

ESTUDOS ASSOCIADOS AO PLANO DECENAL DE ENERGIA PDE 2008/2017

ESTUDOS SOBRE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

*Levantamento das principais tecnologias e sistemas de
utilização no mundo e tendências tecnológicas*



Empresa de Pesquisa Energética

Ministério de
Minas e Energia





GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MME/SPE

Ministério de Minas e Energia

Ministro (Interino)
Nelson José Hubner Moreira

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento

Energético
Márcio Pereira Zimmermann

Diretor do Departamento de Planejamento

Energético
Iran de Oliveira Pinto

ESTUDOS ASSOCIADOS AO PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA

PDE 2008/2017

ESTUDOS SOBRE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

*Levantamento das principais
tecnologias e sistemas de utilização no
mundo e tendências tecnológicas*



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Maurício Tiomno Tolmasquim

Diretor de Estudos Econômicos e Energéticos

Amílcar Guerreiro

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

José Carlos de Miranda Farias

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível

Gelson Baptista Serva

Diretor de Gestão Corporativa

Ibanês César Cássel

Coordenação Geral

Maurício Tiomno Tolmasquim

Coordenação Executiva

Gelson Baptista Serva

Coordenação Técnica

Luciano Basto Oliveira

Equipe Técnica

Angela Oliveira da Costa
Leonidas Bially Olegario do Santos
Luciano Basto Oliveira

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede

SAN – Quadra 1 – Bloco “B” – 1º andar
70051-903 – Brasília – DF


Escritório Central

Av. Rio Branco, 01 – 11º Andar
20090-003 – Rio de Janeiro – RJ

Nº EPE-DPG-RE-018/2007-r0

Data: 30 de novembro de 2007

IDENTIFICAÇÃO CONTRATUAL

 Empresa de Pesquisa Energética	Contrato/Aditivo MME-001/2007	Data de assinatura do contrato/Aditivo 16.07.2007
<i>Área de Estudo</i> A ESTUDOS ASSOCIADOS AO PLANO DECENAL DE ENERGIA		
<i>Estudo</i> A.2 OFERTA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS		
<i>Macro-atividade</i> A.2.9 Estudos sobre aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos		
<i>Ref. Interna (se aplicável)</i> A.2.9.2 <i>Levantamento das principais tecnologias e sistemas de utilização no mundo e tendências tecnológicas</i>		
<i>Revisões</i>	<i>Data de emissão</i>	<i>Descrição sucinta</i>
r0	30.11.2007	Emissão original

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1– Concentrações de GEE na Atmosfera.....	24
Tabela 2 – Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential - GWP).....	25
Tabela 3 – Estimativas de Emissão de Metano de Aterros Sanitários	27
Tabela 4 – Destinações recomendadas pelo SIGRS.....	33
Tabela 5 – Potencial de Conservação de Energia Elétrica através da Reciclagem de Embalagens .	36
Tabela 6 - Conservação de Energia Elétrica através da Reciclagem de Embalagens	39
Tabela 7 – Potencial de Conservação de Energia Elétrica através da Reciclagem de Embalagens por tonelada de lixo.....	40
Tabela 8 – Custos do Sistema de Coleta (US \$ 1994).....	50
Tabela 9 – Percentual de Investimento do Projeto de Recuperação Energética do Caju pela COMLURB (US\$ Junho de 1983)	50
Tabela 10 – Custos Operacionais	51
Tabela 11– Custo Médio de Investimento para a Recuperação de Gás de Lixo em US\$/kW _e	51
Tabela 12– Distribuição Geral de Plantas de Gás de Lixo pelo Mundo	53
Tabela 13 – Estimativas de Redução de Metano de Aterros Sanitários Economicamente Viáveis ..	55
Tabela 14 – Especificações que Gás Metano Veicular (GMV) da COMLURB atendia e Especificações do Gás Natural	64
Tabela 15 – Potencial de geração de energia e créditos de CO ₂ eq por municípios e regiões	73
Tabela 16 – Municípios que responderam ao Edital do Ministério das Cidades	74
Tabela 17 – Resultados classificação Região Sudeste.....	76
Tabela 18 – RESULTADOS CLASSIFICAÇÃO	77
Tabela 19 - Composição Típica do Biogás	78
Tabela 20 - Padrões para metais pesados em compostos do Departamento de Agricultura Americano (ppm).....	89
Tabela 21 - Limites de concentração (mg/kg sólidos totais) de metais pesados e arsênico em compostos de acordo com a regulamentação em diferentes países da Europa.	90
Tabela 22 - Empresas e Processos que Operam Plantas de Digestão Anaeróbica da fração orgânica dos RSU.....	91
Tabela 23 - Instalações do Processo Valorga.....	93
Tabela 24 - Referências do Sistema DRANCO.....	100

Tabela 25 - Balanço de massa e energia de uma planta típica (para uma capacidade anual de 1.000 toneladas).	102
Tabela 26 - Vantagens e desvantagens do Processo Kompogas.	102
Tabela 27 - Novas Encomendas de Usinas WTE na Europa (2004)	115
Tabela 28 - Plantas CTRP da Kompac.	118
Tabela 29 - Emissões de Dioxinas nos EUA (1987-2002, Dados EPA).....	125
Tabela 30 - Posições das ONGs Greenpeace e The Chlorophiles sobre as dioxinas.....	129
Tabela 31 - Total de unidades da Martin pelo mundo.....	132
Tabela 32 - Principais parcerias comerciais da Martin.....	132
Tabela 33 - Usinas Avançadas da Martin, GmbH.....	133
Tabela 34 - Dados da Planta de Perham.	141
Tabela 35 - Dados da Planta de Harrisonburg.	141
Tabela 36 - Diferenças entre as tecnologias de incineração, pirólise e gaseificação.....	151
Tabela 37 - Composição do gás de síntese do processo.	156
Tabela 38 – Lista de empreendimentos da SEFICO.	160
Tabela 39 - Vantagens e desvantagens dos TMB.	167
Tabela 40 - Principais Processos TMB e seus Produtos.	170
Tabela 41 - Classificação das 26 Empresas pela Juniper.	171
Tabela 42 - Infraestrutura Mundial de TMB.....	171
Tabela 43 - Capacidade Operacional por País.	171
Tabela 44 - As 10 Maiores Plantas de TMB do Mundo.	172
Tabela 45 - Vantagens e Desvantagens do método a plasma.....	172
Tabela 46. Comparação das Eficiências Globais das Usinas e Tecnologias.	174
Tabela 47 - Balanço de massa do método PCS.	175
Tabela 48 - Balanço de energia do método PCS.	176
Tabela 49 - Emissões de Alguns Poluentes na Chaminé de Utashinai.....	178
Tabela 50 - Comparação de dados das plantas de Utashinai e Mihama-Mikata.	178
Tabela 51 - Composição do gás de saída.	182

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - O Efeito Estufa.....	24
Figura2 – As Rotas dos Resíduos Sólidos	34
Figura3 – Esquema representativo da produção de biogás	44
Figura4 – Recuperação de GDL.....	44
Figura5 – Rotas para Utilização do GDL	49
Figura6 – Áreas com biogás na Alemanha.....	54
Figura7 – Áreas com Projetos de Gás de Aterro nos Estados Unidos.....	56
Figura8 – Vista Lateral de Moderno Sistema de Limpeza de Biogás de Aterro nos EUA.....	59
Figura9 – Vista Frontal de Moderno Sistema de Limpeza de Biogás de Aterro nos EUA	59
Figura10 – Planta de GDL da COMLURB/CEG	62
Figura11 – Instalações da COMLURB para produção de GNV do GDL	63
Figura12 – Aterro de Natal	66
Figura13 – Captação do Biogás.....	66
Figura14 – Cozinha Comunitária com GDL em Natal, RN	67
Figura15 – Casa de Motores a Biogás no Aterro Bandeirantes, São Paulo	69
Figura16 – Planta Geral da Usina a Biogás no Aterro Bandeirantes, São Paulo.....	70
Figura17 – Aplicação do Revestimento no Aterro de Adrianópolis, Nova Iguaçu, RJ	71
Figura18 – Revestimento de Adrianópolis, Nova Iguaçu, RJ.....	71
Figura19 – Sistema de Gramacho – Fotos	72
Figura20 - Exemplos de Unidades de Processo Comumente Utilizadas com Digestores Anaeróbicos de Resíduos Sólidos Urbanos.	81
Figura21 - Esquema de estágio simples e duplo para DA.....	83
Figura22 - Biodigestor anaeróbico Valorga.	92
Figura23 - Esquema do Processo Valorga.	94
Figura24 - Análise do Processo Valorga.	94
Figura25 - Esquema Simplificado do Processo Biopercolat (alto conteúdo de sólidos no 1º estágio, baixo conteúdo de sólidos no 2º estágio). Adaptado de Mata-Alvarez, J. (2003).....	95
Figura26 - Balanço de energia da planta de Kahlenberg.	96
Figura27 - Sistema de digestão úmida com dois estágios.	97
Figura28 - Digestão seca.....	98

Figura29 - Esquema e Balanço de Massa do Processo DRANCO.	100
Figura30 - Desenho do reator DRANCO.	101
Figura31 - Esquema do Processo Kompogas.	103
Figura32 - Processo da ArrowBio.....	105
Figura33 – Leira de Digestão Aeróbica (Compostagem).....	107
Figura34 – Moderna Usina de Incineração de RSU.....	109
Figura 35- Capacidade de Incineração de RSU (10 ⁶ t/ano).	110
Figura 36 - Incineração de RSU na Europa em 2003.	111
Figura 37 - Percentual do Lixo Incinerado por País na Europa (2003).....	112
Figura 38 - Capacidade de Incineração de RSU per capita (kg/ano)	112
Figura39- Quantidade de RSU descartado - Período 1960-2003	113
Figura40- Quantidade de RSU recuperado - Período 1960-2003.....	114
Figura41- Aterro de Semakau, Cingapura.....	117
Figura 42 - CTRP – Fortaleza – Sistema de tratamento de gases.....	119
Figura 43 - USINAVERDE na UFRJ, Ilha do Fundão.	120
Figura 44 - Esquema da USINAVERDE para 100 t/dia.	121
Figura 45 - Emissões de Dioxinas da Incineração de RSU (Suécia 1999).	125
Figura 46 - Formação da molécula de PVC.	127
Figura 47 - Molécula de Tetraclorado dibenzo-dioxina (TCDD).....	128
Figura 48 - Participação das Empresas de Incineração de RSU no Mercado Europeu.....	131
Figura 49 - Incinerador de Grelha Reversa da Martin GmbH – Comparação com pessoa em seu interior.	133
Figura 50 - Usina de Brescia, Itália.....	134
Figura 51 - Usina de Bilbao, Espanha (Zabalgardi).....	135
Figura 52 - Esquema da Usina de Bilbao, Espanha.....	135
Figura 53 - Processo de Combustão Convencional	136
Figura 54 - Processo SYNCOM PLUS da Martin GmbH.	137
Figura 55 - Comparação dos processos convencional e SYNCOM PLUS em relação ao volume de gases, volume das cinzas e emissão total de dioxinas.	138
Figura 56 - Modelo de planta de incineração da Barlow.....	139
Figura 57 - Sistema Aireal®.	140
Figura 58 - Hidrólise Ácida – Processo MASADA.....	146
Figura 59 - Hidrólise Ácida Concentrada – Processo Arkenol.	147

Figura 60 - Esquema de representação da Pirólise	150
Figura 61 - Representação esquemática da gaseificação.	150
Figura 62 - Processos Proprietários de Gaseificação	152
Figura 63 - Diagrama esquemático do processo de Reforma em Estágio.....	156
Figura 64 - Diagrama do processo da planta Blue Tower.....	157
Figura 65 – Esquema de funcionamento da tecnologia SEFICO.....	159
Figura 66 - Craqueamento Catalítico – Plastic Energy, LLC	161
Figura 67 - Despolimerização Térmica, da empresa Changing World Technologies (CWT)	162
Figura 68 - Lixo Hospitalar Usado para Produzir Combustíveis na Ucrânia.	164
Figura 69 - Produção de Diesel de Resíduos Hospitalares na Ucrânia.....	164
Figura 70 - As Quatro Opções Principais dos Tratamentos Mecânicos e Biológicos (TMB).	168
Figura 71 - As Principais Opções de TMB.	169
Figura 72 - Usina de Gaseificação de RSU da RCL.....	175
Figura 73 - Esquema do Gaseificador a Plasma da Hitachi.	177
Figura 74 - Esquema do processo Pyroarc.....	181
Figura 75 – Esquema de Zabalgarbi	185
Figura 76 – Esquema do Ciclo Combinado Otimizado	188
Figura 77 – Esquema do ECOPOLO.....	193
Figura 78 - Maquete digital do ECOPOLO para o Caju - Rio de Janeiro	195
Figura 79 - Sistema de Gestão de Resíduos da LIPOR.....	196

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Correlação entre Percentual de Restos Alimentares no Lixo e Renda Per Capita das Áreas de Planejamento da Cidade do Rio de Janeiro	21
Gráfico 2 – Emissões de CO ₂ eq de 1 tonelada de Resíduos Sólidos Urbanos em Disposições Finais diferenciadas.....	26
Gráfico 3 – Emissão típica de um aterro com vida útil de 25 anos.	43
Gráfico 4 – Evolução dos Projetos de Aproveitamento de GDL no EUA.....	57

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	13
INTRODUÇÃO	15
1. A Questão do Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil...18	
1.1. Resíduos do Lixo (Conceito)	19
1.2. Tecnologias para Aproveitamento dos RSU	20
1.3. Composição dos RSU e Potencial Energético	20
1.4. RSU e Aspectos Políticos, Sociais e Ambientais	22
1.4.1. O Efeito Estufa Antropogênico e os Créditos de Carbono	22
1.4.2. As Emissões dos Resíduos Sólidos	25
1.4.3. Convenção do Clima e os Créditos de Carbono	28
2. Tecnologias individuais para o tratamento dos RSU – Possibilidades de geração e/ou conservação de energia.....33	
2.1. Redução na fonte, reaproveitamento e reciclagem (conservação de energia). 33	
2.2. Aterros sanitários, controlados e lixões (biogás)..... 41	
2.2.1. Formação e Obtenção do Biogás.	41
2.2.2. Alternativas de Utilização do Gás de Lixo (GDL).	48
2.2.3. Viabilidade Econômica de Sistema de Recuperação de Gás de Lixo.	49
2.2.4. Panorama Mundial da Geração de Energia a partir do GDL.	52
2.2.4.1. O GDL nos Estados Unidos:	55
2.2.4.2. O GDL no Reino Unido.....	60
2.2.5. Panorama Brasileiro da Geração a partir do GDL	61
2.3. Digestão Anaeróbica (Biogás, Adubo Orgânico)..... 78	
2.3.1. Descrição dos Modernos Sistemas de Digestão Anaeróbica.	80
2.3.2. Tipos de Sistemas de Digestão Anaeróbica.	82
2.3.3. Parâmetros Importantes na Digestão Anaeróbica.	86
2.3.4. Tecnologias de Digestão Anaeróbica – Empresas e Processos	90
2.3.4.1. Valorga.....	91
2.3.4.2. Biopercolat (Wehrle Werk AG -Emmendingen, Alemanha).....	94
2.3.4.3. Linde-KCA-Dresden GmbH (Dresde, Alemanha).....	96
2.3.4.4. Processo DRANCO e Sistema Sordisep (Gent-Bélgica).....	99
2.3.4.5. Kompogas (Glattbrugg, Suíça).....	101
2.3.4.6. Processo ArrowBio (Haifa, Israel)	103
2.3.4.7. Outras Empresas.	105
2.3.5. Aspectos Ambientais e Econômicos.	106
2.4. Compostagem (adubo orgânico)..... 107	

2.5. Incineração (Vapor → Energia elétrica, Co-geração).	109
2.5.1. Situação Mundial das Usinas de Incineração de RSU.	110
2.5.2. Situação no Brasil das Usinas de Incineração de RSU.	118
2.5.3. Impactos Ambientais das Usinas de Incineração de RSU.	121
2.5.4. EMPRESAS E PROCESSOS.	130
2.5.4.1. Martin GmbH.....	131
2.5.4.2. Barlow	138
2.5.4.3. Outras empresas	142
2.6. Tecnologias de Conversão Avançadas - Hidrólise Ácida, Gaseificação/Pirólise, Craqueamento Catalítico (Combustíveis).....	144
2.6.1. Hidrólise Ácida.	145
2.6.1.1. Processos e Empresas.	145
2.6.1.2. Viabilidades Técnica, Ambiental e Econômica.....	148
2.6.1.3. Vantagens e Desvantagens.....	149
2.6.2. GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE.	149
2.6.2.1. Processos e Empresas	151
2.6.2.2. Viabilidades Técnica, Ambiental e Econômica.....	154
2.6.2.3. Vantagens e Desvantagens.....	157
2.6.3. CRAQUEAMENTO CATALÍTICO.	160
2.6.3.1. Empresas e Processos.	160
2.6.3.2. Viabilidades Técnica, Ambiental e Econômica.....	165
2.6.3.3. Vantagens e Desvantagens.....	165
2.7. Tratamentos Mecânicos e Biológicos.	166
2.7.1. Empresas e Processos.	168
2.8. ARCO DE PLASMA.....	172
2.8.1. Empresas e Processos.	173
2.8.1.1. RCL Plasma – Ottawa, Canadá	174
2.8.1.2. Hitachi Metals - Japão	176
2.8.1.3. Solena Group - Washington, DC	179
2.8.1.4. Georgia Tech Research Institute - Atlanta, Georgia	179
2.8.1.5. Westinghouse Plasma Corporation – Madison, PA.....	180
2.8.1.6. Outras Empresas	182
3. Tecnologias Consorciadas para o Tratamento dos RSU – Possibilidades de Geração e/ou Conservação de Energia.....	183
3.1. Tratamentos Mecânicos e Biológicos Combinados (Utilização do TMB Consorciado a Diversos Processos).....	183
3.2. CICLO COMBINADO (GN + INCINERAÇÃO → ZABALGARBI).....	184
3.2.1. Descrição Detalhada da Usina.	184
3.3. CICLO COMBINADO OTIMIZADO (ESTADO DA TÉCNICA)	186
3.3.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA	187
3.3.2. Descrição detalhada do Sistema	190

3.3.3. Vantagens e Originalidade do Sistema	190
3.4. Ciclo Combinado Otimizado com Biogás de Aterro.	191
3.5. Ciclo Combinado Otimizado com Biogás de Digestão Anaeróbica.....	191
3.6. Reciclagem plena, Biodigestão Anaeróbica, Cultivo de Oleaginosas, Produção de Biodiesel e de Carvão (ECOPOLO).....	191
4. Considerações Finais, Conclusões e Recomendações.....	198
5. Referências	200

APRESENTAÇÃO

Este trabalho procura mostrar as principais alternativas para o gerenciamento adequado dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), comumente tratados de lixo municipal. Os RSU representam um custo significativo para todas as prefeituras brasileiras, tanto pela manutenção do serviço de coleta quanto pelo tratamento necessário à destinação final adequada.

Em última análise estes custos são arcados pela sociedade, mas podem ser reduzidos através da aplicação de tecnologias de aproveitamento energético a exemplo do que é feito em diversos países. Existem, atualmente, mais de 1.700 usinas termelétricas movidas a lixo ou derivados no planeta. A maior parte utiliza as tecnologias de recuperação de gás dos aterros, incineração do lixo e decomposição anaeróbica da fração orgânica para produção de biogás.

Outras alternativas analisadas foram as tecnologias de conversão, ou seja, a transformação dos RSU em outros produtos valiosos como combustíveis, fertilizantes, catalisadores, adubos, etc. Entre estas tecnologias as mais promissoras, algumas com várias plantas comerciais em operação, destacam-se: a gaseificação/ pirólise, a hidrólise ácida, o craqueamento catalítico e o arco de plasma.

Foram ressaltados projetos, embora pequenos, pioneiros, de recuperação de biogás de aterros realizados nas cidades do Rio de Janeiro e de Natal, nas décadas de 1980 e 1990. Enquanto nesta o aproveitamento era feito diretamente em uma cozinha comunitária, naquela foi desenvolvido um sistema de tratamento do biogás para retirada de contaminantes e aumento do teor de metano, que abastecia uma frota de 100 veículos.

Atualmente, existe o domínio tecnológico, no Brasil, sobre a maioria das alternativas em operação no exterior, sendo possível ter mais de 60% de índice de nacionalização em todos os sistemas – além de alguns serem plenamente nacionais. Isto decorre de desenvolvimento local, fruto de iniciativas isoladas da academia e de empresas – pouquíssimas – e de consórcios entre estes segmentos, na maioria dos casos, e de representação comercial, em alguns deles.

A responsabilidade Constitucional quanto à gestão dos RSU é das Prefeituras Municipais. A criação do Ministério das Cidades possibilitou ao Governo Federal participar desta gestão, o que foi corroborado pela Política Nacional de Saneamento Básico, aprovada em 2007 pelo Congresso Nacional. O presente trabalho visa mostrar que o setor energético e as mudanças climáticas podem auxiliar na viabilização de outras alternativas.

Um exemplo é o edital lançado pelos Ministérios das Cidades e do Meio Ambiente, em 2006, convidando as 200 maiores cidades a manifestarem seus interesses quanto à elaboração de um Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica – para o aproveitamento de gás dos aterros e elaboração de um Documento de Concepção de Projeto para candidatura aos créditos de carbono. Foram hierarquizadas 132 cidades das que encaminharam respostas, o que representa 66% do total previsto. Atualmente um dos aterros paulistanos já fornece eletricidade para uma instituição financeira, enquanto o outro participou – e obteve êxito – do leilão do setor elétrico de junho de 2006, demonstrando a competitividade desta alternativa. A recente resolução nº 271 da ANEEL, de 03 de julho de 2007, isentando a cobrança de TUST e de TUSD da eletricidade gerada a partir de, no mínimo, 50% de resíduos, representa um significativo estímulo a este tipo de empreendimento.

Assim, pode-se concluir que o país vive a iminência de viabilizar este tipo de aproveitamento, para o que são necessários alguns incentivos setoriais, mesmo que temporários apenas para alavancar as primeiras atividades industriais, e a integração entre os agentes, quais sejam: governo federal, prefeituras, proprietários dos resíduos, detentores das tecnologias e empresas de energia/investidores.

Neste trabalho foram analisadas as tecnologias individuais disponíveis para o tratamento dos RSU no Brasil e no mundo. Em seguida, a exemplo do que é feito nos países desenvolvidos, foram consideradas combinações de duas ou mais tecnologias visando tratar as diversas frações presentes nos RSU (orgânicos, recicláveis, combustíveis).

Finalmente, foi identificada a alternativa com maior potencial energético e de geração de emprego.

INTRODUÇÃO

O Brasil deposita 45 milhões de toneladas de lixo por ano em vazadouros (IBGE, 2000), material que poderia ser convertido – através de processos conservadores – em cerca de 57.000 GWh de energia elétrica. Esta energia corresponde a cerca de 13% do consumo de energia elétrica do Brasil do ano de 2006 (BEN, 2007), equivalendo a uma usina de 6.500 MW médios¹ (mais da metade da capacidade instalada de Itaipu ou cinco vezes a de Angra 2) funcionando continuamente.

Dois grandes problemas enfrentados pelas sociedades, tanto por países desenvolvidos como pelos em desenvolvimento, são: disposição adequada dos resíduos sólidos e geração de energia segura, barata e limpa. As tecnologias para o aproveitamento energético dos resíduos permitem atender a todas estas premissas, uma vez que não há perspectiva de redução na sua produção – o que representa a segurança no fornecimento; a sociedade paga pela destinação final – requisito que ajuda a atender à modicidade tarifária, sobretudo ao agregar as receitas possíveis com a redução das emissões de gases do efeito estufa; e suas taxas de poluição são inferiores às que ocorreriam no caso do lixo ser destinado a vazadouros.

Na escala hierárquica, após redução na origem e reciclagem, usinas de conversão lixo-energia (“waste-to-energy” – WTE – ou Usinas Termelétricas à Resíduos - UTR) são o caminho natural para extrair a energia contida nos resíduos. Para tanto, existem diversas tecnologias, a saber: incineração, digestão anaeróbica, arco de plasma, gaseificação/pirólise, fermentação alcoólica (hidrólise ácida) e conversão térmica (craqueamento catalítico), além do uso do metano produzido espontaneamente nos aterros. A compostagem aeróbica, apesar de não disponibilizar energia diretamente, também pode ser uma alternativa de gestão, mas sua aplicação só é mais vantajosa financeiramente quando refere-se a pequenas quantidades de resíduos.

Com a separação adequada dos resíduos (Tratamentos Mecânico-Biológicos), uso de modernos equipamentos de controle da poluição e com o uso de tecnologias múltiplas para diferentes tipos de lixo, usinas UTR podem gerar energia ambientalmente segura – e que seria desperdiçada caso o lixo fosse depositado em “lixões” ou aterros.

Usinas UTR não resolverão totalmente os problemas da disposição do lixo e, muito menos, os de energia. Entretanto, podem auxiliar neste sentido com soluções redutoras de impactos ambientais – em comparação com as outras alternativas energéticas e com a própria tendência

¹ Potência média aqui significa utilização em tempo integral da potência instalada, ou seja, fator de capacidade 100%.

de destinação final dos resíduos. Como a perspectiva é de aumento da produção per capita nos próximos anos e as UTR devem ser projetadas para trabalhar sem capacidade ociosa, serão necessárias campanhas voltadas a conservar recursos naturais e reduzir a geração de resíduos – ainda que esta atividade seja de difícil implementação, por contrapor-se ao modelo de desenvolvimento planetário. O lixo deve ter a parcela composta por papéis, plásticos, vidros e metais, reciclada, enquanto a fração orgânica deve ser compostada, se possível, anaerobicamente.

