4% do esgoto gerado com tratamento de 48,3%. O Censo 2010 registra escoamento de esgoto a céu aberto nas ruas abrangendo 16.737 domicílios ou 59.704 habitantes IBGE (2013). Figuras 4.9 e 4.10 mostram o esgoto não coletado em Campinas.

---

<sup>11</sup> Agência Anhanguera. Disponível em: [http://portal.rac.com.br/noticias/index\\_teste.php?tp=campinas-e-rmc&id=/126635&ano=/2012&mes=/04&dia=/26&titulo=/campinas-so-recicla-2-do-lixo-e-sufoca-aterro-delta](http://portal.rac.com.br/noticias/index_teste.php?tp=campinas-e-rmc&id=/126635&ano=/2012&mes=/04&dia=/26&titulo=/campinas-so-recicla-2-do-lixo-e-sufoca-aterro-delta)

<sup>12</sup> Divulgação/luiz granzotto. Disponível em <http://www.destakjornal.com.br/noticias/campinas/tratamento-de-lixo-e-o-segundo-pior-da-rmc-135204/>



Figuras 4.9 Destino do esgoto não coletado em Campinas.

Fonte: Portal CBN Campinas<sup>13</sup> (2013).

Com relação ao abastecimento de água em Campinas, a rede de distribuição atende 98% da população urbana ou 993.620 pessoas. Cada habitante consome, em média, 218,7 l/dia de água. O valor médio da tarifa praticada é R\$ 2,85/m<sup>3</sup>. Perda no sistema de distribuição está em torno de 19,9%. Arrecadação do município com água e esgoto, em 2011, foi de R\$ 518.780.063 (IBGE, 2013; MCidades, 2013b).

Os dados de RSU, ED e água obtidos pelo Censo 2010 e pelo Ministério das Cidades referentes à Campinas demonstram que nem todo o RSU gerado no município é coletado e tratado e menos da metade do Esgoto coletado é tratado. Além disso, conforme o Censo 2010, falta iluminação pública em 5.865 domicílios ou 19.154 pessoas.

Finalizada a apresentação do perfil dos três municípios de grande porte, são apresentadas, na sequência, o perfil dos três municípios de pequeno porte, cuja delimitação da área geográfica é mostrada na Figura 4.11.

---

<sup>13</sup> Portal CBN Campinas. Disponível em <http://www.portalcbnb Campinas.com.br/?p=56428>.

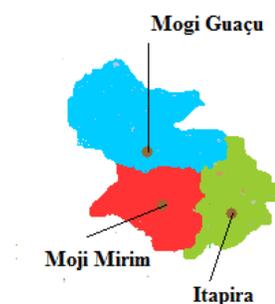


Figura 4.11 Área limítrofe dos municípios.

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.7 Perfil do município de Mogi Guaçu (SP)

Município de Mogi Guaçu, fundado em 1887, está localizado no interior do estado de São Paulo (SP), distante a 67 km de Campinas e a 166 km da capital paulista, onde ocupa área territorial de 812.163 km<sup>2</sup>. A população registrada, em 2013, totalizou-se em 144.963 habitantes, sendo que 95% vivem no espaço urbano. A densidade demográfica é de 168.99 hab./km<sup>2</sup> e o IDHM corresponde a 0,774 (IBGE, 2013).

Conforme MCidades (2013b), a coleta de RSU, em 2011, atendeu 100% da população urbana sendo que 10% da população têm coleta diária e 90% tem coleta 2 a 3 vezes por semana. Quantidade de RSU coletado em Mogi Guaçu correspondeu a 37.832 toneladas. Cada habitante gera, em média, 0,8 kg/dia. O censo 2010 registra acúmulo de resíduo nas ruas de 251 domicílios. O custo total da coleta, em 2011, foi de R\$ 6.518.850. O RSU coletado tem como destino o aterro sanitário municipal em operação desde 1982 (IBGE, 2013; MCidades, 2013b).

Com relação ao esgoto em Mogi Guaçu, dados do MCidades (2013a) mostra que 97% da população urbana é atendida por rede coletora. Tratamento representa 75% do esgoto coletado e 60% do esgoto gerado. O censo 2010 registra esgoto nas ruas em 157 domicílios onde residem 481 pessoas (IBGE, 2013).

O município supre com água tratada 100% da população, que consome, em média, 188,6 l/hab./dia conforme dados do MCidades (2013a). Perda de água tratada no sistema de distribuição corresponde a 43,5%. Arrecadação com água e esgoto, em 2011, foi de R\$ 29.596.348. Outro serviço essencial que falta é a iluminação pública para 105 domicílios ou

354 pessoas, conforme o Censo 2010, (IBGE, 2013).

#### **4.8 Perfil do município de Moji Mirim (SP)**

Município de Moji Mirim, fundado em 1650, está localizado no interior do estado de São Paulo, distante a 54 km de Campinas, onde ocupa área de 497.801 km<sup>2</sup>. A população, em 2013, estava contabilizada em 90.558 habitantes, sendo que 80.945 vivem no espaço urbano. A densidade demográfica do município é de 173,77 hab.km<sup>2</sup> e o IDHM corresponde a 0,784 (IBGE, 2013).

Dados do MCidades (2013b) e do IBGE (2013) mostram que a coleta de RSU, em 2011, atendeu 81.306 habitantes sendo que 20% da população tinha coleta diária e 80% era atendida pela coleta 2 a 3 vezes por semana. Quantidade de RSU coletado em Moji Mirim foi 20.902 t/ano. Abrangência da coleta corresponde a 99,6% da população urbana. O preço da coleta era de R\$ 75,00/tonelada que somado com o valor do transporte para destinação final totaliza R\$ 111,97. O RSU de Moji Mirim é transportado para disposição final no aterro do município de São Pedro (SP) a 147 km. No total, o custo da coleta e manejo de RSU correspondeu, em 2011, a R\$ 5.735.585/ano. Conforme censo 2010, resíduo sólido acumulado nas ruas abrange os domicílios de 79 pessoas. A coleta seletiva é realizada em parceria entre prefeitura e associação de catadores e coletou, em 2011, 50 t/ano.

Conforme MCidades (2013a), a população urbana tem 100% do esgoto coletado com tratamento de 4,8% ou 4,7% do gerado. Esgoto nas ruas abrange os domicílios de 224 pessoas (IBGE, 2013).

Rede de distribuição de água atende 100% da população urbana que consome, em média, 189,5 l/hab./dia. O índice de perda de água tratada no sistema de distribuição é de 45,5%. Arrecadação anual com água e esgoto, em 2011, foi R\$ 22.218.362 (IBGE, 2013; MCidades, 2013a). Em Moji Mirim, a falta de iluminação pública atinge 335 domicílios, totalizando 1.147 pessoas, conforme o Censo 2010.

#### **4.9 Perfil do município de Itapira (SP)**

Município de Itapira, fundado em 1847, está localizado no interior do estado de São Paulo, distante 67 km de Campinas e 166 km da capital paulista onde ocupa área territorial de

518.385 km<sup>2</sup>. A população, em 2011, foi contabilizada em 68.934 habitantes dos quais 63.944 vivem na área urbana. A densidade demográfica é de 132.21 hab./km<sup>2</sup> e o IDHM corresponde a 0,762 (IBGE, 2013).

Dados do MCidades (2013a) e do IBGE (2013) mostram que a coleta de RSU atende 98,3% da população e é realizada entre 2 a 3 vezes por semana. Quantidade coletada totalizou 16.675 toneladas/ano. Cada habitante em Itapira gera, em média, 0,7 kg/dia. Associação de catadores recolheu 260 toneladas/ano de material reciclável ou 1,6% da massa gerada no município. Todo resíduo sólido recolhido é disposto no aterro sanitário de Itapira em operação desde 1998. Acúmulo de resíduo nas ruas abrange 211 domicílios ou 690 pessoas. Em 2011, o custo unitário da coleta de RSU foi de R\$ 126,51/t e o custo do manejo totalizou em R\$ 2.109.600 (IBGE, 2013; MCidades, 2013a).

MCidades (2013b) informa que a rede coletora de esgoto atende 99,2% da população urbana, mas não fornece dados sobre o volume coletado e nem tratado. Segundo o IBGE (2013), em 2010, a rede geral de esgoto abrangia 61.322 habitantes. A mesma fonte informa que há presença de esgoto nas ruas de 47 domicílios ou 163 pessoas e que 13 domicílios não têm banheiro (IBGE, 2013).

Dados do MCidades (2013a) mostram que 99,2% da população urbana dispõe de rede de distribuição de água e o consumo por habitante corresponde a 186,6 l/dia. O índice de perda na distribuição de água tratada corresponde a 34,4% e a arrecadação anual com água e esgoto, em 2011, foi de R\$ 11.052.688 (IBGE, 2013).

Com relação à iluminação pública, IBGE (2013) informa que 155 domicílios ou 492 pessoas em Itapira estão desprovidas dessa necessidade básica.



## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **5.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentados os dados usados nos cálculos para obtenção dos resultados do estudo que foram extraídos da revisão bibliográfica bem como os esquemas dos processos de tratamento do RSU e do ED e suas respectivas equações. Importante salientar que os dados do Brasil e dos municípios são oficiais publicados pelo IBGE e pelo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) do Ministério das Cidades.

### **5.2 Materiais**

#### **5.2.1 Sistemas propostos para tratamento de RSU e de ED**

Tratamento para RSU e ED, neste trabalho, compreende reciclagem, aterramento, biodigestão e incineração com recuperação de energia. Em cada sistema, foi avaliado o potencial de energia disponível e a redução das emissões de gás de efeito estufa (GEE), bem como os ganhos, financeiro, energético e também as emissões evitadas na reciclagem. Nesta especificamente, foi adotado o índice de 10% de reaproveitamento do reciclável gerado para quantificar os potenciais ganhos. Inicialmente, as rotas de tratamento foram aplicadas ao país para averiguação global dos impactos e, posteriormente, aplicados em cada um dos seis municípios.

### **5.3 Escolha das rotas de tratamento**

Os sistemas de tratamento para uso exclusivo ou comum entre municípios circunvizinhos foram escolhidos considerando a tecnologia mais adequada em função das necessidades e prioridades do país.

### **5.4 Dados e parâmetros**

Dados e informações utilizados nos cálculos são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 Dados e parâmetros técnicos e físicos

Descrição	Valor de referência	Valor usado nos cálculos	Fonte
Taxa de produção de biogás de aterros (L/kg)	35 - 45	0,04 m <sup>3</sup> /kg	Karagiannidis (2012)
Massa específica de CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,83	1,83	Rose and Cooper (1977)
PCI do RSU (kJ/kg)	4200 - 6300	6130 <sup>(1)</sup>	Niessen (2002)
Emissão na incineração (tCO <sub>2</sub> /TJ)	10 - 40	25	Monni et al. (2006)
GWP do CH <sub>4</sub>	25	25	IPCC (2006)
PCI do CH <sub>4</sub> (MJ/m <sup>3</sup> )	33,95	33,95	Rose & Cooper (1977)
Taxa de produção de biogás do lodo (m <sup>3</sup> /kg)	0,8-1,1	0,95	Turovskiy e Mathai (2006)
Emissões evitadas com a reciclagem (CO <sub>2</sub> /t)	1,971	1,971	Lino and Ismail (2012)
Energia evitada com a reciclagem (GJ/t)	31,629	31,629	Lino e Ismail (2012)
PCI do lodo (MJ/kg)	20-28	16	Turovskiy e Mathai, (2006)
Taxa de sólido no lodo primário (kg/m <sup>3</sup> )	0,1– 0,3	0,2	Turovskiy e Mathai, (2006)
Taxa de combustível auxiliar GLP (kg/t)	8,0	8,0	MCT (2008)
Eficiência de recuperação de biogás (%)	75	75	Monni et al. (2006)
Emissão da combustão do GLP (kg CO <sub>2</sub> /kg)	3.019	3.019	MCT (2008)
PCI do biogás do lodo (MJ/m <sup>3</sup> )	15 - 25	20	Niessen (2002)
PCI do GLP comercial (MJ/kg)	40,05 a 46,05	40,05	Rose and Cooper (1977)

Fonte: Elaboração própria.

<sup>(1)</sup> Calculado pelo autor.

Tabela 5.2 Caracterização gravimétrica do RSU

Localidade	Matéria orgânica (%)	Papel/ papelão (%)	Plástico (%)	Vidro (%)	Metal (%)	Outros (%)
Brasil	52,5	24,5	2,9	1,6	2,3	16,2
Campinas	46,0	20,0	15,0	2,0	4,0	13,0
Mogi Guaçu <sup>(1)</sup>	36,1	13,4	21,6	-	12,6	16,2

<sup>(1)</sup> O PCI do RSU em Mogi Guaçu = 3531 kJ/kg (calculado pelo autor).

Fonte: IPT/CEMPRE (2000); PMC (1996); Masotti et al. (2013).

#### 5.4.1 Preço do mix de reciclável

O preço da tonelada de material comercializado, de acordo com Cempre (2013) varia em função da demanda de reciclável no mercado, da sazonalidade e da região. Neste trabalho foi usado o valor médio de R\$ 450,00 por tonelada de reciclável. Esse valor é referente a maio de 2013.

#### **5.4.2 Energia e emissões evitadas na reciclagem**

Conforme Hekkert et. al (2000); McDougall (2001); Lino e Ismail (2012), a substituição da matéria-prima por matéria reciclada nos processos produtivos evita o uso de energia correspondente a 31,629 GJ/t de reciclável da mesma forma que evita emissões de 1,971 tCO<sub>2</sub>/t de reciclável.

A seguir, são apresentadas a metodologia de cálculo aplicada às rotas de tratamento propostas que são: aterramento e incineração com recuperação de energia, incluindo a reciclagem em ambas as rotas para RSU. Para ED as rotas de tratamento propostas são biodigestão e incineração.

### **5.5 Métodos**

Nesta seção, é apresentada a metodologia aplicada em cada rota de tratamento juntamente com os respectivos fluxogramas simplificados.

#### **5.5.1 Reciclagem**

Como mostra o fluxograma (Figura 5.1) nesta técnica de tratamento de RSU, os recicláveis como papel/papelão, plástico, vidro e metal são coletados seletivamente e encaminhados à cooperativas ou associações para beneficiamento (triagem, prensagem e enfardamento) para aumentar seu valor comercial.

#### **5.5.2 Aterramento de RSU com recuperação de biogás**

Conforme o fluxograma (Figura 5.1), RSU coletado na coleta comum é encaminhado para o aterro para recuperação de biogás e geração de energia elétrica. No aterro, o material biodegradável produz principalmente CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Esses gases são captados, filtrados e preparados para injeção em caldeira para produzir calor e gerar vapor a alta pressão e temperatura, passa-o na turbina a vapor para produzir trabalho mecânico onde será convertido por um gerador elétrico em eletricidade. Essa energia elétrica pode ser usada no local para atender as necessidades da planta de tratamento e o restante pode ser alimentado na rede pública de distribuição. Neste processo de biodigestão, o volume do material é reduzido em torno de 20 a 25% (MCT, 2008).

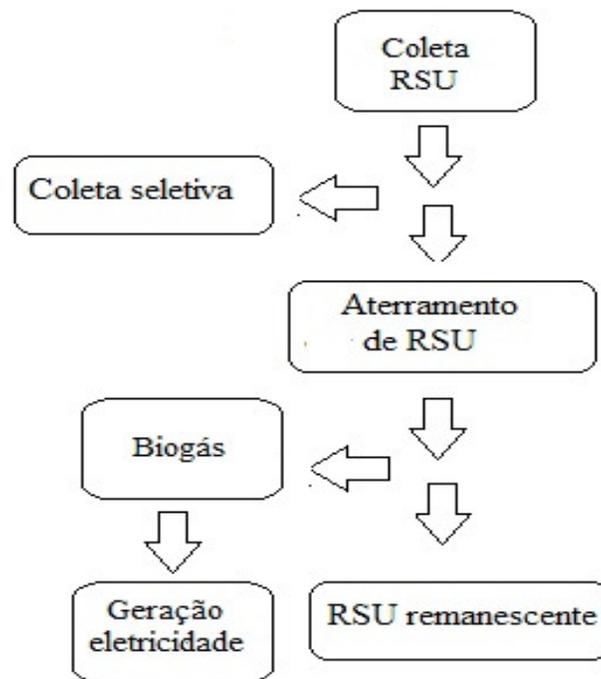


Figura 5.1 Reciclagem e tratamento biológico de RSU.

A partir da análise gravimétrica do RSU do município é determinada a composição do material reciclável contido na massa de resíduo coletado. A quantidade de reciclável é determinada pela Equação 5.1.

$$\text{Quantidade de reciclável} = \text{Fração do reciclável} \times \text{total de RSU coletado} \quad (5.1)$$

Após beneficiamento, os recicláveis são comercializados com base no valor da tonelada do mix. A renda obtida na comercialização é calculada pela Equação 5.2.

$$\text{Renda obtida na venda dos recicláveis} = \text{R\$/t de mix} \times \text{quantidade de reciclável} \quad (5.2)$$

O retorno dos recicláveis à cadeia produtiva traz vantagens, dentro outras, evita o uso de energia, evita emissões de GEE, economiza água e matéria-prima. Dois parâmetros apresentados por Lino e Ismail (2012) possibilitam o cálculo rápido dos ganhos energéticos e as emissões

correspondentes na reciclagem. Com base na Tabela 5.1 pode-se calcular a energia e as emissões evitadas pelas Equações 5.3 e 5.4.

$$\text{Energia evitada na reciclagem} = \text{Fator de energia evitada} \times \text{Massa de reciclável} \quad (5.3)$$

$$\text{CO}_2 \text{ evitado na reciclagem} = \text{Fator de emissão evitada} \times \text{Massa de reciclável} \quad (5.4)$$

Subtraindo a parcela do reciclável encaminhada para reciclagem, o RSU coletado na coleta comum é aterrado para geração de biogás a partir da decomposição do material biodegradável. A taxa de produção de biogás da massa orgânica (MO) varia em função da composição do RSU, das condições ambientais, da umidade e do pH. A taxa de produção de biogás é determinada experimentalmente para o município onde o projeto for implantado.

A quantidade de biogás que pode ser produzida é determinada no procedimento global de cálculo pela Equação 5.5

$$\text{Quantidade de biogás gerado} = \text{Taxa de produção de biogás} \times \text{massa de RSU} \quad (5.5)$$

A quantidade de MO contida na massa de RSU e aterrada para geração de biogás é determinada pela Equação 5.5a

$$\text{Quantidade de MO no aterro} = \% \text{ de MO no RSU} \times \text{RSU total coletado} \quad (5.5a)$$

O mesmo cálculo é usado na incineração do RSU (MO + reciclável subtraído a parcela reaproveitada) conforme Equação 5.5b.

$$\text{Massa a ser incinerada} = \% \text{ do material incinerável no RSU} \times \text{RSU total coletado} \quad (5.5b)$$

Retomando os cálculos do biogás, este após coletado passa por processo de limpeza para remover particulados e materiais orgânicos arrastados junto com os gases. Como foi visto na revisão, nem todos os gases gerados são possíveis de ser coletados. Uma parcela escapa para o ambiente por rachaduras, furos e porosidade da cobertura e paredes do aterro. Os gases que escapam são chamados fugitivos e, geralmente, a quantidade varia entre 25% no caso de aterros de alta tecnologia até 50% para aterros com nível de engenharia padrão conforme Monni et al. (2006). Este parâmetro é chamado de eficiência de recuperação de biogás. Os gases então coletados podem ser calculados pela Equação 5.6.

$$\text{Biogás coletado} = \text{eficiência de coleta} \times \text{volume de biogás gerado} \quad (5.6)$$

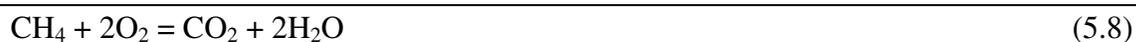
Biogás gerado é composto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e outros gases de pequenas proporções. Neste trabalho, foram considerados os percentuais de composição de 45% de  $\text{CH}_4$  e 55% de  $\text{CO}_2$ . A energia contida no biogás pode ser calculada pela Equação 5.7.

$$\text{Energia do biogás} = \text{Volume (ou massa) de biogás} \times \text{PCI do biogás} \quad (5.7)$$

O poder calorífico do gás deve ser determinado experimentalmente. Para o biogás produzido no aterro o valor depende da sua composição. As eficiências das máquinas térmicas (caldeira, turbina a vapor, turbina a gás) variam conforme o projeto do equipamento. De modo geral, neste estudo, foi considerada a eficiência global de conversão térmica para elétrica de 30%.

### 5.5.3 Cálculo das emissões de $\text{CO}_2$ e do biogás de aterro

A fórmula da reação química da queima do metano está descrita na Equação 5.8.



Sendo assim, a quantidade total de  $\text{CO}_2$  gerada na queima de biogás coletado é igual à quantidade de biogás coletado, conforme Equação 5.9, ou seja,

$$\text{CO}_2 \text{ gerado na queima de biogás coletado} = \text{quantidade de biogás coletado} \quad (5.9)$$

Cálculo da contribuição do biogás fugitivo e das emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e) do aterro pode ser feito usando as Equações 5.10 e 5.11.

$$\text{Quantidade de biogás fugitivo} = (1 - \eta) \times \text{quantidade de biogás gerada} \quad (5.10)$$

$$\text{CO}_2\text{e da parcela de metano} = \text{GWP} \times \text{parcela de metano} \quad (5.11)$$

Onde  $\eta$  é a eficiência de recuperação do biogás do aterro e GWP é Potencial global de aquecimento.