O gerenciamento adequado dos resíduos sólidos urbanos (RSU) enfrenta dificuldades, no Brasil, devido à escassez de recursos, tanto para a execução de soluções tecnicamente consolidadas quanto para pesquisas sobre otimização, integração e inovação tecnológica que sejam economicamente viáveis. Enquanto em países desenvolvidos a gama de soluções e processos cresce a cada dia, no Brasil a solução dos aterros, grande parte sem controle (“lixões”), é praticamente a única adotada.

Apesar da complexidade da composição dos RSU, que depende de inúmeros fatores, como hábitos culturais, poder econômico, clima, estações do ano e muitos outros, ao considerar as possibilidades de reaproveitamento dos RSU, seja por reciclagem ou recuperação da energia, é possível distinguir as seguintes frações principais:

- Fração Orgânica Biodegradável Úmida → alto teor de umidade. Ex: restos de alimentos, lixo de jardins, cascas de coco.
- Fração Orgânica Biodegradável Seca → baixo teor de umidade. Ex: papéis, papelão, tecidos, madeiras secas.
- Metais → a maioria recicláveis. Ex: ferro, alumínio.
- Vidros → recicláveis e não recicláveis.
- Plásticos → recicláveis e não recicláveis.
- Inertes → materiais quimicamente estáveis. Ex: entulho de obras, cinzas.
- Materiais Potencialmente Perigosos → alguns podem até ser reciclados, mas necessitam de tratamentos especiais. Ex: pilhas e baterias contendo cádmio, lixo hospitalar, componentes eletrônicos.

Um sistema adequado de gerenciamento de RSU deverá contemplar os materiais de modo a adotar a melhor solução para cada um deles. A referência à “melhor” solução deve considerar todos os aspectos, inclusive o cronológico, pois algumas tecnologias requerem, durante certo período, apoio ao desenvolvimento, para ganhar escala industrial. Uma solução adequada é

aquela que reduza significativamente os efeitos nocivos da falta de tratamento do lixo e que seja economicamente viável – ainda que a rentabilidade financeira só venha a ocorrer depois de algumas unidades industriais em funcionamento, de modo a permitir a preservação ambiental desejada.

Obviamente, uma solução viável na Europa ou Japão, onde a comunidade pode pagar mais de US\$ 100 por tonelada para sua adequada destinação, não é factível para países em desenvolvimento como o Brasil. Aqui estas taxas se situam em torno de US\$ 7 por tonelada (COMLURB, Rio de Janeiro). No entanto, países em desenvolvimento podem se beneficiar com recursos oriundos dos créditos de carbono instituídos pelo Protocolo de Kyoto, que entrou em vigência em 2005 no âmbito da Convenção do Clima da ONU, em particular através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permite a estes países, dentre os quais o Brasil, receber recursos provenientes de países desenvolvidos para aplicá-los em projetos que reduzam a emissão de gases do efeito estufa.

A razão disto é que os países incluídos no Anexo I da Convenção e que ratificaram o Protocolo aceitaram as metas para reduzir suas emissões, enquanto os países em desenvolvimento não têm essa obrigação. Tal relação está fundamentada no princípio da “responsabilidade comum, porém diferenciada”, pois grande parte dos gases acumulados na atmosfera refere-se às atividades dos países mais desenvolvidos, como o dióxido de carbono devido ao consumo de combustíveis fósseis e o metano decorrente da disposição final de resíduos.

Por conta disto, já está aumentando o número de empreendimentos de geração com fontes – alternativas e renováveis – menos intensivas em emissão de dióxido de carbono. Também têm ocorrido limitações à disposição de lixo orgânico em aterros sanitários, tanto na Europa quanto no Japão.

O consórcio destas soluções, o aproveitamento energético do lixo, reduz emissões de duas fontes, o que pode representar maior tendência de atingir a viabilidade nos países em desenvolvimento.

1. A Questão do Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

O lixo, conjunto dos resíduos gerados pela sociedade em suas diversas atividades, constitui uma das maiores preocupações para aqueles que compreendem os malefícios que podem ser causados por sua inadequada destinação final. Por outro lado, existem diversas tecnologias que permitem o aproveitamento energético do lixo, transformando-o em eletricidade ou combustível. Assim, o problema da disposição dos resíduos e o planejamento energético têm, hoje, soluções convergentes. No Brasil, aproximadamente 45 milhões de toneladas anuais de resíduos urbanos (IBGE, 2000) são produzidas atualmente e encaminhadas para vazadouros, causando custos à sociedade.

Com o desenvolvimento econômico das classes sociais ocorre, ainda, um aumento significativo na produção de resíduos. Uma solução satisfatória e de certa forma simples, ainda que não ideal, é a disposição dos resíduos em aterros sanitários, que a princípio evita uma série de problemas ambientais como, por exemplo, a contaminação de lençóis freáticos, para citar apenas uma, e suas conseqüências sociais, econômicas e administrativas. Mas mesmo essa forma de disposição não é sustentável do ponto de vista econômico, por uma série de motivos a serem abordados ao longo desse trabalho. Essa solução apenas adia o surgimento de uma série de problemas, visto que a maioria dos aterros não apresenta uma forma adequada de disposição e grande parte dos resíduos coletados ainda ser colocada em lixões, causando problemas de contaminação da água, de saúde, de espaço, entre outros. As emissões dos gases e líquidos desses locais, decorrentes da ausência de um controle e tratamento adequado, são problemas ambientais gravíssimos, que afetam o bem estar físico, mental e social das pessoas. Os resíduos poderiam ser aproveitados como substitutos dos combustíveis fósseis, uma vez que a energia é escassa e o lixo existe em excesso.

O potencial de aproveitamento energético, incluindo-se a economia devida à reciclagem, contido no lixo brasileiro atinge 6.500 MW médios, cerca de 13% do consumo total do país (BEN, 2007). Este potencial pode ser explorado a custos competitivos com as opções tradicionais de geração elétrica, além de abater emissões de gases de efeito estufa e ofertar empregos para a população com baixa qualificação profissional, sobretudo nas cidades de maior densidade demográfica. Isto foi comprovado pelo resultado do leilão de energia "nova", em 2006, quando a Usina do Aterro São João, de São Paulo, foi uma das vencedoras.

1.1. Resíduos do Lixo (Conceito)

Matéria-prima fora do lugar ou dinheiro jogado fora, o termo resíduo engloba os diversos artefatos utilizados pelo homem que tenham perdido sua utilidade para cumprir o fim a que foram destinados inicialmente.

De acordo com a Norma Brasileira NBR -10.004, os resíduos definidos como sólidos são aqueles: "(...) resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também, resíduo sólido os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível" (ABNT, 1987).

Apesar desta definição ser, segundo Teixeira et al. (1997), muito ampla, é a oficial e servirá como base a este texto. Formalmente, os resíduos podem ser classificados segundo sua origem, ou segundo suas características físicas:

Quanto à sua origem:

- resíduos urbanos – provenientes de residências, atividades comerciais, varrição de ruas, podas de árvores e similares;
- resíduos industriais – gerados pelos processos de transformação;
- resíduos agrícolas – decorrentes da atividade produtiva do setor primário;

Quanto às suas características físicas:

- materiais inertes – vidros, metais, terras e cinzas e restos inertes;
- materiais combustíveis – papéis, cartões, plásticos, madeira, gomas, couro, alimentos e outros.

Para tratar o lixo adequadamente, algumas informações são fundamentais, como a quantidade produzida em cada localidade, a produção *per capita*, a composição do lixo, o que isto representa em nível de desenvolvimento, onde é disposto, qual a disponibilidade de área para continuar a disposição final atual, quais os impactos ambientais e sociais que o lixo causa e quais as oportunidades que seu (re)aproveitamento pode viabilizar. Estes ingredientes

permitem elaborar um Plano Diretor para os resíduos, com vistas a torná-los insumo para novos processos.

As rotas de destinação e disposição final dos resíduos sólidos urbanos podem ser hierarquizadas. Quando esta hierarquia está baseada no critério de resíduo final mínimo, é conhecida como Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (SIGRS). Para o SIGRS, as rotas devem ser priorizadas na seguinte ordem: redução da geração de lixo na fonte, reutilização do material produzido, reciclagem, recuperação de energia e aterro sanitário (SERÔA DA MOTTA e CHERMONT, 1996, apud OLIVEIRA, 2004).

1.2. Tecnologias para Aproveitamento dos RSU

Uma das soluções para o problema apresentado é o desenvolvimento de equipamentos para o aproveitamento energético dos resíduos. Estas usinas movidas a resíduos podem disponibilizar energia diretamente através da queima ou incluir um estágio no processo, referente ao beneficiamento dos resíduos para a obtenção da energia e/ou de combustível derivado de resíduos (CDR). Nesse trabalho serão abordadas diversas tecnologias para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU), a serem desenvolvidas nos capítulos subseqüentes.

1.3. Composição dos RSU e Potencial Energético

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1997)², a composição média do lixo brasileiro é de 65% de restos alimentares, incluindo inertes, 25% de papéis, 3% de plásticos, 3% de vidros e 4% de metais. Já a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2006) identificou³ a participação de 57% de restos alimentares, 2% de metal, 2% de vidro, 13% de papel e 16% de plástico, sendo o restante composto por inertes e outros.

Esta composição varia de acordo com o poder aquisitivo das populações, como mostra o trabalho realizado pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB, 2005), abaixo. Ao relacionar a composição do lixo com a renda per capita dos moradores das áreas de planejamento⁴ (AP) da cidade foi ressaltado que o incremento do poder aquisitivo aumenta a participação de embalagens e, por conseqüência, reduz a participação de restos

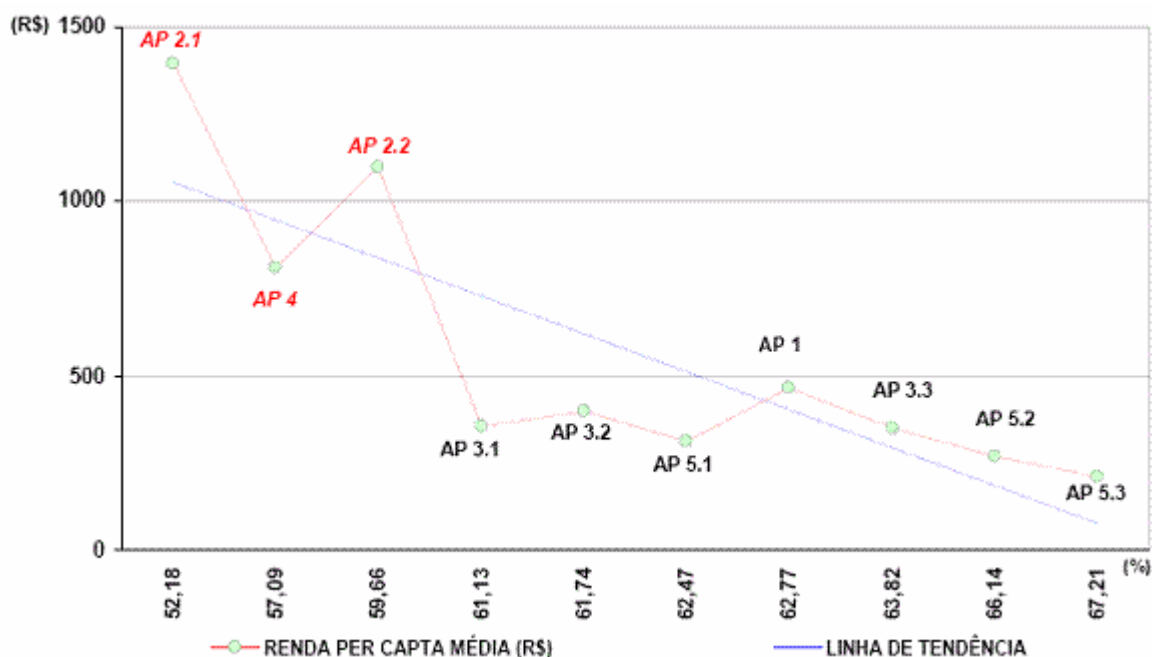
² Apesar da importância desta informação para o planejamento do aproveitamento energético dos resíduos, por conta do desprezo a esta solução, não existe coleta formal e periódica deste tipo de dado.

³ A metodologia utilizada pela ABRELPE foi comparar o total informado pelo IBGE com a produção de embalagens, considerando que todas as embalagens sejam destinadas ao lixo.

⁴ Divisão regional do município do Rio de Janeiro. A composição de bairros de cada AP pode ser encontrada no endereço eletrônico do Instituto Pereira Passos, responsável pelas estatísticas municipais (<http://www.rio.rj.gov.br/ipp/>).

alimentares. O Gráfico 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a seguir, representa o resultado encontrado.

Gráfico 1 – Correlação entre Percentual de Restos Alimentares no Lixo e Renda Per Capita das Áreas de Planejamento da Cidade do Rio de Janeiro



COMLURB, 2005

Para que o potencial energético seja conhecido, é necessário que a composição do lixo em cada cidade seja desvendada. A combinação desta informação com a quantidade produzida, a distância entre as cidades, as demandas mínimas de cada tecnologia de geração e os processos de conservação através da reciclagem possibilitará construir o potencial brasileiro. A inexistência deste dado remete a uma faixa muito ampla de potencial energético, com o limite superior sendo cinco vezes maior que o limite inferior.⁵

Em virtude da indisponibilidade dos dados de campo colhidos à mesma época e com aplicação da mesma metodologia, o melhor resultado que pode ser obtido é a extrapolação através de seus Índices de Desenvolvimento Humano (IDH), da correlação com base no IDH e Composição do Lixo dos bairros do município do Rio de Janeiro – ambos para o ano 2000, e dados mais recentes sobre Composição do Lixo e IDH de municípios cujos IDHs não estejam contemplados pela lista elaborada com os dados cariocas.

⁵ Considerando a produção de lixo do IBGE, a composição do IPT, o potencial de conservação de energia de Morris (1996) e o aproveitamento energético do biogás em aterros, valores que serão apresentados e calculados no decorrer do trabalho, é possível atingir 38 TWh/a. No outro extremo está a produção industrial de materiais que poderiam ser descartados, a quantidade reciclada, o potencial de conservação de Calderoni (1996) e o aproveitamento da fração orgânica em biodigestores, atingindo 170 TWh/a.

1.4. RSU e Aspectos Políticos, Sociais e Ambientais

A principal questão ambiental dos Resíduos Sólidos Urbanos é a poluição local relacionada à sua destinação final, uma vez que as áreas vizinhas às utilizadas para este fim perdem a atratividade para outras atividades (produtivas ou residenciais). Os principais motivos são o mau cheiro, a presença de urubus, ratos e outros vetores, bem como o elevado potencial de poluição do solo e do lençol freático, além dos riscos de explosão. Por conta disto, as manifestações contrárias à instalação de depósitos de lixo nas proximidades de áreas urbanas passaram a ser conhecidas internacionalmente pela sigla NIMBY, referente à expressão inglesa “not in my back yard” (não no meu quintal), que reflete o paradoxal interesse de todos em ter o problema resolvido, desde que longe de sua área de influência. É importante ressaltar, nos países mais pobres, o papel de disseminadores de doenças que os catadores de lixo que trabalham nos vazadouros podem exercer, o que aumenta o dano causado por este tipo de situação.

Mas a poluição local, que afetava apenas às classes menos favorecidas, desdobrou-se em poluição global com as emissões de gases responsáveis pelo aquecimento global, também conhecido como efeito estufa. Atualmente, a utilização de tecnologias que evitem a decomposição anaeróbica dos resíduos, ou que recuperem e queimem estes gases, é incentivada com recursos a fundo perdido, conhecidos como créditos de carbono.

Uma melhor apresentação do problema relacionado ao aquecimento global encontra-se a seguir.

1.4.1. O Efeito Estufa Antropogênico e os Créditos de Carbono

A temperatura média próxima à superfície da Terra seria de aproximadamente 17° C abaixo de zero, fruto do processo natural de seu balanço energético com o sol, a atmosfera e o espaço, caso não houvesse na atmosfera certos gases, destacando-se entre eles o CO₂. A presença na atmosfera de gases com características “estufa” – “transparentes” às radiações solares, mas absorvedores da radiação térmica emitida pela Terra, re-emitada por eles em todas as direções – aquece o planeta, levando a temperatura média da atmosfera próxima à superfície terrestre a cerca de 15° C, mais favorável à vida como conhecemos.

Está comprovado, entretanto, através de medições da concentração de dióxido de carbono nas geleiras das calotas polares, que a presença desse gás na atmosfera vem aumentando nos últimos dois séculos, na atmosfera, a presença desse gás de forma acentuada, capaz de intensificar o efeito estufa e modificar as condições climáticas do planeta. Como este aumento

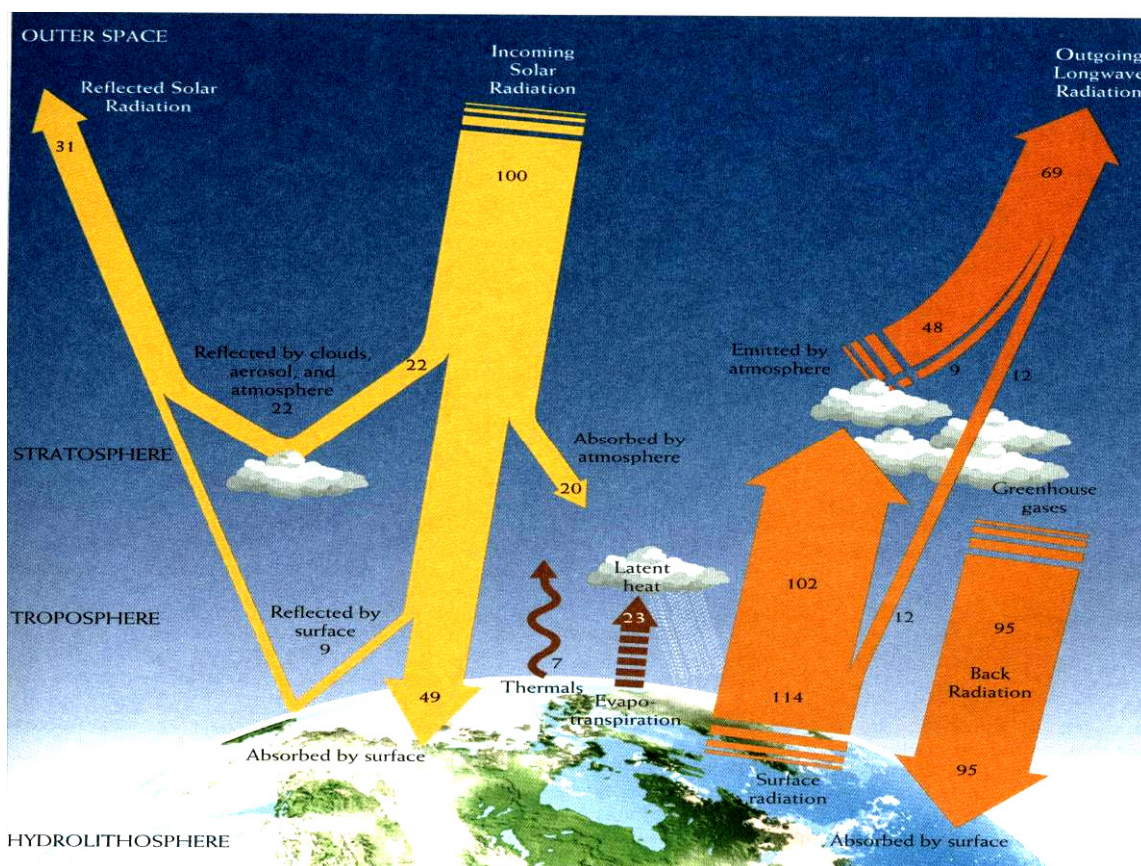
está ocorrendo simultaneamente ao incremento da emissão deste e de outros gases provenientes das atividades humanas, como combustão de combustíveis fósseis e fermentação anaeróbica de resíduos, convencionou-se chamar este fenômeno de efeito estufa antropogênico.

Os gases de efeito estufa (GEE)⁶ são caracterizados por suas moléculas absorverem radiação eletromagnética em frequências da faixa do infravermelho, tal qual a radiação térmica emitida pela Terra. Por outro lado eles não absorvem radiação com frequências situadas na faixa da luz visível, como a emitida pelo Sol (ROSA, 1997).

A Figura 1 mostra que a quantidade de energia que chega à superfície terrestre é maior que aquela emitida pelo sol e que atravessa a atmosfera. Tendo como base de cálculo a quantidade de energia emitida pelo Sol (100%), vê-se que 22% são refletidos pela atmosfera de volta ao espaço, 9% são refletidos pela superfície terrestre, 20% são absorvidos pela atmosfera e 49% são absorvidos pela superfície (terra firme e oceanos). Devido aos gases do efeito estufa, a taxa líquida de energia em fluxo entre a superfície terrestre e a atmosfera é muito maior que a quantidade de energia que chega ao planeta, oriunda do Sol. Vê-se que a superfície transfere para a atmosfera e o espaço, energia na forma de radiação térmica, em quantidades equivalentes, respectivamente, a 102% e 12%. Além disso, 23% são transferidos para a atmosfera na forma de calor latente, por processos de evaporação e transpiração e 7% por outros processos térmicos. A atmosfera também irradia energia para o espaço (57%) e para a superfície (95%). Assim, fazendo-se o somatório de todas as correntes que efetivamente chegam à superfície, observa-se uma taxa global de energia equivalente a 144%.

⁶ Os principais gases causadores do efeito estufa antropogênicos são: CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), CFC₁₁ e CFC₁₂ (clorofluorcarbonos).

Figura 1 - O Efeito Estufa.



Fonte: Gradel e Crutzen, 1997.

Além de suas concentrações diferentes, como mostra a Tabela 1, os GEE diferem quanto a seus potenciais de aquecimento global (GWP), uma medida da capacidade de absorção e redistribuição da energia térmica emitida pela Terra.

Tabela 1- Concentrações de GEE na Atmosfera

GEE	CO ₂	CH ₄	O ₃ (ao nível do solo)	N ₂ O	CFCs
%	50	11	9	7	13

Fonte: I. Smith, 1988.

O GWP é calculado, tendo como base um intervalo de tempo ou horizonte específico (medido em anos), tendo em vista que é uma função da vida média de cada gás na atmosfera. O GWP do gás carbônico é, por definição, igual a 1, não importando o horizonte de tempo considerado.

Segundo os cálculos do IPCC⁷, os GWP dos principais gases do efeito estufa são calculados e mostrados na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2 – Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential - GWP)

Espécies	Fórmula química	Tempo de vida (anos)	Potencial de aquecimento global (horizonte de tempo)		
			20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono	CO ₂	Variável	1	1	1
Metano	CH ₄	12±3	56	21	6.5
Óxido Nitroso	N ₂ O	120	280	310	170
Ozônio	O ₃	0,1 - 0,3	n.d.	n.d.	n.d.
HFC-23	CHF ₃	264	9.100	11.700	9.800
HFC-32	CH ₂ F ₂	5,6	2.100	650	200
HFC-41	CH ₃ F	3,7	490	150	45
HFC-43-10mee	C ₅ H ₂ F ₁₀	17,1	3.000	1.300	400
HFC-125	C ₂ HF ₅	32,6	4.600	2.800	920
HFC-143	C ₂ H ₃ F ₃	3,8	1.000	300	94
HFC-143a	C ₂ H ₃ F ₃	48,3	5.000	3.800	1.400
HFC-227ea	C ₃ HF ₇	36,5	4.300	2.900	950
HFC-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	209	5.100	6.300	4.700
HFC-145ca	C ₃ H ₃ F ₅	6,6	1.800	560	170
Hexafluorido de Enxofre	SF ₆	3200	16.300	23.900	34.900
Perfluorometano	CF ₄	50.000	4.400	6.500	10.000
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	10.000	6.200	9.200	14.000
Perfluoropropano	C ₃ F ₈	2.600	4.800	7.000	10.100
Perfluorociclobutano	c-C ₄ F ₈	3.200	6.000	8.700	12.700
Perfluoropentano	C ₅ F ₁₂	4.100	5.100	7.500	11.000
Perfluorohexano	C ₆ F ₁₄	3.200	5.000	7.400	10.700

Fonte: IPCC, 1996.

É importante notar na tabela que o metano (CH₄) emitido pela fermentação dos resíduos sólidos em locais para disposição final tem GWP bastante maior que o do dióxido de carbono (CO₂).

1.4.2. As Emissões dos Resíduos Sólidos

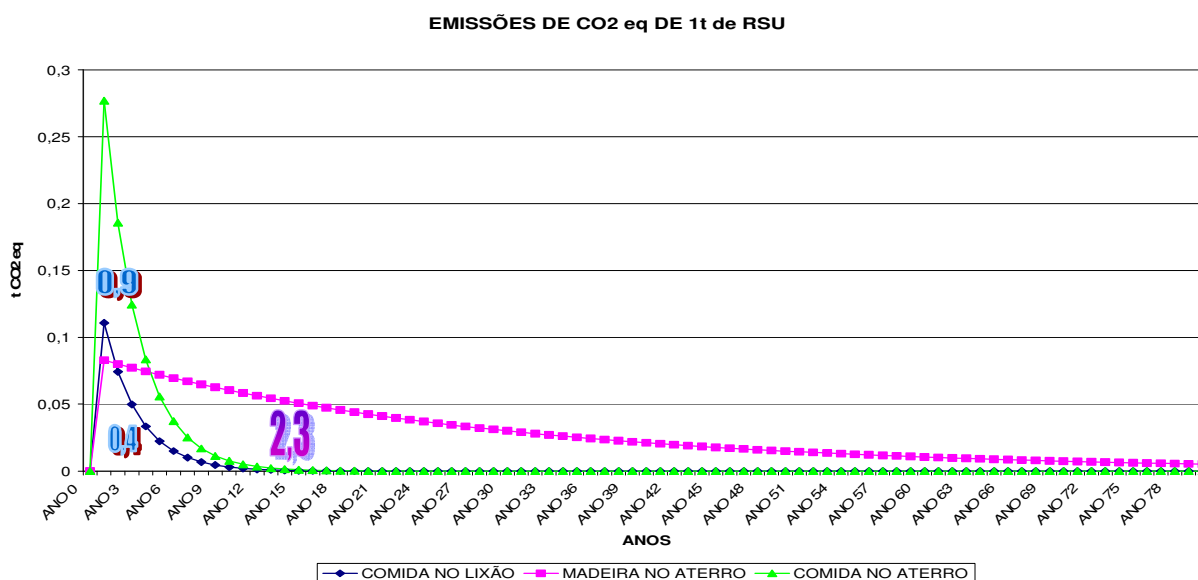
De acordo com a Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (USEPA, 1998), são quatro as principais formas de relação entre os resíduos sólidos urbanos – lixo – e o efeito estufa: **emissão de dióxido de carbono** decorrente do consumo de energia para extração e produção dos bens (incluindo a extração e processamento dos combustíveis a serem usados);

⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change – Órgão que assessoria as Nações Unidas no estudo sobre o tema, suas causas e seus efeitos, inclusive propondo metodologias para elaboração de inventários e medidas mitigadoras.

emissão de dióxido de carbono oriunda do consumo não-energético de combustíveis no processo de produção dos bens; **emissão de metano** dos aterros sanitários em que os materiais acima e os restos de alimentos são depositados⁸ e se decompõem; e **fixação de carbono**⁹ das parcelas dos materiais que não se decompõem nos aterros sanitários. Uma quinta relação é a emissão de **dióxido de carbono** devida ao transporte dos resíduos, desde a coleta até a destinação final.

As emissões, de acordo com o modelo matemático disponibilizado pelo IPCC (2006), ocorrem durante 80 anos. As características da curva dependem do teor de material orgânico do lixo e do tipo de destinação final utilizado. O Gráfico 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a seguir, apresenta os dois extremos – em emissões totais – dentre várias simulações realizadas para uma tonelada de lixo: somente composto por restos alimentares e disposto em vazadouro a céu aberto (lixão), que somou 0,4 t CO₂ eq, e exclusivamente composto por madeira e disposto em aterro sanitário, que somou 2,3 t CO₂ eq. Também é apresentado o caso de somente restos alimentares em aterro. Todos os casos consideram as condições ambientais tropicais e úmidas.

Gráfico 2 – Emissões de CO₂ eq de 1 tonelada de Resíduos Sólidos Urbanos em Disposições Finais diferenciadas



Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC 2006.

Percebe-se que a emissão da madeira em aterro sanitário é cerca de 6 vezes maior que a dos restos alimentares em lixão, e cerca de 2,5 vezes maior que a dos restos alimentares no próprio

⁸ O CO₂ emitido pela fermentação do lixo não é contabilizado como GEE pelo IPCC, pois é oriundo de biomassa cultivada (alimentos e papel).

⁹ As metodologias para inventários propostas pelo IPCC não consideram este pleito de fixação. Nenhum projeto de carbono aprovado solicitou este benefício, até o momento.

aterro. Entretanto, cabe ressaltar que a emissão dos restos alimentares é mais acentuada nos primeiros anos, atingindo entre uma vez e meia e o triplo da emissão da madeira.

Os aterros sanitários em todo o mundo produziram cerca de 20 a 60 milhões de toneladas de metano por ano, resultado direto da decomposição orgânica dos componentes do lixo (Muylaert *et alli*, 2000), o que pode ser visto na Tabela 3, a seguir. Ainda que cerca de dois terços destas emissões sejam de países desenvolvidos, a contribuição relativa dos países em desenvolvimento está mudando rapidamente e, devido às tendências de crescimento populacional e urbanização, bem como às necessidades de crescimento econômico, estes serão responsáveis por uma parcela cada vez maior das emissões de metano. Ressalta-se que, mesmo assim, não haverá alteração nas emissões per capita, pois as dos países em desenvolvimento permanecerão por muitas décadas menores do que aquelas dos países desenvolvidos (*idem*).

Tabela 3 – Estimativas de Emissão de Metano de Aterros Sanitários

País	Emissões Estimadas (Tg ¹⁰ /ano) ⁽ⁱ⁾
E.U. ⁽ⁱⁱ⁾	8 – 12
U.K.	1 – 3
Brasil	0.7 – 2.2
Índia	0.2 – 0.8
Polônia	0.1 – 0.4
Outros	11 – 39
Total	21 – 57

(i) Baseado no Congresso Global de Emissões Antropogênicas de Metano (Muylaert *et alli*, 2000);

(ii) Muylart *et alli*, 2000

Segundo Bogner (2007), as emissões do setor resíduos representam menos de 5% do total de emissões de gases causadores do efeito estufa.

É importante considerar, ainda, as emissões vinculadas aos transportes dos materiais novos e dos recicláveis, nas várias etapas do processo, uma vez que o balanço desse fator também deve ser analisado quanto ao potencial de mitigação.

Caso venham a ser aplicadas técnicas de gerenciamento diferentes da disposição em aterros, da fração orgânica úmida dos RSU, como as apresentadas nos itens anteriores, não haverá emissão de biogás (metano e dióxido de carbono) de fermentação.

Este fato acaba por reduzir, também, as emissões de dióxido de carbono decorrentes da combustão de derivados de fósseis, uma vez que são substituídos para gerar aquela quantidade

¹⁰ Teragrama ou milhões de toneladas.

de energia, cujo benefício depende do tipo de combustível a ser usado, de acordo com o planejamento do setor elétrico. No Brasil, o fator de emissão da margem de construção¹¹ varia entre zero, na região norte, e 173,7 t CO₂/GWh na região Sul¹² (MCT, 2007). Isto se deve ao fato de que, ao estar sendo usada como combustível, a combustão da biomassa cultivada emana dióxido de carbono, o qual foi totalmente absorvido durante o crescimento daquela safra de vegetais ou na engorda da pecuária, configurando emissão nula – visto que seu balanço é sempre favorável¹³.

Como o metano (CH₄) tem potencial de aquecimento global¹⁴ para 100 anos (GWP), definido pelo IPCC, 21 vezes maior que o dióxido de carbono, a simples queima do metano, mesmo sem o aproveitamento do calor gerado, reduz o seu impacto – em termos de aquecimento global. Se o metano for utilizado para a geração de energia, cada unidade elétrica gerada com resíduos (dependendo da rota escolhida) será capaz de compensar a emissão decorrente de três a quinze unidades energéticas geradas com gás natural em ciclo combinado (OLIVEIRA e ROSA, 2003). Considerando a conservação de energia possível com a reciclagem, a emissão evitada referente à expansão da construção refere-se a 29 unidades de energia gerada pelo mix previsto pelo ONS para cada unidade de energia gerada com os resíduos.

1.4.3. Convenção do Clima e os Créditos de Carbono

As mudanças no padrão de consumo da sociedade¹⁵, desde a Revolução Industrial, levaram ao acúmulo de GEEs na atmosfera em quantidades sem precedentes. Uma fonte de emissões importante é a decomposição anaeróbica dos RSU, a qual decorre dos restos orgânicos de fácil digestão (alimentos, papéis e excrementos humanos). A presença de outros materiais misturados nos RSU favorece a decomposição anaeróbica, na medida em que dificulta a presença de oxigênio.

¹¹ O fator de emissão da margem de construção (BM) deve ser calculado como o fator de emissão médio ponderado do conjunto *M* de usinas mais recentemente construídas. O conjunto *M* é constituído pelas usinas mais recentes que compreendam 20% da geração anual do sistema, ou pelas 5 usinas mais recentes no caso dessas serem responsáveis por mais de 20% da geração do sistema. O fator BM é calculado e disponibilizado anualmente. Os projetos de MDL têm duas opções de utilização do fator BM. Ele pode ser calculado ex ante quando da submissão do projeto, ou ex post para cada ano em que a geração do projeto ocorrer.

¹² Dentre as usinas termelétricas, as abastecidas por gás natural (GN), cuja combustão emitirá para a atmosfera 449 ton CO₂/GWh (LA ROVERE e AMERICANO, 1998), no caso do ciclo combinado, podem ser consideradas como as de melhor rendimento entre as formas de aproveitamento dos combustíveis fósseis. Apesar deste fator ser significativamente grande em relação às emissões da biomassa, quando comparado às emissões decorrentes do uso de óleo diesel em usina térmica a ciclo combinado, 607 t CO₂/GWh (PINGUELLI ROSA e SCHECHTMAN, 1996) e do uso de carvão mineral nacional em usina térmica em ciclo a vapor convencional, cuja emissão pode chegar a 1248 t CO₂/GWh (idem), revela que o gás natural é o mais limpo dos combustíveis não renováveis.

¹³ A biomassa cultivada retira carbono da atmosfera via fotossíntese e, quando utilizada como combustível, emite dióxido de carbono, entre outros gases, até anular o benefício que proporcionou.

¹⁴ Este valor é cientificamente errado, pois no seu cálculo não se leva em conta a resposta da atmosfera. O valor correto é menor mas encontra-se em discussão no IPCC.

¹⁵ Principalmente a queima de combustíveis fósseis em quantidades crescentes; as queimadas e desmatamentos florestais, que fomentam o incremento de uso do solo para atividades produtivas (do ponto de vista financeiro).

E a presença destes materiais vem crescendo, em virtude de um equívoco na aplicação do conceito de obsolescência planejada, cujo foco está na redução da vida útil dos bens de consumo para torná-los mais baratos e, portanto, acessíveis a todas as classes sociais. O equívoco relaciona-se à não utilização dos resíduos como insumos de novos produtos, o que causa dois problemas: o extrativismo de recursos naturais e a disposição final de RSU.

Como cerca de 90% dos materiais presentes nos RSU podem ser (re)utilizados, seja reciclando as embalagens ou transformando tudo em energia através de técnicas já utilizadas em diversos países, sobretudo os europeus, fica comprovado que houve uma escolha pela utilização de insumos novos por parte da indústria, o qual somente é alterado quando os governos manifestam-se contrários a esta deletéria opção.

As conseqüências do efeito estufa deveriam levar a humanidade à discussão sobre padrões de consumo, principalmente sobre o modelo que tendem a buscar os países em desenvolvimento, haja vista que o "American way of life" (consumismo americano) não pode ser estendido para todos os seres humanos, pois a natureza não consegue ofertar, com as tecnologias disponíveis, suporte para toda a poluição e extrativismo acelerado oriundos deste "progresso" parcial. Este assunto foi suscitado por Rosa (1996), quando analisou a visão dos países em desenvolvimento quanto ao efeito estufa e a necessidade de crescimento econômico com base em suas potencialidades.

É importante notar a mudança de foco pelo consenso do problema da poluição global, que transforma todos os habitantes do planeta em vítimas potenciais do efeito estufa e, portanto, interessados em sua solução. Segundo o IPCC: "é fundamental que sejam adotadas medidas de âmbito mundial com o objetivo de reversão ou estabilização das taxas de concentração de GEE."

Neste sentido, em 9 de maio de 1992, foi criada a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, na Organização das Nações Unidas. A UNFCCC¹⁶ reconhece a mudança do clima como "uma preocupação comum da humanidade" e propõe uma estratégia global "para proteger o sistema climático para gerações presentes e futuras" e para estabilizar "as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático." (PNUMA, 1992).

O acordo estabelecido, nesta oportunidade, voltou-se à elaboração de inventários nacionais de emissões de gases do efeito estufa, com base no ano de 1990 e ao compromisso, pelos países

¹⁶ United Nations Framework Convention on Climate Change.

desenvolvidos e as chamadas economias em transição (ex-URSS e leste europeu), de redução de 5% destes níveis a partir do ano 2000 (idem).

Em dezembro de 1997 em Kyoto, no Japão, na Terceira Conferência das Partes (COP 3), órgão supremo da Convenção, foi apresentada a proposta brasileira de criação de um Fundo para o Desenvolvimento Limpo. Foram sugeridos critérios para atribuição de responsabilidades históricas pelo aquecimento global e, com isso, mensurar as emissões máximas possíveis, cujo descumprimento seria atrelado a um sistema de multas, que geraria recursos para o Fundo destinar a projetos apresentados pelos países que cumprissem suas metas.

Apesar de não aceita, esta proposta deu origem ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL, ou CDM da sigla em inglês), um dos quatro instrumentos econômicos de flexibilização criados pelo Protocolo de Kyoto. Os países responsáveis pela maioria das emissões históricas passaram a integrar um documento conhecido por Anexo I do Protocolo, para os quais foi estipulada a meta de redução, entre os anos de 2008 e 2012, 5% em média das emissões de GEE em relação aos níveis de 1990. Desta forma, o Protocolo busca obter uma reversão da tendência histórica de crescimento das emissões antrópicas de GEE na atmosfera, de acordo com o objetivo final da UNFCCC, sendo o CDM o único aplicável entre integrantes do Anexo I e Não-Anexo I (os países em desenvolvimento).

Este Protocolo não foi regulamentado em novembro de 2000, na COP 6, em reunião na Haia, Holanda, nem mesmo nas COPs 7, em Marrakesch, Marrocos, 8, em Nova Dehli, Índia e 9, em Milão, na Itália, em 2003. O governo dos Estados Unidos, após a vitória de George W. Bush, negou-se a ratificar o protocolo alegando que não existiria comprovação das causas do fenômeno serem antropogências. Em meados de novembro de 2004, menos de um mês antes da realização da COP 10, em Buenos Aires, na Argentina, a Rússia ratificou o Protocolo, após negociar com a União Européia seu apoio a este e outros acordos ambientais em troca do apoio para integrar a Organização Mundial do Comércio. Isto permitiu o início da vigência do compromisso internacional em 16 de fevereiro de 2005, noventa dias após a ratificação.

Este acordo tem o intuito de que os compromissos firmados possam ser atingidos através dos menores custos marginais de abatimento – fato normal nos países não-anexo I – simultaneamente ao fomento do desenvolvimento sustentável nestas nações. É preciso que seja construído um consenso internacional para que estes recursos não sofram com os desperdícios históricos, ou com as destinações benevolentes de alguns negociadores. As metas estabelecidas para o primeiro período de compromisso, que correspondem ao intervalo entre 2008 e 2012, referem-se a 5,2% abaixo das emissões em 1990. Após este período serão estabelecidos outros patamares, cujas negociações começam em 2007 – cinco anos antes de entrar em vigor, conforme regra da Convenção do Clima.

Mas, para as empresas norte-americanas, o interesse do governo em não cumprir metas de redução nas emissões não é incompatível com as oportunidades de negócios que os créditos de carbono representam, o que é demonstrado pela criação da Bolsa de Carbono de Chicago (CCX, 2004). Nesta instituição tem sido comercializados créditos de projetos de redução de emissões em diversos países, tanto com empresas americanas quanto de outras nacionalidades. Os preços pagos, antes da ratificação do Protocolo, pela unidade convencionada (tonelada de dióxido de carbono equivalente) eram os menores dentre as negociações divulgadas, os quais atingiam cerca de US\$ 0,90 contra US\$ 5 do fundo holandês (CERUPT, 2004) e até US\$ 10 de ONGs internacionais – mas que adquirem apenas pequenas quantidades. Apesar da diferença de preços, a CCX requer menor quantidade de garantias que os outros compradores em exercício, ainda que exija o estabelecimento de metas de redução dos participantes – que só podem negociar o que suplantar este patamar. Após o início de vigência do Protocolo de Kyoto, as negociações chegaram a atingir €16/t CO₂ (<http://www.pointcarbon.com/>, 2005), caíram a €1/t CO₂ (idem, 2006) e atualmente estão em torno de € 21/t CO₂ (ibidem, 2007) – ainda que o primeiro leilão internacional de créditos de carbono, realizado pela Bolsa Mercantil e de Futuros de São Paulo em setembro de 2007, tenha comercializado os Certificados a €16,20/t CO₂ com banco holandês que, por não ter metas de redução de emissões estabelecidas, revenderá os certificados no mercado europeu.

Por outro lado, a Comunidade Européia estabeleceu um protocolo próprio que começou a vigorar em janeiro de 2005, no qual está definida uma multa de €40/t CO₂ por tonelada de dióxido de carbono equivalente para os países que não cumprirem suas metas até 2007. Como este protocolo também permite a aquisição de créditos em outros países, similar ao MDL, o mercado internacional tende a contar com preços mais elevados que os ofertados pela CCX (DUBEUX, 2004). As multas para as metas não cumpridas a partir de 2008 já foram alteradas para € 100/t CO₂.

Desta forma, percebe-se que a poluição global causada pela emissão de gases de efeito estufa tornou-se uma grande preocupação da humanidade, levando a que todas as políticas para reduzi-las sejam bem vindas, como as que enfocam o CO₂ (evitado pela substituição de fontes fósseis por renováveis), o CH₄ (decorrente da fermentação do lixo) e o N₂O (oriundo da queima dos combustíveis e do lixo) provenientes do ciclo de vida dos bens encontrados no lixo.

É preciso considerar que as ações pós-consumo, para reduzir os efeitos deletérios dos resíduos, afetam muito pouco aos interesses estabelecidos do sistema econômico (exceto do setor extrativista), sendo possível contar com seu apoio, ao contrário da profunda discussão sobre mudança nos padrões de consumo, a qual provavelmente sofrerá retaliações e terá dificuldades para ser implantada, embora certamente deva ser tida como meta.

Portanto, o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos é capaz de permitir uma significativa redução de emissões sem requerer mudanças estruturais nos padrões de consumo da população, o que pode gerar recursos advindos da Bolsa de carbono.

2. Tecnologias individuais para o tratamento dos RSU – Possibilidades de geração e/ou conservação de energia.

2.1. Redução na fonte, reaproveitamento e reciclagem (conservação de energia).

Em virtude das indispensáveis e profundas mudanças necessárias – envolvendo o comportamento da população (que requer a demorada maturação dos processos pedagógicos) e os interesses dos setores econômicos –, os resultados dos dois primeiros estágios do Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (SIGRS), redução na fonte e reutilização, serão considerados como metas futuras, ainda que devam ser iniciados imediatamente. Isto se deve ao fato de a redução na fonte e o reaproveitamento requererem grande investimento em reestruturação do sistema quanto à redução no fornecimento de embalagens pelas indústrias, assim como em conscientização da sociedade no que tange ao reaproveitamento dos materiais disponíveis, ampliando a venda de produtos a granel com a reutilização das embalagens. Apesar destas práticas serem as mais convenientes do ponto de vista ambiental e sócio-econômico, não serão discutidas neste texto por conta da difícil mensuração técnica de investimentos, tecnologias, resultados e cronogramas.

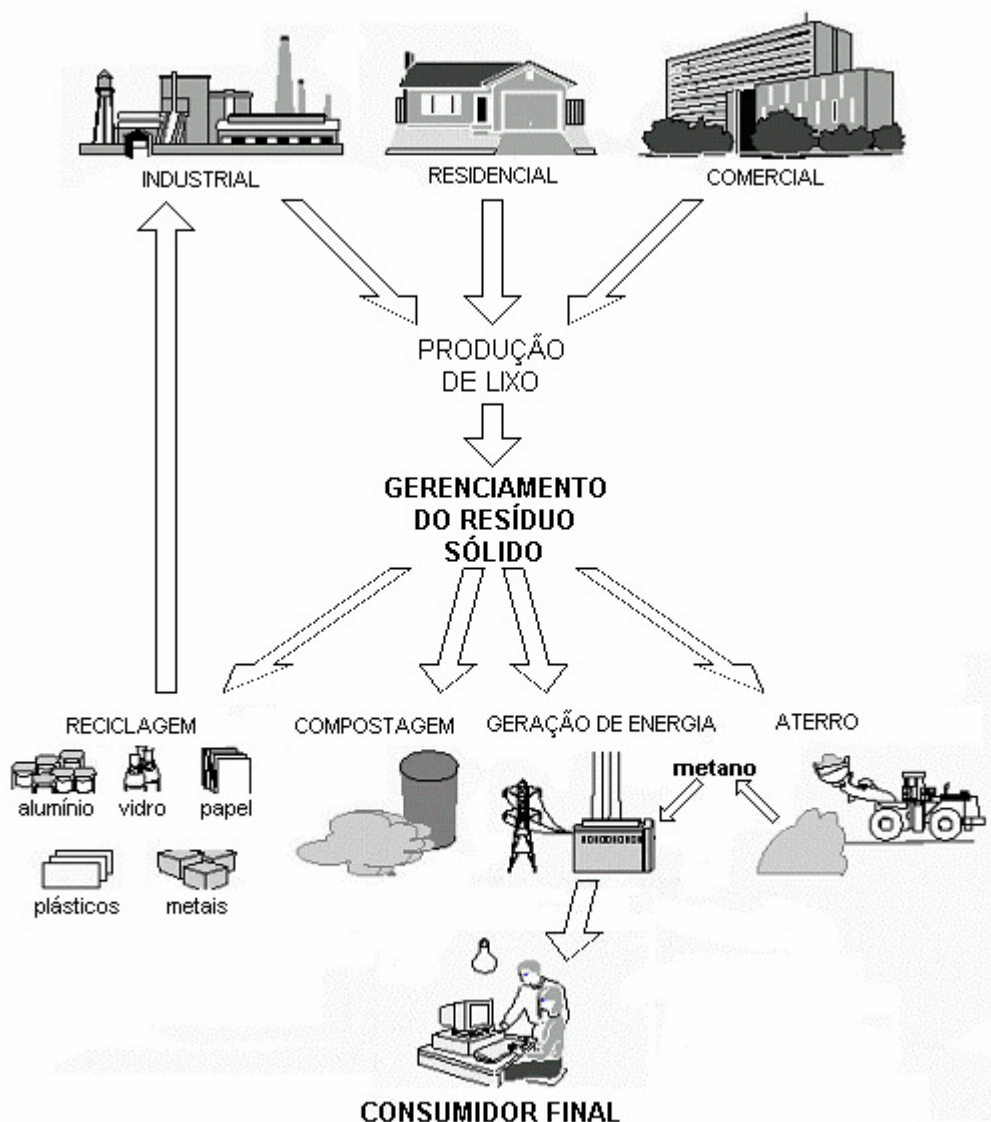
O SIGRS prevê que os resíduos sólidos oriundos dos setores industrial, comercial e residencial, depois de recolhidos, passem por um sistema de gerenciamento que identifica sua destinação, em função de algumas características. Esta destinação pode ser a reciclagem, a compostagem, a geração de energia elétrica (incineração, gaseificação direta ou através do biogás de um aterro energético) e/ou a conversão em combustíveis (sólidos, líquidos e gasosos) ou outros produtos comerciais como fertilizantes, catalisadores, etc. Há, ainda, a opção de encaminhamento para um aterro sanitário, de acordo com as três fases finais do SIGRS, como mostram a Tabela 4 e a Figura 2.

Tabela 4 – Destinações recomendadas pelo SIGRS.

DESTINAÇÃO	DESCRIÇÃO
RECICLAGEM	Aproveitamento dos restos de papéis, vidros, plásticos e metais que não estejam contaminados para servir como insumo na fabricação de novos materiais
COMPOSTAGEM	Aproveitamento dos restos alimentares e componentes orgânicos (papéis, madeira, poda de jardins) para produção de adubo natural
RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	Forma de aproveitar os resíduos e reduzir seus impactos, cujas alternativas serão vistas na seção a respeito
ATERRO SANITÁRIO	Local de disposição final dos resíduos imprestáveis, com garantias sanitárias

Fonte: USEPA (1998).

Figura2 – As Rotas dos Resíduos Sólidos



É importante ressaltar que a Figura2 não especifica a presença, ou não, da coleta seletiva. Caso seja adotada, será necessária uma etapa de segregação após a coleta.

A reciclagem de vidros, papéis, plásticos e metais não exclui as demais etapas – compostagem, recuperação energética e disposição final. O aproveitamento energético versus reciclagem de plásticos e papéis requer a discussão sobre a viabilidade de cada uma das rotas tecnológicas para a oferta desses produtos, comparando-as com as alternativas de mercado. Nos EUA, onde a reciclagem está mais avançada do que no Brasil, muitos plásticos inicialmente separados para reciclagem terminaram em aterros sanitários, por falta de mercado (Themelis, WMW Sep-Oct 2004), ainda que sua disponibilidade, dado seu elevado conteúdo energético, devesse ter

atraído o interesse das usinas de incineração de resíduos - no país de maior aplicação desta tecnologia.

No Brasil, há mais de meio século, existe um mercado de coleta de recicláveis iniciado pelos “papeleiros e garrafeiros” – que tiveram a atividade mantida até então – ainda que atualmente sejam mais visíveis pela atuação dos catadores de latas de alumínio. É importante ressaltar que, apesar de ter atingido o primeiro posto em percentual de reciclagem de latas de alumínio no mundo, o motivo é infeliz: decorrência da miséria da população, contra o desejável fruto da consciência ambiental.

No que concerne à triagem e reciclagem de lixo, existem várias empresas e cooperativas que atuam neste setor, algumas das quais desde a década de 1950. Segundo dados do CEMPRE (2006), existem 327 municípios realizando projetos de coleta seletiva, com populações, percentuais de engajamento popular, tempo de participação e resultados muito díspares. Mesmo assim, o potencial de reciclagem ainda é maior que o triplo do reciclado atualmente.