O total das emissões de CO<sub>2</sub> é a soma das contribuições. Enquanto a matéria orgânica digerida permanece no aterro com volume reduzido entre 20 a 25%.

#### 5.5.4 Incineração de RSU

Figura 5.2 mostra o fluxograma da técnica de incineração para tratamento de RSU. A exemplo do tratamento biológico, nesta rota de tratamento também é descontado 10% de materiais recicláveis reaproveitados na reciclagem.

Conforme fluxograma (Fig. 5.2), RSU coletado na coleta comum é prensado no próprio caminhão compactador que o transporta e descarregado na planta de incineração para processo de queima. Inicialmente, o RSU é inserido na esteira rolante onde passa por secagem e, em seguida, é queimado na câmara de combustão.

Na planta de incineração, normalmente uma caldeira integra a câmara de combustão para gerar vapor a alta pressão e alta temperatura. Vapor é usado para geração de eletricidade. Gases resultantes da queima passam por sistema de recuperação de energia para pré-aquecer o ar de combustão e melhorar a eficiência do processo de incineração. Gases menos quente são filtrados para remoção dos particulados e tratamento químico para neutralizá-los. Após limpeza total, os gases são liberados para atmosfera. Material remanescente da incineração na forma de cinza

vitrificada pode ser reaproveitado para uso na construção civil, como cimento, tijolo, pavimentação de estrada entre outras aplicações.

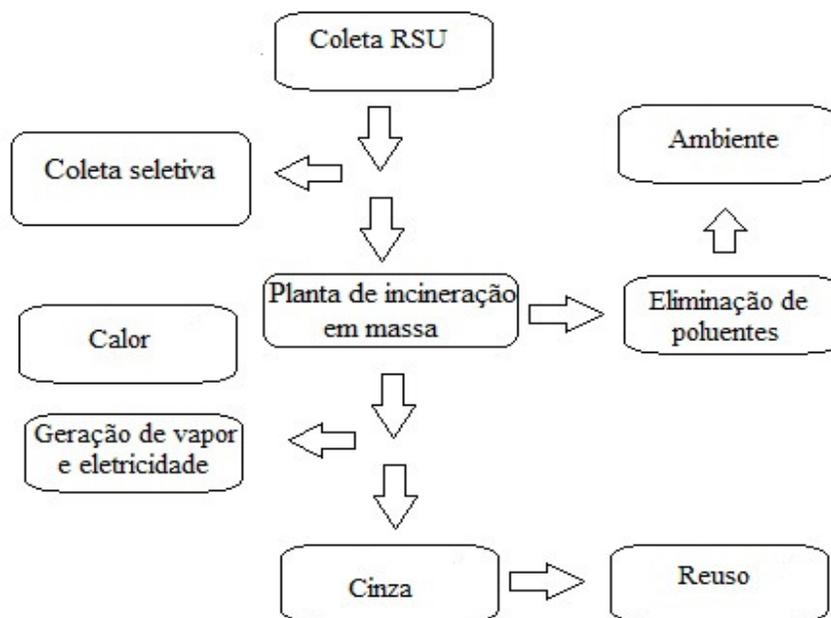


Figura 5.2 Incineração de RSU.

A massa de RSU encaminhada para incineração é calculada conforme a Equação 5.5b. Entretanto, o calor liberado pela incineração do RSU pode ser calculado se o conteúdo energético do material for conhecido. Este é normalmente determinado experimentalmente por amostragem. Neste caso específico, o calor liberado na incineração é calculado pela Equação 5.12.

$\text{Calor liberado} = \text{Massa de RSU incinerada} \times \text{Conteúdo energético do RSU} \quad (5.12)$
--

Normalmente, combustível auxiliar é usado para iniciar a incineração e também para manter a temperatura do forno se o RSU é de baixo valor calorífico. Dados sobre taxa de consumo de combustível, que deve ser compatível com o projeto, são geralmente fornecidos pelo fabricante ou obtidos no processo operacional.

Para determinar a quantidade de energia liberada pelo combustível auxiliar é necessário saber a massa de combustível auxiliar e seu poder calorífico, conforme Equação 5.13.

$$\text{Energia liberada por combustível auxiliar} = \text{Massa de combustível auxiliar} \times \text{PCI} \quad (5.13)$$

No processo de incineração, tem-se a energia da queima e a fornecida pelo combustível auxiliar. A quantidade de energia líquida da incineração é, portanto, a diferença entre a energia liberada pela queima e a fornecida pelo combustível auxiliar, calculado conforme a Equação 5.14. Energia líquida resultante da incineração, a exemplo do biogás, será convertida para energia elétrica.

$$\text{Energia líquida da incineração} = \text{Energia liberada na queima} - \text{Energia fornecida por combustível auxiliar} \quad (5.14)$$

Tanto o processo de incineração quanto a queima do combustível auxiliar produzem GEE principalmente  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e outros poluentes resultantes da queima do plástico e materiais similares. Os gases poluentes são tratados por técnicas especiais específicas, removidos e liberados na atmosfera de acordo com os limites estabelecidos por legislação ambiental.

Neste trabalho, calcula-se somente a produção de  $\text{CO}_2$  resultante dos processos da incineração e da queima do combustível auxiliar. A quantidade de  $\text{CO}_2$  gerada pode ser calculada usando taxas de produção de  $\text{CO}_2$  disponíveis na literatura técnica (MCT, 2008; Monni et al., 2006), conforme Equação 5.15.

O fator de emissão usado nesse trabalho para o GLP = 3.019 kg  $\text{CO}_2$ /kg. Para incineração do RSU, o valor encontrado na literatura varia entre 10 a 40 t $\text{CO}_2$ / TJ, sendo usado no cálculo, o valor médio de 25 t $\text{CO}_2$ / TJ, conforme Equação 5.16.

$$\text{Quantidade de } \text{CO}_2 \text{ gerada na combustão do GLP} = \text{Fator de emissão} \times \text{massa do GLP} \quad (5.15)$$

$$\text{Quantidade de } \text{CO}_2 \text{ gerada na incineração do RSU} = \text{Fator de emissão} \times \text{massa do RSU} \quad (5.16)$$

### 5.5.5 Tratamento biológico de ED

Os processos de tratamento de esgoto são formados por uma série de operações associadas ao nível e à eficiência de tratamento. Lodo gerado no tratamento de esgoto é bombeado para reatores anaeróbicos para biodigestão e produção de biogás sobre condições de temperatura e pH controlados. A massa sólida biodegradável depende de propriedades do esgoto. Pela Equação 5.17 calcula-se a massa de sólido contido no esgoto.

$$\text{Massa sólida do esgoto} = \text{Taxa de sólido no esgoto} \times \text{Volume de esgoto tratado} \quad (5.17)$$

A geração de biogás do lodo de esgoto depende do conteúdo do sólido na massa. A quantidade de biogás gerado é calculado, conforme a Equação 5.18.

$$\text{Volume de biogás produzido} = \text{Taxa de produção de biogás} \times \text{massa sólida} \quad (5.18)$$

O biogás produzido pode ser usado em caldeiras para produção de vapor para alimentar turbina a vapor acoplada ao gerador elétrico para produção de eletricidade. Também é possível usar turbina a gás para geração de eletricidade. A quantidade de energia térmica produzida por biogás depende do biogás gerado e seu poder calorífico, conforme Equação 5.19.

$$\text{Energia térmica do biogás} = \text{Volume de biogás} \times \text{poder calorífico do biogás} \quad (5.19)$$

A energia elétrica que pode ser produzida pelo biogás é o produto da energia térmica gerada pela eficiência de conversão, conforme Equação 5.20.

$$\text{Energia elétrica do biogás} = \text{Energia térmica do biogás} \times \text{eficiência de conversão térmica/ elétrica} \quad (5.20)$$

( $\eta$ )

O valor da eficiência de conversão é de 30%. Considerando o consumo médio mensal de uma família de  $0,6342 \times 10^9 \text{ J}_{\text{el}}$ , o total de residência que pode ser atendida por esta energia é calculado com base na Equação 5.21.

$$\text{N}^\circ \text{ de residências} = \text{Energia elétrica mensal gerada} \div \text{consumo médio residencial} \quad (5.21)$$

Volume de emissões liberadas na combustão do biogás para produzir energia pode ser calculado usando as Equações 5.8 e 5.9.

Água recuperada para reuso foi considerada como sendo a metade da água consumida. O consumo mensal ou diário de água em uma residência depende do número de residentes e do consumo médio individual. Assim, o consumo médio por residência no município pode ser calculado, conforme Equação 5.22.

$$\text{N}^\circ \text{ de residências que podem ser atendidas} = \text{Volume de água recuperada por dia} \div \text{consumo médio residencial por dia} \quad (5.22)$$

Figura 5.3 mostra o fluxograma da rota de tratamento biológico do esgoto doméstico.

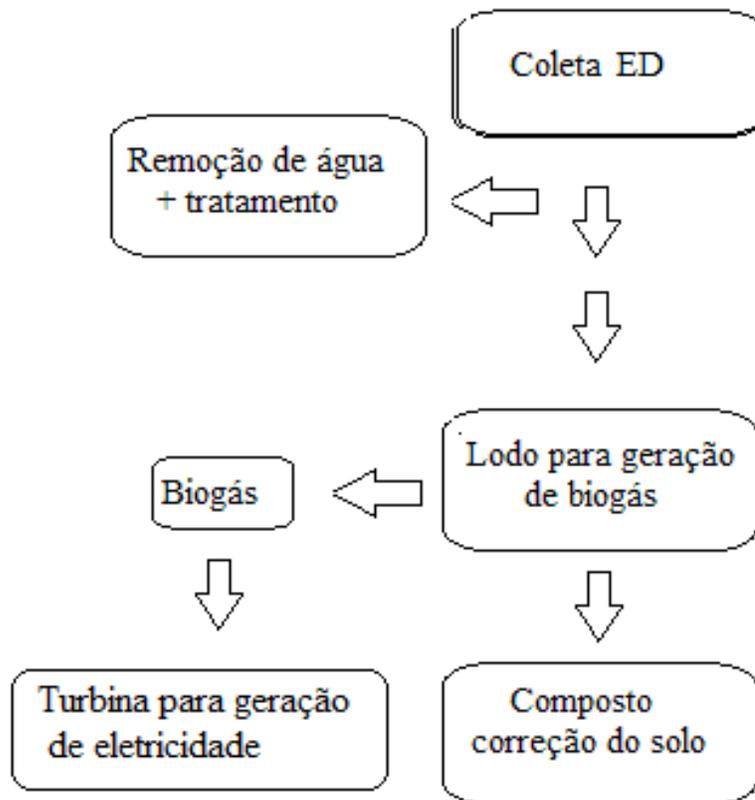


Figura 5.3 Tratamento biológico de esgoto doméstico.

### 5.5.6 Tratamento térmico de ED

Lodo primário é encaminhado para queima em incinerador tipo leito fluidizado ou similar produzindo calor que pode ser usado para produzir calor e eletricidade, conforme Figura 5.4. Após recuperação da energia, os gases quentes passam por limpeza para eliminação de particulado e de gases ofensivos antes do seu lançamento na atmosfera. Cinza na forma de material vitrificado pode ser reaproveitada como no caso anterior.

Se a planta de incineração de RSU estiver localizada próxima à ETE, ambos RSU e lodo podem ser queimados juntos. Isto pode reduzir o custo das instalações.

Considera-se que do total da água removida durante o desaguamento do lodo primário, cerca de 50% pode ser tratada para reuso.

A massa sólida no esgoto pode ser calculada pela Equação 5.13. O conteúdo energético do lodo depende da sua composição e umidade cujo valor deve ser determinado experimentalmente. A massa de lodo a ser incinerada requer combustível auxiliar com taxa que depende do projeto. Conforme WEF (2009), o valor calorífico do esgoto varia entre 12.800 a 19.750 kJ/kg.

Assim, a energia resultante da incineração do lodo é o produto da massa de sólida e seu poder calorífico, conforme Equação 5.23.

$$\text{Energia liberada na incineração do lodo} = \text{Massa de sólido} \times \text{conteúdo energético do lodo} \quad (5.23)$$

Para iniciar e manter o processo de incineração é usado um combustível auxiliar. Nesse estudo, foi usado GLP tendo em vista a disponibilidades de seus dados operacionais confiáveis na incineração, mas outros combustíveis podem ser usados desde que suas taxas de consumo sejam conhecidas. Assim, o consumo total de GLP pode ser calculado como sendo o produto da massa a ser incinerada e a taxa de consumo do combustível auxiliar, conforme Equação 5.24.

$$\text{Consumo total de GLP} = \text{Massa a ser incinerada} \times \text{taxa de consumo do combustível auxiliar} \quad (5.24)$$

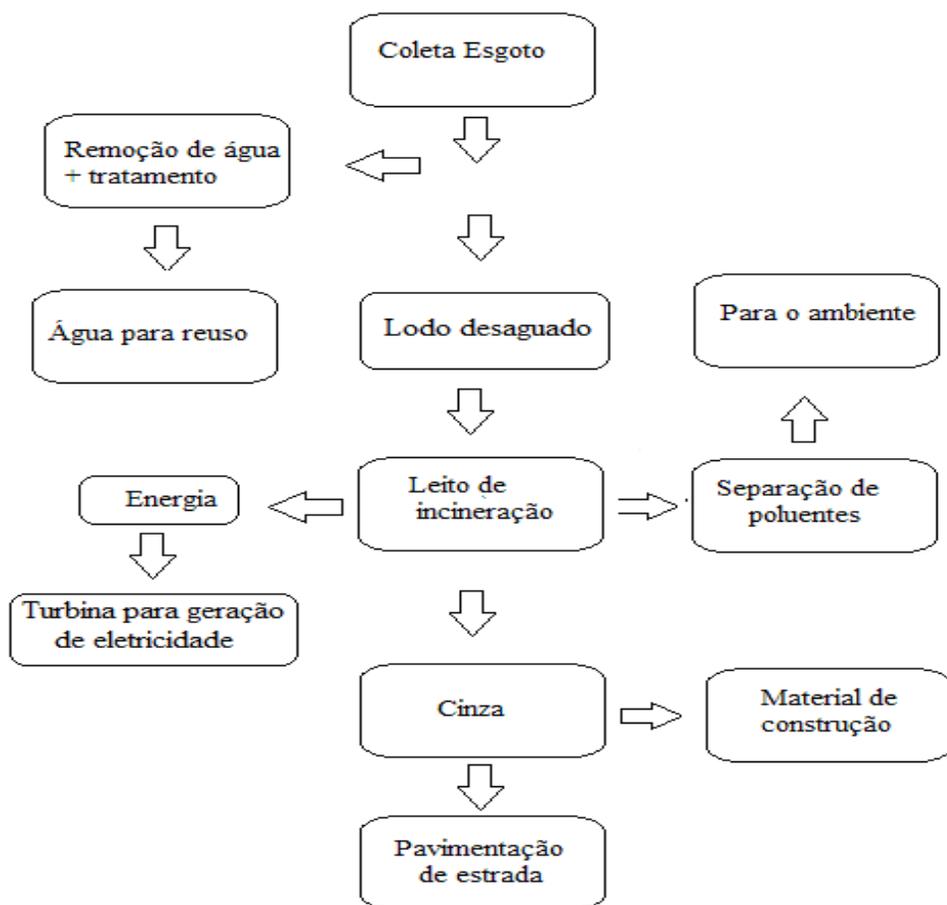


Figura 5.4 Incineração de ED.

A energia gerada pela queima do combustível auxiliar é o produto da massa de combustível e seu PCI, conforme Equação 5.25.

$$\text{Energia liberada pelo combustível auxiliar} = \text{massa de combustível} \times \text{PCI} \quad (5.25)$$

Energia líquida do processo de incineração é calculada como a diferença entre energia liberada pela incineração do lodo e energia liberada pelo combustível auxiliar, conforme Equação 5.26.

$$\text{Energia líquida do processo de incineração} = \text{Energia liberada pela incineração do esgoto} - \text{Energia liberada pelo combustível auxiliar} \quad (5.26)$$

A energia térmica liberada pode ser usada para produzir vapor em caldeira (integrada ao sistema de incineração) que alimenta uma turbina a vapor acoplada ao gerador para produzir eletricidade. Energia elétrica é o produto da energia térmica líquida pela eficiência de conversão térmica / elétrica, calculada conforme Equação 5.27.

$$\text{Energia elétrica gerada} = \text{Energia líquida do processo de incineração} \times \eta \quad (5.27)$$

A energia associada aos produtos de combustão geralmente é aproveitada para secagem do lodo e/ou aquecimento do ar para incineração. Após o resfriamento, os gases são lavados e tratados quimicamente para neutralizar ou remover os poluentes antes de serem liberados à atmosfera. CO<sub>2</sub> resultante dos processos da incineração e da queima do combustível auxiliar são calculados usando fatores de emissão contidos na Tabela 5.1

A quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pela queima de GLP é o resultado do produto do fator de emissão e da massa de GLP, conforme Equação 5.28.

$$\text{CO}_2 \text{ gerado na combustão do GLP} = \text{Fator de emissão} \times \text{massa do GLP} \quad (5.28)$$

De forma similar, a quantidade de CO<sub>2</sub> gerada na incineração do ED é o produto do fator de emissão e a massa do sólido no ED, conforme Equação 5.29.

$$\text{CO}_2 \text{ gerado na incineração do ED} = \text{Fator de emissão} \times \text{massa do sólido no ED} \quad (5.29)$$

A quantidade de CO<sub>2</sub> gerada pelo processo de incineração de esgoto é a soma das duas contribuições, do combustível auxiliar e da incineração do esgoto, conforme as Equações 5.28 e 5.29.

Nesta seção, foi apresentada a metodologia com os fluxogramas das rotas de tratamento escolhidos para RSU e ED junto com as equações básicas e os parâmetros utilizados para calcular os ganhos financeiros, energéticos e emissões de cada rota de tratamento. Estas equações e os parâmetros serão aplicados nas rotas de tratamento apresentados no Capítulo 6.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, a metodologia proposta para tratamento de RSU e de ED é aplicada ao Brasil, como um todo para averiguar o potencial de ganhos financeiros e energéticos, bem como as emissões reduzidas ou evitadas. Também foi aplicada especificamente em três municípios com população acima de um milhão de habitantes e em três municípios pequenos e circunvizinhos para demonstrar as possibilidades de parcerias para tratamento comunitário tanto do RSU quanto do ED. Entretanto, antes de quantificar os potenciais ganhos mencionados acima, primeiramente são aplicadas a metodologia para mostrar as perdas no país devido ao desperdício e à falta de tratamento adequado para ambos tipos de resíduo.

### 6.1 Realidade do tratamento de RSU e ED no Brasil

#### 6.1.1 Resíduo sólido urbano (RSU)

No Brasil, os dados de RSU atualizados referem-se a 2008 que foram publicados pelo IBGE (2010), onde é registrada a coleta de 259.547 t/dia. Deste total, conforme caracterização gravimétrica, mostrada na Tabela 5.2, a matéria orgânica (excluído papel/papelão) contida na massa de RSU corresponde a 52,5% e a fração de papel e papelão representa 24,5%. Assim,

- Total de matéria orgânica degradável totaliza 77% ou = 199.851,2 t/dia
- Coleta seletiva totaliza 3.122 t/dia (IBGE, 2010) e a parcela de papel e papelão recolhidos seletivamente corresponde a =  $3122 \times 0,245 = 765$  t/dia
- Dessa forma, a quantidade de material biodegradável encaminhado para aterro:  
 $199.851,2 - 765 = 199.086,2$  t/dia

A taxa de geração de biogás médio usado neste cálculo é 0,030 m<sup>3</sup>/kg.

- Volume de biogás gerado
- =  $0,030 \times 199.086,2 \times 10^3 = 5,972586 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/dia =  $2,1799939 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/ano

Considerando que a composição do biogás depende principalmente da composição do material aterrado, considerou-se a composição de 55% de CO<sub>2</sub> e 45% de CH<sub>4</sub>, então

- Volume de CO<sub>2</sub> gerado =  $1,1989966 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/ano

- Volume de CH<sub>4</sub> gerado =  $0,9809973 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$
- Valor de GWP do metano: 25
- CO<sub>2e</sub> do metano =  $24,52493 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$
- Volume total CO<sub>2e</sub> liberado para a atmosfera =  $25,72393 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$
- Massa específica do CO<sub>2</sub>:  $1,83 \text{ kg/m}^3$
- Massa de CO<sub>2e</sub> liberada para a atmosfera  
=  $1,83 \times 25,72393 \times 10^9 \text{ kg/ano} = 47,0748 \text{ MtCO}_2/\text{ano}$ .

Se o biogás gerado for queimado sem aproveitamento da energia liberada, a quantidade de CO<sub>2</sub> gerada é igual à quantidade de biogás conforme Equação 5.8, ou seja,

- =  $2,1799939 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano} = 3,9894 \text{ MtCO}_2/\text{ano}$ .

Isto significa que a queima de biogás pode reduzir significativamente o GEE gerado.

### 6.1.2 Reciclagem

- Quantidade de reciclável coletado seletivamente, em 2008 = 3122 t/dia (IBGE, 2010).
  - Preço da tonelada do mix de reciclável  
= R\$ 450,00
  - Considerando esse valor, o ganho com a venda de reciclável  
=  $450 \times 3122 = \text{R}\$1.404.900 \text{ /dia}$  ou =  $\text{R}\$ 42.147.000 \text{ /mês}$ .

Aplicando os valores de energia e emissões evitadas na reciclagem, conforme Tabela 5.1, tem-se que

Energia evitada: =  $31,629 \times 3122 = 98745,7 \text{ GJ/dia} = 10011,72 \text{ GWh anual}$ .

- CO<sub>2</sub> evitado =  $1,971 \times 3122 = 6153,5 \text{ tCO}_2/\text{dia} = 2,24 \text{ MtCO}_2/\text{ano}$ .

### 6.1.3 Esgoto doméstico (ED)

- Esgoto gerado =  $28.249.154 \text{ m}^3 / \text{dia}$

Considerando a taxa de sólido no ED =  $0.2 \text{ kg} / \text{m}^3$ , então,

- massa de sólido para incineração ou para tratamento biológico
- $= 0,2 \times 28.249.154 = 5.649.831 \text{ kg} / \text{dia} = 5649,831 \text{ t} / \text{dia}$ .

Por falta de dados, não é possível calcular os danos associados a este volume de esgoto, mas é possível avaliar os potenciais ganhos que podem ser obtidos com tratamento adequado. Enquanto a água residuária, se fosse recuperada 50% para reuso, poderia atingir o volume de  $14.124.577 \text{ m}^3 / \text{dia}$ .

## 6.2 Propostas para tratamento de RSU

Neste trabalho, são propostos dois sistemas de tratamento para RSU sendo que, em ambos, a reciclagem está inserida. A primeira proposta é o tratamento biológico do RSU disposto no aterro sanitário com recuperação de energia. A segunda proposta para tratamento é a incineração com recuperação de energia para produção de energia elétrica.

### 6.2.1 Reciclagem

Conforme dados do IBGE (2010), a coleta diária de RSU = 259.547 toneladas,

- Porcentagem de reciclável na massa de RSU = 31,3% (Tabela 5.2)

Usando a Equação 5.1 obtém-se

- Quantidade de reciclável potencialmente disponível

$$= 0,313 \times 259.547 = 81.238,2 \text{ t/dia}$$

- Preço do mix de reciclável = R\$ 450/t

Pela Equação 5.2, tem-se

- Ganho estimado com a venda dos recicláveis

$$= 450 \times 81.238,2 = 36557195 \text{ R\$/dia} = 1.096.715.849 \text{ R\$/mês.}$$

Como pode ser observado, a reciclagem representa importante fonte de recursos financeiros. Em 2008, a taxa de reciclagem representava 1,2%. Esta taxa, porém, se mantém no

país desde a implantação da coleta seletiva, em 1980, mas precisa aumentar por uma série de razões, inclusive, devido à falta de área nos grandes centros urbanos para construção de aterros. A Política Nacional de Resíduo Sólido (PNRS), Lei 12.305, em vigor desde 2010, estipula taxa de reciclagem em 20%. Como medida inicial, neste trabalho, é proposta a taxa de 10%. Considera-se que esta taxa possa ser alcançada com algumas medidas, como políticas públicas e plano de gestão. No esforço de aumentar o índice de reciclagem, o Reino Unido investiu em várias ações, inclusive programas intensivos de conscientização popular que deram certo. A revisão bibliográfica traz os detalhes.

- Recuperação de 10% de reciclável  
 $= 8123,8 \text{ t/dia}$  e ganho mensal de  $= \text{R\$ } 109.671.585 \text{ /mês}$ .

Pela Equação 5.3, a energia evitada com reaproveitamento de 10% de reciclável  
 $= 31,629 \times 8123,8 = 256.948 \text{ GJ/dia}$ .

Pela Equação 5.4, as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas devido a 10% do reciclável  
 $= 1,971 \times 8123,8 = 16.012 \text{ tCO}_2 \text{ /dia} = 5,844 \text{ MtCO}_2 \text{ /ano}$ .

### 6.2.2 Aterramento de RSU

A quantidade de matéria orgânica contida na massa de RSU corresponde a 52,5% (Tabela 5.4). Como foi considerado o reuso de apenas 10% do reciclável e, considerando que a massa orgânica reciclável é representada por 24,5% de papel e papelão, o percentual de 10% desse reciclável é descontado, ou seja,  $0,1 \times (24,5\%)$ .

- A porcentagem total de matéria orgânica biodegradável destinada ao aterro  
 $= 52,5\% + 0,9(24,5\%) = 74,55\%$ ;
- massa de matéria orgânica biodegradável (Eq. 5.5a)  
 $= 0,7455 \times 259547 = 193492,3 \text{ t/dia}$ ;

Considerando a taxa média de produção de biogás em aterro sanitário como 40 l/kg (Tab. 5.1), tem-se

- Quantidade de biogás produzido (Eq. 5.5)  
 $= 0,04 \times 193492,3 \times 10^3 = 7,73969 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ /dia}$ .

O biogás gerado no aterro tem pressão mais alta que o ambiente, e isso, favorece sua fuga para atmosfera por furos na camada de capeamento e cantos de contato entre as paredes e a cobertura. O biogás de fuga ou fugitivo tem contribuições significativas sobre os GEE reduzindo, assim, a eficácia de aterramento como método seguro para tratamento do RSU.

Considerando a eficiência de recuperação de biogás de aterro de 75% (Tab. 5.1)

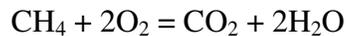
- O volume de biogás coletado (Eq. 5.6) é

$$= 0,75 \times 7,73969 \times 10^6 = 5,80477 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}.$$

- Volume de biogás fugitivo é determinado pela Equação 5.10

$$= 0,25 \times 7,73969 \times 10^6 = 1,93492 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}.$$

Equação (5.8) correspondente à queima de CH<sub>4</sub> é descrita como:



Dessa forma, se todo o CH<sub>4</sub> contido no biogás for queimado, produzirá o mesmo volume em CO<sub>2</sub>. Esse procedimento é o mais correto do ponto de vista ambiental, tendo em vista que o GWP do CH<sub>4</sub> corresponde a 25 vezes o do CO<sub>2</sub>.

A partir da composição do biogás (45% de CH<sub>4</sub> e 55% de CO<sub>2</sub>), é possível calcular a quantidade de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub> no biogás.

- Volume de CO<sub>2</sub> da composição de biogás

$$= 0,55 \times 5,805 \times 10^6 = 3,193 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}.$$

- Volume de CH<sub>4</sub> no biogás

$$= 0,45 \times 5,805 \times 10^6 = 2,612 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}.$$

Com base no PCI do CH<sub>4</sub> (Tab. 5.1) é possível calcular a quantidade de energia gerada pela combustão do CH<sub>4</sub> e a quantidade de CO<sub>2</sub> gerada pela combustão do biogás.

- Pela Equação 5.7 a quantidade de energia gerada pela combustão de CH<sub>4</sub>

$$= 33,95 \times 2,612 \times 10^6 = 88,68 \times 10^{12} \text{ J/dia}.$$

Conforme MME (2012), o consumo de energia elétrica per capita, em 2012, foi 0,604 MWh, ou  $0,1812 \times 10^9$  J<sub>el</sub> mensal. Considerando que uma família brasileira é composta, em média, de 3,5 membros (IBGE, 2012), então, o consumo médio mensal da família corresponde a  $0,6342 \times 10^9$  J<sub>el</sub>.

Considerando a eficiência de conversão de energia térmica para energia elétrica de 30%, calcula-se a quantidade de residências que podem ser atendidas por esta energia gerada a partir do aproveitamento do RSU.

- Energia elétrica gerada a partir do biogás de RSU  
 $= 88,68 \times 10^{12} \times 30 \times 0,3 = 798,097 \times 10^{12}$  J<sub>el</sub>/mês = 221,694 GWh mensal.
- Pela Equação 5.21, o número de residências que podem ser atendidas pela energia gerada corresponde a 1.258.430 residências.

### **Emissões**

Pelas Eqs. 5.8 e 5.9, a quantidade de CO<sub>2</sub> liberado é igual à quantidade de biogás coletado,

$$= 5,805 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia},$$

tendo em vista que a combustão do CH<sub>4</sub> produz a mesma quantidade de CO<sub>2</sub>.

- massa de CO<sub>2</sub> liberado para atmosfera  
 $= 1,83 \times 5,805 \times 10^6 \text{ kg CO}_2 / \text{dia} = 10,6227 \times 10^3 \text{ t CO}_2 / \text{dia} = 3,877 \text{ MtCO}_2 / \text{ano}.$

### **Biogás fugitivo**

Considerando a eficiência de recuperação de biogás de 75% (Tab. 5.1)

- quantidade de biogás fugitivo pode ser calculada pela Equação 5.10

$$= 0,25 \times 7,73969 \times 10^6 = 1,93492 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}.$$

- quantidade de CH<sub>4</sub> no biogás fugitivo

$$= 0,45 \times 1,93492 \times 10^6 = 0,870714 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{dia}.$$

- A quantidade de CO<sub>2</sub> no biogás fugitivo

$$= 0,55 \times 1,93492 \times 10^6 = 1,064206 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 / \text{dia}.$$

Considerando o GWP do metano como 25 (IPCC, 2006),

- a quantidade de CO<sub>2</sub>e do CH<sub>4</sub> no biogás fugitivo é calculada pela Equação 5.11  
$$= 25 \times 0,870714 \times 10^6 = 21,76785 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ CO}_2\text{e} / \text{dia}.$$

O volume total de CO<sub>2</sub>e do biogás fugitivo = Volume de CO<sub>2</sub> na composição do biogás fugitivo + CO<sub>2</sub>e equivalente de metano

- Volume total de CO<sub>2</sub>e fugitivo  
$$= 1,064206 \times 10^6 + 21,76785 \times 10^6 = 22,832056 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ CO}_2\text{e} / \text{dia}.$$
- Massa de CO<sub>2</sub>e do biogás fugitivo pode ser calculada multiplicando a massa específica do CO<sub>2</sub> na pressão e na temperatura ambiental pelo volume do gás, ou seja,
- Massa de CO<sub>2</sub> do biogás fugitivo  
$$= 1,83 \times 22,832056 \times 10^6 = 41,78266248 \times 10^6 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{dia} = 41.783 \text{ tCO}_2\text{e} / \text{dia}$$
  
$$= 15,251 \text{ MtCO}_2\text{e} / \text{ano}.$$

Assim, pode-se observar que a contribuição da parcela do biogás fugitivo referente a 25% é três vezes maior que os gases gerados e queimados.

### 6.2.3 Incineração de RSU

Pela caracterização gravimétrica do RSU no Brasil (Tabela 5.2) a parcela de resíduo identificado como “outros” que corresponde a 16,2% não é considerado para incineração. Estão incluídos, a matéria orgânica (52,5%) e as parcelas de papel e papelão e a do plástico que não são reaproveitados na reciclagem. Assim, tem-se 90% do papel e papelão, cujo percentual é 22,05% e 90% do plástico que corresponde a 2,61%. Deste modo,

- Total de material a ser incinerado  
$$= 52,5\% + 22,05 + 2,61 = 77,16\% \text{ ou } 77\%.$$
- Quantidade de material para incineração  
$$= 0,77 \times 259547 = 199.851,2 \text{ t/dia}.$$

Considerando o conteúdo energético do RSU (Tab. 5.1), como 6130 kJ/kg

- calcula-se a energia liberada na incineração do RSU usando Equação 5.12

$$= 199851,2 \times 6130 \times 10^3 \text{ kJ/dia} = 1225,0879 \times 10^{12} \text{ J/dia} = 36752,636 \times 10^{12} \text{ J/mês.}$$

Para iniciar e manter o processo de incineração torna-se necessário usar um combustível auxiliar, especialmente se o RSU for de baixo conteúdo energético ou muito úmido. Este combustível pode ser qualquer tipo, de preferência barato e disponível no local, como óleos usados, combustíveis líquidos misturados com granulados de carvão etc. Neste estudo, foi usado o GLP como combustível auxiliar em razão da disponibilidade de dados. Conforrme Tabela 5.1, cada tonelada de RSU a ser incinerada necessita de 8 kg de GLP.

Pelo uso da Equação 5.24, tem-se

- quantidade de GLP necessária no processo de incineração  
 $= 8 \times 199851,2 = 1598.809,6 \text{ kg/dia.}$

Considerando o PCI do GLP (Tab. 5.1) que é 40,05 MJ/kg, é possível calcular

- Energia liberada pelo GLP (Eq. 5.13)  
 $= 40,05 \times 10^6 \times 1598809,6 = 64,03232 \times 10^{12} \text{ J/dia} = 1920,9697 \times 10^{12} \text{ J/mês}$
- Energia líquida liberada no processo de incineração de RSU é calculada pela Equação 5.14  
 $= 36752,636 \times 10^{12} - 1920,9697 \times 10^{12} = 34831,666 \times 10^{12} \text{ J/mês.}$
- Energia líquida gerada  
 $= 34831,666 \times 0,3 \times 10^{12} = 10449,4999 \times 10^{12} \text{ J}_{el}/\text{mês} = 2902,639 \text{ GWh mensal.}$

Considerando o consumo médio de 0,6342 GJ<sub>el</sub> /mês de energia elétrica (EE) em uma residência brasileira (MME, 2012), o número de residência que pode ser atendida por essa energia é calculado dividindo a energia elétrica disponível pelo consumo elétrico médio de uma residência brasileira.

Com base na Equação 5.21,

- o número de residência que pode ser atendida por essa energia  
 $= 10449,4999 \times 10^{12} / 0,6342 = 16.476.663 \text{ residências,}$

ou seja, 26,4% das residências brasileiras, considerando o número de residências no país, em 2013, totalizada em 62.300.000 (IBGE, 2013).

### **Emissões**

A partir da taxa de 25 tCO<sub>2</sub>/TJ para emissões na incineração conforme Tabela 5.1, calcula-se a quantidade de emissões na incineração. A combustão do GLP libera emissões no valor de 3.019 kg CO<sub>2</sub>/kg de GLP (Tabela 5.1). Essas emissões devem ser somadas com as da incineração para determinar as emissões liberadas no processo de incineração. Pela Equação 5.16,

- emissões geradas na incineração  
 $= 25 \times 10^3 \times (1225,0879 \times 10^{12}) / 10^{12} \text{ kg CO}_2/\text{dia} = 30627,2 \text{ t CO}_2/\text{dia}$   
 $= 11,1789 \text{ MtCO}_2/\text{ano},$
- emissões geradas na combustão do GLP (Eq. 5.15)  
 $= 3.019 \times 1598809,6 \text{ kg CO}_2/\text{dia} = 4826,806 \text{ t CO}_2/\text{dia},$
- total das emissões de CO<sub>2</sub> do processo de incineração  
 $= 30627,2 + 4826,806 = 35454 \text{ t CO}_2/\text{dia} = 12,941 \text{ MtCO}_2/\text{ano}.$

A Tabela 6.1 mostra um resumo dos resultados que possibilita fazer uma comparação entre a realidade do RSU no país e a proposta deste trabalho.

Tabela 6.1 Resultados da proposta de tratamento de RSU no Brasil

Descrição	Realidade em 2008	Proposta	
<b>Reciclagem</b>			
RSU coletado (t/dia)	259.547	259.547	
Reciclável disponível (t/dia)	81.238,2	81.238,2	
Venda de 10% reciclável (t/dia)		8.123,82	
Venda de reciclável em 2008 (t/dia)	3122	-	
Renda obtida com a venda (R\$/mês)	42.147.000	109.671.585	
Energia evitada na reciclagem (GJ/dia)	98745,7	256.948,3	
Emissão evitada na reciclagem (MtCO <sub>2</sub> /ano)	2,24	5,844	
		<b>Aterro com recuperação de biogás</b>	<b>Incineração</b>
<b>Tratamento de RSU</b>			
Matéria orgânica para aterro (t/dia)	199.086,2	193.492,3	
Resíduo para incineração (t/dia)			199.851,2
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /dia)	5,9726 x 10 <sup>6</sup>	7,73969 x 10 <sup>6</sup>	
Biogás coletado (m <sup>3</sup> /dia)		5,80477 x 10 <sup>6</sup>	
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> /dia)		1,93492 x 10 <sup>6</sup>	
Energia gerada por biogás (J/dia)		88,68 x 10 <sup>12</sup>	
Energia gerada por incineração (J /dia)			1225,0879 x 10 <sup>12</sup>
Energia da incineração (J/ mês)			36752,64 x 10 <sup>12</sup>
Energia liq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)			10449,4999 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)		798,097 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh /mês)		221,694	
Energia da incineração (GWh/mês)			2902,639
Nº de residência a suprir com EE <sup>1</sup>		1.258.430	16.476.663
Emissão (MtCO <sub>2</sub> /ano)	47,0748	3,877	12,941
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> /dia)		1,9349 x 10 <sup>6</sup>	
Emissão do biogás fugitivo (m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> e/dia)		22,8321 x 10 <sup>6</sup>	
Massa do biogás fugitivo (MtCO <sub>2</sub> e /ano)		15,251	

<sup>(1)</sup> Considerando a média nacional de consumo de EE/residência = 0,6342 GJ<sub>el</sub> /mês.

## 6.3 Propostas para tratamento de ED

### 6.3.1 Tratamento biológico

Conforme IBGE (2010) o total de ED gerado no Brasil, em 2008, foi 28.249,154 m<sup>3</sup>/dia e a taxa de produção de lodo usada, neste trabalho, foi o valor médio de 0,2 kg/m<sup>3</sup>, conforme Tabela 5.1. Assim, é possível calcular a massa de lodo usando Equação 5.17

$$= 0,2 \times 28249154 = 5.649,831 \text{ kg/dia de lodo.}$$

Tratamento anaeróbico de esgoto é adotado para obtenção de biogás. Nesse trabalho, foi adotado o valor médio de  $0,95 \text{ m}^3/\text{kg}$  por falta de dados nacionais confiáveis do ponto de vista energético e térmico. Deste modo, calcula-se

- volume de biogás produzido usando Equação 5.18

$$= 0,95 \times 5649831 = 5367339 \text{ m}^3/\text{dia.}$$

PCI do biogás proveniente do lodo foi adotado o valor médio de  $20 \text{ MJ/m}^3$ , conforme Tabela 5.1. Deste modo,

- energia total gerada pela queima de biogás pode ser calculada pela Equação 5.19

$$= 20 \times 5367339 = 107,347 \times 10^{12} \text{ J/dia} = 3220,4 \times 10^{12} \text{ J/mês.}$$

- Eficiência de conversão da energia térmica para energia elétrica é considerada 30%, assim,
- energia elétrica obtida pela combustão do biogás (Eq. 5.20)

$$= 3220,4 \times 10^{12} \times 0,3 = 966,12 \times 10^{12} \text{ J}_{el} / \text{mês} = 268,37 \text{ GWh mensal.}$$

Como calculado anteriormente, o consumo médio de energia elétrica de uma residência brasileira é de  $0,6342 \text{ GJ}_{el} / \text{mês}$ . Assim, o número de residência atendida por esta energia pode ser calculado pela Equação 5.21.

- A energia produzida pelo lodo de esgoto é suficiente para atender 1.523.368 residências.

## **Emissões**

Como mencionado anteriormente, a queima de  $\text{CH}_4$  produz a mesma quantidade de  $\text{CO}_2$ , conforme Equação 5.8.

Sendo assim, a quantidade de  $\text{CO}_2$  produzido é igual à quantidade de biogás gerado, ou seja,

$$= 5.367.339 \text{ m}^3 \text{ biogás/dia} = 5.367.339 \text{ m}^3 \text{ CO}_2/\text{dia.}$$

- Massa de  $\text{CO}_2$  liberada é obtida multiplicando o volume de  $\text{CO}_2$  x a massa específica

$$= 1,83 \times 5367339 = 9.822.230 \text{ kg CO}_2/\text{dia} = 3,585 \text{ MtCO}_2/\text{ano}.$$

### **Água recuperada para reuso**

Neste trabalho, é proposta a recuperação de 50% da água residuária para reuso, nesse caso, o volume de água recuperada é

$$= 14.124.577 \text{ m}^3 / \text{dia}$$

Considerando o consumo médio de água no Brasil correspondente a 162,6 l/hab./dia e o consumo de uma família composta de 3,5 membros, o consumo de uma residência = 0,569 m<sup>3</sup> /dia.

Número de residência que pode ser atendida com água recuperada pode ser calculado conforme a Equação 5.22. O uso da água recuperada depende das necessidades locais. Pode ser reaproveitada para fins comercial e industrial, inclusive, em substituição a água potável. Dessa maneira, tem-se economia de água potável que pode ser direcionada para localidades não atendidas. Pela Equação 5.22,

- água recuperada é suficiente para atender 24.823.510 residências, ou seja, 40% das residências brasileiras.

### **6.3.2 Proposta de tratamento térmico: incineração**

Quantidade de esgoto gerado no país = 28.249.154 m<sup>3</sup>/dia.