A título de exercício, foi elaborada a Tabela 5, abaixo, na qual calculou-se o potencial de conservação de energia caso toda a parcela de papéis, plásticos, vidros e metais disponível no Brasil fosse reciclada – ainda que seja impossível realizar o aproveitamento de todo o material disponível. Para tanto, foram utilizados fatores de conservação de energia elétrica disponibilizados por dois trabalhos encontrados na literatura internacional – Calderoni, sobre o caso brasileiro, Morris, sobre o caso norte-americano, e Warnken Ise, sobre o caso australiano. Deve-se atentar para o vínculo entre os valores identificados por estes pesquisadores e a premissa da Agência de Proteção Ambiental norte-americana sobre as relações entre os resíduos sólidos urbanos e as emissões de gases do efeito estufa, apresentadas neste trabalho no item 2.4.2.

Tabela 5 – Potencial de Conservação de Energia Elétrica através da Reciclagem de Embalagens

PRODUTO	PRODUÇÃO (1000 t)	VOLUME RECICLADO	DISPONIBILIDADE (1000 t)	ENERGIA CONSERVÁVEL (MWh/t) – BRASIL (segundo Calderoni)	POTENCIAL DE ENERGIA CONSERVÁVEL NO BRASIL (TWh/a) (segundo Calderoni)	ENERGIA CONSERVÁVEL (MWh/t) – EUA (segundo Morris)	POTENCIAL DE ENERGIA CONSERVÁVEL NO BRASIL (TWh/a) (segundo Morris)	ENERGIA CONSERVÁVEL (MWh/t) – Austrália (segundo Warnken Ise)	ENERGIA CONSERVADA NO BRASIL (TWh/a) (segundo Warnken Ise)
PAPEL	7.333	46%	3.960	3,51	13,90	1,75	6,93	1,37	5,42
PLÁSTICO	2.178	17%	1.808	5,06	9,15	5,55	10,03	5,91	10,68
VIDRO	1.277	47%	677	0,64	0,43	0,08	0,05	1,25	0,85
LONGA VIDA	157	22%	122	3,51	0,43	1,75	0,21	1,37	0,17
ALUMÍNIO	125	96%	5	5,3	0,03	3,25	0,02	2,67	0,01
AÇO	31.600	26%	23.384	5,3	123,94	3,25	76,00	2,67	62,44
TOTAL	42.670		29.956		147,87		93,25		79,57

Fonte: Elaboração própria a partir de Morris (1996), Calderoni (1997), Pimenteira et al. (2004), Warnken Ise (2007) e CEMPRE (2005 - http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas.php?lnk=ft_microcenarios.php, ACESSADO EM 25/06/07).

O estímulo à conservação de energia propicia a disponibilidade imediata de oferta, o que reduz o risco de desabastecimento. Os valores da Tabela 5 permitem verificar que a disponibilidade seria de, no mínimo, 79,57 TWh por ano, equivalente a um complexo energético com potência instalada equivalente a 9 GW – podendo atingir até quase o dobro deste potencial.

Cabe ressaltar que esta atividade dispensa licenciamento ambiental federal, visto que é atividade de baixo impacto. Ademais, é do interesse de todos os setores que o lixo não seja produzido e que, simultaneamente, nenhum novo poluente seja emitido por conta de seu tratamento. Enquanto isto, a expansão da oferta permite o adiamento das novas construções.

Esta prática pode ser estimulada mediante acesso ao fundo de conservação de energia do setor elétrico, que dispõe de recursos para apoiar empreendimentos de eficiência energética – categoria na qual a reciclagem pode ser assimilada. Inclusive, por conta de parte das fontes energéticas utilizadas no país ser de origem fóssil, a conservação de energia é candidatável à solicitação de créditos de carbono, relacionados ao Protocolo de Kyoto (MUYLEAERT, 2000; OLIVEIRA, 2000; TOLMASQUIM, 2003; OLIVEIRA, 2004; PIMENTEIRA et al., 2004; EPE, 2006; WARNKEN ISE, 2007).

Inclusive, a oferta de emprego e renda para profissionais de baixa qualificação profissional, plenamente atendida por este tipo de atividade, é um dos requisitos para elevar o valor pago pelos créditos de carbono – em projetos de redução de pobreza. É relevante atentar para a perspectiva de aproveitamento imediato desta força de trabalho, visto que as maiores parcelas de resíduos estão disponíveis nos centros urbanos, mesmo local onde se concentram os desempregados¹⁷.

A atividade de segregação dos materiais recicláveis – que envolve a triagem, armazenamento, enfardamento (quando necessário) e comercialização – deixa os profissionais envolvidos sujeitos às oscilações do mercado. Como esta categoria profissional não dispõe de reservas financeiras para manter estoque e esperar as melhores oportunidades para vender, suas remunerações tendem a ser baixas e a tornar esta atividade um círculo vicioso. Entretanto, os efeitos do apoio do Governo Federal ao Movimento Nacional dos Catadores de Recicláveis, iniciados em 2006, começam a ser notados, sobretudo pelo estabelecimento da obrigatoriedade da coleta seletiva nas repartições públicas e a doação dos recicláveis para as cooperativas de catadores – o que já vem sendo seguido por governos estaduais e municipais. Além disto, o BNDES criou uma linha de financiamento exclusivo para equipamentos para cooperativas, o que tende a instrumentar estas instituições a agregar valor aos produtos que atualmente

¹⁷Cabe ressaltar que os desempregados acabam tornando-se mais facilmente cooptáveis pela indústria da violência, o que pode acarretar em outros custos para a sociedade.

comercializam – através de mini-fundições para metais, de moinhos para plásticos e sistemas de reciclagem de papel, cujos primeiros contratos foram assinados em 01 de outubro de 2007. Assim, é possível que os catadores de hoje tornem-se industriais no futuro – ainda que em micro ou pequena escala – permitindo aumento de suas remunerações¹⁸.

Por outro lado, deve ser realçada a importância de manutenção dos atuais índices de reciclagem, para coibir o risco de desabastecimento de recicláveis que demandaria – imediatamente – mais energia para produção da mesma quantidade de bens, o que, por certo, representaria um gargalo ao desenvolvimento. A Tabela 6, a seguir, mostra o potencial de energia conservada de acordo com as opções de fatores disponíveis.

¹⁸ A alteração do poder aquisitivo destes profissionais pode representar o resgate intergeracional da sociedade, permitindo que seus filhos possam exercer suas opções profissionais.

Tabela 6 - Conservação de Energia Elétrica através da Reciclagem de Embalagens

PRODUTO	PRODUÇÃO (1000 t)	VOLUME RECICLADO	DISPONIBILIDADE (1000 t)	ENERGIA CONSERVÁVEL (MWh/t) – BRASIL (segundo Calderoni)	POTENCIAL DE ENERGIA CONSERVÁVEL NO BRASIL (TWh/a) (segundo Calderoni)	ENERGIA CONSERVÁVEL (MWh/t) – EUA (segundo Morris)	POTENCIAL DE ENERGIA CONSERVÁVEL NO BRASIL (TWh/a) (segundo Morris)	ENERGIA CONSERVÁVEL (MWh/t) – Austrália (segundo Warnken Ise)	ENERGIA CONSERVADA NO BRASIL (TWh/a) (segundo Warnken Ise)
PAPEL	7.333	46%	3.373	3,51	11,84	1,75	5,90	1,37	4,62
PLÁSTICO	2.178	17%	370	5,06	1,87	5,55	2,05	5,91	2,19
VIDRO	1.277	47%	600	0,64	0,38	0,08	0,05	1,25	0,75
LONGA VIDA	157	22%	35	3,51	0,12	1,75	0,06	1,37	0,05
ALUMÍNIO	125	96%	120	5,3	0,64	3,25	0,39	2,67	0,32
AÇO	31.600	26%	8.216	5,3	43,54	3,25	26,70	2,67	21,94
TOTAL	42.670		12.714		58,40		35,16		29,86

Fonte: Elaboração própria a partir de Morris (1996), Calderoni (1997), Pimenteira et al. (2004), Warnken Ise (2007) e CEMPRE (2005 - http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas.php?lnk=ft_microcenarios.php, ACESSADO EM 25/06/07).

A Tabela 6 mostra que a quantidade de energia já conservada pela reciclagem é de, no mínimo, 29 TWh/a, equivalente a tudo o que pode vir a ser gerado no Complexo do Rio Madeira e quase três vezes a energia que será disponibilizada pela Usina Nuclear de Angra 3.

Para verificar o conteúdo típico da conservação de energia por tonelada de lixo, foi utilizada a composição média elaborada e divulgada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo (1998) e da Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública (ABRELPE) – ainda que seja muito difícil utilizar os dados disponíveis em função da inexistência de séries históricas que os consolidassem. A Tabela 7, a seguir, congrega as informações sobre conservação de energia por tonelada de reciclável à composição média do lixo brasileiro no período de 1998 a 2004. Nas células da última linha é possível verificar que, apesar da redução na participação dos recicláveis no horizonte analisado – tanto para o total como para cada um dos recicláveis, exceto para os plásticos –, o teor de energia conservada ampliou-se, independente do conjunto de fatores de conservação utilizado.

Tabela 7 – Potencial de Conservação de Energia Elétrica através da Reciclagem de Embalagens por tonelada de lixo

MATERIAL	PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL		ENERGIA CONSERVÁVEL (MWh/t reciclável)			ENERGIA CONSERVÁVEL (MWh/t lixo) 1998			ENERGIA CONSERVÁVEL (MWh/t lixo) 2004		
	IPT 1998	ABRELPE 2004	Morris	Calderoni	Warnke n Ise	Morris	Calderoni	Warnken Ise	Morris	Calderoni	Warnken Ise
METAL	4	2	3,25	5,3	2,67	0,13	0,21	0,11	0,07	0,11	0,05
VIDRO	3	2	0,08	0,64	1,25	0,00	0,02	0,04	0,00	0,01	0,03
PAPEL	25	13	1,75	3,51	1,37	0,44	0,88	0,34	0,23	0,46	0,18
PLÁSTICO	3	16	5,55	5,06	5,91	0,17	0,15	0,18	0,89	0,81	0,95
TOTAL	35	33				0,74	1,26	0,66	1,18	1,38	1,20

Fonte: Elaboração própria a partir de Morris (1996), Calderoni (1997), Warnken Ise (2007), IPT (1998) e ABRELPE (2005).

A Tabela 7, acima, permite depreender que a reciclagem é capaz de conservar entre 0,66 MWh/t e 1,38 MWh/t de lixo com a composição média nacional. A este potencial energético – caso seja viabilizada a segregação total – é possível acrescentar a geração de energia (elétrica e térmica, ou como propulsor veicular) com a fração orgânica, assim como a produção de energéticos decorrentes do aproveitamento do adubo produzido – oleaginosas, reflorestamento, etc...

Nunca é demais reforçar a importância do baixo custo das soluções obtidas através da conservação de energia. Segundo dados do PROCEL, no período entre 1994 e 2002 foram conservados 16,5 TWh ao custo médio de US\$ 16/MWh (GARCIA, 2003). Este valor é inferior à

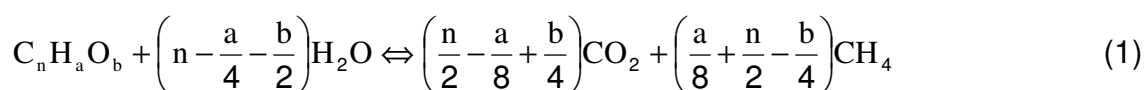
terça parte do custo marginal de expansão obtido no leilão de energia “nova” realizado em 2007 (EPE, 2007).

2.2. Aterros sanitários, controlados e lixões (biogás).

A tecnologia de aproveitamento do gás de lixo (GDL), ou biogás produzido nos aterros, é o uso energético mais simples dos resíduos sólidos urbanos. É uma alternativa que pode ser aplicada a curto e médio prazos para os gases produzidos na maioria dos aterros já existentes, como ocorre em centenas de aterros de diversos países. Consiste na recuperação do biogás oriundo da decomposição anaeróbica de resíduos sólidos urbanos por ação de microorganismos que os transformam em substâncias mais estáveis, como dióxido de carbono (CO₂), água, gás metano (CH₄), gás sulfídrico (H₂S), mercaptanas e outros compostos inorgânicos.

2.2.1. Formação e Obtenção do Biogás.

A formação de metano e gás carbônico se dá, segundo a equação de Busweel & Mueller da seguinte forma (ETHERIDGE 2003) :



Ou, tomando como exemplo a molécula de glicose (C₆H₁₂O₆) para uma reação na ausência de oxigênio seria:



Caso esta etapa ocorresse na presença de oxigênio, a quantidade necessária para a total oxidação nesta reação seria a quantidade necessária para oxidar toda matéria orgânica presente em dióxido de carbono e água¹⁹. Para a mesma glicose a reação seria:



Segundo Willumsen (WILLUMSEN, 2001 apud HENRIQUES, 2004), o biogás contém aproximadamente 50% de metano, que pode ser utilizado para propósitos energéticos. O restante da composição contém cerca de 45% de CO₂, 3% de nitrogênio, 1% de oxigênio e 1% de outros gases (LEONE 2003).

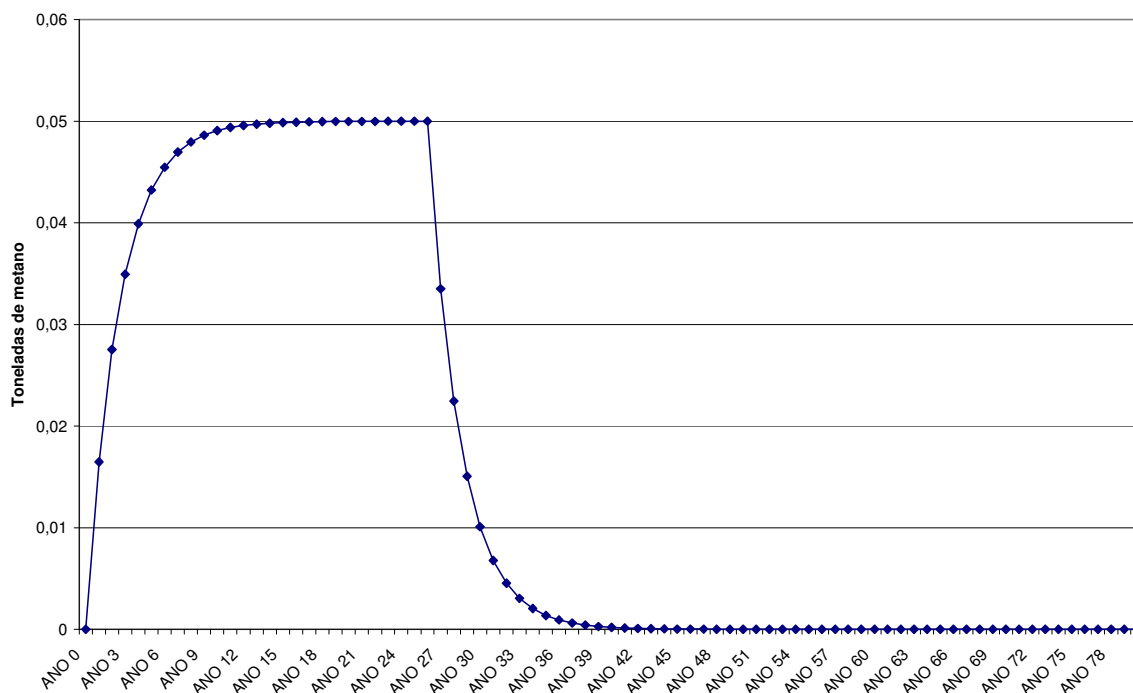
¹⁹ DQO é a Demanda Química de Oxigênio, que representa a quantidade necessária de oxigênio para que toda a matéria orgânica presente se transforme em água (H₂O) e gás carbônico (CO₂)

O gás metano, principal componente do biogás, é 21 vezes mais potente que o dióxido de carbono em termos de efeito estufa.

A geração do gás ocorre através de quatro fases características da vida útil de um aterro:

1. Fase aeróbia – produz o gás CO_2 . Apresenta alto conteúdo de N_2 que sofre um declínio nas passagens para as 2ª e 3ª fases.
2. Esgotamento de O_2 - resulta em um ambiente anaeróbio com grandes quantidades de CO_2 e um pouco de H_2 produzido.
3. Fase anaeróbia – começa a produção de CH_4 , com uma redução na quantidade de CO_2 produzido.
4. Produção quase estável de CH_4 , CO_2 e N_2 .

A produção de metano, nos aterros, para uma única unidade de RSU disposta ocorre conforme a curva mostrada no Gráfico 2. Para um aterro funcionando continuamente – com vida útil típica de 25 anos, a curva de disponibilização de metano de uma única unidade de RSU disposta por ano ocorrerá como representada no Gráfico 3.

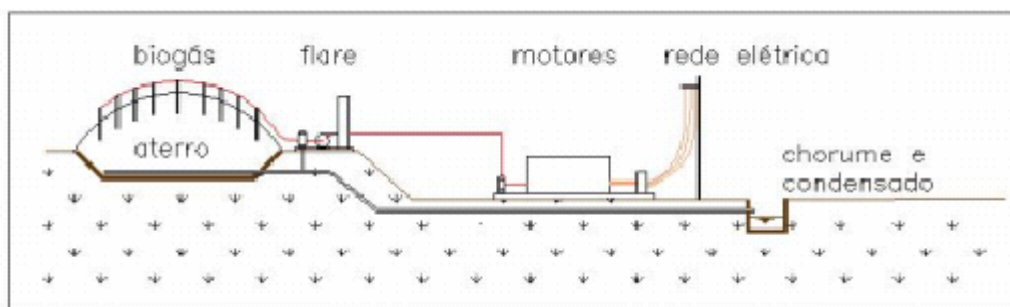
Gráfico 3 – Emissão típica de um aterro com vida útil de 25 anos.

Fonte: Elaboração própria.

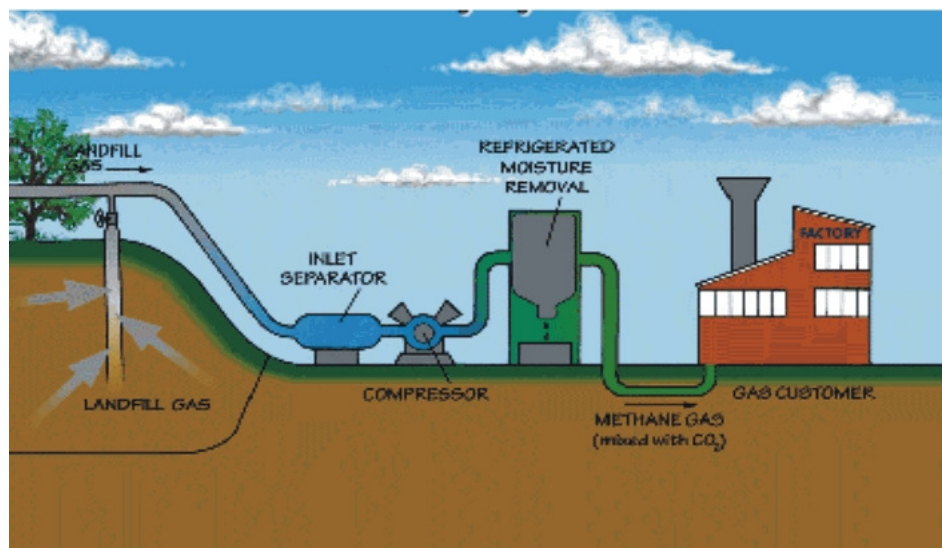
É possível verificar, no gráfico anterior, que o encerramento da disposição de RSU no ano 25 acarreta vertiginosa queda na disponibilidade de metano, o que ocorre a partir do ano 27 – último ponto sobre a linha 0,05. Isto inviabiliza a exploração comercial deste gás por período superior a 10 anos após o encerramento da disposição. A técnica utilizada nos aterros é a disposição de RSU em áreas próximas, de maneira a permitir o complemento de oferta de gás para os empreendimentos.

Entretanto, é preciso realçar o fato do gás ser gerado até serem completados 70 anos da disposição final dos RSU. Isto é importante para dimensionar os custos com monitoramento que as áreas demandarão, visto que a produção e emissão de metano podem ocasionar explosões e acidentes. Ademais, é impossível recuperar todo o metano gerado, pois aproximadamente 20% são convertidos em “emissões fugitivas” – em virtude das fissuras naturais que o gás provoca na argila utilizada para cobrir as células de disposição dos resíduos.

As condições do aterro, tais como a composição do resíduo, o material de cobertura, o projeto e o estado anaeróbio, determinam a duração das fases e o tempo de geração do gás que podem ainda variar com as condições climáticas, com a umidade e com a temperatura. Esses processos podem ser acompanhados pela Figura3 ilustrada abaixo.

Figura3 – Esquema representativo da produção de biogás


A Figura4, a seguir, representa um sistema típico de aproveitamento do gás do lixo.

Figura4 – Recuperação de GDL


Um sistema padrão de coleta de GDL tem três componentes centrais: poços de coleta e tubos condutores, um sistema de tratamento, e um compressor. O biogás excedente é queimado em flares de forma controlada, evitando a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera com a conseqüentemente mitigação de um grande impacto ambiental.

Tubos de Coleta:

A coleta de gás normalmente começa após uma porção do aterro (chamada célula) ser fechada. Existem duas configurações de sistemas de coleta: poços verticais e trincheiras horizontais, sendo que os poços verticais são o tipo mais usado de coleta. As trincheiras podem ser apropriadas para aterros sanitários profundos e podem ser usadas em áreas de aterro ativo. Independente do sistema de coleta usado, cada uma das pontas é conectada a uma tubulação lateral, que transporta o gás para um coletor principal. Preferencialmente, o sistema de coleta

deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás, quando necessário.

Nos aterros onde não houve instalação prévia dos tubos de coleta existe perda de biogás, fenômeno conhecido como emissão fugitiva. Isto ocorre em decorrência da pressão positiva do biogás, que propicia o vazamento por caminhos preferenciais formados através da argila utilizada na cobertura. Normalmente esta emissão fugitiva é da ordem de 30% (HENRIQUES, 2004) e, mesmo nos aterros projetados para recuperação do biogás existem emissões fugitivas, ainda que inferiores a 5% (idem).

Sistema de Tratamento de Condensado:

Uma importante parte de qualquer sistema de coleta de gás é o sistema de tratamento de condensado. Quando o GDL (quente) produzido pelo aterro sanitário viaja através do sistema de coleta, este se resfria formando um condensado. Caso não seja removido, ele pode bloquear o sistema de coleta e interromper o processo de recuperação de energia. O controle do condensado começa tipicamente no campo do sistema de coleta, onde tubos inclinados e conectores são utilizados para permitir a drenagem em tanques ou armadilhas de coleta. Estes sistemas são, normalmente, complementados por uma remoção de condensado pós-coleta. Os métodos para disposição do condensado são: descarga no sistema público de esgoto, um sistema de tratamento local, e uma recirculação para o aterro sanitário.

O melhor método para um aterro em particular dependerá das características do condensado (depende dos componentes do lixo local), da legislação e regulação vigentes, e do custo de tratamento e/ou disposição.

Compressor:

Um compressor é necessário para succionar o gás dos poços de coleta, e este também pode ser necessário para comprimir o gás antes deste entrar no sistema de recuperação energética. O tamanho, tipo e número de compressores necessários, dependerão da taxa, do fluxo de gás e do nível desejado de compressão que tipicamente é determinado pelo equipamento de conversão energética.

Flare:

Um *flare* é um dispositivo simples para ignição e queima do GDL. *Flares* são considerados como um componente de cada opção de recuperação de energia porque este pode ser necessário

durante as etapas de início e manutenção do sistema. Em adição, este pode ser de maior custo-efetividade para gradualmente aumentar o tamanho do sistema de recuperação de energia e para queimar o excesso de gás entre *upgrades* de sistemas, isto é, antes da adição de um novo motor. Os projetos de *flare* incluem *flares* abertos (ou vela) e enclausurados. Estes são mais caros, mas podem ser preferíveis (ou requeridos) porque proporcionam testes de concentração e podem obter eficiências de combustão mais elevadas. Além disto, *flares* enclausurados podem reduzir os incômodos de ruído e iluminação.

Sistema de Tratamento de Gás:

Depois do GDL ser coletado, e antes de ser usado no processo de conversão de energia, é tratado para remover algum condensado que não foi coletado nos tanques de captura, assim como particulados e outras impurezas. As necessidades de tratamento dependem da aplicação de uso final. Um tratamento mínimo é requerido para o uso direto do gás em caldeiras, enquanto um extensivo tratamento é necessário para remover o CO₂ para injeção em um gasoduto. As aplicações de geração de energia incluem uma série de filtros para remover impurezas, as quais podem danificar os componentes do motor ou turbina e, com isso, reduzir a eficiência do sistema. Os custos de tratamento estão incluídos nos custos de recuperação de energia descritos no item de análise de viabilidade econômica.

Sistema de Geração ou Recuperação de Energia:

O objetivo de um projeto de aproveitamento energético do GDL é convertê-lo em alguma forma de energia útil, como a eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular, ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade.

Existem várias tecnologias que podem ser usadas para maximizar o valor do GDL, através de diversas formas de utilização. As mais importantes são:

- Uso direto do gás de médio poder calorífico;
- Produção de energia/co-geração;
- Venda de gás de qualidade através de gasodutos ou como GNV.

O uso mais simples e normalmente de maior custo-efetividade do GDL é como um combustível de médio poder calorífico para caldeiras ou para uso em processos industriais - operações de secagem, operações em fornos, produção de cimento e asfalto. Nestes projetos, o gás é transportado por gasoduto diretamente para um consumidor próximo para ser usado em equipamentos de combustão novos ou já existentes, em substituição, ou como suplemento, do

combustível tradicionalmente usado. Torna-se necessária a remoção de condensado e um tratamento de filtração, realizando uma eventual modificação no equipamento de combustão existente.