Considerando a taxa de lodo do esgoto como 0,2 kg/m<sup>3</sup> (Tabela 5.1) a massa de lodo

$$= 0,2 \times 28249154 = 5649831 \text{ kg/dia}.$$

Valor calorífico do lodo incinerado, neste trabalho, corresponde ao valor médio aproximado de 16 MJ/kg (Tab. 5.1)

- calor liberado pela incineração do lodo usando a Equação 5.23  
 $= 16 \times 5649831 \text{ MJ/dia} = 90,397 \times 10^{12} \text{ J/dia} = 2711,9 \times 10^{12} \text{ J/mês}.$

Para iniciar e manter o processo de incineração utiliza-se um combustível auxiliar. Nesse estudo, foi usado GLP. A taxa de consumo do GLP corresponde a 8 kg/t de lodo incinerado (Tab. 5.1), assim,

- consumo de GLP no processo de incineração é obtido usando a Equação 5.24  
 $= 8 \times 5649831 \times 10^{-3} = 45198,648 \text{ kg GLP/dia.}$
- calor liberado pelo GLP é calculado com base na Equação 5.25  
 $= 45198,648 \times 40,05 \text{ MJ/dia} = 1,810 \times 10^{12} \text{ J/dia.}$
- energia líquida do processo de incineração é calculada pela Equação 5.26  
 $= 90,397 \times 10^{12} - 1,810 \times 10^{12} = 88,587 \times 10^{12} \text{ J/dia} = 26,576 \times 10^{12} \text{ J}_{el}/\text{dia}$   
 $= 797,283 \times 10^{12} \text{ J}_{el} / \text{mês} = 221,47 \text{ GWh mensal.}$

Considerando o consumo médio de energia elétrica de uma residência brasileira de 0,6342  $\text{GJ}_{el}/\text{mês}$ , o número de residência que pode ser atendida com esta energia é determinado usando Equação 5.21. Esta energia é suficiente para atender 1.257.143 residências.

## **Emissões**

A taxa de produção de  $\text{CO}_2$  da combustão do GLP corresponde a 3,019  $\text{kg CO}_2 / \text{kg de GLP}$  (Tabela 5.1). A taxa de produção de  $\text{CO}_2$  da incineração do lodo foi usado, neste trabalho, como sendo o valor médio de 25  $\text{tCO}_2 / \text{TJ}$  (Tab. 5.1). Para obter a emissão total no processo de incineração, calcula-se as emissões de cada um dos itens e soma-os.

Emissões na queima do GLP são calculadas usando Equação 5.28 e as emissões de  $\text{CO}_2$  gerado na incineração do lodo são calculadas pela Equação 5.29.

- Quantidade de  $\text{CO}_2$  emitida na combustão do GLP  
 $= 3,019 \times 45198,648 = 136454,72 \text{ kg CO}_2/\text{dia} = 136,455 \text{ t CO}_2/\text{dia.}$
- Quantidade de  $\text{CO}_2$  liberado na incineração do lodo  
 $= (25 \times 90,397 \times 10^{12}) / 10^{12} = 2259,925 \text{ t CO}_2/ \text{dia.}$
- Total das emissões de  $\text{CO}_2$  no processo de incineração do lodo

$$= 2259,925 + 136,455 = 2396,38 \text{ t CO}_2/\text{dia} = 0,875 \text{ MtCO}_2/\text{ano}.$$

### Água recuperada para reuso

Água recuperada para reuso consiste em 50% do esgoto =  $14.124.577 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

Valor médio de consumo de água no Brasil, em 2011, corresponde a 162,6 l/hab./dia, logo uma família composta de 3,5 membros consome  $0,569 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

Usando Equação 5.22, tem-se que a água recuperada é suficiente para atender 24.823.510 residências ou 40% das residências brasileiras, considerando o total de 62.300.000 de residências, em 2013.

Esses valores merecem uma reflexão, tendo em vista que 10,6% dos municípios brasileiros não dispõem de rede de distribuição de água potável e 65% dos municípios não tem rede coletora de esgoto, conforme MCidades (2013a). A Tabela 6.2 mostra o resumo dos resultados da proposta de tratamento (biológico e incineração) de ED no Brasil.

Tabela 6.2 Resultados da proposta de tratamento de ED no Brasil.

Descrição	Tratamento biológico e recuperação do biogás	Incineração
Esgoto gerado ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )	28.249.154	28.249.154
Lodo para tratamento (t/dia)	5.649.831	5.649.831
Biogás gerado ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )	5.367.339	
Energia do biogás (J/dia)	$128,816 \times 10^{12}$	.
Energia da incineração (J/dia)		$90,397 \times 10^{12}$
Energia do biogás (J/mês)	$3220,4 \times 10^{12}$	.
Energia da incineração (J/mês)		$2711,9 \times 10^{12}$
Energia do biogás ( $J_{el}/\text{mês}$ )	$966,12 \times 10^{12}$	.
Energia do biogás (GWh mensal)	268,37	.
Energia líq. da incineração (J/dia)		$88,587 \times 10^{12}$
Energia líq. da incineração ( $J_{el}/\text{dia}$ )		$26,576 \times 10^{12}$
Energia líq. da incineração ( $J_{el}/\text{mês}$ )	.	$797,283 \times 10^{12}$
Energia da incineração (GWh mensal)		221,47
Nº de residência a ser atendida <sup>1</sup>	1.523.368	1.257.143
Emissões (t $\text{CO}_2/\text{dia}$ )	9.822	2396,38
Emissões (Mt $\text{CO}_2/\text{ano}$ )	3,585	0,875
Água recuperada para reuso $\text{m}^3/\text{dia}$	14.124.577	14.124.577
Nº de residências a ser atendida <sup>2</sup>	24.823.510	24.823.510

<sup>(1)</sup> Considerando a média nacional de consumo de EE/residência =  $0,6342 \text{ G } J_{el}/\text{mês}$ .

<sup>(2)</sup> Considerando o consumo médio mensal de uma residência de  $0,569 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

## **6.4 Discussão dos resultados em âmbito nacional**

### **6.4.1 Realidade brasileira**

Análise dos resultados mostra que a realidade do RSU e de ED no país é crítica e desafiadora porque envolve riscos à saúde pública e ao ambiente, além de evidenciar enorme desperdício energético e econômico. Os sistemas implantados para prover saneamento básico não são eficientes nem suficientes para atender a demanda crescente da população. O panorama nacional demonstra que RSU e ED gerados por quase 200 milhões de habitantes são desprezados. A reciclagem, com índice em torno de 1,2%, é adotada por menos de 20% dos municípios brasileiros (IBGE, 2010).

### **6.4.2 Propostas de tratamento de RSU**

#### **Reciclagem**

Considerando que a reciclagem é uma forma importante de reaproveitamento e de minimização de resíduo, neste trabalho, é proposto que 10% do resíduo reciclável seja reciclado. Acredita-se que esse percentual possa ser alcançado por meio de algumas ações, dentre as quais, prioridade nas políticas públicas e implantação de programa de esclarecimento público, a exemplo do que fez o Reino Unido para aumentar sua taxa de adesão à coleta seletiva, resultando na elevação em 19% do montante de reciclável coletado no período pré e pós campanha que durou cerca de 4 semanas (Read et al., 1999).

A reciclagem de 10% do potencial de embalagem pós-consumo disponível no RSU do Brasil, conforme Tabela 6.1, corresponde a cerca de 8 mil t/dia. Se comercializado pode render mensalmente a quantia de R\$ 109 milhões, ou seja, 2,6 vezes mais o valor de 2008. Esse valor corresponde a 151.480 salários mínimos (valor base de janeiro de 2014) que corresponde a R\$ 724,00. Parte desse dinheiro pode ser investido na coleta seletiva e em infraestrutura dos galpões de triagem e beneficiamento dos recicláveis como incentivo à atividade desenvolvida por cooperativas e associações integradas às prefeituras.

Além disso, esse valor acumulado por um ano é suficiente para aquisição de 4 plantas de incineração em massa com sistema sofisticado de controle e monitoramento de emissões,

conforme imposição das normas europeias, ao custo unitário de cada planta em torno de R\$ 300 milhões para incinerar resíduo não reciclável. A energia evitada na reciclagem anualmente é equivalente à potência instalada da hidroelétrica de Machadinho (1.140 MW) no Rio Pelotas, localizada no estado do Rio de Janeiro (MME, 2010). Além disso, a reciclagem evita a liberação na atmosfera de cerca de 6 MtCO<sub>2</sub>/ano o que não deixa de ser uma contribuição importante para conter o aquecimento global.

### **Aterramento de RSU**

Com relação à proposta de tratamento biológico, o aterramento de 199 mil toneladas diárias de resíduo orgânico, como mostrado na Tabela 6.1, pode gerar em torno de 7 Mm<sup>3</sup>/dia de biogás que, descontado os quase 2 Mm<sup>3</sup>/dia de biogás fugitivo, a parcela coletada se, queimada numa caldeira produzirá vapor que em uma turbina acoplada ao gerador elétrico produzirá cerca de 221 milhões de kWh mensal de eletricidade. Essa quantidade de energia, equivalente ao consumo de cerca de 1,3 milhão residências, corresponde a R\$ 86 milhões/mês, considerando o valor cobrado pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), em setembro de 2013, de R\$ 0,389/kWh ou 119 mil salários mínimos. Esse montante acumulado é suficiente para a compra anual de três sofisticadas plantas de incineração em massa.

Em adição, o vapor na saída da turbina pode ser aproveitado para pré-aquecer a água de alimentação da caldeira ou em trocadores de calor para melhorar a eficiência global do sistema. Alternativa é queimar o biogás na câmara de combustão da turbina, para gerar energia mecânica que será convertida em energia elétrica pelo gerador acoplado à turbina. Os gases quentes de saída da turbina a gás geralmente são aproveitados para pré-aquecer o ar de combustão da turbina e ou aquecer o ar em uso industrial.

Quanto às emissões, a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada na produção de energia a partir do biogás corresponde a cerca de 4 MtCO<sub>2</sub> que é da mesma ordem das emissões evitadas na reciclagem. Entretanto, se considerar as emissões fugitivas, no balanço geral, o custo ambiental torna-se muito alto, ou seja, 19 MtCO<sub>2</sub>/ano.

## **Incineração**

Os resultados mostram que na incineração de quase 200 mil t/dia de RSU, a energia térmica líquida liberada corresponde a quase 37 mil TJ/ mês ou 10 mil TJ<sub>el</sub>/mês que corresponde a R\$ 1,1 bilhão/mês ou 1,5 milhão de salários mínimos, considerando o valor do salário vigente a partir de janeiro de 2014, de R\$ 724,00. Essa energia é suficiente para atender a demanda de 16,5 milhões de residências ao consumo médio de 0,6342 GJ<sub>el</sub>/ mês.

Comparando as emissões liberadas nos dois sistemas de tratamento, tem-se que a emissão na incineração é da ordem de 13 MtCO<sub>2</sub>/ ano e no aterramento a emissão corresponde a 3,88 MtCO<sub>2</sub> / ano. Quando somada a emissão do biogás fugitivo do aterro na ordem de 15,251 MtCO<sub>2</sub>/ ano, o total de emissões proveniente do aterramento chega a 19 MtCO<sub>2e</sub>, ou seja, quase o dobro da incineração. A comparação da produção de energia, em ambos os processos, mostra que a quantidade gerada na incineração corresponde a 13 vezes a energia gerada no aterramento.

É importante salientar, porém, que a energia líquida computada nos processos de tratamento representa o potencial disponível. No caso do aterramento, não foi considerada a energia gasta com transporte de resíduo, manejo, iluminação, bombeamento de biogás e outros. No caso da incineração, não foi incluída a energia gasta com transporte, máquinas para manejo do material dentro da planta, bombeamento de água para lavagem dos gases, bombeamento de ar para combustão e outros.

### **6.4.3 Proposta de tratamento de ED**

#### **Biodigestão**

Os resultados apresentados na Tabela 6.2 referentes à proposta de biodigestão do ED para o Brasil mostram que os 5.6 Mt/dia de lodo produzidos pela população urbana, no processo de digestão anaeróbica em reator, produz cerca de 5.4 Mm<sup>3</sup> biogás/ dia que, convertido em energia elétrica pode resultar em cerca de 268 GWh mensal, o equivalente ao consumo de energia de 1.5 milhão de residências. Essa energia corresponde a R\$ 104 milhões/mês ou 144 mil salários mínimos no valor vigente a partir de janeiro de 2014. Com relação à queima do biogás, este libera

na atmosfera cerca de 3,6 MtCO<sub>2</sub>/ano. Enquanto a água recuperada para reuso corresponde a 14 Mm<sup>3</sup>/dia, equivalente ao consumo de cerca de 25 milhões de residências.

## **Incineração**

Quanto a proposta de incineração do lodo de esgoto do Brasil, os resultados apresentados na Tabela 6.2 mostram que a energia elétrica gerada equivale ao consumo de 1,2 milhão de residências, corresponde a R\$ 86 milhões/mensais ou 119 mil salários mínimos. As emissões totalizam 0,875 MtCO<sub>2</sub>/ano. Além do reaproveitamento de água para 25 milhões de residências.

### **6.4.4 Considerações**

Enfim, tratamento de esgoto oferece uma série de benefícios, dentre os quais, o potencial de geração de energia que pode diminuir a demanda por novas hidroelétricas. Além disso, corpos d'água como rios, praias, mares e lagoas ficarão livres das cargas de esgoto bruto lançadas diariamente impactando o ecossistema. O reaproveitamento da água residuária se apresenta como mais um benefício a ser contabilizado, ou seja, o grande volume de água que pode ser recuperado e reutilizado para diversos fins na indústria, na agricultura ou na área urbana para irrigação de jardins públicos, banheiros e outros contribui para a sustentabilidade da cidade.

Entretanto, para reverter a realidade apresentada, em 2008, sobre RSU e ED no país, torna-se necessário recursos financeiros e vontade política. Municípios que fazem uso de lixão para dispor seu resíduo têm prazo para fechá-lo até agosto de 2014 por exigência da Lei nacional 12.305 de 2010. Por isso, vão ter que encontrar solução para deposição dos resíduos de forma adequada. Uma alternativa que pode ser viável é a formação de parcerias com o setor privado para financiar projetos e instalações de tratamento de resíduo e esgoto em troca de incentivos fiscais.

É possível incinerar lodo junto com RSU usando incineradores de massa. A tecnologia está disponível internacionalmente e usada em muitos países. Vantagens de incinerar esses dois tipos de resíduo são obtidas como redução dos investimentos, maiores controles de poluição, além de restar apenas cerca de 10% do volume inicial na forma de cinza que também pode ser reusada ou reciclada.

A tecnologia de incineração necessita capacitação específica do corpo técnico responsável, infraestrutura e financiamento para manutenção e aquisição dos equipamentos.

Foi visto nos tratamentos de RSU e de ED, os vários processos que necessitam e/ou liberam calor, além do material que pode ser usado em ambos os tratamentos. Assim, a localização das usinas de tratamento próximas uma da outra facilita a integração total ou parcial, economiza material e reduz as perdas com transporte (Tchobanoglous et al.,1993).

A redução de volume de RSU devido à incineração pode ser a solução para cidades onde não há área disponível para transformá-la em aterro. Além disso, aterramento de RSU, no entanto, pode ser considerado apenas medida paliativa de disposição, porque mesmo apresentando custo menor de tratamento por tonelada, entre R\$ 80 a 140, o volume de resíduo é reduzido em 25 a 30%, portanto, há necessidade de aterro. Além disso, após encerramento das atividades, o aterro continua produzindo biogás até a fase de decaimento representar pequena quantidade que inviabiliza sua coleta para gerar energia, mas há risco de explosão no local bem como vazamento de chorume pela camada de fundo do aterro.

Com isso, termina aqui a seção de apresentação dos resultados e discussão referentes à proposta de tratamento de RSU e ED no contexto do país como um todo e, na sequência, são apresentados os resultados obtidos a partir dos cálculos com base na realidade de cada município selecionado para estudo e, na sequência, são apresentados os resultados da proposta deste trabalho para os três municípios de grande porte seguindo o mesmo procedimento de cálculo usado no Brasil.

## **6.5 Discussão dos resultados do município de Belém (PA)**

### **6.5.1 Realidade do manejo do RSU e do ED**

O resultado dos cálculos realizados a partir dos dados do MCidades (2013a,b) para Belém mostra que, em 2011, houve desperdícios de ordem econômica, energética e ambiental na medida em que todo RSU coletado foi praticamente disposto no solo sem controle. A quantidade de biogás gerado e desperdiçado proveniente do RSU disposto no solo correspondeu a cerca de 9 Mm<sup>3</sup>/ano sendo liberado livremente na atmosfera cerca de 106 Mm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>e/ano contribuindo

para o aquecimento global. Situação ainda mais crítica representa o ED, cujo tratamento corresponde a 1,6% do total gerado.

### **6.5.2 Proposta de tratamento de RSU**

Seguindo o mesmo procedimento de cálculo, obtém-se os resultados como mostra Tabela 6.3.

#### **Reciclagem**

O resultado da proposta de reciclagem para o município de Belém mostra, conforme Tabela 6.3, que o reaproveitamento de 10% de reciclável, totalizado em 12 mil t/ano pode render em torno de R\$ 5,5 milhões/ano que corresponde a 7,6 mil salários mínimos, valor vigente a partir de janeiro de 2014. Uma parte dessa verba pode ser direcionada para programas educacionais visando ao aumento da adesão da população para separar o reciclável em seu domicílio, enquanto outra parte pode ser investida em caminhão para o transporte dos recicláveis e na infraestrutura do galpão de triagem e beneficiamento. Acredita-se que essas ações podem aumentar o índice de reciclagem no município bem como promover a inclusão social com a inserção de desempregados nesse mercado de trabalho.

Com relação à energia, os 10% de reaproveitamento de reciclável pode evitar o uso de cerca de 32 mil GJ/mês, equivalente ao consumo de cerca de 50,5 mil residências. Além disso, a reciclagem evita a emissão de cerca de 2 mil tCO<sub>2</sub>/mês.

#### **Aterramento**

O aterramento de cerca de 290 mil t/ano de matéria orgânica do município de Belém para recuperação de energia, conforme Tabela 6.3, pode gerar em torno de 8,7 Mm<sup>3</sup>/ano de biogás descontado os quase 3 Mm<sup>3</sup>/ano de biogás fugitivo. Esse biogás efetivamente coletado se, convertido em energia elétrica, pode gerar em torno de 3,3 TJ<sub>el</sub> mensal. Essa quantidade de energia equivale ao consumo de cerca de 5,2 mil residências. Essa energia produzida a partir do biogás corresponde em torno de 923 MWh mensal.

Considerando o custo unitário de R\$ 0,389/kWh de energia elétrica cobrado pela CPFL, empresa distribuidora de energia em Campinas (SP), em setembro de 2013, a energia do biogás totaliza 923 mil kWh com custo equivalente em torno de R\$ 360 mil mensal. Na produção de energia a partir do biogás de aterro, as emissões são da ordem de 16 mil tCO<sub>2</sub>/ano, o que representa 4 vezes menos as emissões liberadas pelo biogás fugitivo.

Tabela 6.3 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de Belém (PA)

<b>Descrição</b>	<b>Reciclagem</b>	
RSU coletado (t/ano)	388.643	
Potencial de reciclável disponível (t/ano)	121.645,26	
Reciclável para venda (t/ano)	12.164,53	
Renda da venda do reciclável (R\$ / ano)	5.474.037	
Energia evitada na reciclagem( GJ / ano)	384.751,92	
Emissão evitada na reciclagem (tCO <sub>2</sub> / ano)	23.976,29	
<b>Tratamento de RSU</b>	<b>Aterramento com recuperação do biogás</b>	<b>Incineração</b>
Matéria orgânica para aterramento (t / ano)	289.927,68	
Resíduo para incineração (t / ano)		299.255,1
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /ano)	11.597,107	
Biogás coletado (m <sup>3</sup> /ano)	8.697.830,34	
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> /ano)	2.899.276,78	
Energia da incineração (J/ano)		1834,43x 10 <sup>12</sup>
Energia do (biogás J/ano)	132,88 x 10 <sup>12</sup>	
Energia liq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		45,86 x 10 <sup>12</sup>
Energia liq. da incineração (GWh mensal)		12,739
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)	3,322 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh mensal)	0,923	
Nº de residência que pode ser atendida <sup>1</sup>	5238	72.312
Emissão (tCO <sub>2</sub> / ano)	15.917,03	45.867,98
Emissão do biogás fugitivo (tCO <sub>2</sub> e /ano)	62.606,98	

<sup>(1)</sup> Considerando o consumo médio nacional de EE por residência = 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês.

## Incineração

Os resultados da proposta de incineração de cerca de 77% do RSU de Belém produz em torno de 12,7 GWh mensal de energia líquida equivalente ao consumo de pelo menos 72 mil residências considerando a média nacional de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês. Essa quantidade de energia, que corresponde a 12,7 GWh mensal ao preço de aproximadamente R\$ 0,389/kWh (valor cobrado pela CPFL em setembro de 2013) corresponde a cerca de R\$ 5 milhões.

Comparando a energia liberada pelo biogás com a da incineração (Tabela 6.3), esta corresponde 14 vezes a gerada no aterro. A quantidade de emissões liberadas pela energia do biogás corresponde a 1/3 da liberada na incineração, mas quando somada com a emissão fugitiva do aterro, esta representa quase o dobro da incineração.

### **6.5.3 Resultados da proposta de tratamento ED**

Seguindo o mesmo procedimento de cálculo, obtém-se os resultados como mostra Tabela 6.4.

#### **Biodigestão**

Resultado da proposta de tratamento de ED em Belém, Tabela 6.4, mostra que a energia elétrica gerada pela biodigestão de 38,7 mil t/dia de lodo corresponde ao consumo de cerca de 10,4 mil residências, quase 6,6 TJ<sub>el</sub>/ mês. Em custo, essa energia corresponde a cerca de R\$ 715 mil/mês, considerando o valor de R\$ 0,389/kWh cobrado pela companhia de energia, em 2013, para Campinas. Assim, a energia gerada a partir da biodigestão do lodo do esgoto corresponde a potência de 2,6 MW. Com relação à emissão de CO<sub>2</sub> liberada pela energia gerada a partir do biogás, totaliza-se em quase 25 mil tCO<sub>2</sub>/ano.

#### **Incineração**

O resultado da proposta de incineração para lodo de esgoto de Belém mostra que as 38,7 mil t/dia incineradas pode produzir cerca de 5,5 TJ<sub>el</sub>/ mês, equivalente ao consumo de quase 8,6 mil residências. O custo dessa energia, considerando o valor cobrado em Campinas, no mês de setembro de 2013, corresponde a cerca de R\$ 590 mil. Assim, a energia gerada a partir da incineração do lodo do esgoto corresponde a potência de 2,1 MW.

Comparando o resultado dos dois sistemas de tratamento observa-se que a quantidade de energia gerada em ambos sistemas é da mesma ordem, entretanto, a diferença está nas emissões de CO<sub>2</sub>. Na biodigestão, as emissões correspondem a 3 vezes mais à da incineração. Com relação à água, a recuperação de 50% da água residuária equivale ao consumo de mais de 6 mil residências ou 4% dos cerca de 150 mil domicílios que não têm acesso à rede geral de distribuição de água no município.

Tabela 6.4 Resultados da proposta de tratamento do ED para Belém (PA)

Descrição	Tratamento biológico com recuperação do biogás	Incineração
Esgoto gerado (m <sup>3</sup> / dia)	193.406,5	193.406,5
Massa de lodo para biodigestão (t /dia)	38,6813	
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /dia)	36.747,24	
Massa de lodo para incineração (t /dia)		38,6813
Energia do biogás (J/dia)	0,734945 x 10 <sup>12</sup>	
Energia da incineração (J/dia)		0,6189 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J/mês)	22,048 x 10 <sup>12</sup>	
Energia da incineração (J/mês)		18,567 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)	6,615 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh mensal)	1,837	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		5,4586 x 10 <sup>12</sup>
Energia da incineração (GWh mensal)		1,516
Nº de residência que pode ser atendida <sup>1</sup>	10431	8607
Emissão (tCO <sub>2</sub> /ano)	24.545,3	5.988,4
Água recuperada para reuso (m <sup>3</sup> / mês)	2.901.098	2.901.098
Nº de residência que pode ser atendida <sup>2</sup>	193.406	193.406

<sup>(1)</sup> Considerando o consumo médio nacional de EE por residência = 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês.

<sup>(2)</sup> Considerando o consumo médio mensal de 15 m<sup>3</sup>/residência.

Com base nos resultados, a incineração é a sugestão para tratamento de RSU e ED em Belém, tendo em vista que os gastos municipais com RSU, em 2011, totalizaram-se em torno de R\$ 30 milhões, conforme MCidades (2013a, 2013b). Esse valor, acumulado em 10 meses, é suficiente para o município adquirir uma planta de incineração onde poderá tratar tanto o RSU quanto o ED. O município coleta cerca de 800 t / dia de RSU e gera também 39 t/ dia de lodo de esgoto, neste caso, uma unidade de incineração em massa com capacidade para 1000 t / dia é suficiente.

## 6.6 Discussão dos resultados do município de São Luís (MA)

### 6.6.1 Realidade do manejo do RSU e do ED

A partir dos dados apresentados pelo MCidades (2013a, 2013b) observa-se que o município de São Luís (MA), perde grande potencial energético e econômico com o RSU e o ED gerado, apresentando, dessa forma, sistemas de tratamento deficitário e que não atendem as necessidades básicas de saneamento da população.

## 6.6.2 Proposta de tratamento de RSU

### Reciclagem

O resultado da proposta de reaproveitamento de 10% dos recicláveis gerados no município de São Luís (MA), em torno de 13 mil t/ano, pode render a quantia de R\$ 5,8 milhões/ano que corresponde a cerca de 8 mil salários mínimos nacional de R\$ 724,00 valor vigente em janeiro de 2014. Parte dessa verba pode ser revertida em prol do programa de coleta seletiva, tais como campanhas educacionais, compra de equipamentos e melhoria das instalações para as atividades de beneficiamento dos recicláveis.

Além do recurso financeiro, a energia evitada ou que deixou de ser gasta no processo produtivo devido à substituição da matéria-prima por matéria reciclada corresponde a quase 410 mil GJ/ano ou 34GJ/mês. Essa energia equivale ao consumo de cerca de 54 mil residências (considerando 0.6342 GJ<sub>el</sub> como média nacional de consumo). Como consequência, evita ainda a emissão na atmosfera de cerca de 25,5 mil tCO<sub>2</sub>/ano.

### Aterramento

Aterramento da matéria orgânica contida no RSU com recuperação de energia no município de São Luís corresponde em torno de 309 mil t/ano, conforme Tabela 6.5, podendo gerar em torno de 9,3 Mm<sup>3</sup>/ano de biogás descontado os 3 Mm<sup>3</sup>/ano de biogás fugitivo. Esse biogás efetivamente coletado se, convertido em energia elétrica, pode gerar em torno de 3,5 TJ<sub>el</sub> mensal. Essa quantidade de energia equivale ao consumo de cerca de 5,6 mil residências, com base no consumo médio nacional de 0.6342 GJ<sub>el</sub>/mês.

Considerando o custo unitário de R\$ 0,389/kWh de energia elétrica cobrado pela CPFL, em setembro de 2013, a energia do biogás (= 983 mil kWh mensal) tem valor estimado em R\$ 382 mil mensal. Na produção de energia a partir do biogás de aterro, as emissões correspondem a cerca de 17 mil tCO<sub>2</sub>/ano, o que representa 3 vezes menos as emissões liberadas pelo biogás fugitivo.

## Incineração

A incineração de 77% do RSU de São Luís produz em torno de 12,9 GWh mensal de energia líquida. Equivale ao consumo de pelo menos 73 mil residências considerando a média nacional de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês. Ao custo unitário de R\$ 0,389/kWh (valor cobrado pela CPF em setembro de 2013) a energia elétrica produzida pela incineração corresponde a cerca de R\$ 5 milhões.

Comparativamente, a energia liberada na incineração corresponde a cerca de 13 vezes a gerada no aterro. Com relação às emissões, a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada pela energia do biogás corresponde a 30% da liberada na incineração, mas quando somada com a emissão fugitiva, o biogás de aterro representa quase 1,5 vez a emissão na incineração.

Repetindo o procedimento de cálculo anterior, as Tabelas 6.5 e 6.6 mostram o resumo dos resultados da proposta de tratamento de RSU e de ED para o município de São Luís (MA).

Tabela 6.5 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de São Luís (MA)

Descrição	Reciclagem	
RSU coletado (t/ano)	413.852	
Recicláveis potencial disponível (t/ano)	129.535,7	
Reciclável para venda (t/ano)	12.953,57	
Renda da venda do reciclável (R\$/ano)	5.829.105,4	
Energia evitada na reciclagem (GJ/ano)	409.708,5	
Emissão evitada na reciclagem (tCO <sub>2</sub> /ano)	25.531,5	
Tratamento de RSU	Aterramento	Incineração
Matéria orgânica para aterro (t/ano)	308.733,6	
Resíduo para incineração (t/ano)		318.666
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /ano)	12.349.344	
Biogás coletado (m <sup>3</sup> /ano)	9.262.008	
Energia da incineração (J/ano)		1953,4 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J/ano)	141,500 x 10 <sup>12</sup>	
Energia líquida da incineração (J /ano)		1851,3 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J <sub>el</sub> / mês)	3,538 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh mensal)	0,983	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		46,283 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh mensal)		12,857
Nº de residências que podem ser atendidas <sup>1</sup>	5.579	72.887
Emissão (tCO <sub>2</sub> / ano)	16.949,48	56.473
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> biogás / ano)	3.087.336	
Emissões do biogás fugitivo (m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> e/ano)	36.430.564,8	
Massa de CO <sub>2</sub> e biogás fug.( tCO <sub>2</sub> e /ano)	66.667,93	

<sup>(1)</sup> Considerando a média nacional de consumo de energia elétrica por residência = 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês.

### 6.6.3 Proposta de tratamento de ED

#### Biodigestão

O resultado da proposta de tratamento de ED em São Luís (MA) mostra que a energia elétrica gerada pela biodigestão de 38 mil t/dia de lodo, como mostra Tabela 6.6, corresponde ao consumo de cerca de 10,3 mil residências, ou quase 6,5 TJ<sub>el</sub> / mês. Em custo, essa energia corresponde a cerca de R\$ 700 mil/mês, considerando o valor de R\$ 0,389/kWh cobrado pela companhia de energia, em Campinas em 2013. Com relação às emissões, a energia gerada a partir do biogás libera na atmosfera cerca de 24 mil tCO<sub>2</sub>/ano.

#### Incineração

O resultado da proposta de incineração para lodo de esgoto de São Luís (MA) mostra que as 38 mil t/dia incineradas pode produzir cerca de 5,4 TJ<sub>el</sub> / mês. Essa quantidade de energia, como mostra Tabela 6.6, equivale ao consumo de quase 8,5 mil residências. O custo dessa energia, considerando o valor cobrado em Campinas, no mês de setembro de 2013, corresponde a cerca de R\$ 580 mil.

Tabela 6.6 Resultados da proposta de tratamento de ED para a cidade de São Luís (MA)

Descrição	Tratamento biológico	Incineração
Esgoto gerado (m <sup>3</sup> / dia)	190.201,54	190.201,54
Massa de lodo (t/dia)	38.040	38.040
Biogás gerado (m <sup>3</sup> / dia)	36.138,29	
Energia do biogás (J/dia)	0,72277 x 10 <sup>12</sup>	.
Energia da incineração (J/dia)		0,608645 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J/mês)	21,683 x 10 <sup>12</sup>	
Energia líq. da incineração (J/mês)		17,8937 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J <sub>el</sub> / mês)	6,505 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh / mês)	1,807	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> / mês)	.	5,368 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh/mês)		1,491
Nº de residências que podem ser atendidas <sup>1</sup>	10.257	8464
Emissão (t CO <sub>2</sub> / dia)	66,133	16,135
Emissão (t CO <sub>2</sub> / ano)	24.138,57	5889,2
Água recuperada para reuso (m <sup>3</sup> /dia)	95.101	
Nº de casas atendidas <sup>2</sup>	135.860	

<sup>(1)</sup> Considerando a média de consumo nacional de EE por residência de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês.

<sup>(2)</sup> Considerando o consumo médio local de água por residência de 21 m<sup>3</sup>/mês.

Comparativamente, os resultados dos dois sistemas de tratamento proposto produzem na mesma ordem a quantidade de energia, entretanto, a diferença está nas emissões de CO<sub>2</sub>. Na biodigestão, as emissões correspondem a 3 vezes mais a da incineração. Com relação à água, a recuperação de 50% da água residuária pode suprir a demanda de mais de 6 mil residências onde a rede de distribuição está ausente. O material remanescente à biodigestão pode ser tratado e usado como adubo na agricultura ou na correção de solo, além de outras aplicações.

Assim, a incineração pode ser vista como melhor opção para tratamento de RSU. Para ED, o sistema de tratamento biológico com geração de energia do biogás apresenta-se como melhor opção.

Como no município de São Luís são coletadas cerca de 850 t / dia de RSU e 38 t/dia de lodo de esgoto, o ideal seria que ambos fossem tratados em uma planta de incineração com capacidade para 1000 t/ dia.

## **6.7 Discussão dos resultados do município de Campinas (SP)**

### **6.7.1 Realidade do manejo do RSU e do ED**

A realidade do manejo de RSU e de ED no município de Campinas mostra que quase todo RSU coletado é disposto no solo sem recuperação de energia, enquanto menos de 50% do ED é tratado.

### **6.7.2 Proposta de tratamento de RSU**

#### **Reciclagem**

O resultado da proposta de reciclagem para o município de Campinas (SP) mostra, conforme Tabela 6.7, que o reaproveitamento de 10% de reciclável, totalizada em 12,7 mil t/ano pode render cerca de R\$ 5,7 milhões/ano. Esse valor corresponde a 7,6 mil salários mínimos nacional, valor praticado em janeiro de 2014. Uma parte dessa verba pode ser direcionada à programas educacionais necessários para aumentar o índice de reciclagem no município.

Com relação à energia, o reaproveitamento de 10% de reciclável pode evitar o uso de cerca de 33 mil GJ/mês, equivalente ao consumo de cerca de 53 mil residências, considerando o

consumo médio nacional por residência de 0,6342 GJ<sub>e</sub> mensal. Além disso, a reciclagem evita a emissão de cerca de 25 mil tCO<sub>2</sub>/mês.

### **Aterramento**

O aterramento de cerca de 200 mil t/ano de matéria orgânica do município de Campinas com recuperação de energia, conforme Tabela 6.7, pode gerar em torno de 6 Mm<sup>3</sup>/ano de biogás descontado os quase 2 Mm<sup>3</sup>/ano de biogás fugitivo. Esse biogás efetivamente coletado se, convertido em energia elétrica, pode gerar em torno de 2,3 TJ<sub>el</sub> mensal. Essa quantidade de energia equivale ao consumo de cerca de 3,5 mil residências, à base de consumo médio nacional de 0.6342 GJ<sub>el</sub> / mês.

Considerando o custo unitário de R\$ 0,389/kWh de energia elétrica cobrado pela CPFL, em setembro de 2013, a energia do biogás que corresponde a 823 mil kWh mensal corresponde em torno de R\$ 244 mil mensal. Na produção de energia a partir do biogás de aterro, as emissões correspondem a cerca de 10,8 mil tCO<sub>2</sub>/ano, o que representa cerca de 4 vezes menos as emissões liberadas exclusivamente pelo biogás fugitivo.

### **Incineração**

Os resultados da proposta de incineração de cerca de 77% do RSU do município de Campinas produz em torno de 9,6 GWh mensal de energia líquida, equivalente ao consumo de pelo menos 55 mil residências considerando a média nacional de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês. Essa quantidade de energia, que corresponde a 9,6 GWh ao preço de R\$ 0,389/kWh (valor cobrado pela CPFL em setembro de 2013) corresponde a cerca de R\$ 3,7 milhões.

Comparando a energia produzida nos dois sistemas propostos (aterramento e incineração) a da incineração corresponde a cerca de 11 vezes a gerada pelo aterramento.

Sobre as emissões, a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada pela energia do biogás corresponde a 1/4 da liberada na incineração, mas quando somada com a emissão fugitiva do aterro, esta representa 1,3 a emissão da incineração.

Seguindo o mesmo procedimento de cálculo aplicado nos casos anteriores, as Tabelas 6.7 e 6.8 mostram os resultados do tratamento proposto para a cidade de Campinas.

Tabela 6.7 Resultados da proposta de tratamento de RSU para Campinas (SP)

Descrição	Realidade em 2011	Proposta	
		<b>Reciclagem</b>	
RSU coletado (t/ano)		308.506	
Reciclável coletado (t/ano)	3.749,3		
Potencial de reciclável disponível (t/ano)	.	126.488	
Reciclável para venda (t/ano)		12.648,8	
Renda da venda de reciclável (R\$/ano)	1.687.185	5.691.960	
Energia evitada na reciclagem (GJ/ano)	118.586,6	400.068,9	
Emissão evitada na reciclagem (tCO <sub>2</sub> /ano)	7.389,9	24.930,8	
<b>Tratamento de RSU</b>		<b>Aterramento</b>	<b>Incineração</b>
Matéria orgânica para aterro (t/ano)		197.443,8	.
Resíduo para incineração (t/ano)			239.092,15
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /ano)		7.897.753,6	
Biogás coletado (m <sup>3</sup> /ano)		5.923.315,2	
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> /ano)		1.974.438,4	
Energia da incineração (J/ano)			1465,63 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J/ano)		90,4935 x 10 <sup>12</sup>	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /ano)			439,69 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)			34,726 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh/mês)			9,646
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)		2.2623 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh/mês)		0,6284	
Nº de residência a ser atendida <sup>1</sup>		3567	54.756
Emissão (t CO <sub>2</sub> / ano)		10.839,67	42.415
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> biogás / ano)		1974.438,4	
Emissão de biogás fug.(m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> e/ano)		23.298.373,12	
Massa biogás fugitivo (tCO <sub>2</sub> e / ano)		42.636,02	

<sup>(1)</sup> Considerando o consumo médio nacional de EE de uma residência de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês.

### 6.7.3 Proposta de tratamento de ED

#### Biodigestão

O resultado da proposta de tratamento de ED em Campinas (Tabela 6.8) mostra que a energia elétrica gerada pela biodigestão de 44,2 mil t/dia de lodo equivale ao consumo de cerca de 12,5 mil residências, ou quase 8 TJ<sub>el</sub> / mês. Em custo, essa energia corresponde a cerca de R\$ 858 mil/mês, considerando o valor de R\$ 0,389/kWh cobrado pela companhia de energia do

município, em 2013. Com relação à emissão, a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada pela energia gerada a partir do biogás totaliza-se em quase 30 mil tCO<sub>2</sub>/ano.

## Incineração

O resultado da proposta de incineração para lodo de esgoto de Campinas, conforme Tabela 6.8, mostra que as 46,5 mil t/dia incineradas pode produzir cerca de 6,6 TJ<sub>el</sub> / mês, essa quantidade de energia equivale ao consumo de quase 10,3 mil residências. O custo dessa energia, considerando o valor cobrado em Campinas, no mês de setembro de 2013, corresponde a cerca de R\$ 710 mil.

Comparando o resultado dos dois sistemas de tratamento, observa-se que a quantidade de energia gerada é da mesma ordem, mas as emissões de CO<sub>2</sub> apresentam diferenças significativas. Na biodigestão, as emissões correspondem a cerca de 3 vezes mais à da incineração. Com relação a água, a recuperação de 50% da água residuária equivale ao consumo de mais de 140 mil residências. Tabela 6.8 mostra o resultado da proposta de tratamento de ED para o município de Campinas (SP).

Tabela 6.8 Resultados da proposta de tratamento de ED para Campinas (SP)

Descrição	Tratamento biológico	Incineração
Esgoto gerado (m <sup>3</sup> / dia)	232.477,3	232.477,3
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /dia)	44171	
Lodo para incineração (t /dia)		46,4955
Energia do biogás (J /dia)	0,8834 x 10 <sup>12</sup>	
Energia da incineração (J /dia)	.	0,7439 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J <sub>el</sub> / mês)	7,951 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh /mês)	2,209	
Energia líq.da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		6,561 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh /mês)		1,823
Nº de residência que pode ser atendida <sup>1</sup>	12.536	10.345
Emissão (tCO <sub>2</sub> / dia)	80,83	19,721
Emissão (t CO <sub>2</sub> /ano)	29.503,7	7198,24
Água recuperada para reuso (m <sup>3</sup> /dia)	116.239	116.239
Nº de residência que pode ser atendida <sup>2</sup>	139.500	139.500

(1) Considerando o consumo médio nacional de energia elétrica por residência de 0,6342 GJ /mês.  
el

(2) Considerando o consumo médio local de 25 m<sup>3</sup> / mês/residência.

A partir dos resultados apresentados, considera-se que a incineração é a forma de tratamento mais adequada para o RSU em Campinas. Trata-se de uma solução para substituir o aterro municipal que terminou sua vida útil em 2013, e o município não dispõe de área para construção de um novo, conforme informação obtida no Departamento de Limpeza Urbana. A opção da incineração elimina essa necessidade, tendo em vista que sobra apenas cerca de 10% do RSU em forma de cinza podendo ser aproveitada para várias finalidades conforme já mencionado, além de manter a cidade limpa e ambientalmente sustentável.

Com relação ao ED, o sistema de tratamento biológico para Campinas é considerado uma opção viável desde que haja adequação da estrutura existente para recuperação de energia e geração de eletricidade. Neste caso, os ganhos energéticos são menores e as emissões são maiores mas a cidade tem suas usinas de tratamento de esgoto em boas condições de operação e, assim, podem ser aproveitadas e incrementadas com reatores e equipamentos necessários para gerar metano e produzir eletricidade.

Outra opção para este município, onde são coletadas cerca de 845 t/ dia de RSU e tem geração de cerca de 47 t / dia de lodo de esgoto, é tratá-los junto em uma planta de incineração com capacidade para 1000 t/dia.

A partir dos resultados apresentados, tem-se que, em geral, os três municípios brasileiros selecionados neste estudo, com população acima de um milhão de habitantes, dispõem de RSU e ED suficientes para gerar energia renovável e renda, enfim, desde que viabilizem e otimizem esses recursos existentes para benefício dos próprios municípios, tornando-os sustentáveis.

Com esta análise, finaliza-se aqui esta etapa de apresentação dos resultados e discussão da proposta para os três municípios de grande porte e, inicia-se com os mesmos procedimentos de cálculo, a apresentação dos resultados para os três municípios de pequeno porte.

## **6.8 Discussão dos resultados dos municípios de Mogi Guaçu, Moji Mirim e Itapira (SP)**

Os resultados apresentados nesta seção referem-se ao tratamento de RSU e de ED dos três municípios como mostram as Tabelas 6.9 a 6.14.