Antes de o GDL estar em condições de ser usado por um consumidor, um gasoduto - cujos custos de instalação variam de acordo com o terreno, os custos de permissão para passagem e outras especificidades locais - precisa ser construído para acessar a oferta. Pode-se considerar que os custos de construção do gasoduto respondem por um terço do custo total (Muylaert *et alii*, 2000). Os custos de operação e manutenção associados ao uso de caldeiras, fornos, secadoras e outros equipamentos industriais são equivalentes aos custos de operação e manutenção (O & M) quando são usados combustíveis convencionais.

O biogás coletado pode também ser utilizado para a geração de eletricidade, através da implantação de uma usina termelétrica. A opção pelo GDL face às alternativas de geração elétrica deve-se a seu largo uso internacional, nas mais diversas condições, como no clima temperado da Inglaterra e no clima mais aquecido da Califórnia. A geração elétrica a partir do gás do lixo é vantajosa porque esta produz valor agregado para o GDL.

Existe ainda a possibilidade de co-geração de eletricidade e energia térmica a partir do GDL como alternativa ainda melhor. A energia térmica pode ser usada localmente para aquecimento, refrigeração, para outras necessidades de processo ou transportado por tubo para uma indústria ou comércio próximo, obtendo um segundo rendimento para o projeto.

O biogás também pode ser tratado e utilizado como combustível em veículos (GNV). Esta opção cresceu de importância nos últimos anos pelo aumento expressivo da frota movida a GNV, especialmente nos táxis. Como será mostrado adiante, na década de 1980, a COMLURB, Rio de Janeiro, produziu GNV a partir do biogás extraído do antigo aterro do Caju, utilizado para abastecer parte da sua frota.

A melhor configuração de um aterro sanitário em particular dependerá de uma variedade de fatores, incluindo a viabilidade de um mercado de energia, os custos de projetos, as fontes potenciais de receita, e várias considerações técnicas.

De um modo geral o GDL tem as seguintes vantagens:

- Redução dos gases de efeito estufa;
- Fonte de receita adicional para aterros existentes (energia + créditos de carbono);
- Permite utilização para geração de energia ou como combustível;

- Evitar a possibilidade (remota) de ocorrência de auto ignição e/ou explosão pelas altas concentrações de metano na atmosfera.

Como desvantagens são citadas:

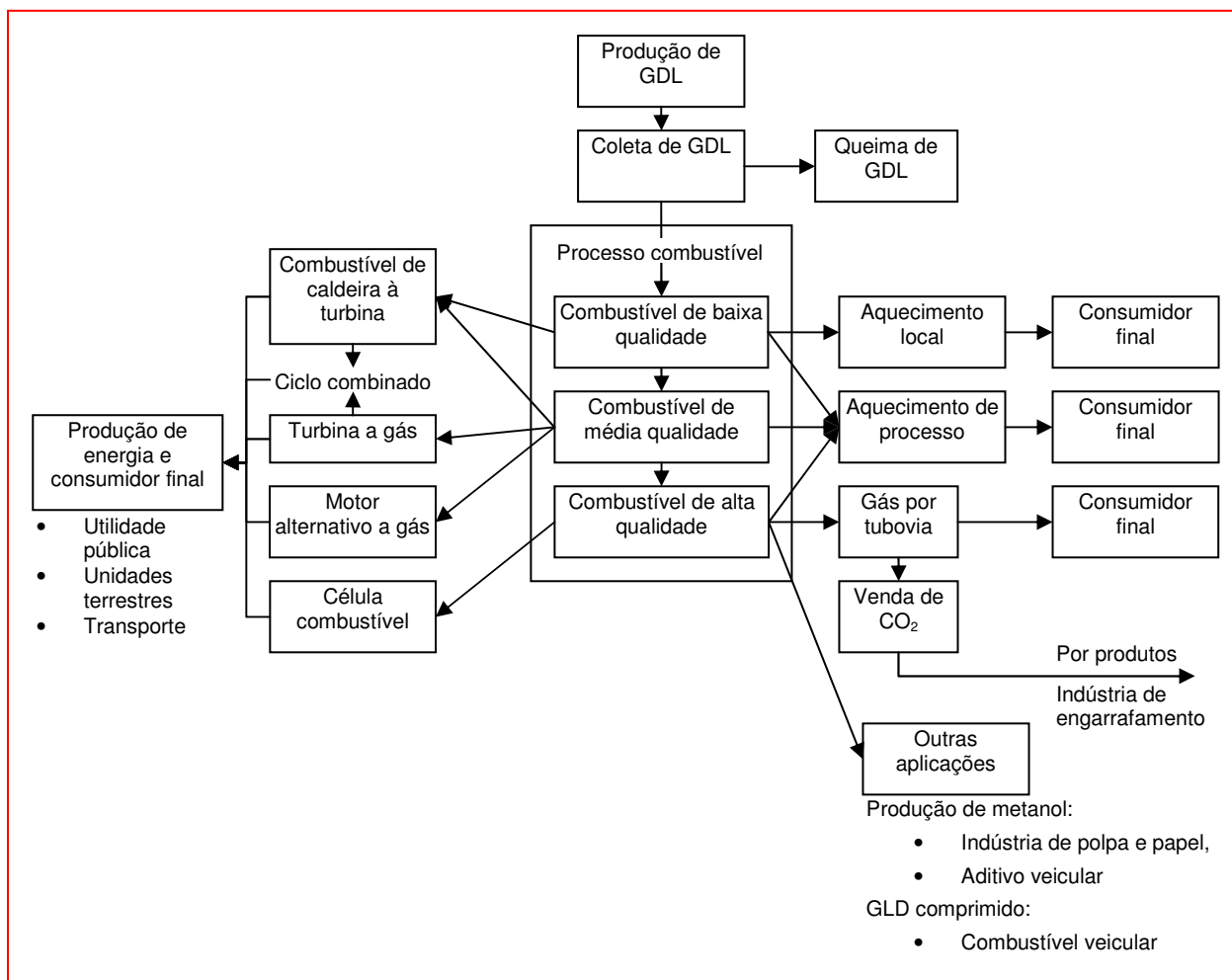
- A ineficiência no processo de recuperação do gás, que permite um aproveitamento máximo de aproximadamente 50% do total de GDL produzido;
- Alto custo da planta, decorrente do tratamento necessário.

2.2.2. Alternativas de Utilização do Gás de Lixo (GDL).

Nesta seção serão abordadas as utilizações possíveis de serem efetivadas especificamente pelo uso do gás de lixo proveniente de aterros. Aquelas aplicações que podem fazer uso do biogás proveniente do processo de digestão anaeróbica acelerada serão discutidas em outra seção.

O gás de lixo possui diversas aplicações de caráter energético. Embora sua principal aplicação seja como combustível em um motor de combustão interna, para gerar energia elétrica, ele pode ser direcionado para outros fins. Dentre suas aplicações mais recorrentes, destaca-se o uso do gás de lixo em boiler a gás para a produção de água quente para aquecimento ou para calor de processo. Sob condições normais não é necessário limpar o gás, exceto para remover partículas caso o mesmo vá ser utilizado em um boiler ou motor. (MUYLEAERT 2000; WILLUMSEN 2001). Como o gás é composto em sua maioria por metano, uma vez seja purificado poderá substituir o gás natural. Inclusive como veremos adiante como GNV. A Figura5 ilustra as possíveis rotas de utilização do GDL.

Figura5 – Rotas para Utilização do GDL



Fonte: (WILLUMSEN 2001).

2.2.3. Viabilidade Econômica de Sistema de Recuperação de Gás de Lixo.

O custo total de um sistema de coleta variará largamente dependendo de um número de fatores específicos do local. Se o aterro sanitário for profundo os custos de coleta tenderão a ser altos, pelo aumento no custo dos poços; e estes também aumentarão se houver a necessidade de aumentar o número de poços instalados. A Tabela 8 mostra os custos de um sistema de coleta com *flare* para aterros sanitários de 1, 5 e 10 milhões de toneladas de lixo no local (MUYLAERT 2000).

Tabela 8 – Custos do Sistema de Coleta (US \$ 1994)

Tamanho do Lixo do Aterro Sanitário	Fluxo Estimado de Gás (mcf/dia)	Custos de Capital (x 1000 US)	Custos de O&M Anual (x 1000 US\$)
um milhão de toneladas métricas	642	628	89
cinco milhões de toneladas métricas	2.988	2.088	152
10 milhões de toneladas métricas	5.266	3.599	218

Fonte: (EPA 1996). mcf = mil pés cúbicos.

Uma das primeiras iniciativas do Brasil neste sentido foi no estado do Rio de Janeiro. Quando foi feita a planta para extração de gás de lixo do aterro do bairro do Caju na década de 80, os custos de investimento foram extremamente baixos, pois os engenheiros da COMLURB realizaram o projeto mais simples e operacional possível, que utilizava exclusivamente equipamentos disponíveis no mercado brasileiro. Além disso, nenhum trabalho prévio foi realizado para preparação do aterro do Caju. A Tabela 9 mostra os percentuais envolvidos nos custos de investimento do projeto à época. O valor total investido foi da ordem de US\$ 320.000,00 – a valores de 1983.

Tabela 9 – Percentual de Investimento do Projeto de Recuperação Energética do Caju pela COMLURB (US\$ Junho de 1983)

Discriminação	%
Área de Administração:	
Prédios da Administração, Mobiliário.	8,38%
Área Industrial:	
Obras Civas, Iluminação, Estrutura Metálica, Cercas, Muros e Portões.	12,68%
Equipamentos:	
Rede de Dutos, Compressores, Unidade de Purificação, Reservatório, Painel de Controle.	67,52%
Subestações	
Eletricidade Interna e Eletricidade Aérea	8,30%
Estação Bombeamento Transferida para COMLURB	3,13%
Total	100%

Fonte: HENRIQUES (2004).

Como pode ser observado, o maior investimento é destinado aos equipamentos, onde os dois compressores são responsáveis por 41,64% dos investimentos totais. Os custos operacionais são de dois compressores trabalhando 20 horas por dia, em 24 dias por mês, conforme cálculos da Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Custos Operacionais

Item	Valor
Custos de investimento:	US \$ 6.584
Custos operacionais:	US \$ 14.530
TOTAL:	US \$ 21.114
Produção de Biogás	153.600 Nm ³ /mês
Custo por m ³	US \$ 0,137/Nm ³

Fonte: *ibidem*.

Segundo Henriques (2004), o sistema de extração consiste num sistema de coleta e um sistema de sucção, contendo bombas, sistemas de monitoramento e controle. Para uma média de 10 metros de profundidade no aterro, o investimento no sistema de coleta vai variar entre 20.000 – 40.000 US\$/ha, e o sistema de sucção varia entre 10.000 – 45.000 US\$/ha. A média do custo de investimento por kW_e instalado para um sistema completo de recuperação de gás de lixo está sintetizado na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11– Custo Médio de Investimento para a Recuperação de Gás de Lixo em US\$/kW_e

Componente	Custo em US\$/kW _e
Sistema de Coleta	200 – 400
Sistema de Sucção	200 – 300
Sistema de Utilização	850 - 1200
Planejamento e Projeto	250 – 350
Total	1.550 – 2.250

Fonte: (WILLUMSEN 2001) .

Quanto às receitas necessárias para tornar a recuperação de gás de lixo viável sem subsídios, o único exemplo brasileiro é o aterro São João, da capital paulista, que participou do Leilão do setor elétrico brasileiro em junho de 2006, tendo vendido eletricidade por R\$ 138,20/MWh (EPE, 2006). Nos Estados Unidos e na Inglaterra, esta deveria ser vendida por um valor próximo a 30 US\$/MWh_e – preferencialmente acima disto. Para pequenos aterros (menos de 500.000 t) na Dinamarca, por exemplo, a eletricidade produzida deveria ser vendida a 55 US\$/MWh_e para fazer a recuperação de gás de lixo viável (WILLUMSEN, 2001 apud HENRIQUES, 2004) .

A receita bruta da recuperação de gás de lixo para ser significativa depende do tipo de energia produzida. O preço para venda de energia elétrica na rede varia significativamente de um país para outro, mas normalmente este valor encontra-se estabelecido na média de 10 US\$/MWh_e (no horário fora de ponta) e 80 US\$/MWh_e (hora de ponta). Como pode ser observado, o preço de venda é um gargalo para uma imediata aplicação desta tecnologia, uma vez que os valores pagos na maior parte do tempo são menores do que seu custo, o que torna esta tecnologia adequada para o horário de ponta ou dependente de subsídios governamentais quando da sua expansão fora do horário de ponta. O quadro de dependência dos subsídios aumenta na medida em que os aterros são menores e conseqüentemente geram menos gás. Assim, fica

claro que há um ganho de escala e a implementação desta tecnologia em grandes centros (estes possuindo aterros de grande porte) torna-se mais atrativa (ibidem).

Subsídios para a venda de energia elétrica podem variar entre 4 US\$/MWh_e nos Estados Unidos e 40 US\$/MWh_e na Dinamarca (idem). No Brasil, a única referência para valores praticados na comercialização de energia advinda de biogás é o PROINFA - Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia²⁰ - cujo Valor Econômico Correspondente à Tecnologia Específica²¹ para o biogás foi de R\$169/MWh, bastante superior ao Custo Marginal de Expansão dos Leilões realizados em 2006 e 2007, que ficaram abaixo de R\$ 140/MWh.

2.2.4. Panorama Mundial da Geração de Energia a partir do GDL.

Hoje existem aproximadamente 950 plantas de gás de lixo em todo o mundo, nas quais o gás é utilizado com propósito energético. Na Tabela 12 há um panorama da locação das plantas mundialmente. No entanto, o número para alguns países deve ser visto com reserva, pois não é possível obter dados exatos de todos os países. (WILLUMSEN, 2001, apud HENRIQUES, 2004).

O biogás de aterros pode substituir o gás natural em praticamente todas as aplicações e combustíveis fósseis na maioria (Augenstein e Pacey, 1992; Doorn et al., 1995).

Durante os últimos 25 anos, as plantas para extração e utilização de gás de lixo vêm se desenvolvendo. Estima-se que os aterros sanitários produzam mundialmente de 20 a 60 Tg (teragramas, ou entre 20 e 60 milhões de toneladas) de metano por ano, como um resultado direto da decomposição orgânica dos componentes do lixo. Aproximadamente dois terços destas emissões são oriundas de países desenvolvidos, sendo que os onze maiores emissores representam 70 por cento das emissões globais. Os Estados Unidos são o maior emissor, seguido por China, Canadá, Alemanha, Reino Unido e Comunidade dos Estados Independentes (ex-URSS).

²⁰ Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, tem como objetivo a promoção do aumento da participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de Produtores Independentes Autônomos - PIA, concebidos com base em fontes eólicas, Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH's) e Biomassa.

²¹ VECTE: “valor de venda de energia elétrica que, em um determinado tempo e para um determinado nível de eficiência, viabiliza economicamente um projeto de padrão médio utilizando a referida fonte” (IN, I. N.-. (2002). Diário Oficial da União - DOU, Governo Nacional. 2004.)

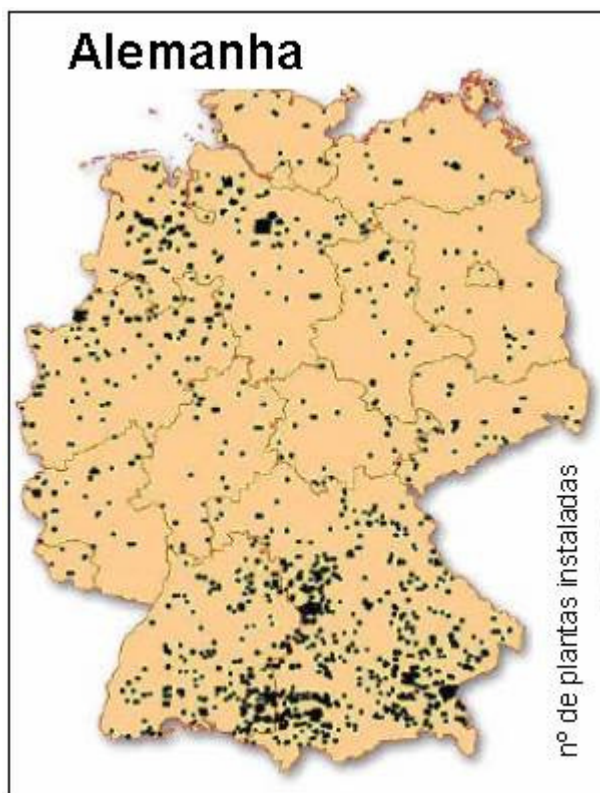
Tabela 12– Distribuição Geral de Plantas de Gás de Lixo pelo Mundo

Países	Número Aproximado de Plantas
China	3
República Checa	5
Hungria	5
Brasil	6
França	10
Espanha	10
Suíça	10
Finlândia	10
Polônia	10
Áustria	15
Noruega	20
Dinamarca	21
Canadá	25
Austrália	25
Itália	40
Holanda	60
Suécia	70
Inglaterra	135
Alemanha	150
Estados Unidos	325
Total	955

Fonte: (WILLUMSEN 2001).

A contribuição relativa dos países em desenvolvimento está mudando rapidamente. Devido às tendências de crescimento populacional e urbanização, bem como às necessidades de crescimento econômico, estes serão responsáveis por uma parcela cada vez maior das emissões de metano (MUYLEAERT 2000). A seguir pode-se ver a Figura 6 onde está ilustrada a área com presença de gás de lixo na Alemanha, com potencial aproveitamento energético.

Figura6 – Áreas com biogás na Alemanha



Fonte: (ETHERIDGE 2003).

Como já mencionado, os aterros sanitários representam uma oportunidade de redução de emissão de metano em vários países, além de apresentarem oportunidades de geração ou recuperação de energia e produção de fertilizantes orgânicos (compostagem), que podem ser associados a um processo de reciclagem, com ganhos econômicos e ambientais pela matéria-prima nova evitada. Alguns países como os Estados Unidos e o Reino Unido criaram programas de recuperação de metano que reduzirão suas emissões de metano em 50% ou mais nas próximas décadas e que têm um ganho econômico pelas emissões evitadas e, principalmente, pela recuperação ou geração de energia.

Baseado somente em tecnologias atualmente disponíveis é tecnicamente viável reduzir as emissões globais de metano de aterros sanitários a aproximadamente 50% das emissões atuais, ou seja, 10 a 25 Tg por ano. A maior parte destas reduções é economicamente viável, visto que normalmente os depósitos de lixo estão localizados nas proximidades dos grandes centros urbanos, o que assegura consumo para este potencial energético. A porção de emissões de metano que pode ser viável de se recuperar foi estimada em vários países e os valores encontram-se na Tabela 13 (EPA, 1993 apud MUYLAERT, 2000).

Tabela 13 – Estimativas de Redução de Metano de Aterros Sanitários Economicamente Viáveis

País	Emissões Estimadas (Tg/ano)	Reduções de Curto Prazo		Reduções de Longo Prazo	
		Tg/ano	%	Tg/ano	%
E.U.	8 – 12	4 – 6	~ 50	4 – 6	~ 50
Reino Unido	1 – 3	0.2 – 0.5	15 – 20	0.5 – 1.4	40 – 50
Brasil	0.7 – 2.2	0.2 – 0.6	25 – 30	0.2 – 0.6	25 – 30
Índia	0.2 – 0.8	0.1 – 0.2	25 – 40	0.1 – 0.4	25 – 50
Polônia	0.1 – 0.4	0.1	~ 20	0.1 – 0.3	20 – 60
Outros	11 – 39	4 – 7	15 – 35	4 – 15	15 – 40
Total	21 – 57	9 – 14	25 – 35	9 – 24	40 – 50

Fonte: (EPA 1993).

A seguir, serão abordados os programas de recuperação de metano dos Estados Unidos e do Reino Unido, que são os principais programas existentes além do panorama Brasileiro.

2.2.4.1. O GDL nos Estados Unidos:

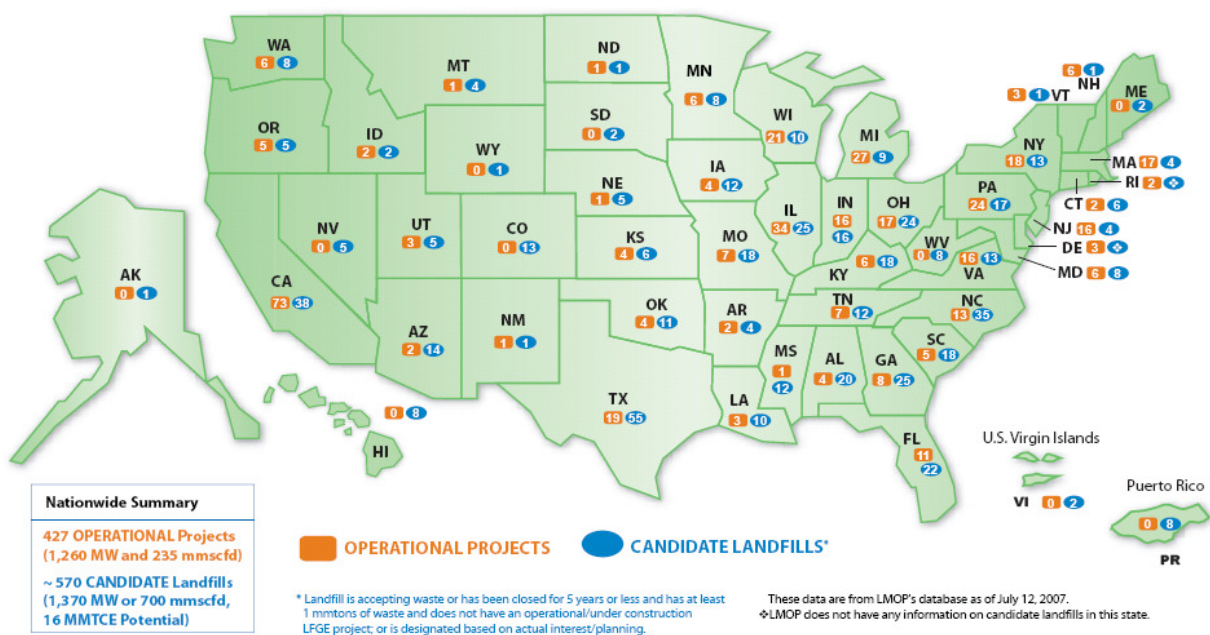
Estima-se que os aterros sanitários nos Estados Unidos produzam anualmente 5,6 milhões de metros cúbicos de metano. Se ao invés de serem recuperados, estes forem simplesmente deixados escapar para a atmosfera ele contribuirá de forma significativa para a mudança do clima. Entretanto, podem ser usados, dentre outras coisas, como uma fonte de energia renovável e substituir combustíveis fósseis. (MUYLEAERT, 2000)

Visando minimizar a mudança do clima, vários instrumentos de comando e controle foram implantados nos Estados Unidos, entre eles: as normas de qualidade do ar da Environmental Protection Agency (EPA), o Clean Air Act Amendments de 1990 e o Revised Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). Este último definiu padrões específicos de desempenho, critérios de operação para aterros sanitários municipais e criou limites de concentrações de metano no entorno de aterros sanitários (requer que as operadoras de aterros colem e queimem o GDL). Mais especificamente relacionado com a geração a partir do GDL foi criado, em 1994, nos Estados Unidos o EPA's Landfill Methane Outreach Program (LMOP). Desde então, este tem desenvolvido um esforço contínuo de reunião de informações sobre aterros sanitários municipais (Municipal Solid Waste Landfills – MSW). O principal objetivo do LMOP é prover os proprietários e operadores de aterros sanitários municipais, os projetistas, os consumidores e outros participantes potenciais com informações sobre as oportunidades de aproveitamento energético que os aterros sanitários podem oferecer.

O EPA Landfill Methane Outreach Program (LMOP) é um componente fundamental do plano de ação americano para a mudança do clima (U.S. Climate Change Action Plan), que encoraja o uso do GDL como fonte energética. A EPA assiste aos proprietários municipais e privados de

aterros sanitários, bem como agências de estado, na redução das emissões de metano de aterros através de rentáveis projetos de recuperação energética dos mesmos. A agência estima que existam aproximadamente 425 projetos de recuperação energética do GDL nos Estados Unidos, gerando anualmente o equivalente a 1.142 MW_e médios, além de volume superior a 6,2 milhões de m³/d de GDL para uso direto. A EPA também estima que poderiam ser instalados projetos de recuperação economicamente viáveis em cerca de 560 aterros sanitários como ilustra a Figura7.

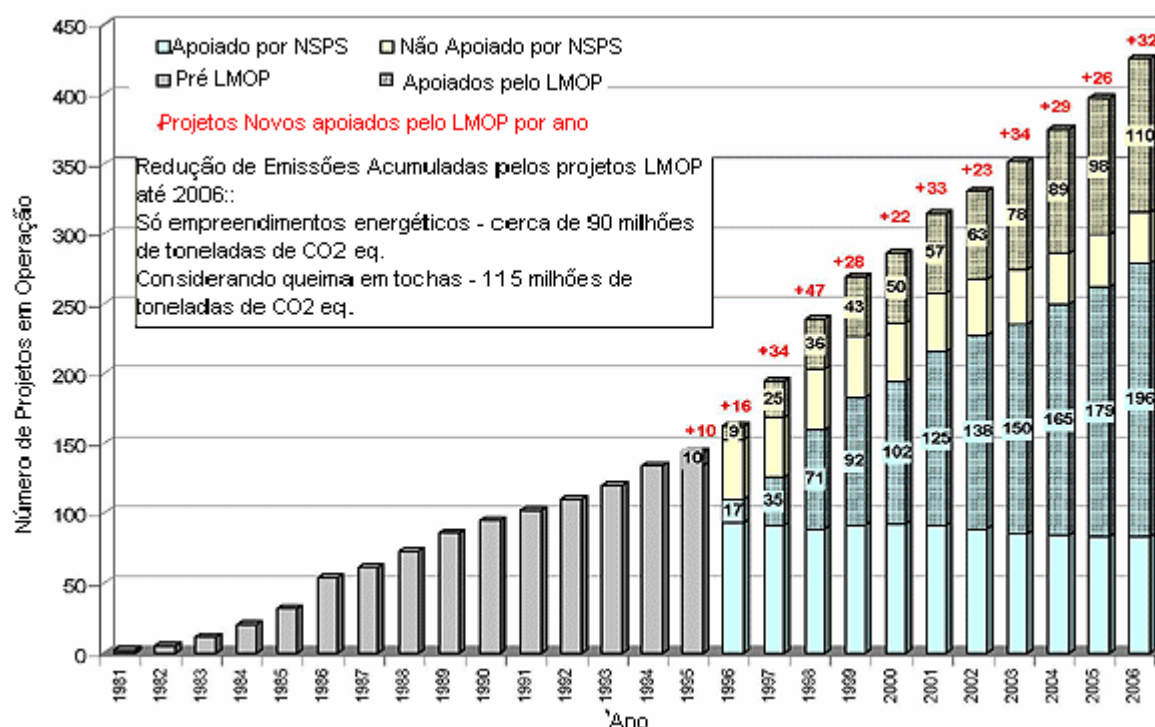
Figura7 – Áreas com Projetos de Gás de Aterro nos Estados Unidos



Fonte: (EPA, 2007).