## **6.8.1 Proposta de tratamento de RSU**

### **Reciclagem**

O resultado da proposta de reciclagem para os municípios de Mogi Guaçu, de Moji Mirim e de Itapira (SP) mostra que o reaproveitamento de 10% de reciclável, totalizada em cerca de 300 t/mês, pode render mensalmente cerca de R\$ 135 mil/mês. Esse valor corresponde a 183,9 salários mínimos nacional, valor praticado em janeiro de 2014. Parte dessa verba pode ser aplicada em programas educacionais para aumentar o índice de reciclagem nesses municípios.

Com relação à energia, o reaproveitamento de 10% de reciclável pode evitar o uso de cerca de 114 TJ<sub>el</sub> /ano. Essa quantidade de energia é equivalente ao consumo de cerca de 179 mil residências, considerando o consumo médio nacional por residência de 0,6342 GJ mensal. Além disso, a reciclagem evita a emissão de cerca de 7 mil tCO<sub>2</sub>/ano.

### **Aterramento**

O aterramento de cerca de 36,4 mil t/ano de matéria orgânica desses três municípios circunvizinhos para recuperação de energia pode gerar em torno de 0,4146 TJ<sub>el</sub> / mês. Essa quantidade de energia equivale ao consumo de cerca de 654 residências, considerando o consumo médio nacional de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês.

Considerando ainda o custo unitário de R\$ 0,389/kWh de energia elétrica cobrado pela CPFL, em setembro de 2013, a energia elétrica do biogás que totaliza-se em 115 MWh mensal corresponde em torno de R\$ 44,8 mil mensal. Na produção de energia a partir do biogás de aterro, as emissões correspondem a cerca de 2 mil tCO<sub>2</sub>/ano, o que representa cerca de 0,25 das emissões liberadas pelo biogás fugitivo.

### **Incineração**

Os resultados da proposta de incineração do RSU mostra que os três municípios circunvizinhos produzem em torno de 4,2 TJ<sub>el</sub> /mês de energia líquida que equivale ao consumo de pelo menos 6,6 mil residências considerando a média nacional de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês. Essa quantidade de energia, que corresponde a cerca de 1,157 milhão kWh mês ao preço de

aproximadamente R\$ 0,389/kWh (valor cobrado pela CPFL em setembro de 2013) corresponde a cerca de R\$ 450 mil/mês.

Comparando a energia produzida a partir do biogás com a da incineração, esta corresponde a cerca de 8 vezes a gerada no aterro.

Sobre as emissões, a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada pela energia do biogás corresponde a 0,36 da liberada na incineração, mas quando somada com a emissão fugitiva do aterro, esta representa quase o dobro das emissões da incineração.

As Tabelas 6.9, 6.10 e 6.11 mostram os resultados da proposta de reciclagem, aterramento e incineração de RSU para os municípios de Mogi Guaçu, Moji Mirim e Itapira. Nestes cálculos foi considerado que o consumo médio nacional de energia elétrica de uma residência é 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês.

Tabela 6.9 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de Mogi Guaçu (SP)

<b>Descrição</b>	<b>Reciclagem</b>	
RSU coletado (t/dia)	104	
Potencial de reciclável disponível (t/dia)	49,57	
Recicláveis para venda (t/dia)	4,957	
Renda da venda do reciclável (R\$ / dia)	2231	
Renda da venda do reciclável (R\$ / mês)	66.920	
Energia evitada na reciclagem (J/ano)	57,227 x 10 <sup>12</sup>	
Emissão evitada na reciclagem (tCO <sub>2</sub> /ano)	3.566,14	
<b>Tratamento de RSU</b>	<b>Aterramento</b>	<b>Incineração</b>
RSU para aterro (t/dia)	50,16	.
Resíduo para incineração (t/dia)		70,41
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /dia)	2006,37	
Biogás coletado (m <sup>3</sup> / dia)	1504,8	
Energia do biogás (J/dia)	0,022989 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)	0,2069x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh/mês)	0,0575	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		2,1217 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh/mês)		0,668
Nº de residência que pode ser atendida	326	3345
Emissão (tCO <sub>2</sub> /ano)	1005,12	2.625,43
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> /dia)	501,59	.
Emissão de biogás fugitivo (m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> e/dia)	5.918,88	
Massa do biogás fugitivo (tCO <sub>2</sub> e /ano)	3.953,68	

Tabela 6.10 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de Moji Mirim (SP)

<b>Descrição</b>	<b>Reciclagem</b>	
RSU coletado (t/ano)	20.902	
Potencial de reciclável disponível (t/ano)	9.961,89	
Reciclável para venda (t/ano)	996,189	
Renda da venda do reciclável (R\$ / ano)	448.285	
Energia evitada na reciclagem (J/ano)	31,509 x 10 <sup>12</sup>	
Emissão evitada na reciclagem (tCO <sub>2</sub> /ano)	1.963,49	
<b>Tratamento de RSU</b>	<b>Aterramento</b>	<b>Incineração</b>
Matéria orgânica para aterro (t/ano)	10.081,04	
RSU para incineração (t/ano)		14.150,65
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /ano)	403.241	
Biogás coletado (m <sup>3</sup> /ano)	302.431	
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> /ano)	100810,25	
Energia da incineração (J/ano)		49,98011 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J/ano)	4,62039 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)	0,11551 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh/mês)	0,032	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		1,1362 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh /mês)		0,3156
Nº de residência que pode ser atendida	182	1792
Emissão (tCO <sub>2</sub> /ano)	553,45	1.591
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> e/ano)	1.189.560,95	
Biogás fugitivo (t CO <sub>2</sub> e/ano)	2.176,897	

Tabela 6.11 Resultados da proposta de tratamento de RSU para a cidade de Itapira (SP)

<b>Descrição</b>	<b>Reciclagem</b>	
RSU coletado (t/ano)	16.675	
Reciclável contido na massa de RSU (%)	47,66	
Potencial de reciclável disponível (t/ano)	7.947,31	
Reciclável para venda (t/ano)	794,73	
Renda da venda do reciclável (R\$/ano)	357.628	
Energia evitada na reciclagem (J/ano)	25,137 x 10 <sup>12</sup>	
Emissão evitada na reciclagem (tCO <sub>2</sub> /ano)	1.566,4	
<b>Tratamento de RSU</b>	<b>Aterramento</b>	<b>Incineração</b>
Matéria orgânica para aterro (t/ano)	8.042,35	
Resíduo para incineração (t/ano)		11.289
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /ano)	321.694	
Biogás coletado (m <sup>3</sup> /ano)	241.270,6	
Energia da incineração (J/ano)		39,873 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J/ano)	3,686 x 10 <sup>12</sup>	
Energia líq. da incineração (J/ano)		36,256 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)	0,09215 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh/mês)	0,0256	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		0,9064 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh/mês)		0,252
Nº de residência que pode ser atendida	145	1.429
Emissão (t CO <sub>2</sub> / ano)	441,525	1.269,48
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> biogás/ano)	80.423,5	
Biogás fugitivo (m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> e /ano)	948.997,31	
Biogás fugitivo (tCO <sub>2</sub> e / ano)	1.736,67	

## **6.8.2 Propostas de tratamento de ED**

### **Biodigestão**

O resultado da proposta de tratamento de ED para os três municípios circunvizinhos mostra que a energia elétrica gerada pela biodigestão de 10.4 mil t/dia de lodo corresponde a quase 1,8 TJ<sub>el</sub>/ mês. Esta energia é equivalente ao consumo de cerca de 2.8 mil residências e representa cerca de R\$ 192 mil/mês, considerando o valor de R\$ 0,389/kWh cobrado pela companhia de energia, em 2013, para Campinas. Na relação de equivalência, a quantidade de energia gerada pela biodigestão do lodo de esgoto nesses três municípios circunvizinhos está totalizada em 0,686 MW. Enquanto a emissão de CO<sub>2</sub> liberada pela energia gerada a partir do biogás corresponde a 6,6 mil tCO<sub>2</sub>/ano.

### **Incineração**

O resultado da proposta de incineração para lodo de esgoto dos municípios circunvizinhos mostra que as 10,4 mil t/dia incineradas pode produzir cerca de 1,468 TJ<sub>el</sub> / mês, equivalente ao consumo de quase 2.315 residências. O custo dessa energia, considerando o valor cobrado em Campinas, no mês de setembro de 2013, como citado acima, corresponde a cerca de R\$ 159 mil.

Comparando os resultados dos dois sistemas de tratamento observa-se que a quantidade de energia gerada é da mesma ordem, entretanto, a diferença está nas emissões de CO<sub>2</sub>. Na biodigestão, as emissões correspondem a cerca de 3 vezes mais à da incineração. Com relação à água, a recuperação de 50% da água residuária equivale ao consumo de cerca de 39 mil residências. As Tabelas 12, 13 e 14 mostram o resultado da proposta de tratamento de ED para os três municípios circunvizinhos.

Tabela 6.12 Resultados da proposta de tratamento de ED para a cidade de Mogi Guaçu (SP)

Descrição	Tratamento biológico com recuperação do biogás	Incineração
Esgoto gerado (m <sup>3</sup> /dia)	24.752,6	24.752,6
Massa de lodo (t/dia)	4.950,52	4.950,52
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /dia)	4703	
Energia da incineração (J/dia)		0,079208 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J/mês)	2,822 x 10 <sup>12</sup>	
Energia líq. da incineração (J/mês)		2,3287 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)	0,84654 x 10 <sup>12</sup>	.
Energia do biogás (GWh/ mês)	0,235	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		0,6986 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh / mês)		0,1941
Nº de residência que pode ser atendida <sup>1</sup>	1335	1102
Emissão (tCO <sub>2</sub> /ano)	3.141	755,9
Água recuperada para reuso (m <sup>3</sup> /dia)		12.376
Nº de residência que pode ser atendida <sup>2</sup>		18.564

<sup>(1)</sup> Considerando a média nacional de consumo de EE por residência de 0,6342 GJ<sub>el</sub>/ mês.

<sup>(2)</sup> Considerando a média de consumo local por residência de 20 m<sup>3</sup>/mês.

Tabela 6.13 Resultados da proposta de tratamento de ED para a cidade de Moji Mirim (SP)

Descrição	Tratamento biológico com recuperação do biogás	Incineração
Esgoto gerado (m <sup>3</sup> /dia)	15.339,08	15.339,08
Massa lodo (t/dia)	3,068	3,068
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /dia)	2.914,43	
Energia da incineração (J/dia)		0,049085 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J/ mês)	1,74865 x 10 <sup>12</sup>	.
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)	0,5246 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh/mês)	0,146	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		0,4329 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh/mês)		0,1203
Nº de residência que pode ser atendida <sup>1</sup>	827	683
Emissão (tCO <sub>2</sub> /ano)	1946,7	474,94
Água recuperada para reuso (m <sup>3</sup> /mês)	230.086	230.086
Nº de residência que pode ser atendida <sup>2</sup>	11.504	11.504

<sup>(1)</sup> Considerando a média de consumo de EE por residência de 0,6342 G J<sub>el</sub> /mês.

<sup>(2)</sup> Considerando a média de consumo de água local por residência de 20 m<sup>3</sup>/mês.

Tabela 6.14 Resultados da proposta de tratamento de ED para a cidade de Itapira (SP)

Descrição	Tratamento biológico com recuperação do biogás	Incineração
Lodo do esgoto gerado (m <sup>3</sup> /dia)	11.932	11.932
Massa de lodo no esgoto (t/dia)	2.386	2.386
Biogás gerado (m <sup>3</sup> /dia)	2.267,07	.
Energia da incineração (J/dia)		0,038176 x 10 <sup>12</sup>
Energia do biogás (J/mês)	1,36024 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (J <sub>el</sub> /mês)	0,408073 x 10 <sup>12</sup>	
Energia do biogás (GWh/mês)	0,113	
Energia líq. da incineração (J <sub>el</sub> /mês)		0,3367 x 10 <sup>12</sup>
Energia líq. da incineração (GWh/mês)		0,0935
Nº de residência que pode ser atendida <sup>1</sup>	643	531
Emissão (tCO <sub>2</sub> /ano)	1.514,29	369,39
Água recuperada para reuso (m <sup>3</sup> /mês)	178.979,25	178.979,25
Nº de residência que pode ser atendida <sup>2</sup>	8.949	8.949

<sup>(1)</sup> Considerando o consumo médio mensal de EE por residência de 0,6342 G J<sub>el</sub> / mês.

<sup>(2)</sup> Considerando o consumo médio de água local de 20 m<sup>3</sup>/mês por residência.

### 6.8.3 Instalações e uso comunitário

Tendo em vista que as modernas instalações para recuperação de energia térmica e sua conversão em energia elétrica contém sistemas de instrumentação para controle de gases, poluentes e monitoramento os quais, geralmente, são caras em função da capacidade tornando-as inviáveis, é proposto, neste trabalho, o uso comunitário das instalações e equipamentos. Dessa forma, dois, três até quatro municípios elaboram um projeto de instalação para tratar em comum o RSU e o ED. Os custos provenientes da instalação e dos equipamentos são rateados entre os municípios-membros.

Como foi visto na revisão bibliográfica em Bodik and Kubaska (2013) e em Ghazi et al. (2011) a eficiência dos equipamentos e instalações dependem do uso em sua carga completa. De certo modo, isso incentiva a utilização compartilhada dos equipamentos entre cidades circunvizinhas. Para Tchobanoglous and Kreith (2002) um critério importante para o bom funcionamento e economia de energia e material é a distancia entre as instalações que reduz gastos com transporte, maior controle operacional e melhor gerenciamento dos recursos materiais

e humanos. Além disso, existem fluxos de energia e materiais entre os diversos processos que podem ser intercambiados entre as instalações. No caso específico dos três municípios estudados, essas informações podem ser consideradas.

Nos três municípios, a soma do RSU gerado para incineração corresponde a cerca de 140 t/dia e o lodo de esgoto totalizado em 10,4 t/dia que podem ser tratados em uma mesma planta com capacidade para 300 t/dia ao custo total do equipamento e obras civis de aproximadamente US\$ 60 milhões. Pelos resultados mostrados acima, nenhum dos municípios tem demanda suficiente para operar um sistema de forma independente e economicamente viável. Por isso, juntá-los para tratar o RSU e o ED em esquema comum pode ser a opção mais conveniente.

Quanto à escolha do equipamento, o fator de escala deve ser primeiramente considerado. Incineradores em massa para RSU podem ser encontrados em operação nas escalas 50, 100, 250, 500, 750 e 1000 t/dia na Europa e no Japão. Incineradores de esgoto tipo leito fluidizado podem ser encontrados na capacidade de 2 a 20 t/dia. É possível fazer modificação no sistema de incineração em massa de modo a injetar o esgoto e incinerá-lo junto com o RSU.

Levando em consideração o custo fixo dos equipamentos e a eficiência da escala, torna-se vantajoso que três municípios circunvizinhos ou mais usem as mesmas instalações. Dessa maneira, os custos operacionais e de manutenção e os ganhos financeiros, ambientais e energéticos são divididos entre as partes. Este tipo de uso comum entre os municípios com pequena população deve ser incentivado.

Enfim, sugestão de possíveis alternativas de instalações para atender as demandas de cada cidade estudada está sujeita a estudo mais detalhado em todos os níveis. Para os três grandes municípios, sugere-se uma planta de incineração com capacidade de 1000 t/dia ao custo total incluindo maquinário e obras civis de US\$ 140 milhões (World Bank, 1999).

Com relação a reciclagem, esta prática deve ser incentivada pelos vários motivos que já foram exaustivamente abordados, neste trabalho. Aqui, cabe uma reflexão sobre a atuação dos catadores. Existem no país, conforme estimativa de IPEA (2013) e de MNCR (2012), em torno de 600 a 800 mil catadores que se sustentam catando material reciclável nas ruas e lixões dos centros urbanos. Entretanto, não se tem dados sobre o montante coletado, porém, é sabido que

esses trabalhadores desviam grande parte do reciclável gerado no país e, portanto, são os responsáveis por alavancar a coleta seletiva. Os catadores não são vistos pela sociedade, conforme (Medina, 2000), mas prestam um grande serviço à sociedade. Enquanto as prefeituras brasileiras apresentam dificuldade em implantar e aumentar a taxa de coleta.

Assim, acredita-se que os resultados deste trabalho possam contribuir para a tomada de decisões dos administradores públicos.



## 7 CONCLUSÕES

1. RSU e ED são fontes de energia renovável para geração de eletricidade, sendo assim, as propostas de tratamento apresentadas neste trabalho podem incrementar a matriz energética do país. Trata-se de uma contribuição significativa para atender as demandas dessa energia, além de ajudar na sustentabilidade das cidades com melhoria do saneamento básico, concomitante à minimização do desperdício de matéria prima, água e energia.

Foi visto que o aterramento de RSU no contexto nacional possibilita a geração de energia correspondente a 798 TJ<sub>el</sub> / mês ou 221,7 GWh /mês. Essa energia é suficiente para atender 1,25 milhão de domicílios brasileiros ou 2,2% do total de domicílios existentes. Esse sistema de tratamento reduz o volume de RSU por cerca de 25 a 30%, portanto, não elimina a necessidade de aterro que deve ser construído conforme as normas de engenharia para evitar excessivos vazamentos de biogás e chorume, ou seja, deve ser preparado para maximizar a captação de biogás para produção de eletricidade. Além do CO<sub>2</sub> produzido na queima do biogás, contabiliza-se ainda o referente à parcela de biogás (varia entre 25% a 50%) que vaza livremente para o ambiente. Esse vazamento está suscetível de acontecer até mesmo nos melhores projetos de aterro. Por esse motivo, o aterramento é considerado apenas uma medida paliativa de disposição de RSU.

A opção de incineração de RSU apresenta vantagem sobre o aterro. No processo térmico de tratamento em âmbito nacional, a energia líquida gerada corresponde a 10,4 mil TJ<sub>el</sub> / mês equivalente ao consumo de 16,4 milhões de domicílios. Na incineração, as emissões de CO<sub>2</sub> respondem por quase metade das emissões do aterramento. Existe no mercado técnicas e equipamentos adequados para tratar as emissões, mantendo-as em nível baixo atendendo às normas rigorosas aplicadas a esta tecnologia. Entretanto, a desvantagem deste processo é o custo de implantação da planta de incineração, embora esta seja uma solução eficiente e definitiva, sem custos ambientais ao contrário do aterramento.

2. Para tratar ED foram apresentadas duas opções: biológica e incineração. Em ambas, com recuperação e produção de energia. No balanço nacional, os cálculos mostram que a energia elétrica que pode ser gerada pelo lodo do esgoto está em torno de 0,97 mil  $TJ_{el}$  /mês. Estima-se que essa energia seja suficiente para atender cerca de 1,5 milhão de domicílios ou 2,7% dos domicílios brasileiros. Na queima do biogás para geração de eletricidade, a quantidade produzida de  $CO_2$  liberada para a atmosfera totaliza-se em cerca de 3,6  $MtCO_2$ /ano. No processo de tratamento do ED está previsto a recuperação de 50% da água para reuso que pode resultar em 14  $Mm^3$  / dia, volume este suficiente para abastecer cerca de 25 milhões de residências ou 43,6% do total dos domicílios brasileiros.

A incineração do lodo de esgoto pode produzir energia elétrica líquida na quantidade de 1200  $TJ_{el}$  / mês. Esta energia é suficiente para atender 1,9 milhão de domicílios ou 3,5% dos domicílios brasileiros. No processo de queima do lodo e geração de energia são produzidos cerca de 1,287  $MtCO_2$  / ano.

Os valores mostrados são significativos tendo em vista que a quantidade de energia gerada pode substituir uma das hidroelétricas “problemas” do país, como a de Jirau, no Rio Madeira, no estado de Rondônia. Além disso, o tratamento adequado do resíduo deixa de impactar negativamente a natureza e, nesse caso, os recursos naturais como corpos d’água são preservados.

3. Os resultados mostram que a reciclagem é um importante aliado para ajudar na sustentabilidade ambiental o que não deve ser interpretado como mecanismo de incentivo ao consumo e, portanto, de geração de resíduo, mas como forma de reaproveitamento da matéria secundária para minimizar sua disposição. A reciclagem é um processo que oferece benefícios, tais como, evita o uso de energia e, conseqüentemente, suas emissões, provê ganhos financeiros que podem servir para inclusão social na medida em que possibilita a inserção de desempregados no mercado de trabalho. Tudo isso faz parte de um conjunto de ações que começa pela separação do resíduo reciclável na fonte (domicílio), campanhas educativas e esforços mútuos entre a sociedade e o poder público.
4. Pela proposta deste trabalho, a reciclagem de 10% do potencial disponível no RSU é possível comercializar em torno de 8 mil t/dia com rendimento da ordem de R\$ 109,6 milhões

mensais, além de evitar o uso de energia quantificada em 256,9 mil GJ / dia e deixa de emitir na atmosfera cerca de 5,8 MtCO<sub>2</sub>/ ano.

5. Aplicando os mesmos sistemas de tratamento para o município de Belém (PA), a reciclagem de 10% do potencial disponível no RSU pode gerar renda anual de R\$ 5,47 milhões. Esse valor pode ser usado em prol de melhoramento da coleta seletiva e em infraestrutura de galpão de triagem e beneficiamento dos recicláveis para aumentar seu valor comercial. Com relação à energia e suas emissões associadas, a reciclagem de 10% dos recicláveis evita o uso de 384,7 mil GJ / ano e evita a liberação de emissões de 23,9 MtCO<sub>2</sub> / ano. Esta quantidade pode ser uma das contribuições do município para amenizar o efeito estufa.