O programa LMOP também apóia projetos estimulados pelo Programa Padrão de Desempenho de Novas Fontes. O Gráfico 4 mostra a evolução do aproveitamento do GDL nos EUA.

Gráfico 4 – Evolução dos Projetos de Aproveitamento de GDL no EUA



A escola de Antioch, em Illinois, EUA, tornou-se a primeira escola do país a ter sua eletricidade e aquecimento fornecidos, exclusivamente, pelo biogás do aterro existente nas proximidades (Torresani, 2004). O aterro recebeu 2.000.000 t entre 1963 e 1984, tendo uma capacidade inicial de 300 ft³/min, ou 510 m³/h. Foram instaladas 12 microturbinas Capstone de 30 kWe e o calor rejeitado, 85 kWth (a 288°C), usado para aquecimento da água. O projeto custou US\$ 1,9 milhões e foi amortizado em 8 anos.

No aterro de Puente Hills, em Whittier, Califórnia, funciona o maior complexo de recuperação de biogás dos EUA. Sua operação foi iniciada na década de 1980, recebendo 12.500 t/dia de RSU e coletando cerca de 35.000 m³/h de biogás – através de 400 poços verticais e 80 km de tubulações horizontais. Esta planta usa o GDL de três maneiras:

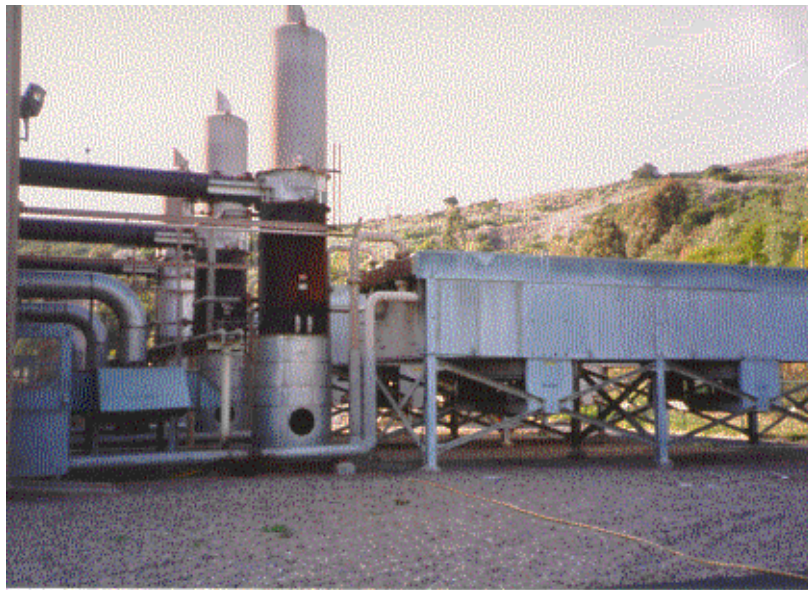
1. 50 MWe de energia numa turbina a vapor localizada no próprio aterro.
2. Transformado em GNV.
3. Como combustível da caldeira de uma escola situada a 1,6 Km do aterro.

Segundo a SCS Engineers (2004), podem ser consideradas algumas estimativas de custo para aproveitamento energético do biogás de aterros, como:

1. Uso Local do Biogás:

- Caldeira vapor de 10.000 lb/h → US\$ 120.000.
 - Caldeira Vapor de 80.000 lb/h → US\$ 300.000.
 - Gasoduto local → US\$ 100.000 a US\$ 200.000/Km.
 - Operação e Manutenção (O&M) → similar ao uso de GN.
2. Injeção na Rede de Gás (limpeza)
- Gasoduto → US\$ 100.000 a US\$ 200.000/Km.
 - Sistema de Limpeza e Compressão → US\$ 25.000/(m³/min) considerando 50% de metano no biogás.
 - O&M → US\$ 600/hp para compressão (para comprimir o biogás a 100 psi a potencia requerida é: 7,2 hp/m³/min).
3. Geração de Energia Elétrica:
- Motores a Gás → US\$ 900 a US\$ 1.200/kW
 - Turbinas a Gás → US\$ 1.100 a US\$ 1.300/kW
 - O&M → US\$ 10 a US\$ 25/MWh.

Nas Figuras abaixo são mostrados dois modernos sistema de limpeza de biogás de aterros nos EUA.

Figura8 – Vista Lateral de Moderno Sistema de Limpeza de Biogás de Aterro nos EUA**Figura9 – Vista Frontal de Moderno Sistema de Limpeza de Biogás de Aterro nos EUA**

Dentro do LMOP foi criado o programa Converting Landfill Gas to Energy (LFGTE) para incentivar a recuperação energética do lixo. Os projetos LFGTE procuram a melhoria da qualidade do ar e da qualidade de vida, além da redução das emissões de gases de efeito estufa. Com a eliminação das emissões de GDL, são reduzidos os odores desagradáveis e explosões espontâneas nos aterros, melhorando as condições de vida local. Além disto, evita-se também o consumo de combustíveis fósseis (idem).²²

²² Informações detalhadas e atualizadas para todos os Estados americanos podem ser obtidas no site <http://www.epa.gov/lmop/proj/>.

O LMOP inclui cinco importantes componentes: os parceiros governamentais (state ally), os parceiros de energia (energy ally), os parceiros industriais (industry ally), os parceiros da comunidade (community partner) e os aprovadores de programas (endorser programs). A EPA estabelece alianças separadas com agências de estado, provedores de energia (incluindo investidor/proprietário, a esfera municipal, outras esferas do poder público e cooperativas), intermediários chaves e associações do setor público, membros das indústrias de desenvolvimento de geração de GDL (incluindo empreendedores, engenheiros, vendedores de equipamentos e outros), comunidades locais, municipalidades e proprietários/operadores de aterros através de um memorando de entendimento (Memorandum of Understanding – MOU).

Pela assinatura do MOU, cada participante assume um compromisso compartilhado de promover a recuperação energética de GDL de aterros sanitários, de reconhecer que o uso apropriado do GDL reduzirá as emissões de metano e de outros gases, e de se comprometer a implantar atividades que levem ao desenvolvimento deste recurso. Em contrapartida, a EPA²³ concorda em prover assistência aos projetos de recuperação energética a GDL e em reconhecer a participação dos parceiros no programa.

Em nível internacional, o LMOP oferece opções amigáveis de desenvolvimento, educação e de serviços de assistência técnica para países em desenvolvimento interessados na implantação de projetos de geração GDL. Nos últimos anos, o LMOP assessorou, técnica e economicamente, projetos em aterros selecionados de vários países em desenvolvimento. Algumas cidades foram reveladas como de grande potencial para desenvolvimento de projetos incluindo São Paulo (Brasil), Manila (Filipinas), Bangkok (Tailândia) e Cidade do México (México). O objetivo desta assessoria era verificar projetos potenciais em países em desenvolvimento de interesse a empreendedores americanos. O LMOP participa ainda de workshops e conferências como em Varsóvia (Polônia), Bangkok (Tailândia), Kiev (Ucrânia), Cidade do México (México) e Nanjing (China).

2.2.4.2. O GDL no Reino Unido

O GDL tem se tornado uma das mais baratas fontes de energia renovável no Reino Unido sendo, em alguns projetos, comparável a geradores convencionais a carvão, a gás ou a

²³ Para facilitar o uso das informações disponíveis sobre aterros a EPA classifica os aterros sanitários em cinco categorias baseadas no status do LFGTE do aterro: projetos em andamento, projetos candidatos, fechados, outros, e de andamento desconhecido. E ainda divide os Estados Unidos em quatro territórios: *território 1, com projetos nos estados de* CT, DE, ME, MD, MA, NH, NJ, NY, NC, PA, RI, SC, TN, VA, VT, and WV; *Território 2, com projetos nos estados de* IL, IN, KY, MI, OH, e WI; *território 3, com projetos nos estados de* AZ, CA, CO, HI, KS, LA, NM, NV, OK, TX, and UT; e *território 4, com projetos nos estados de* AK, AL, AR, FL, GA, IA, ID, MN, MO, MS, MT, ND, NE, OR, SD, WA, and WY.

combustível nuclear. Os aterros sanitários com plantas de geração, que somavam apenas 135 MW em 1998, atingiram a capacidade de 505 MW médios em 2006.

Desde 1990, o governo do Reino Unido tem apoiado a geração de energia usando combustíveis não derivados de fontes fósseis, devido às desvantagens ambientais associadas a estes. O Non-Fossil Fuel Obligation (NFFO) é um plano pelo qual as companhias de eletricidade são obrigadas a comprar um montante de energia gerada a partir de fontes não fósseis (renováveis), funcionando de forma similar ao PROINFA no Brasil. Isto leva a projetos baseados em fontes eólicas, hídricas, de biomassa e do lixo. As propostas que têm obtido sucesso em licitações são remuneradas por um período de 15 anos com garantia de preço. Qualquer custo extra para as companhias de eletricidade é pago por uma pequena taxa para todos os consumidores de eletricidade.

2.2.5. Panorama Brasileiro da Geração a partir do GDL

No passado, após as crises do petróleo, existiram experiências de aproveitamento energético do lixo principalmente no Rio de Janeiro, Natal e São Paulo.

No Rio de Janeiro esta experiência teve início em 1977, quando a Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) em parceria com a Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro (CEG) deram início ao primeiro projeto de recuperação energética de GDL de aterros sanitários. Foi implementado um projeto de coleta de biogás no aterro sanitário do Caju, Figura 10. O transporte do biogás produzido era realizado por um gasoduto de 4 Km até a planta de gás da CEG em São Cristóvão. Neste local o biogás era adicionado ao gás de nafta e posteriormente craqueado em gás natural, a fim de ser distribuído para uso residencial no Rio de Janeiro. Em dez anos de operação, o sistema recuperou 20 milhões de metros cúbicos de GDL, que foram adicionados ao gás produzido pela planta da CEG, sem nenhum tipo de tratamento especial, a custos operacionais extremamente baixos (2 bombas de 2 HP operadas por três técnicos).

Figura10 – Planta de GDL da COMLURB/CEG

Fonte: Web-resol

Em 1980, os engenheiros da COMLURB iniciaram estudos para utilização do GDL como combustível veicular, utilizando um detalhado projeto de coleta, purificação, e compressão. O projeto atendeu a 100 veículos diariamente, durante cinco anos, para o que contava com um posto de abastecimento na unidade de tratamento de biogás, mostrada na Figura11 a seguir. (MUYLEAERT 2000).

Figura11 – Instalações da COMLURB para produção de GNV do GDL



Estação de purificação, compressão e abastecimento de biogás para uso em veículos COMLURB



Caminhão de coleta adaptado para uso de biogás purificado como combustível.

Fonte: Web-resol

O aterro sanitário do Caju está localizado às margens da Baía de Guanabara, a oito quilômetros do centro da Cidade do Rio de Janeiro. Este foi instalado em 1935 e operou até 1977, quando foi fechado. Durante sua operação não existia controle sobre a quantidade e qualidade do lixo. Na verdade, este era um aterro aberto, com uma cobertura de terra irregular que recebeu aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos de lixo. Este aterro foi expandido em uma área de aproximadamente um milhão de metros quadrados e totalmente recoberto por camadas irregulares de argila. Seu ponto padrão mais alto fica aproximadamente 20 metros acima do nível do mar. Seu sistema de coleta de biogás ocupa uma área de aproximadamente 250.000 metros quadrados e está localizado nas últimas áreas aterradas. Devido às altas taxas de pluviosidade e insolação do Rio de Janeiro, bem como à alta taxa de material orgânico do lixo deste Estado, existem condições ideais para produção de GDL. Mesmo sem qualquer tipo de tratamento do lixo e área de coleta de apenas um quarto do total do aterro, doze anos após seu fechamento, medições realizadas pela COMLURB atestaram níveis de produção de gás ainda aceitáveis para aproveitamento energético economicamente viável. (idem).

A qualidade do produto comercializado era conferida pelo atendimento às especificações da Portaria 42/1998 ANP, a qual foi alterada pela Portaria 104/2002, ambas apresentadas na Tabela 14, a seguir.

Tabela 14 – Especificações que Gás Metano Veicular (GMV) da COMLURB atendia e Especificações do Gás Natural

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	42/1999	104/2002		
			N	NE	S/SE/CO
Poder Calorífico Superior	kWh/m ³	-	9,47 a 10,67	9,72 a 11,67	
Teor de Metano, Mín.	% volume	86	68		86
Teor de Etano, Max	% volume	-	12		10
Teor de Propano, Max	% volume	3,3		3	
Teor de Propano e superiores, Max	% volume	3,7		-	
Teor de Butano e superiores, Max	% volume	0,8		1,5	
Teor de Inertes, Max*	% volume	4,0	18,0	5,0	4,0
Nitrogênio	% volume	-	anotar		2
Teor de Metano e Inertes, Mín.	% volume	87		-	
Teor de Dióxido de Carbono, Max	% volume	2,0		-	
Teor de Hidrogênio	% volume	Anotar		-	
Teor de Oxigênio (O ₂), Max	% volume	0,5	0,8		0,5
Teor de Enxofre (H ₂ S e enxofre mercaptídico), Max	mg/m ³	80		70	
Teor de Gás Sulfídrico (H ₂ S), Max	mg/m ³	20	10	15	10
Pto de orvalho de água, 1 atm, Max	°C	-45	-39	-39	-45

* Na Portaria 104/2002, Teor de Inertes incorpora N₂ e CO₂.

Na comparação entre as especificações é possível notar que foi incluído o Poder Calorífico Superior, mantido o teor de metano (quando não reduzido), inserida a medição de etano, reduzido o teor máximo de propano em 9%, retirada a medição de propano e superiores, expandido o teor de butano e superiores, sendo que o teor de propano e superiores ficou o mesmo (ainda que tenha sido retirado). Os teores de inertes e de oxigênio foram ampliados, enquanto os limites de enxofre total e gás sulfídrico foram reduzidos em 12,5% e 50%, respectivamente. O teor de nitrogênio foi inserido, enquanto o de hidrogênio foi retirado. Ou seja, os limites ficaram mais rígidos apenas quanto à presença de propano e destes dois últimos componentes, o que pode ser solucionado através de melhoria no processo de tratamento dos gases. No caso do Poder Calorífico Superior e teor de nitrogênio, deverão passar a ser medidos e, caso não atendam às especificações, melhorias no processo também serão estabelecidas.

Quanto a outro tipo de utilização para o biogás, a experiência da cidade de Natal deve ser ressaltada. A capital potiguar produzia aproximadamente 500 toneladas de lixo urbano por dia na década de 1980. Estas eram dispostas em um depósito controlado próximo a uma grande duna de areia. Devido à alta percentagem de matéria orgânica, às altas taxas pluviométricas e à temperatura da região, um grande potencial de produção de GDL foi verificado. Em 1983, a administração da cidade decidiu elaborar três projetos para utilização deste gás:

- em uma cozinha comunitária para moradores de baixa renda da comunidade próxima ao aterro;
- em uma rede de distribuição de gás conectada diretamente a uma comunidade próxima de 150 habitantes;
- em uma ligação para alimentação de uma caldeira de uma indústria de castanha de caju.

O investimento estimado foi de US\$ 50.000 e foi apresentado para agências federais, não sendo, entretanto, aprovado devido à sua pequena abrangência. Apesar disto, a administração de Natal decidiu implementar a cozinha industrial com recursos próprios, o que aconteceu em 1986. As Figuras abaixo ilustram estas instalações.

Figura12 – Aterro de Natal

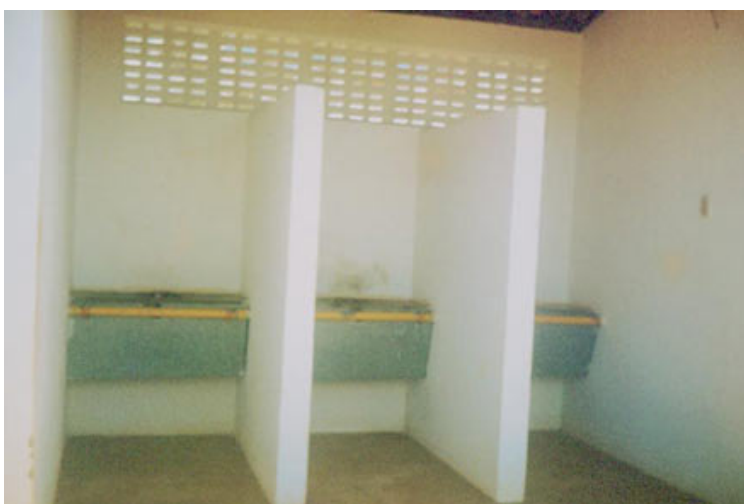


Fonte: Web-resol

Figura13 – Captação do Biogás



Fonte: Web-resol

Figura14 – Cozinha Comunitária com GDL em Natal, RN

Fonte: Web-resol

Em São Paulo também houve programas para aproveitamento do GDL, como o Programa de Recuperação de Metano de Aterros Sanitários no Estado de São Paulo. A Região Metropolitana

de São Paulo apresenta problemas ambientais de grande magnitude, decorrentes de um processo histórico de ocupação e expansão do espaço urbano sem o devido equacionamento das questões sócio-ambientais e urbanas. Uma delas diz respeito ao gás metano produzido espontaneamente nos depósitos de lixo, que afeta negativamente o efeito estufa e pode causar explosões, com conseqüências mórbidas em decorrência da presença de catadores nos lixões (Muylaert, 2000).

As primeiras atitudes neste sentido foram a elaboração de uma avaliação pela USEPA, denominado FEASIBILITY ASSESSMENT FOR GAS-TO-ENERGY AT SELECT LANDFILLS IN SAO PAULO, BRAZIL, e o lançamento do edital de licitação da exploração do biogás dos aterros municipais, em 1997, de número 005/SVMA/97 - PROCESSO Nº 1995-0.087.026-6. Neste edital foram oferecidos os aterros de São João, Bandeirantes, Santo Amaro, Jacuí, São Mateus e Sapopemba, sendo que apenas os aterros Bandeirantes e São João tiveram propostas e foram concedidas explorações.

Em 1998, foi realizado pela USAID um trabalho sobre o potencial de aproveitamento energético do biogás dos 13 maiores aterros do Brasil, localizados nas regiões metropolitanas. Análises quanto às quantidades de lixo depositadas foram realizadas, com base no modelo matemático de emissão de metano produzido em aterros sanitários conhecido como "First Order Decay", no qual também são consideradas as condições climáticas. Dentre os resultados encontra-se o motivo para que o programa LMOP da EPA, citado anteriormente, tenha estimulado o aproveitamento energético dos aterros paulistas.

Isto pode ser comprovado com base nos dados do Inventário Brasileiro de Emissões Antropogênicas de Gases de Efeito Estufa (MCT, 2000), que utilizou a metodologia do IPCC (IPCC, 1996) e encontrou que as emissões líquidas de metano provenientes de resíduos sólidos no Brasil, para os anos de 1990 e 1994, foram de 617,95 e 676,89 gigagramas (mil toneladas) por ano, respectivamente. Como atualmente estas emissões não são recuperadas, e considerando que o potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*) relativo às emissões de metano é equivalente a 21 vezes o potencial das emissões do dióxido de carbono, para o período de cem anos, parâmetro utilizado internacionalmente, teríamos em 1994 um total de emissões equivalentes a 14.214,69 Gg/ano de dióxido de carbono equivalente.

Este montante poderia ser evitado parcialmente (apenas nos aterros de exploração economicamente viável) através da geração elétrica a partir do GDL, trazendo o duplo benefício de evitar tanto as emissões do GDL quanto as que seriam oriundas da geração a partir de combustíveis fósseis inseridos na matriz energética, além de atender às demandas crescentes de energia necessárias ao desenvolvimento do país (MUYLAERT 2000).

No decorrer da primeira metade da década de 2000, enquanto o Protocolo de Kyoto tinha sua ratificação negociada, alguns empreendimentos foram desenvolvidos no Brasil. Três devem ser destacados por suas características, mostradas nas figuras a seguir:

- em primeiro lugar, um dos maiores do mundo em funcionamento, com 22 MW de potência instalada, localizado no Aterro Bandeirantes, em São Paulo – SP, que recupera o biogás existente para consumir em motores de combustão interna. O investimento foi de US\$ 5,29 milhões, com redução de emissões de metano estimadas em 8,8 milhões de toneladas de CO₂ equivalentes em 12 anos. Leilão realizado em setembro de 2007 comercializou as emissões a US\$ 20/t CO₂ eq – cerca de 16,20 euros – e somente 800.000 t CO₂ eq. As figuras a seguir mostram o sistema:

Figura15 – Casa de Motores a Biogás no Aterro Bandeirantes, São Paulo



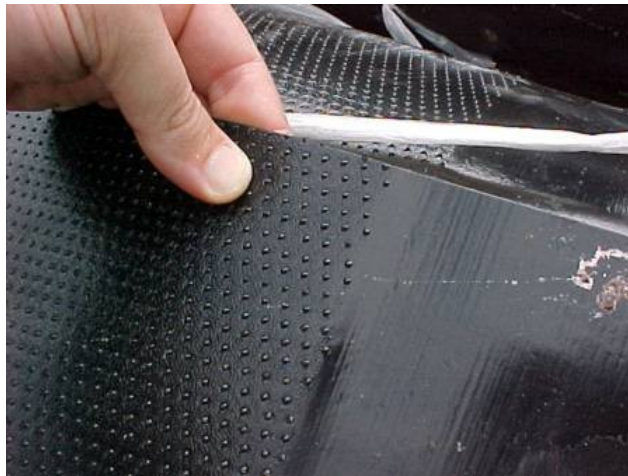
Figura16 – Planta Geral da Usina a Biogás no Aterro Bandeirantes, São Paulo

- seguido pelo primeiro projeto a ser reconhecido como mitigador de emissões de gases do efeito estufa no mundo, localizado no Aterro de Adrianópolis, em Nova Iguaçu – RJ, mostrado na Figura17 e na Figura18, que foi criado para este fim em 2002 (dos dez projetos submetidos à CIMA até final de maio de 2005, sete eram de recuperação de biogás de aterro e um de aproveitamento de resíduos da indústria madeireira, totalizando oito de redução de emissões de metano, alguns com geração de energia, mas nenhum requerendo as reduções decorrentes desta atividade), estima mitigar a emissão de 14 milhões de toneladas de CO₂ eq em 21 anos, com expectativa de potência instalada final de 12 MW.

Figura17 – Aplicação do Revestimento no Aterro de Adrianópolis, Nova Iguaçu, RJ



Figura18 – Revestimento de Adrianópolis, Nova Iguaçu, RJ



- aos quais deve ser agregado o experimento no Aterro de Gramacho, em Duque de Caxias – RJ, onde o aproveitamento de 1% do biogás disponível consorciado a biodiesel está servindo para avaliar a alternativa de utilização de equipamentos mais eficientes, Figura19 – cabe ressaltar que este projeto não funcionou por falta de fornecimento de óleo vegetal para produção de biodiesel;

Figura19 – Sistema de Gramacho – Fotos



Nota: A - Sistema de coleta de gases, B - Abastecimento da Central de Gás, C - Grupo-Gerador Ciclo Diesel abastecido com Biogás e Biodiesel, D - Torneiras de Controle de combustíveis.

Fonte: IVIG, 2004.

Outra linha de trabalho foi estabelecida pelo governo federal, que contratou um projeto à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), em 2001, através do Ministério do Meio Ambiente, sobre o potencial de aproveitamento energético dos vazadouros de lixo das regiões metropolitanas do Brasil. Depois de realizar pesquisa junto às prefeituras de 67 municípios de 37 regiões, através de questionários, e visitado 15, abrangendo cerca de 40 milhões de pessoas, foi constatado que seria possível instalar usinas termelétricas com potência instalada total de 340 MW (MMA, 2004), capazes de mitigar emissões da ordem de 100 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalentes no decorrer de 10 anos. A lista dos municípios segue na Tabela 15 abaixo:

Tabela 15 – Potencial de geração de energia e créditos de CO₂ eq por municípios e regiões

NOME DO MUNICÍPIO	IBGE 2000 População	IBGE 2000 População	POTENCIAL ENERGIA ELÉTRICA em MW			TONELADAS DE CRÉDITOS DE CO ₂ EQUIVALENTE em tCO ₂ equivalente		
			2005	2010	2015	2005	2010	2015
NATAL	709.422	709.422	8,8	5,3	3,2	342.795	208.458	124.653
OLINDA	368.643	368.643	2,8	1,7	1	109.071	68.222	38.954
REGIÃO DE RECIFE	1.421.947	2.002.344	22	28	18	856.988	1.012.804	701.172
MACEIO	796.842	796.842	8,5	5,4	3,4	331.709	210.352	132.444
REGIÃO DE SALVADOR	2.440.866	2.646.112	26	30	36	1.090.712	1.168.620	1.480.252
BELO HORIZONTE	2.229.697	2.229.697	11,3	8,2	5,2	440.180	319.423	202.561
BETIM	303.588	303.588	0,7	1	1,3	27.288	38.954	50.640
CONTAGEM	538.408	538.408	2,4	3,8	4,7	93.490	140.234	183.084
REGIÃO DE VITÓRIA	291.889	1.089.789	4	6	5,8	155.818	233.724	225.933
BELFORD ROXO	433.120	433.120	2,1	1,4	0,9	81.803	54.536	35.059
NITERÓI	458.465	458.465	4,7	2,8	1,7	183.084	109.071	68.222
NOVA IGUAÇU	915.364	915.364	4	6	8	155.818	233.724	311.632
REGIÃO DE RIO DE JANEIRO	5.850.544	6.575.359	40	48	31,5	1.558.160	1.791.884	1.227.051
GUARULHOS	1.071.298	1.071.298	5,4	6,8	7,8	210.352	257.096	303.841
REGIÃO DE ITAQUAQUECETUBA	272.416	1.292.695	7,1	7,1	4,5	278.573	278.573	175.293
REGIÃO DE MAUÁ	363.112	1.596.402	5	6	8	194.770	233.724	311.632
OSASCO	650.993	650.993	4,4	3,6	2,3	171.398	140.234	89.594
SANTO ANDRÉ	648.443	648.443	3,3	2,1	1,3	128.548	81.803	50.640
REGIÃO DE SÃO PAULO	10.406.166	10.406.166	11,7	84	48	4.557.618	3.272.136	1.869.792
GUARUJÁ	265.155	265.155	1,9	2,3	1,7	74.013	89.594	66.222
SANTOS	417.777	417.777	2,5	1,8	1	97.385	62.326	38.954
SÃO VICENTE	302.678	302.678	0,7	0,8	0,5	27.288	23.372	19.477
CAMPINAS	967.921	967.921	5,2	3,3	2,1	202.561	128.548	81.803
PAULÍNIA	51.242	247.297	4,4	10,9	16	171.398	424.589	623.284
REGIÃO DE CURITIBA	1.588.850	2.487.769	10	15	20	389.540	584.310	779.080
LONDRINA	448.849	448.849	2,4	3,6	3,5	93.490	140.234	136.339
MARINGÁ	288.485	288.485	2	2,3	1,5	77.908	89.594	58.431
REGIÃO DE FLORIANÓPOLIS	331.784	414.534	2,5	3,4	4,2	97.385	132.444	163.607
JOINVILLE	428.974	428.974	4	5,5	4,4	155.818	214.247	171.398
REGIÃO DE PORTO ALEGRE	232.447	1.592.378	8,2	5,5	3,7	319.423	214.247	144.130
SÃO LEOPOLDO	193.403	193.403	0,6	0,4	0,3	23.372	15.582	11.688
GOIÂNIA	1.090.581	1.090.581	7,6	10,1	12,5	298.050	393.435	486.925
CAMPO GRANDE	662.534	662.534	3,8	5,2	6,6	148.025	202.561	257.096
REGIÃO DE TREMEMBÉ	34.807	165.213	1	2	3	38.954	77.908	116.862
CUIABÁ	482.496	482.496	1,7	1	0,7	66.222	38.954	27.268
JOÃO PESSOA	594.922	594.922	2,8	1,7	1	109.071	68.222	38.954
REGIÃO DE JUNDIAÍ	322.798	669.783	1,5	1,2	1	58.431	46.745	38.954
População abrangida pelo estudo	38.870.977	46.431.979	344,3	328,4	278,3	13.411.862,2	12.792.483,6	10.840.898,2

Fonte: MMA, 2004.

O desdobramento deste trabalho começou em maio de 2005, após o início da vigência do Protocolo de Kyoto, em 16 de fevereiro, com o lançamento de um edital conjunto dos Ministérios das Cidades e do Meio Ambiente, para identificar dentre os 200 maiores municípios os interessados em receber consultoria para elaboração de um estudo de viabilidade e elaboração dos documentos para candidatura aos créditos de carbono. O resultado do convite aos municípios foi o constante na Tabela 16, de acordo com site do Ministério das Cidades (www.cidades.gov.br), em 27 de maio de 2005. Deve-se ressaltar o fato de nem o Rio de Janeiro nem São Paulo terem respondido ao edital, como ilustra a Tabela 16, a seguir.

Tabela 16 – Municípios que responderam ao Edital do Ministério das Cidades

UF	Município	UF	Município	UF	Município
AC	Rio Branco	PB	João Pessoa	SC	Itajaí
AL	Arapiraca	PB	Santa Rita	SC	Jaraguá do Sul
AL	Maceió	PE	Cabo de Santo Agostinho	SC	Joinville
AM	Manaus	PE	Camaraçibe	SC	Lages
AP	Macapá	PE	Caruaru	SC	São José
BA	Alagoinhas	PE	Garanhuns	SE	Aracaju
BA	Barreiras	PE	Jaboatão dos Guararapes	SE	Nossa Senhora do Socorro
BA	Camaçari	PE	Olinda	SP	Americana
BA	Feira de Santana	PE	Paulista	SP	Araçatuba
BA	Ilhéus	PE	Petrolina	SP	Araraquara
BA	Itabuna	PE	Recife	SP	Atibaia
BA	Jequié	PE	Vitória de Santo Antão	SP	Barueri
BA	Juazeiro	PI	Parnaíba	SP	Bauru
BA	Lauro de Freitas	PI	Teresina	SP	Bragança Paulista
BA	Salvador	PR	Cascavel	SP	Campinas
BA	Vitória da Conquista	PR	Colombo	SP	Carapicuíba
CE	Caucaia	PR	Curitiba	SP	Cotia
CE	Fortaleza	PR	Foz do Iguaçu	SP	Diadema
CE	Juazeiro do Norte	PR	Guarapuava	SP	Embu
CE	Maracanaú	PR	Londrina	SP	Ferraz de Vasconcelos
CE	Sobral	PR	Maringá	SP	Franca
DF	Brasília	PR	Paranaguá	SP	Francisco Morato
ES	Cachoeiro de Itapemirim	PR	Ponta Grossa	SP	Guarujá
ES	Cariacica	PR	São José dos Pinhais	SP	Guarulhos
ES	Serra	RJ	Angra dos Reis	SP	Hortolândia
ES	Vila Velha	RJ	Barra Mansa	SP	Indaiatuba
ES	Vitória	RJ	Belford Roxo	SP	Itapeçerica da Serra
GO	Águas Lindas de Goiás	RJ	Cabo Frio	SP	Itapetininga
GO	Anápolis	RJ	Campos dos Goytacazes	SP	Itapevi
GO	Aparecida de Goiânia	RJ	Duque de Caxias	SP	Itaquaquecetuba
GO	Goiânia	RJ	Itaboraí	SP	Itu
GO	Luziânia	RJ	Macaé	SP	Jacaréí
GO	Rio Verde	RJ	Magé	SP	Jundiá
MA	Caxias	RJ	Mesquita	SP	Limeira
MA	Imperatriz	RJ	Nilópolis	SP	Marília
MA	São José de Ribamar	RJ	Niterói	SP	Mauá
MA	São Luís	RJ	Nova Friburgo	SP	Mogi Guaçu
MA	Timon	RJ	Nova Iguaçu	SP	Moji das Cruzes
MG	Barbacena	RJ	Petrópolis	SP	Osasco
MG	Belo Horizonte	RJ	Queimados	SP	Pindamonhangaba
MG	Betim	RJ	Rio de Janeiro	SP	Piracicaba
MG	Contagem	RJ	São Gonçalo	SP	Praia Grande
MG	Divinópolis	RJ	São João de Meriti	SP	Presidente Prudente
MG	Governador Valadares	RJ	Teresópolis	SP	Ribeirão Preto
MG	Ibirité	RJ	Volta Redonda	SP	Rio Claro
MG	Ipatinga	RN	Mossoró	SP	Santa Bárbara d'Oeste
MG	Juiz de Fora	RN	Natal	SP	Santo André
MG	Montes Claros	RN	Parnamirim	SP	Santos
MG	Patos de Minas	RO	Porto Velho	SP	São Bernardo do Campo
MG	Poços de Caldas	RR	Boa Vista	SP	São Caetano do Sul
MG	Ribeirão das Neves	RS	Alvorada	SP	São Carlos
MG	Sabará	RS	Bagé	SP	São José do Rio Preto

UF	Município	UF	Município	UF	Município
MG	Santa Luzia	RS	Canoas	SP	São José dos Campos
MG	Sete Lagoas	RS	Caxias do Sul	SP	São Paulo
MG	Teófilo Otoni	RS	Gravataí	SP	São Vicente
MG	Uberaba	RS	Novo Hamburgo	SP	Sorocaba
MG	Uberlândia	RS	Passo Fundo	SP	Sumaré
MS	Campo Grande	RS	Pelotas	SP	Suzano
MS	Dourados	RS	Porto Alegre	SP	Taboão da Serra
MT	Cuiabá	RS	Rio Grande	SP	Taubaté
MT	Rondonópolis	RS	Santa Maria	TO	Araguaína
MT	Várzea Grande	RS	São Leopoldo	TO	Palmas
PA	Abaetetuba	RS	Sapucaia do Sul		
PA	Ananindeua	RS	Uruguaiana		
PA	Belém	RS	Viamão		
PA	Castanhal	SC	Blumenau		
PA	Marabá	SC	Chapécó		
PA	Santarém	SC	Criciúma		
PB	Campina Grande	SC	Florianópolis		

LEGENDA	
	Enviados
	Documentação Pendente
	Não enviado

O resultado final, já com pontuação estabelecida, encontra-se na Tabela 17 e na Tabela 18, abaixo, cuja hierarquização foi feita com base nas regiões brasileiras, agrupadas pelos Ministérios como se segue: sudeste, norte/nordeste, sul/centro-oeste.

Tabela 17 – Resultados classificação Região Sudeste

CLASSIFICAÇÃO	MUNICÍPIO	UF	PONTUAÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	MUNICÍPIO	UF	PONTUAÇÃO
1	Belo Horizonte	MG	154	31	Montes Claros	MG	105
2	Nova Iguaçu	RJ	139	32	Bauru	SP	104
3	Americana	SP	136	33	Contagem	MG	104
4	Duque de Caxias	RJ	135	34	São Carlos	SP	103
5	Santos	SP	133	35	Campos dos Goytacazes	RJ	102
6	São Gonçalo	RJ	133	36	Itaboraí	RJ	102
7	Guarulhos	SP	133	37	Ribeirão Preto	SP	102
8	Santo André	SP	132	38	Sorocaba	SP	100
9	Mesquita	RJ	132	39	Marília	SP	98
10	Niterói	RJ	131	40	Barra Mansa	RJ	97
11	São José dos Campos	SP	130	41	Uberaba	MG	96
12	Governador Valadares	MG	127	42	Limeira	SP	94
13	Jundiaí	SP	126	43	Poços de Caldas	MG	94
14	Piracicaba	SP	123	44	Santa Bárbara d'Oeste	SP	93
15	Juiz de Fora	MG	121	45	Macaé	RJ	92
16	Jacareí	SP	121	46	Atibaia	SP	92
17	Hortolândia	SP	120	47	Betim	MG	90
18	Praia Grande	SP	119	48	Santa Luzia	MG	90
19	Petrópolis	RJ	118	49	Embu	SP	90
20	Osasco	SP	117	50	São João de Meriti	RJ	90
21	Itapecerica da Serra	SP	113	51	Volta Redonda	RJ	88
22	Guarujá	SP	113	52	Belford Roxo	RJ	86
23	Moji das Cruzes	SP	112	53	Sete Lagoas	MG	84
24	Ribeirão das Neves	MG	111	54	Ipatinga	MG	82
25	Araraquara	SP	111	55	Itu	SP	81
26	Teresópolis	RJ	110	56	Patos de Minas	MG	81
27	Cariacica	ES	110	57	Barbacena	MG	79
28	Taubaté	SP	109	58	Magé	RJ	78
29	Uberlândia	MG	109	59	Teófilo Otoni	MG	70
30	Mogi Guaçu	SP	108	60	Araçatuba	SP	68

Tabela 18 – RESULTADOS CLASSIFICAÇÃO

Regiões Norte e Nordeste				Regiões Sul e Centro-Oeste			
Classificação	Município	UF	Pontuação	Classificação	Município	UF	Pontuação
1	Recife	PE	154	1	Curitiba	PR	157
2	Maceió	AL	142	2	Gravataí	RS	132
3	São Luís	MA	141	3	Porto Alegre	RS	130
4	Caucaia	CE	139	4	Goiânia	GO	128
5	Lauro de Freitas	BA	138	5	Florianópolis	SC	125
6	Manaus	AM	132	6	Distrito Federal	DF	123
7	Olinda	PE	130	7	Londrina	PR	123
8	Fortaleza	CE	128	8	Maringá	PR	122
9	Camaçari	BA	119	9	Campo Grande	MS	116
10	Belém	PA	117	10	Passo Fundo	RS	115
11	João Pessoa	PB	115	11	Joinville	SC	114
12	Teresina	PI	114	12	Caxias do Sul	RS	111
13	Natal	RN	107	13	Alvorada	RS	109
14	Aracaju	SE	107	14	Guarapuava	PR	109
15	Vitória da Conquista	BA	106	15	Rio Verde	GO	107
16	Alagoinhas	BA	100	16	Paranaguá	PR	104
17	Caxias	MA	100	17	Chapecó	SC	103
18	Petrolina	PE	100	18	Dourados	MS	101
19	Boa Vista	RR	100	19	São Leopoldo	RS	100
20	Porto Velho	RO	99	20	Ponta Grossa	PR	98
21	Barreiras	BA	95	21	Luziânia	GO	97
22	Campina Grande	PB	94	22	Rio Grande	RS	97
23	Cabo de Santo Agostinho	PE	89	23	Rondonópolis	MT	96
24	Juazeiro	BA	89	24	Anápolis	GO	95
25	Rio Branco	AC	89	25	Criciúma	SC	95
26	Paulista	PE	88	26	Cascavel	PR	94
27	Itabuna	BA	88	27	Blumenau	SC	93
28	Arapiraca	AL	85	28	Santa Maria	RS	91
29	Timon	MA	84	29	Foz do Iguaçu	PR	90
30	Parnaíba	PI	84	30	São José dos Pinhais	PR	84
31	Garanhuns	PE	84	31	Aparecida de Goiânia	GO	76
32	Caruaru	PE	82	32	Bagé	RS	76
33	Palmas	TO	80	33	São José	SC	75
34	Maracanaú	CE	80	34	Várzea Grande	MT	71
35	Ilhéus	BA	79	35	Colombo	PR	68
36	Araguaína	TO	76				
37	Ananindeua	PA	65				

As ações mais recentes neste segmento remetem ao aproveitamento do biogás do aterro São João, também na capital paulista, cuja eletricidade foi negociada no leilão do setor elétrico nacional, realizado em junho de 2006. O aterro de Salvador também está sendo explorado,

ainda que por empresa canadense. O aterro de Gramacho teve concedida a exploração do biogás após licitação realizada entre o final de 2006 e início de 2007, cujo vencedor foi consórcio de empresas que conta com integrante dos consórcios que exploram os aterros paulistanos e com o proprietário do aterro de Adrianópolis.

2.3. Digestão Anaeróbica (Biogás, Adubo Orgânico).

Digestão Anaeróbica (DA) pode ser definida como a conversão de material orgânico em dióxido de carbono, metano e lodo através de bactérias em um ambiente pobre em oxigênio. Este processo é uma das formas mais antigas de digestão e ocorre naturalmente na ausência de oxigênio como em plantações de arroz, águas paradas, estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários. O gás obtido durante a digestão anaeróbica, chamado de biogás, inclui além do metano e do dióxido de carbono, alguns gases inertes e compostos sulfurosos.

Normalmente de 100 a 200 m³ de biogás são produzidos por tonelada de matéria orgânica digerida. A composição típica do biogás é dada na Tabela 19, abaixo.

Tabela 19 - Composição Típica do Biogás

Gás	Composição
Metano	55 -70% por volume
Dióxido de Carbono	30 – 45% por volume
Sulfeto de hidrogênio	200 – 4000 ppm por volume
Teor de Energia do gás de digestão anaeróbica	20 – 25 MJ/Nm ³
Teor de CH ₄ por tonelada de RSU	167 – 373 MJ/t RSU

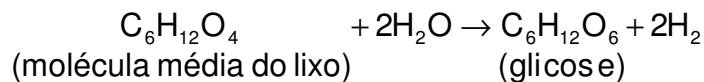
Fonte: (VERMA 2002).

A digestão anaeróbica é a consequência de uma série de interações metabólicas com a atuação de diversos grupos de microorganismos. Ela ocorre em três etapas:

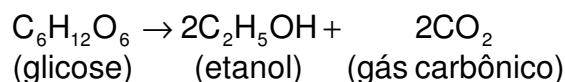
- hidrólise e acidogênese
- acetanogênese
- metanogênese

Na hidrólise o primeiro grupo de microorganismos secreta enzimas, que convertem os materiais orgânicos complexos (polímeros) em monômeros como a glicose, aminoácidos e ácidos graxos. A fase hidrolítica é relativamente lenta para resíduos ricos em celulose contendo lignina, por esta razão a madeira, em geral, não é digerida anaerobicamente e deve ser removida do

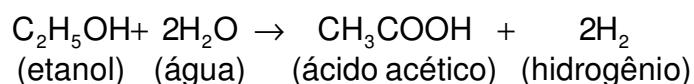
processo. Considerando o lixo pela molécula média (Themelis), $C_6H_{10}O_4$, a transformação desta molécula em glicose, por exemplo, é dada pela equação abaixo:



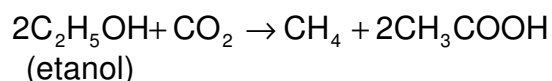
A hidrólise é imediatamente seguida pela fase de formação de ácidos a acidogênese. Neste caso as bactérias acidogênicas transformam os produtos da hidrólise em compostos orgânicos mais simples, de cadeia mais curta (voláteis), como ácidos (ex: acético, propiônico, butírico), cetonas (glicerol, acetona) e álcoois (etanol, metanol). Por exemplo a transformação da glicose em etanol é mostrada abaixo:

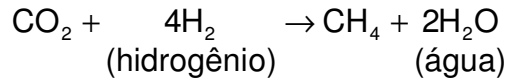
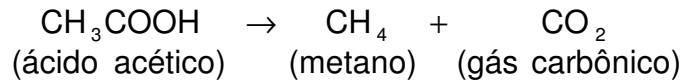


Os produtos da primeira fase são subseqüentemente convertidos, por um segundo grupo de bactérias, acetanogênicas, em ácidos orgânicos simples (acético, propiônico, butírico e etanol), hidrogênio (H_2) e gás carbônico (CO_2). Uma das equações nesta fase é a transformação do etanol em acetato:



Finalmente, o terceiro grupo de bactérias, metanogênicas ou fermentadoras de metano, convertem o material solúvel em metano. Aproximadamente 2/3 do metano é derivado da conversão do acetato e 1/3 pela redução do CO_2 pelo hidrogênio. As bactérias metanogênicas preferem ambientes levemente alcalinos, sendo muito sensíveis a variações. Se o pH cair abaixo de 6 estas bactérias não podem sobreviver e a produção de metano é prejudicada. A metanogênese é a fase limitante no processo de DA, por ser a mais lenta das três irá controlar a velocidade total do processo. As reações de metanogênese podem ser expressas abaixo:





A produção de metano ocorre em um espectro amplo de temperaturas mas, aumenta significativamente em duas faixas: mesofílica, entre 25-40°C, e termofílica, entre 50-65°C.

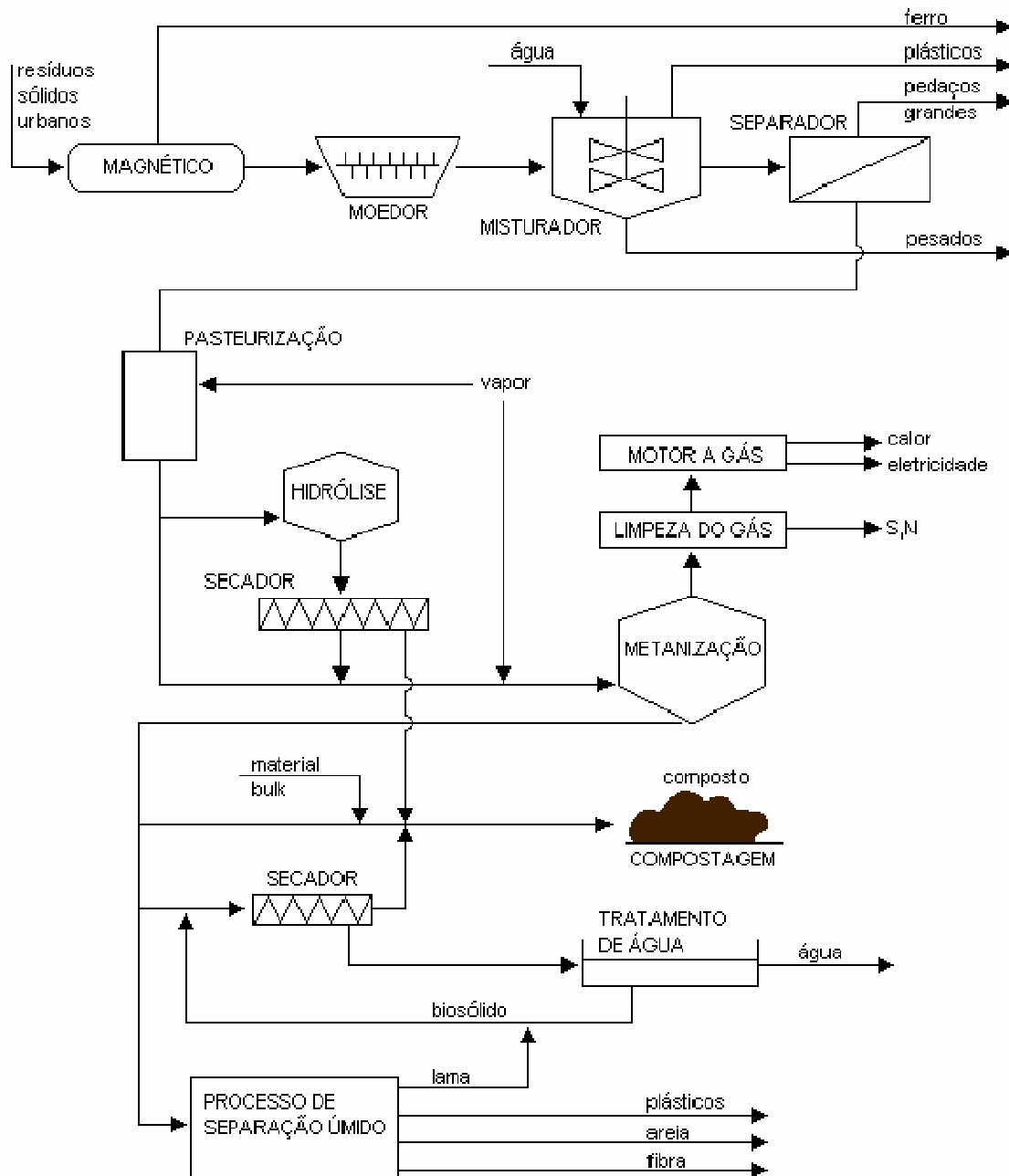
2.3.1. Descrição dos Modernos Sistemas de Digestão Anaeróbica.

De modo geral, a digestão anaeróbica pode ser dividida em quatro fases:

- pré-tratamento
- digestão de resíduo
- recuperação de gás
- tratamento de resíduos

A Figura 20, abaixo, mostra um esquema simplificado de um processo de digestão anaeróbica.

Figura20 - Exemplos de Unidades de Processo Comumente Utilizadas com Digestores Anaeróbicos de Resíduos Sólidos Urbanos.



Fonte: (VERSTRAETE 2002).

A maioria dos sistemas de DA necessita de uma fase de pré-tratamento da carga de entrada para que o sistema atinja seus objetivos. Por exemplo, se a produção de adubos de alta qualidade é desejada, a segregação dos contaminantes deve ser muito mais apurada.

No pré-processamento há a separação dos materiais não digeríveis. Os resíduos recebidos pelo digestor vêm normalmente da coleta seletiva ou de um pré-tratamento mecânico. A separação

garante a remoção de materiais indesejáveis ou recicláveis tais como vidros, metais, pedras e etc. No caso da coleta seletiva, os materiais recicláveis são separados dos resíduos orgânicos na fonte. A separação mecânica pode ser empregada caso a coleta seletiva não exista ou seja insuficiente. Contudo, a fração resultante é mais contaminada, conduzindo a compostos de baixa qualidade (RISE-AT,1998).

Dentro do digestor a carga é diluída para atingir o teor de sólidos desejado e permanece no digestor durante o tempo de retenção designado. Para a diluição, uma ampla variedade de fontes d'água pode ser utilizada, como água limpa, água de esgoto, ou líquido recirculante do efluente de digestor. Frequentemente necessita-se de um trocador de calor a fim de controlar a temperatura no vaso de digestão. As impurezas do biogás são retiradas para que o produto esteja de acordo com a necessidade da sua aplicação. No caso de tratamento residual, o efluente do digestor é desidratado e o líquido é reciclado para ser usado na diluição da carga de alimentação. Os bio-sólidos são aerobicamente tratados para a obtenção do produto composto, estabilizados para serem depositados em aterros ou usados como combustível para incineração.