A proposta de aterramento para RSU no município de Belém mostra que 290 mil t/ano pode produzir biogás e sua conversão em eletricidade na quantidade de 3,3 TJ<sub>el</sub> mensal, com emissão de 15,9 mil tCO<sub>2</sub> /ano, mais as emissões fugitivas que correspondem a 62,6 mil tCO<sub>2</sub>e/ano.

6. A incineração como proposta de tratamento para RSU e para ED apresenta melhores resultados. A quantidade de energia elétrica que pode ser produzida pela queima de RSU é de 45,8 TJ<sub>el</sub> / mês. Essa energia equivale ao consumo de 72,3 mil domicílios, correspondente a 17% do total do município, considerando o consumo de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês. As emissões geradas são menores se comparada com as do aterramento. A incineração ainda apresenta a vantagem de sobrar apenas cinza que pode ser reaproveitada.

Enquanto a queima do lodo de esgoto pode gerar energia líquida na quantidade de 5,5 TJ<sub>el</sub> / mês. Essa energia é equivalente ao consumo de 8,6 mil domicílios representando 2,1% do total de domicílios em Belém. A emissão resultante no processo corresponde a 6,0 MtCO<sub>2</sub> / ano. Com relação ao reaproveitamento da água residuária, o volume equivale ao consumo de 193,4 mil domicílios, considerando o consumo médio local de 15 m<sup>3</sup> / mês.

7. Em São Luís (MA), a parcela de 10% dos recicláveis totalizada em 12,9 mil t /ano, se comercializada pode render ganho financeiro de R\$ 5,8 milhões/ ano. A substituição da matéria prima por matéria reciclada nos processos produtivos evita o consumo de energia correspondente a 409,7 mil GJ / ano e evita emissões na atmosfera de 25,5 mil tCO<sub>2</sub> / ano.

O aterramento da matéria orgânica contida no RSU de São Luís produz biogás que, se transformada em energia elétrica corresponde a 3,5 TJ<sub>el</sub> /mês equivalente ao consumo de 5,5 mil residências. Essa quantidade de energia produzida resulta na liberação de 16,9 mil tCO<sub>2</sub>/ano, mais as emissões fugitivas de 66,6 mil tCO<sub>2</sub>e/ano.

Na incineração do RSU de São Luís (MA), a energia gerada, em torno de 46 TJ<sub>el</sub> /mês, equivale ao consumo de 72,9 mil domicílios ou 23,9% do total de domicílios da cidade com liberação de emissões de 56,5 mil tCO<sub>2</sub> / ano. Enquanto a energia elétrica gerada a partir do biogás do lodo do ED, que se totaliza em cerca de 6,51 TJ<sub>el</sub> / mês, equivale ao consumo de 10.257 domicílios ou 3,3% do total de domicílios do município. Com relação à recuperação de água residuária para reuso, o volume corresponde a 95.1 mil m<sup>3</sup> / dia, equivalente ao consumo de 135,8 mil domicílios ou cerca de 45% do total. Este percentual supera o déficit de abastecimento de água em São Luís que, conforme IBGE (2013), é de 41,7%.

8. O tratamento de RSU e de ED proposto para o município de Campinas (SP) mostra resultados na mesma ordem dos dois municípios anteriormente estudados. A comercialização de 10% dos recicláveis coletados, totalizada em 12,6 t/ano, pode prover rendimento financeiro anual de R\$ 5,7 milhões. Energia evitada com o uso do reciclável corresponde a 400 mil GJ / ano e evita emissões de 24,9 mil tCO<sub>2</sub> / ano.

O aterramento do RSU em Campinas gera biogás que transformado em energia elétrica corresponde a 2,26 TJ<sub>el</sub> /mês. Essa energia resultante do biogás equivale ao consumo de 3,6 mil domicílios. As emissões provenientes da combustão do biogás para produção de energia elétrica é da ordem de 10,8 mil tCO<sub>2</sub>/ano mais a emissão de 42,6 mil tCO<sub>2</sub>/ano correspondente ao biogás fugitivo. O tratamento de RSU pela incineração gera 34,7 TJ<sub>el</sub> / mês, equivalente ao consumo de energia elétrica de 54,7 mil domicílios ao consumo de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês, representando 15,5% do total de domicílio do município e as emissões totalizadas em 42,4 mil tCO<sub>2</sub>/ano.

Enquanto o lodo do esgoto pode produzir biogás e energia elétrica totalizada em 7,9 TJ<sub>el</sub> / mês. Essa energia equivale ao consumo de 12,5 domicílios ou 3,5% do total de domicílio no município. No tratamento do esgoto, a água recuperada para reuso corresponde a 116,2 mil m<sup>3</sup> / dia, equivalente ao consumo de 139,5 mil domicílios ou 39,4% do total, ao consumo médio da cidade de 25 m<sup>3</sup> / mês/domicílio. Na análise dos resultados de Campinas observa-se

que a incineração é a opção mais adequada para tratar o RSU. Enquanto o lodo de esgoto pode ser biodigestado nas instalações existentes para aproveitamento da infraestrutura local.

9. O resultado do tratamento de RSU e ED para Mogi Guaçu mostra que a comercialização de 10% do potencial de reciclável disponível na massa de resíduo coletada possibilita o rendimento financeiro de R\$ 803 mil/ ano; evita o uso de 57,2 TJ<sub>el</sub> / ano de energia e evita emissão de 3,5 mil tCO<sub>2</sub> / ano. O aterramento de RSU pode gerar biogás e sua transformação em energia elétrica resulta em cerca de 0,207 TJ<sub>el</sub> /mês. Essa energia elétrica equivale ao consumo de 326 domicílios. A emissão gerada pela produção de energia totaliza-se em 1005 tCO<sub>2</sub>/ano. Enquanto a incineração do RSU pode produzir cerca de 2,1 TJ<sub>el</sub> / mês. Essa energia elétrica equivale ao consumo de 3,3 mil domicílios ou 8% do total ao consumo médio de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês. A partir desses resultados, pode-se verificar que a incineração do RSU é a opção mais vantajosa tendo em vista o ganho energético.
10. A incineração de lodo de esgoto pode produzir cerca de 0,7 TJ<sub>el</sub> / mês, equivalente ao consumo de energia elétrica de 1,1 mil domicílios ou 4% do total. Se 50% da água residuária for recuperada representa o volume de 12,4 mil m<sup>3</sup> / dia equivalente ao consumo de 18,5 mil domicílios ou 44,4% do total, considerando o consumo médio de 20 m<sup>3</sup> / mês/domicílio.
11. Os resultados para o município de Moji Mirim mostram que a comercialização de 10% do potencial disponível de reciclável na massa de resíduo pode render ganho financeiro de R\$ 448,2 mil/ ano. A reciclagem desse montante de material evita o consumo de 31,5 TJ / ano de energia e evita a emissão 1,9 mil tCO<sub>2</sub> / ano.

O aterramento de RSU gera biogás que, convertida em energia elétrica, resulta em 0,116 TJ<sub>el</sub> / mês, com emissão de 553 tCO<sub>2</sub>/ano. A energia elétrica gerada equivale ao consumo de 182 domicílios e na incineração do RSU, a energia elétrica gerada é 1,1 TJ<sub>el</sub> / mês. Essa quantidade de energia elétrica é equivalente ao consumo de 1,7 mil domicílios ou 6,6% do total. Analisando esses resultados, observa-se que a incineração é o processo mais vantajoso também para Moji Mirim tendo em vista os ganhos energéticos.

Com relação ao tratamento de ED no município de Moji Mirim, a biodigestão do lodo de esgoto pode gerar biogás e sua conversão em energia elétrica resulta em 0,524 TJ<sub>el</sub>/ mês. Essa energia equivale ao consumo de 827 domicílios ou 3,1% do total de domicílio da cidade, considerando o consumo de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês. No processo de tratamento do ED, a água

residuária recuperada representa o consumo de 11,5 mil domicílios ou 42,6% do total de domicílios, considerando a média local de consumo por residência de 20 m<sup>3</sup> / mês.

12. O tratamento de RSU no município de Itapira tem resultados semelhantes ao do município de Moji Mirim. O reaproveitamento de 10% do potencial de reciclável disponível na cidade pode prover ganho financeiro de R\$ 357 mil/ ano. Esse material de volta ao processo produtivo evita o consumo de 25 TJ / ano de energia e evita emissão de 1,5 mil tCO<sub>2</sub> / ano.

Aterramento de RSU do município de Itapira para produção de biogás e geração de energia elétrica resulta na quantidade de 0,092 TJ<sub>el</sub> /mês. Essa quantidade de energia equivale ao consumo de 145 domicílios. A emissão referente à geração de energia corresponde a 441 tCO<sub>2</sub>/ano.

Incineração de RSU pode gerar a quantidade de 0,906 TJ<sub>el</sub> / mês de energia equivalente ao consumo de 1,4 mil domicílios ou 6,7% do total de domicílio da cidade considerando a média de consumo de 0,6342 GJ<sub>el</sub> / mês. A partir desses resultados, tem-se que a incineração é a opção mais vantajosa para tratamento de RSU em Itapira tendo em vista o ganho energético.

Os resultados do tratamento de ED para o município de Itapira mostram que a biodigestão do lodo de esgoto para geração de biogás e sua transformação em energia elétrica pode resultar em 0,408 TJ<sub>el</sub> / mês. Essa energia é equivalente ao consumo de 643 domicílios ou 3% do total de domicílios da cidade. O reaproveitamento de 50% da água residuária, conforme a proposta deste trabalho, é suficiente para atender 8,9 mil domicílios ou 42,2% do total do município, considerando a média de consumo local de 20 m<sup>3</sup> / mês.

13. Esses três municípios de pequeno porte selecionados para estudo têm características semelhantes aos demais municípios localizados nas cinco regiões do país. Seus desempenhos e esforços pró- saneamento é fundamental na somatória do esforço global da nação para resolver definitivamente a questão do saneamento básico. Acredita-se que as maiores dificuldades estão nas questões de falta de recursos financeiros, projetos e vontade política. Uma solução para captar recursos pode ser encontrada, por exemplo, em empresas de mineração que aproveitam dos recursos naturais do país. Essas empresas devem ser chamadas

14. para contribuir nos financiamentos e custeios de projetos de saneamento básico nos estados onde atuam. Outra solução pode ser a destinação de parte dos recursos do PRÉ-SAL para ajudar os municípios implantar os sistemas de tratamento adequado do RSU e do ED.
15. Como pode ser observado, municípios pequenos geram pouca quantidade de resíduo para ter instalação de porte razoável que requer eficiência de escala. A junção de vários municípios circunvizinhos para usar as mesmas instalações possibilita a divisão dos custos e os lucros. É possível, ainda, adotar sistemas modulares para serem expandidos conforme suas necessidades.
16. Como foi observado na análise dos resultados, existem fluxos de material e energia comuns entre os processos, isso incentiva o conceito de integração entre as usinas quando possível. Essa é uma idéia importante para se pensar e praticar. Promover a integração nos tratamentos de RSU e de ED para redução dos custos e das perdas possibilita otimização dos processos além de melhorar o controle global.

## **7.1 Considerações**

- Após a biodigestão do lodo de esgoto e a coleta de biogás em plantas de tratamento de ED, o material remanescente deve passar por tratamento para neutralizá-lo se for usado para compostagem ou aplicação direta na terra para correção do solo. A quantidade de material digerido resultante, estimado em torno de 70% da carga do reator, pode representar um problema se a cidade não tiver áreas agrícolas, inclusive, suficientes para absorver essa carga. Nesse caso, há duas possibilidades: a primeira é encaminhar o material digerido para incinerar junto com RSU na planta de incineração em massa; a segunda é secá-lo e incinerá-lo para obter calor e gerar energia elétrica. Dessa maneira, melhora o rendimento global da planta de incineração.
- O volume de água que pode ser recuperado nos processos de tratamento de esgoto é grande e valioso, especialmente para localidades onde há falta de água. Esta água pode ser redirecionada para uso industrial, comercial e agrícola. Também pode ser usada no setor residencial após tratamento químico ou por ultravioleta para eliminação dos micróbios, disponibilizando-a para regiões não atendidas e diminuindo, assim, os gastos com captação de água.

No entanto, acredita-se que algumas ações para promover o tratamento de RSU e ED nos municípios são necessárias, como:

- Cobrança de taxa específica de embalagem a ser embutida no preço final do produto para financiamento da coleta seletiva;
- adoção de contratos públicos preferenciais para fabricantes que utilizarem embalagens retornáveis e recicláveis nos processos produtivos e que se responsabilizem pela coleta dos seus produtos pós-consumo;
- formação de parcerias entre setores, público e privado, para financiamento de projetos de tratamento de RSU e de ED;
- envolvimento do setor privado no processo de capacitação e treinamento de pessoal nessas áreas de trabalho;
- criação de programas pró-incineração para esclarecimento público sobre as vantagens e os benefícios dessa tecnologia;
- estudo e planejamento de estratégias para elaboração de projetos modulares de plantas de incineração em massa e de leito fluidizado e sua disponibilização às prefeituras, conforme conveniência, demanda, condições técnicas e operacionais de cada município; e,
- Outras ações como programas educacionais direcionados a escolas e outras instituições, incentivos às atividades de coleta seletiva, regulamentação e apoio às cooperativas de catadores.

## **7.2 Outras recomendações**

Durante este estudo foram encontradas diversas lacunas como falta de dados e informações técnicas que necessitam de estudos aprofundados:

1. Necessidade de informações para dimensionar os equipamentos para os municípios estudados, tais como, caracterização gravimétrica e propriedade termo-física de material, tanto para o RSU como para o ED.

2. Com base nesses dados, pode-se calcular um protótipo para incinerador de massa para RSU.

## BIBLIOGRAFIA

- ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M. **Biogas Energy**. New York: Springer, 2012.
- AGARWAL, A. Municipal solid waste recycling and associated markets in Delhi and India. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 44, p.73–90, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2012: edição especial**. Brasília, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2013**. Brasília, 2013.
- ANDERSON, Fabiano. **As ações do poder público municipal para o setor de reciclagem de resíduos sólidos em Porto Alegre: Um estudo exploratório**. 2005. 136p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ANDRADE NETO, Cícero O. de; HAANDEL, Adrianus V.; MELO, Henio N.S. O Uso do filtro anaeróbio para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios no Brasil. In: X SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. (APESB/APRH/ABES), 2002, Braga. **Anais do X SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**. (APESB/APRH/ABES), 2002, Braga. Cd-Rom.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM (ABRE). Simbologia. 2008. Disponível em: [http://www.abre.org.br/meio\\_reci\\_brasil.php](http://www.abre.org.br/meio_reci_brasil.php).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Atualizações**: boletim ABNT. Rio de Janeiro, agosto 2013. Disponível em: [www.abnt.org.br/catalogo](http://www.abnt.org.br/catalogo)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: resíduos sólidos: coletânea de normas. Rio de Janeiro, 2004.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7229**: projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8419**: apresentação de projetos para aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEM). **Relatório síntese**: ano base 2012, EPE, 55p. Rio de Janeiro, 2013.
- BODÍK, I.; KUBASKÁ, M. Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. **Environment Protection Engineering**, v.39, n.2, 2013.
- BRUNDTLAND. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. UN Documents Gathering a body of global agreements, 1987. Disponível em: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
- BUENROSTRO, O.; BOCCO, G. Solid waste management in municipalities in México: goals and perspectives. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 39, p. 251-263, 2003.
- CABRAL, Sueli Maria. **Trabalhadores do lixo: o relato de uma pedagogia de desordem**. 2001. 130p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CARDOSO, Vagner Alves. **Gerenciamento de resíduo sólido doméstico da cidade de Ribeirão Preto-SP: histórico, avaliação e recomendações**. 2004. 604p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- CARNEIRO, Paulo Fernando. **Caracterização e avaliação da potencialidade econômica da coleta seletiva e reciclagem coletiva dos resíduos sólidos domiciliares gerados nos municípios de Belém e Ananindeua**. 2006. 132p. Dissertação (Mestrado) - Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA (CENBIO). **Notas Técnicas**. São Paulo, 2001.

COLTRO, L.; MADI, L. F. **As experiências de coleta seletiva no Brasil e no mundo**. Reciclagem, agricultura e meio ambiente. CATI/SAA, Campinas, 1995.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Aterro sanitário: definição**. 2013. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Aterro%20Sanit%C3%A1rio/21-Aterro%20Sanit%C3%A1rio>.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Caracterização de resíduos**. São Paulo, 1997.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Inventário brasileiro de gás metano gerado por resíduos: relatório dos bancos de dados de resíduos sólidos e efluentes líquidos**. Vieira, S. M. M. São Paulo: CETESB, 2001.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares: relatório de 2007**. São Paulo, 2008.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS (COPASA). **ETE Arrudas**. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<http://www.copasa.com.br/>>

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (CEMPRE). Preço do material reciclável. 2013. Disponível em: [http://www.cempre.org.br/servicos\\_mercado.php](http://www.cempre.org.br/servicos_mercado.php).

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resoluções do CONAMA 1994-2012**. Edição especial, Brasília, 2012.

COSTA, David Freire da. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- CHANDLER, A.J., EIGHMY, T.T., HJELMAR, O., KOSSON, D.S., SAWELL, S.E., VEHLOW, J, van der SLOOT, H.A e RTLÉN, J. **Municipal solid waste incinerators residues: Studies in environmental Science 67**. The international ash working group. Elsevier, 1997.
- CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of solid waste management and waste minimization technologies**. Elsevier Science, 2003.
- CRUZ, André Luiz Marcelo da. **A reciclagem dos resíduos sólidos urbanos: um estudo de caso**. 2002. 155p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- DIAS, G. F. **Educação Ambiental: princípios e práticas**. São Paulo: Gaia, 2001.
- ENSINAS, Adriano Viana. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas, SP**. 2003. 129p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- ENVIROSTATS – Environment Accounts and Statistics Division. 2013. Composting by households in Canada. By Iman Mustapha ISSN 1913 – 4320. Canada.
- EUROPEAN COMMISSION (EC). **Integrated pollution prevention and control**. Reference document on the best available techniques for waste incineration. 2006.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). **Managing municipal solid waste: a review of achievements in 32 European countries**. Luxembourg, 2013. Disponível em: [www.europa.eu](http://www.europa.eu).
- EUROPEAN UNION. Good practices in sludges management. 2012. Disponível em: [http://www.purebalticsea.eu/index.php/gpsm:good\\_practices](http://www.purebalticsea.eu/index.php/gpsm:good_practices).
- EUROSTAT – EUROPEAN COMISSION (EC). **Europe in figures: Eurostat yearbook 2011**. Statistical books. Luxembourg, European Union.

EUROSTAT – EUROPEAN COMMISSION (EC). **Municipal waste generation and treatment, by type of treatment method in 2011.** 2012. Disponível em: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/main\\_tables](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/main_tables)

EUROSTAT – EUROPEAN COMMISSION (EC). **Generation of waste.** 2013. Disponível em: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>.

FAEDO, Andreia Maria. **Tecnologias convencionais e novas alternativas para o tratamento de efluentes domésticos.** 2010. 39p. Trabalho de conclusão de especialização. Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis.

FERRUCCI, Rodolfo Sérgio. **Avaliação de gerenciamento de resíduo sólido em doze municípios paulistas com aterro classificado como adequado pela CETESB.** 2003. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia civil, Universidade Estadual de Campinas.

FIGUEIREDO, P. J. M. **A sociedade do lixo: os resíduos, a questão energética e a crise ambiental.** Piracicaba: Unimep. 1995

FRANCHETTI, M. J. **Solid Waste Analysis and Minimization.** A system Approach. New York: Mc Graw Hill, 2009.

GHAZY, M. R.; DOCKHORN, T. and DICHTL, N. Economic and environmental assessment of sewage sludge treatment processes application in Egypt. Fifteenth **International Water Technology Conference, IWTC-15.** Alexandria, Egypt, 2011.

GIDARAKOS, E. **Hazardous waste management, treatment and disposal.** Thessalonisli: Zigos Editors, 2006.

GLOBAL METHANE INITIATIVE. **Landfill Methane: Reducing Emissions, advancing recovery and use opportunities.** 2011. Disponível em: <https://www.globalmethane.org/>

GONÇALVES, J. V.; TANJI, M. M.; MOURA, C. L. O uso da coleta seletiva como inclusão social. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, III-264. (ABES), 2007, São Paulo. **Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental,** III-264. (ABES), 2007, São Paulo.

- GONOPOLSKY, A. M. The waste recycling industry in Russia: Challenges and prospects. **Wastetech**. 2007. Disponível em: <http://w2007.sibico.com/print.php/content>.
- GONZÁLEZ-TORRES, P. L.; ADENSO-DIAZ, B. Influence of distance on the motivation and frequency of household recycling. **Waste management**, v. 25, p. 15-23, 2005.
- Government of Canada. Municipal Wastewater Treatment Indicator. 2013. Disponível em: <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=En&n=2647AF7D-1>.
- GRIPPI, S. **Lixo, reciclagem e sua história: guia para as prefeituras brasileiras**. Rio de Janeiro: Interciências, 2001.
- HARDER, M. K.; WOORDARD, R.; BENCH, M. L. Two measured parameters correlated participation rates in curbside recycling schemes in the UK. **Environmental management**, v. 37, n.4, p. 487-495, 2006.
- HAYAMI, Y.; DIKISHIT, A. K.; MISHRA, S. N. Waste pickers and collectors in Delhi: poverty and environment in an urban informal sector. **Journal of Development Studies**, v. 42, n.1, p. 41-69, 2006.
- HEKKERT, M. P.; JOOSTEN, L. A. J.; WORRELL, E. Reduction of CO<sub>2</sub> emissions by improved management of material and product use: the case of primary packaging. **Resources, Conservation and Recycling**, v.29, p.33-64, 2000.
- HOGG, D. **Costs for municipal waste management in the EU**. Final report. Directorate General Environment, 2001.
- ICLEI/BRASIL: **Governos Locais pela Sustentabilidade**. 2009. Disponível em: [http://www.resol.com.br/cartilha12/manual\\_iclei\\_brazil.pdf](http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Atlas de saneamento 2002. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/atlas\\_saneamento/pdf](http://www.ibge.gov.br/home/atlas_saneamento/pdf).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Atlas de saneamento. Rio de Janeiro, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Atlas do Censo demográfico 2010. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Banco de dados. Brasil: população. 2013. Disponível em:  
[http://www.ibge.gov.br/paisesat/main\\_frameset.php](http://www.ibge.gov.br/paisesat/main_frameset.php).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Banco de dados. Brasil: população. 2012. Disponível em:  
[http://www.ibge.gov.br/paisesat/main\\_frameset.php](http://www.ibge.gov.br/paisesat/main_frameset.php).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades: população do município de Campinas. Dados de 2011. Disponível em:  
<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2011/estimativa/.shtm>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE/PNAD). Pesquisa nacional por amostra de domicílios: síntese de indicadores 2012. Rio de Janeiro, 2013; 278p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE/PNAD). Pesquisa nacional por amostra de domicílios: síntese dos indicadores 2011. Rio de Janeiro, 2012; 281p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos: relatório de pesquisa**. Brasília, 2012.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA E COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (IPT/CEMPRE). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse by Gas Inventories**. V.5, Waste, 2006.
- INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). Waste to energy: integrated part of sustainable waste management. Waste –to-energy research & technology council of Greece – Sinergia, 2011.
- INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). Waste-to-energy: state of the art report. Statistic 6<sup>th</sup> edition, 2012.
- JAPAN SEWAGE WORKS ASSOCIATION. Sewage Works statistics, 2004.
- KARAGIANNIDIS, A. **Waste to Energy. Opportunities and Challenges for developing and transition economies**. London: Springer-Verlag, 2012.
- KOCASOY, G. Gerenciamento de resíduos sólidos na Turquia. **Waste Management World**. Jan-fev. 2002. 8 p.
- KUMAR, S. **Biogas**. Published by In Tech. Croatia, 2012.
- KUMAR, S. **Waste management**. Published by In Tech. Croatia, 2010.
- LIMA, Mara Líbia Viana de. Infra-estrutura de esgoto sanitário no município de Belém: cobrança por serviços nas bacias hidrográficas do Reduto e do Uma. 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém.
- LINO, F. A. M. **Consumo de energia no transporte da coleta seletiva de resíduo sólido domiciliar no município de Campinas (SP)**. 2009. 135p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- LINO, F. A. M.; BIZZO, W. A.; DA SILVA, E. P. and ISMAIL, K. A. R. Energy impact of waste recyclable in a Brazilian metropolitan. **Resources, Conservation and Recycling**, v.54, p.916–922, 2010.
- LINO, F. A. M; ISMAIL, K. A. R. Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. **Journal of Energy Policy**, v.39, p.3496-3502, 2012.
- LINO, F. A. M; ISMAIL, K. A. R. MSW Solid waste recycling as a mechanism for the social inclusion in Brazil. **Int. J. Environment and Waste Management**, v.12, p.264-279, 2013.
- LU, L. et al. MSW management for waste minimization in Taiwan: the last two decades. **Waste Management**, v. 26, p. 661-667, 2006.
- LUCKE, Sergio Augusto. O Resíduo sólido urbano como fonte renovável para geração de energia elétrica: aspectos econômicos e sócio-ambientais. 2012. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MACZULAK, A. **Waste Treatment**. Green Technology. Facts on File, 2010.
- MAGRINHO, A.; DIDELET, F.; SEMIAO, V. Municipal solid waste disposal in Portugal. **Waste Management**, v. 27, p.1477-1489, 2006.
- MARCHIORI, A. **Coleta diferenciada de lixo: a proposta da CATI para programas de reciclagem, agricultura e meio ambiente**. Campinas: CATI/SAA, 1995.
- MASOTTI, J. S.; DOMINGUES, T. C. G.; BIMBATI, T. A. V. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos do município de Mogi Guaçu – SP**. X Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas. Instituto Federal Sul de Minas Gerais: Campus Muzambinho. ISSN on line 2317-9686, 2013.
- MCDUGALL, F. et al. **Integrated solid waste management: a life cycle inventory**. USA: Blackwell Science, 2001. 2. ed. 512 p.

- MEDINA, M. **Informal recycling and collection of solid waste in developing countries. Issues and opportunities.** The United Nations University Institute of Advanced Studies UNU/IAS. Working paper, v.24, 37p. 1997.
- MEDINA, M. Scavenger cooperatives in Asia and Latin American. **Resources, Conservation and Recycling**, v.31, p.51-69, 2000.
- METIN, E.; ERÖZTÜRK, A.; NEYIM, C. Solid waste management practices and review of recovery and recycling operations in Turkey. **Waste Management**, v.23, p.425-432, 2003.
- MILIEU Ltd. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land, Interim report prepared by Milieu Ltd., WRC and RPA, 2008.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). Projeto Usina Verde: Incineração de resíduos sólidos urbanos, com carga de composição similar ao RDF, evitando emissão de metano e promovendo geração de eletricidade para autoconsumo. Brasília: MCT, 2008. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/581778/>.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES (MCIDADES). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto 2011**, (Ministério das Cidades/SNSA/ SNIS). Brasília, 2013a.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES (MCIDADES). **Diagnóstico do manejo de resíduo sólido urbano 2011**. (Ministério das Cidades/SNSA/ SNIS). Brasília, 2013b.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco Energético Nacional - ano base 2011**. Empresa de Pesquisa Energética EPE, Brasília, 2012.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Manual para implantação de compostagem e de coleta seletiva no âmbito de consórcios públicos**. Melhoria da gestão ambiental urbana no Brasil – BRA/OEA/08/00. Brasília, 2010.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Módulo específico: licenciamento ambiental de Estações de tratamento de Esgoto e aterros sanitários. Brasília, 2009.

- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Política de águas e educação ambiental: processos dialógicos e formativos em planejamento e gestão de recursos hídricos. 3.ed., rev.; Organizadores: Franklin de Paula Junior e Suraya Modaelli. Brasília: MMA/SRHU, 2013. 288 p.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Política Nacional de Resíduo Sólido 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/pnrs.pdf> . 2012.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Política nacional de resíduo sólido**. 2012. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/politica-de-residuos-solidos>.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Resolução CONAMA N° 20, de 18 de junho de 1986**. Diário Oficial da União em 30/07/86. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res2086.html>
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Resolução CONAMA n° 375**. Licenciamento ambiental simplificado de sistemas de esgotamento sanitário, 2006.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Resolução CONAMA N°5, de 5 de agosto de 1993**.
- MNCR (Movimento Nacional de Catadores de Recicláveis). Estimativa sobre o número de catadores no Brasil, 2012. Disponível em: <http://www.mnrc.org.br/>
- MOCELIN, Cristiane. Pirólise de lodo de esgoto sanitário: produção de adsorvente e óleos combustíveis. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- MONNI, S.; PIPATTI, R.; LEHTILÄ, A.; SAVOLAINEN, I. and SYRI, S. Global climate change mitigation scenarios for solid waste management. **VTT publications**, 603, ESPOO, 2006.
- MORIN, E. Cultura de massas no século XX: o espírito do tempo I: neurose. Tradução de Maura Ribeiro Sardinha. 6ªed. Rio de Janeiro: Fundação Forense Universitária. 1984.

- MOUSTAKAS, K.; LOIZIDOU, M. Solid Waste Management through the application of thermal methods. **Waste Management**, 2010. Cap.6 Intech. India.
- NAG, A., VIZAYAKUMAR, K. Environmental Education and Solid Waste Management. **New Age International Publishers**, 2005, 106p.
- NAGLE, Elizabeth Camargo, Potencial de minimização do material biodegradável de alimentação contido no resíduo sólido domiciliar em municípios da região metropolitana de Campinas. 2004. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- NIESSEN, W.R. **Combustion and Incineration Processes**. 3rd Edition: Marcel Dekker, Inc. New York, 2002.
- OKUDA, I.; THOMSON, V. E. Regionalization of municipal solid waste management in Japan: Balancing the proximity principle with economic efficiency. **Environment Management**, v.40, p.12–19, 2007.
- OLIVEIRA, F. C. Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num latossolo vermelho amarelo cultivado com cana-de-açúcar. 2000. 247p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). Environmental Outlook to 2050 THE CONSEQUENCES OF INACTION, 2012, OECD Publishing. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). Total amount generated of municipal waste, in Factbook Country Statistical profiles, 2013 edition/Environmental. OECD. StatExtracts. Disponível em: <http://stats.oecd.org/Index.aspx?DatasetCode=CSP2012>.
- PATNAIK, P. Handbook of environment analysis: Chemical pollutants in air, water, soil and solid waste. **CRC Press**, second edition, USA, 2010.

- PEGORINI, E. S. et al. Produção e disposição final de lodo de esgoto na reciclagem agrícola da região metropolitana de Curitiba – PR. In: **SIMPÓSIO SOBRE BÍOSSÓLIDOS NO ÂMBITO DO MERCOSUL**, São Paulo, Anais..., 2003.
- PERIN, A. **Geração de renda a partir de resíduos recicláveis: Análise de duas associações de Florianópolis**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- PERUGINI, F.; MASTELLONE, L.; ARENA, U. A life cycle of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. **Environmental Progress**, v.24, n.2, p.137–154, 2005.
- PETERSEN, G. H. M.; BERG, P. E. O. Use of recycling stations in Borlange, Sweden – volume weights and attitudes. **Waste Management**, v.24, p.911-918, 2004.
- PETERSEN, G. **Life Cycle Assessment of four sludge disposal routes**. Master Thesis, Environment Systems Analysis, Goteborg, Sweden; 2001.
- PICHTEL, J. **Waste Management Practices, Municipal, Hazardous, and Industrial**. Taylor & Francis Group, New York, 2005.
- PIUNTI, Regina Célia. **A coleta seletiva de resíduos sólidos domésticos: considerações energéticas, ambientais e sociais para a região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari, SP**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- PORTER, R.; ROBERTS, T. **Energy Savings by wastes recycling**. Environmental Resources Limited, London UK. Elsevier Applied Science Publishers London And New York, 2005.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS (PMC). **Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Secretaria de Serviços Públicos. Campinas, 1996.
- PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico). **Tratamento e utilização de esgoto sanitário**. ABES, Recife – PE, 2006.

- READ, A. D. A weekly doorstep recycling collection. I had no idea we could. **Resources, Conservation and Recycling**, v.26, p.217-249, 1999.
- REDDY, P. J. **Municipal solid waste management: processing, energy recovery, global examples**. BS Publications, India, 2011.
- RIBEIRO, H.; JACOBI, P.R.; BESEN, G.R.; GÜNTER, W.M.; DEMAJOROVIC, J. and VIVEIROS, M. **Coleta Seletiva com Inclusão Social**. (Ed.), Annablume, São Paulo, 2009.
- ROSE, J. W.; COOPER, J. R. **Technical data on fuels**, 7<sup>th</sup> edition 1977, The British National Committee, London.
- ROYAL COMMISSION ON ENVIRONMENTAL POLLUTION. 17<sup>th</sup> report. **Incineration of waste**. London: HSMO, 1993.
- RUSHBROOK, P.; PUGH, M. **Solid Waste Landfills in Middle- and Lower- Income Countries**. A Technical Guide to Planning, Design, and Operation. The World Bank Washington, D.C., 1999
- SABESP (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO). Tratamento de esgoto ETE ABC. 2007. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/interna/Default.aspx?secaoId=55>
- SACHS, I. **Ecodesenvolvimento: crescer sem destruir**. São Paulo, 1986.
- SAKATA, Y. A choice experiment of the residential preference of waste management services – The example of Kagoshima city, Japan. **Waste Management**, v.27, p.639-644, 2007.
- SANTOS, Guilherme Garcia Dias dos. Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterro. 2011. 193p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SATO, A., QADIRB, Toshio, MANZOOR, C.D., YAMAMOTO, E. Sadahiro, ENDOE, Tsuneyoshi, ZAHOORA, Ahmad. Global, regional, and country level need for data on

wastewater generation, treatment, and use. **Agricultural Water Management**, v.130, p.1–13. 2013.

SCHUMACHER, E. F. **O negócio é ser pequeno: um estudo que leva em conta as pessoas**. Rio de Janeiro, 1979.

SEADE - Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. **Mapas dos municípios paulistas**. 2006. Disponível em: <<http://www.seade.gov.sp.br>>.

SHARHOLY, M.; AHMAD, K.; MAHMAAD, G. and TRIVEDI, R.C. Municipal solid waste management in Indian cities – A review. **Waste Management**, v.28, p.459–467, 2008.

SILVA, Valdinei Mendes da. **Plano Diretor Setorial do sistema de esgotamento sanitário: alternativas de concepção para a área de maior adensamento populacional do município de Belém**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém.

SINGER, P. Economia solidária: um modo de produção e distribuição. In **A economia solidária no Brasil: a autogestão como resposta ao desemprego**. Coleção Economia. São Paulo: Ed. Contexto, 2000.

SOUZA, Celina. Políticas públicas: uma revisão da literatura. **Sociologia**. Porto Alegre, v.8, n.16, p.20-45, jul/dez 2006.

SPELLMAN, F. R. **Handbook of water and wastewater treatment plant operations**. Lewis Publishers CRC Press Company, 2003.

STREB, Cleci Schalemburger. **Resíduo sólido domiciliar: potencial de minimização e potencial de conservação de energia com reciclagem em municípios da Região Metropolitana de Campinas**. 2004. Tese (Doutorado) - Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- TAGLIA, P. 2010. **Biogas**: rethinking the Midwest's potential. Clean Wisconsin. Disponível em: [http://www.ec.europa.eu/energia/renewables/electricity/doc/msreports/2009/germany\\_2009\\_english.pdf](http://www.ec.europa.eu/energia/renewables/electricity/doc/msreports/2009/germany_2009_english.pdf).
- TALYAN, V.; DAHIYA, R. P.; SREEKRISHNAN, T. R. State of municipal solid waste management in Delhi, the capital of India. **Waste Management**, v.28 n.7, p.1276-1287, 2008.
- TAMMEMAGI, H. **The waste crisis: Landfills, incinerators and the search for a sustainable future**. New York, Oxford: Oxford University Press 1999.
- TANAKA, M. Recent trends in recycling activities and waste management in Japan. **Waste Management**, v.1, p. 10-16, 1999.
- TARAZONA, Carolina Flórez. Estimativa de produção de gás em aterros de resíduos sólidos urbanos. 2010. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- TAYIBI, H. et al. Management of msw in Spain and recovery of packaging steel scrap. **Waste Management**, v. 27, p.1655-1665, 2007.
- TCHOBANOGLIOUS, G. and KREITH, F. Handbook of solid waste management. New York, USA: McGraw Hill, 2002.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H. VIGIL, S. A. **Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues**. New York: McGraw-Hill, 1993.
- TEIXEIRA, E. N. e BIDONE, F. Conceitos básicos. In Metodologias e Técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 1999, 65 p.
- THEMELIS, N. An overview of the global waste-to-energy industry. **Waste Management World 2003-2004**. Review Issue July-August, p. 40-47, 2003.

- THEMELIS, N. J.; TODD, C.E. Recycling in a megacity, **Journal of the Air & Waste Management Association**, v.54, p.389–395, 2004.
- TONGLET, M.; PHILLIPS, P. S.; BATES, M. P. Determining the drivers for householder pro-environmental behavior: waste minimization compared to recycling. **Resources, conservation and recycling**, v. 42, p. 27-48, 2004.
- TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: **Impacto ambiental de uso agrícola de lodo de esgoto**. Jaguariúna: Ed. Bettiol e Camargo, 2000, 312p.
- TUROVSKIY, I. S. and MATHAI, P. K. **Wastewater Sludge Processing**. John Wiley & Sons, Inc. 2006.
- U S EPA (UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). Feasibility Assessment for gas-to-energy at selected landfills in São Paulo, Brazil, 1997.
- U S EPA. Characterization of Municipal solid waste in the United States: 1994 Update. EPA 530-S-94-052. Washington, D. C.
- U.S EPA (UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY). Air Emission from Municipal Solids Waste Landfill – Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Emission Standards Division. EPA-450/3-90-011a. USA, March de 1991.
- UDAETA, M. E. M.; MIGUEL, F. A. A.; BURANI, G. F.; KANAYAMA, P. H. Energia do biogás do reuso da água do esgoto dentro do planejamento energético. **Revista PCH Notícias & SHP News**, v.2, p.8-11, fev\mar/abr 2004.
- UN (UNITED NATION). World Economic and Social Survey 2013. **Sustainable Development Challenges** Department of Economic and Social Affairs. **New York, 2013**.
- UN-HABITAT. **Planning and design for Sustainable urban mobility**. Global report on human settlements 2013. United Nations Human Settlements Programme, New York., 2013.

UN-HABITAT. **Solid waste management in the world's cities: water and sanitation in the world's cities 2010.** United Nations Human Settlements Programme. UK.

UNSTAT (UNITED NATION STATISTIC DIVISION). Environmental indicators. Population connected to wastewater collecting systems, 2011. Disponível em: <http://unstats.un.org/unsd/environment/wastewater.htm>.

UNSTAT (UNITED NATION STATISTIC DIVISION). Population and Vital Statistics Report Statistical Papers Series A Vol. LXV Data available as of 1 January 2013. Department of Economic and Social Affairs Statistics Division. UN, NY.

UNU/INWEH (UNITED NATIONS UNIVERSITY / INSTITUTE FOR WATER, ENVIRONMENT AND HEALTH). World lacks data on wastewater reuse: rising reuse of wastewater in forecast but world lacks data on 'a massive potential Resource. 2013. Disponível em: <http://inweh.unu.edu/rising-reuse-wastewater/>.

US EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). (2011). DRAFT: global anthropogenic emissions of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases: 1990–2030. (EPA 430-D-11-003); USA. Disponível em: <http://www.epa.gov/climatechange/economics/international.html>.

US EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). Background information document for updating AP42 Section 2.4 for estimating emissions from municipal solid waste Landfills, Washington, 2008. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/draft/db02s04.pdf>

VINAGRE, Marco Valério de Albuquerque. **Objetivos de desenvolvimento do milênio da ONU: redução da mortalidade na infância e saneamento básico urbano no estado do Pará.** 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém.

WANG, J.; HAN L.; LI S.; The collection system for residential recyclables in communities in Haidian District, Beijing: A possible approach for China recycling. **Waste Management**, v.28, p.1672-1680, 2008.

- WEF (WATER ENVIRONMENT FEDERATION). **Wastewater solids incineration systems. Manual of practice number 30.** WEPRESS. New York: Mc Graw Hill, 2009.
- WENISCH, S.; ROUSSEAU, P.; MÉTIVIER-PIGNON, H. Analysis of the technical and environmental parameters for waste-to-energy and recycling: household waste case study. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 43, p. 519-529. 2004.
- WHO/UNICEF, 2012. Water quality and health strategy 2013-2020. World Health Organization. Disponible en: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/2013/water\\_quality\\_strategy.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2013/water_quality_strategy.pdf).
- WHO/UNICEF. **Progress on sanitation and drinking-water.** 2013. Update. World Health Organization and UNICEF 2013. France.
- WILLIAMS, P. T. **Waste Treatment and Disposal.** 2nd ed., J Wiley & Sons, 2005.
- WOORDARD, R. et al. Evaluating the performance of a fortnightly collection of household waste separated into compostable, recyclables and refuse in the south of England. **Resources, conservation and recycling**, v.31, p.265-284, 2001.
- WOORDARD, R.; HARDER, M. K.; BENCH, M. Participation in curbside recycling schemes and its variation with material types. **Waste management**, v.26, p.914-919, 2006.
- WORLD BANK. Municipal Solid Waste Incineration. Requirements for a Successful Project. World Bank Technical Paper n° 462. Washington, D.C., 2000.
- WORLD BANK. Municipal Solid Waste Incineration. TECHNICAL GUIDANCE REPORT The World Bank Washington, D.C., 1999.
- WORLD BANK. **Urban Development Serie.** What a waste: A global review of solid waste management. Hoornweg, D. and Bhada-Tata (authors). World Bank, 15. USA. 2012.
- WORREL, W. A. and VESILIND P. A. **Solid waste engineering.** Second edition. Cengage Learning, USA, 2012.

WRAP. Landfills bans: Feasibility research. The environmental, economic and practical impacts of landfill bans or restrictions: research to determine feasibility, **Research date:** May 2009 – February 2010; 2012. Disponível em: [www.wrap.org.uk/landfillbans](http://www.wrap.org.uk/landfillbans).

YOUNG, G. C. Municipal solid waste to energy conversion process. New York: J Wiley & Sons Inc. 2010.

ZANETTE, André Luiz. Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. 2009. Dissertação (Mestrado) - Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ZHANG, G.; ZHU J.; OKUWAKI, A. Prospect and current status of recycling waste plastics and technology for converting them into oil in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v.50, p.231-239, 2007.

ZILOTTI, Hécio Alexandre Rodrigues. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. 2012. 52p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.