2.3.2. Tipos de Sistemas de Digestão Anaeróbica.

Os processos de digestão anaeróbica podem ser classificados de acordo com o conteúdo de sólidos totais (ST) presentes no reator onde ocorre a digestão, de acordo com o seguinte critério:

- Úmido: baixo conteúdo de sólido (BS) – ST < 15%.
- Seco: alto conteúdo de sólidos (AS) – ST entre 25% e 30%.

Podemos classificar ainda os processos de digestão anaeróbica, com base no número de reatores utilizado, em:

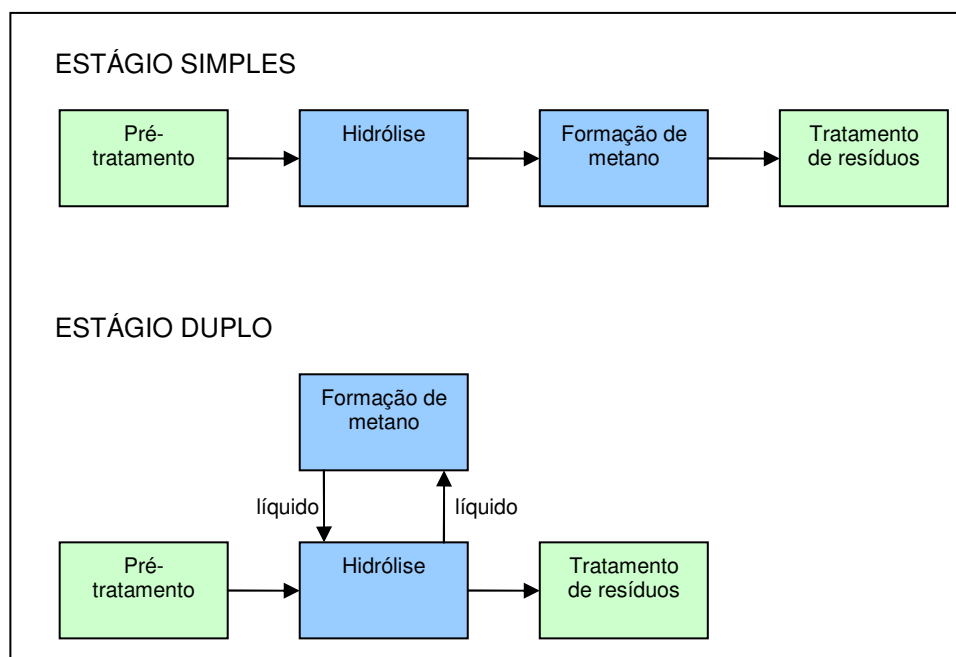
- Estágio Simples
- Múltiplos Estágios
- Batelada

No estágio simples as três etapas do processo ocorrem em um único reator de forma seqüencial enquanto no processo de múltiplos estágios faz-se uso de dois ou mais reatores onde as fases acidogênica e metanogênica ocorrem separadamente.

Reatores de múltiplos estágios são mais caros e mais complexos de operar; no entanto, como estes sistemas possuem reatores separados para hidrólise e metanogênese, condições mais

favoráveis para a digestão que poderiam, em tese, produzir maiores quantidades de metano. No entanto, uma desvantagem do tipo de dois estágios é que as partículas sólidas precisam ser removidas da alimentação do segundo estágio, o que decresce a produção de biogás. Na Figura21 abaixo, vê-se exemplos típicos de esquemas de estágios simples e duplo para DA.

Figura21 - Esquema de estágio simples e duplo para DA.



Fonte: <http://www.iowadnr.com/waste/policy/files/bluestem.pdf>.

De fato, a grande maioria das aplicações comerciais usa sistemas de um estágio. Do ponto de vista financeiro, os sistemas seco (alto sólidos) e úmido (baixo sólidos) são comparáveis. Em termos de desempenho biológico, ambos os métodos são adequados. Do ponto de vista técnico, no entanto, o sistema seco aparece mais robusto. As falhas mecânicas frequentes são associadas ao sistema úmido devido à presença de areia, pedras, plásticos e madeira. (VERMA 2002).

Os estágios simples e múltiplos podem ser categorizados como estágio simples de baixo conteúdo de sólidos (ESBS); estágio simples com alto conteúdo de sólidos (ESAS), múltiplos estágios com baixo conteúdo de sólidos (MEBS) e múltiplos estágios com alto conteúdo de sólidos (MEAS). *A comparação entre as operações com reatores de estágio simples, com baixo conteúdo de sólidos (BS) e estágio simples com alto conteúdo de sólidos (AS) indica maior produção de gás das unidades com maior quantidade de sólidos (AS).*

A desvantagem do BS é a grande quantidade de água utilizada, resultando em um reator de grande volume e uma tecnologia de pós-tratamento de alto custo devido à necessidade de tirar e tratar a água no final do processo de digestão.

Sistemas de alto conteúdo de sólidos requerem um reator de menor volume, por unidade de produção, porém usa equipamentos mais caros (bombas e etc) Reactores com alto conteúdo de sólidos são mais robustos e tem altas taxas de carga orgânica.

Muitas das plantas de digestão anaeróbica construídas na década de 80 foram predominantemente de baixo conteúdo de sólidos, mas durante a última década o número de processos com alto conteúdo de sólidos tem crescido apreciavelmente. *Existem indicações substanciais dos dados obtidos que as plantas de alto conteúdo de sólidos estão emergindo como líderes.*

Nos processos de batelada o reator é carregado, o material é processado e os produtos são descarregados no final de um ciclo. O sistema de batelada é o de tecnologia mais simples entre todos os sistemas e também o mais barato. As maiores dificuldades são as grandes áreas ocupadas e a baixa produção de biogás. O sistema de batelada tem grande potencial de aplicação para países em desenvolvimento. (VERSTRAETE 2002)

O outro tipo de reator utilizado, principalmente para lodo de esgoto com baixo conteúdo de sólidos, é o de fluxo contínuo.

Existem ainda alguns tipos de processos especiais que merecem destaque pelo seu uso freqüente por diversas companhias.

- **Percolação:** o processo de percolação é uma tecnologia de dois estágios. No primeiro, a fração orgânica do RSU é aerada em um reator fechado de operação contínua. Microorganismos promovem a hidrólise da fração orgânica a compostos solúveis, os quais são dissolvidos e arrastados por água de reciclo. No segundo estágio, os compostos orgânicos dissolvidos são convertidos a biogás em um digestor que utiliza um processo úmido e acelerado, usualmente um filtro anaeróbico. Ambos os reatores aeróbico e anaeróbico operam em fluxo contínuo.
- **Processo contínuo seco:** este conceito envolve um reator contínuo, com uma concentração de sólidos totais entre 25 e 40%. Sistemas de mixagem perfeita ou "plug-flow" são avaliáveis.

Os sistemas plug-flow verticais contam com um reciclo de digerido que serve para inocular a carga de entrada. Devido a um tempo de retenção da carga total do reator de 2 dias, a reciclagem conta com um sistema de mistura. Um exemplo típico desse sistema é o Dranco.

Os sistemas plug-flow horizontais utilizam equipamentos com um agitador rotativo lento e intermitente e, portanto, apenas uma pequena fração do digerido é reciclada. Um exemplo típico desse sistema é o Kompogás.

Em todos os três casos, o requisito por uma adição mínima de água faz o balanço térmico dos sistemas ser favorável a operações de digestão com temperaturas na faixa termofílica.

Uma planta moderna que trata RSU por DA necessita de um complexo de unidades de processo, onde resíduos podem ser transformados em diversos produtos. A viabilidade de um processo específico deve considerar a quantidade e qualidade desses produtos, bem como a necessidade de pós e pré-tratamentos. Em geral, o número de estágios e a concentração total de sólidos (%TS) no fermentador têm um grande impacto no custo, performance e confiabilidade do processo de digestão anaeróbica acelerada.

Diante das diferentes alternativas quanto aos processos de digestão anaeróbica, os vários sistemas são comparados de acordo com as seguintes condições:

- operação termofílica *vs* mesofílica
- fermentação seca *vs* úmida
- fermentação monofásica *vs* bifásica

a – Termofílica *versus* Mesofílica

No passado todas as instalações de DA operavam na faixa de temperatura mesofílica. As primeiras instalações termofílicas foram das instalações à fermentação seca e fizeram sua aparição em 1992 e 1993. A capacidade de fermentação mesofílica aumentou em 350.000 toneladas no período de 1994 a 1999, cerca de 70.000 t/ano, ao passo que a capacidade de fermentação termofílica aumentou em 280.000 toneladas, ou seja, 56.000 t/ano. Em alguns anos foi construído um maior número de instalações mesofílicas, enquanto em outros instalações termofílicas predominaram. Não se tem como discernir uma tendência clara. Pode-se esperar um crescimento equivalente para os dois tipos de fermentação, embora haja cada vez mais negócios propondo a fermentação termofílica. O processo termofílico foi desenvolvido mais recentemente, mas desde então está se afirmando como um método de fermentação viável e aceitável. O método amplia em muito os benefícios de um tratamento a alta temperatura, pois mata grande número de patógenos durante a fase anaeróbica. (OWS 1998)

b – Fermentação seca versus úmida

No começo dos anos 90, predominava o sistema de fermentação úmida (menos de 15% de sólidos). A partir de 1993, um número maior de instalações via fermentação seca foram construídas e em 1998, mais de 60% da capacidade de tratamento usava o sistema de fermentação seca. Para a DA de RSU atualmente predominam os sistemas secos.

c – Fermentação monofásica versus bifásica

Há muita pesquisa acerca da fermentação mono e bifásica. Até uma fermentação trifásica foi proposta. Mas na prática, a fermentação bifásica nunca foi capaz de satisfazer as vantagens reivindicadas pelo mercado.

Antes de tudo, os benefícios adicionais decorrentes de uma maior eficiência da hidrólise e do mecanismo de metanação não foram provados. De outro lado, altas taxas de fermentação são obtidas com o sistema monofásico. Devido ao alto custo de investimento e a complexidade de funcionamento, a fermentação bifásica adquiriu uma parte minoritária do mercado. Hoje, somente 10,6% da capacidade instalada de DA utilizam o sistema de fermentação bifásico. (De Baere, 1999).

2.3.3. Parâmetros Importantes na Digestão Anaeróbica.

A taxa na qual os microorganismos crescem é de crucial importância no processo da digestão anaeróbica. Os parâmetros de operação do digestor devem ser controlados de forma que aumente a atividade dos microorganismos e assim aumente a eficiência do sistema de degradação anaeróbica. Alguns desses parâmetros serão discutidos a seguir.

d – Composição dos resíduos/sólidos voláteis (SV)

Os resíduos tratados por digestão anaeróbica podem conter uma fração orgânica biodegradável, uma fração combustível e uma inerte. A fração orgânica biodegradável inclui sobras de cozinha, resíduos de comida, e grama e aparas de árvores. A fração combustível inclui material orgânico ligno-celulósico de degradação lenta encontrado em madeira comum, papel e papelão. Como os materiais orgânicos ligno-celulósicos não se degradam imediatamente sob condições anaeróbicas, eles são mais adequados em plantas *waste-to-energy*. A fração inerte contém pedras, vidros, areia, metal, etc. e deve ser removida antes da digestão uma vez que gera um aumento da capacidade volumétrica do digestor e o desgaste dos equipamentos. Em correntes de resíduos com grandes quantidades de esgoto ou esterco, os micróbios encontram o ambiente propício ao seu desenvolvimento e hidrolisam as substâncias rapidamente. Para materiais mais resistentes, como madeira, a digestão é limitada.

Os sólidos voláteis (SV) em resíduos orgânicos são medidos como os sólidos totais menos o conteúdo de cinzas, que pode, por exemplo, ter sido obtida na combustão completa da carga de resíduos. Os sólidos voláteis compreendem a fração dos sólidos voláteis biodegradáveis (SVB) e a fração dos sólidos voláteis refratários (SVR). Foi mostrado que o conhecimento da fração de sólidos voláteis biodegradáveis dos resíduos sólidos urbanos ajuda na melhor estimativa da biodegradabilidade dos resíduos, da geração de biogás, da taxa de carga orgânica e na razão C/N. A lignina é um material orgânico complexo que não é degradado facilmente pelas bactérias anaeróbicas e constitui os sólidos voláteis refratários (SVR) nos RSU. Resíduos caracterizados pelo alto teor de SV e ausência de material não biodegradável, ou SVR, são os mais adequados para a digestão anaeróbica. A composição do resíduo afeta tanto a produção quanto à qualidade do biogás, assim como a qualidade do composto.

e – Nível de pH

Bactérias anaeróbicas, especialmente as metanogênicas, são sensíveis à concentração de ácidos dentro do digestor e o seu crescimento pode ser inibido pelas condições do ácido. A concentração de ácido em sistemas aquosos é representada pelo valor do pH, ou seja, a concentração de íons de hidrogênio. Em condições neutras, a água contém uma concentração de 10^{-7} íons de hidrogênio e tem pH 7. Soluções ácidas têm pH menor que 7 e as soluções alcalinas tem pH maior que 7. Foi determinado que um valor ótimo de pH para a digestão anaeróbica situa-se entre 5,5 e 8,5.(VERMA 2002), ou entre 6,8 e 8,0 (ITALIA 1998). Durante a digestão, os dois processos de acetanogênese e metanogênese requerem valores diferentes de pH para a otimização do controle do processo. O tempo de retenção do composto digerido afeta o valor do pH e em um reator de batelada a acetanogênese ocorre em uma única etapa. A acetanogênese pode conduzir à acumulação de uma grande quantidade de ácidos orgânicos resultando em um pH menor que 5. A geração excessiva de ácidos pode inibir a metanogênese devido à sensibilidade às condições do ácido. A redução do pH pode ser controlada pela adição de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou filtrado reciclado obtido durante o tratamento de resíduos. Na realidade, o uso de filtrado reciclado pode até eliminar a necessidade de hidróxido de cálcio.

Conforme a digestão atinge a etapa da metanogênese, a concentração de amônia aumenta e o valor do pH pode chegar acima de 8. Uma vez que a produção de metano se estabiliza, o nível de pH fica entre 7,2 e 8,2.

f – Temperatura

Existem duas faixas de temperatura que proporcionam condições ótimas de digestão para a produção de metano – as faixas mesofílica e termofílica. A faixa mesofílica situa-se entre 20°C –

40°C e a temperatura ótima é tomada entre 30°C – 35°C. A faixa termofílica de temperatura situa-se entre 50°C – 65°C. Foi observado que temperaturas mais altas na faixa termofílica reduzem o tempo de retenção necessário. Naturalmente, o processo termofílico tem um consumo de energia maior que o mesofílico. (ITALIA 1998; VERMA 2002).

As primeiras de DA operavam, tradicionalmente, na faixa mesofílica de temperatura devido à dificuldade em controlar a temperatura do digestor. Estabeleceu-se o uso de temperaturas na faixa termofílica devido ao advento da digestão anaeróbica com alto conteúdo de sólidos e muitas plantas vêm utilizando. Os benefícios oferecidos são a higienização dos resíduos, menor tempo de retenção e alta produção de biogás.

g – Relação Carbono - Nitrogênio (C/N)

A relação entre as quantidades de carbono e nitrogênio presentes nos materiais orgânicos é representada pela razão C/N. Taxas ótimas de C/N para os digestores anaeróbicos encontram-se entre 20 – 30. Uma alta taxa de C/N é uma indicação do consumo rápido de nitrogênio pela metanogênese e resulta em menor produção de gás. Por outro lado, uma baixa razão de C/N causa acúmulo de amônia e valores de pH maiores que 8,5, que são tóxicos para a bactéria da metanogênese. Taxas ótimas de C/N para os materiais digeríveis podem ser obtidas pela mistura de materiais com razões altas e baixas de C/N, tal como a mistura de resíduos sólidos orgânicos com esgoto ou esterco animal. (VERMA 2002)

h – Conteúdo de Sólidos Total (ST)/Taxa de Carga Orgânica (TCO)

A taxa de carga orgânica (TCO) é uma medida da capacidade de conversão biológica do sistema de digestão anaeróbica. Alimentar o sistema acima da capacidade de TCO resulta em baixa produção de biogás devido ao acúmulo de substâncias inibidoras, tais como ácidos graxos na lama do digestor. Neste caso, a taxa de alimentação do sistema deve ser reduzida. TCO é particularmente um parâmetro importante de controle para sistemas contínuos. Muitas plantas reportaram falhas no sistema devido à sobrecarga. Vandevivere anunciou um TCO duas vezes maior em AS em comparação a BS. (VERMA 2002; VERSTRAETE 2002)

i – Tempo de Retenção

O tempo de retenção requerido para a finalização das reações de digestão anaeróbica varia com as diferentes tecnologias, a temperatura do processo e a composição dos resíduos. O tempo de retenção para resíduos tratados em digestores na faixa mesofílica varia de 10 a 40 dias. Tempos de retenção menores são necessários nos digestores que operam na faixa

termofílica. Um reator de alto conteúdo de sólidos, operando na faixa termofílica, tem um tempo de retenção de 14 dias. (VERMA 2002)

j – Mistura

A finalidade de se realizar a mistura no digestor é misturar o material fresco com o digerido contendo micróbios. Além do mais, a mistura evita não só a formação de uma camada superficial de impurezas, mas também os gradientes de temperatura dentro do digestor. Entretanto, a mistura excessiva pode destruir os micróbios. Assim sendo, a mistura deve ser realizada de forma lenta. O tipo de equipamento de mistura e a quantidade a ser misturada variam com o tipo de reator e o conteúdo de sólidos no digestor. (idem)

k – Composto

Quando a digestão é completada, a lama residual, também conhecida como composto digerido, é removida. A água contida é filtrada e recirculada para o digestor enquanto que a “torta” retida no filtro é curada aerobicamente, usualmente em pilhas de compostos, para formar o composto orgânico. O composto produzido é peneirado para a retirada de materiais indesejáveis, (tais como cacos de vidro, pedaços de plástico etc.) e vendido como adubo orgânico.

A qualidade do composto é dependente da composição dos resíduos. Alguns países possuem padrões determinados para a qualidade do composto. A Tabela 20 e a Tabela 21, a seguir, mostram alguns limites máximos para metais pesados nos EUA e Europa.

Tabela 20 - Padrões para metais pesados em compostos do Departamento de Agricultura Americano (ppm).

Metais pesados	Padrões*
Cádmio (Cd)	10
Níquel (Ni)	200
Chumbo (Pb)	250
Cobre (Cu)	1000
Cromo (Cr)	1000
Zinco (Zn)	2500

*padrões para compostos produzidos por digestão aeróbica.

Fonte: (HICKMAN L.H. 1999)

Tabela 21 - Limites de concentração (mg/kg sólidos totais) de metais pesados e arsênio em compostos de acordo com a regulamentação em diferentes países da Europa.

País	Cd	Pb	Hg	Ni	Zn	Cu	Cr	As
Áustria	1	150	1	60	400	100	70	-
Dinamarca	0,8	120	0,8	30	4000	1000	100	-
Finlândia	3	150	2	100	1500	600	-	50
França ^a	8	800	8	200	-	-	-	-
Alemanha, classe I ^b	1,5	150	1	50	400	100	100	-
Itália ^c	10	500	10	200	2500	600	10 ^d	500 ^d
Holanda "composto superlimpo" ^{re}	0,7	65	0,2	10	75	25	50	5
Holanda "composto limpo" ^{re}	1	100	0,3	20	200	60	50	15
Noruega, classe I ^f	0,8	60	0,6	30	400	150	60	-
Noruega, classe II ^f	2	80	3	50	800	650	100	-
Espanha	40	1200	25	400	4000	1750	750	-
Suécia (linhas guias)	1	100	1	50	300	100	100	-
Suíça	1	120	1	30	400	100	100	-

a) Legislação não-oficial.

b) Classe I – composto é usado para produção de comida.

c) Regulamentação para composto de coleta seletiva varia de acordo com a região.

d) Cromo (III) 500 mg/kg de sólido total; Cromo (VI) 10 mg/kg sólido total.

e) A divisão em duas classes foi feita para estimular e melhorar a qualidade dos compostos. A qualidade em geral é tão boa que é discutida a mudança para uma só classe.

f) A máxima aplicação para classe I é 40 toneladas/ha durante 10 anos e para classe II é no máximo 20 toneladas/ha durante 10 anos.

Fonte: (VERMA 2002).

2.3.4. Tecnologias de Digestão Anaeróbica – Empresas e Processos

De acordo com o Bioenergy Report of the International Energy Agency (IEA), existiam cerca de 90 plantas de digestão anaeróbica em 1996. Esses dados incluem todas as plantas com capacidade de tratamento maior que 2500 toneladas por ano.

Aproximadamente 40 companhias encontram-se envolvidas na tecnologia de digestão anaeróbica. No Capítulo sobre Tratamentos Mecânicos e Biológicos foram consideradas as 26 principais empresas que atuam no mercado de DA. Neste ponto serão descritas algumas delas e seus respectivos processos. A Tabela 22, abaixo, resume as informações principais destas empresas.

Tabela 22 - Empresas e Processos que Operam Plantas de Digestão Anaeróbica da fração orgânica dos RSU.

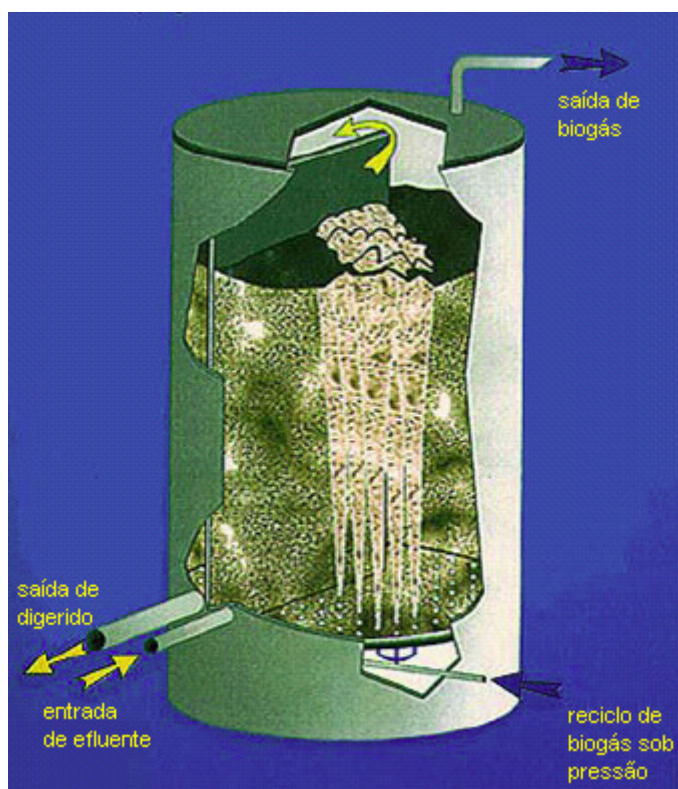
Nome da Empresa	Local da Sede	Nome do Processo	Tipo de Processo
Valorga	Montpellier, França	Valorga	Anaerobic digestion (OS - HS)
Wehrle Werk AG	Emmendingen, Alemanha	Biopercolat	Anaerobic digestion (MS - HS)
Wright Environmental Management	Ontário, Canadá		In vessel composting
CiTec	Finlândia/Suécia	Waasa	Anaerobic digestion (OS - LS)
Linde-KCA-Dresden	Dresde, Alemanha		Anaerobic digestion & composting (MBT)
Kompogas	Glattbrugg, Suíça	Kompogas	Anaerobic digestion (OS - HS)
U-plus Umweltservice	Ettlingen, Alemanha	ISKA	MBT followed by anaerobic digestion
Eco Tec	Finland	WABIO	Anaerobic digestion (OS - LS)
Organic Waste Systems	Gent, Bélgica	Dranco	Anaerobic digestion (OS - HS)
BTA (Canada Composting in North America)	Munique, Alemanha (Ontario, Canadá)	BTA	Anaerobic digestion (OS or MS - LS)
Arrow Ecology	Haifa, Israel	Arrow Bio	Anaerobic digestion (MS - HS/LS)
Onsite Power Systems	Camarillo, CA	APS (UC Davis)	Anaerobic digestion (MS - HS/LS)

OS= One Stage MBT= Mechanical-Biological Treatment
 MS = Multi Stage HS = High Solids LS= Low Solids

2.3.4.1. Valorga.

O processo Valorga foi projetado para tratar resíduos orgânicos sólidos. É um processo de digestão anaeróbica que recebe RSU após separação apropriada. O processo dilui o resíduo pré-tratado e o transforma em polpa, de modo que o teor de sólidos totais esteja em torno de 30% (seco). Vapor é utilizado para o aquecimento de modo a manter a temperatura nos reatores. Dependendo da carga de alimentação ou de fatores econômicos pode-se utilizar os sistemas mesofílicos ou termofílicos.

O processo é classificado como sendo de um estágio, seco e contínuo com operação do tipo "plug-flow". O digester Valorga (Figura22) é um tanque cilíndrico vertical que possui uma parede interna plana que passa pelo diâmetro do tanque, saindo da superfície cilíndrica interna e cobrindo apenas 2/3 do diâmetro (não fechando totalmente o tanque em dois compartimentos). Os orifícios de entrada de carga e saída de digerido localizam-se na parte de baixo do tanque, na parede cilíndrica e postos cada um em um lado da linha de interseção desta parede com a parede interna plana. O biogás produzido sai por um orifício na parte superior do reator, sendo que uma parte do gás é reciclada de volta ao reator, inserida sob pressão por orifícios localizados na parte inferior, promovendo uma mistura do meio reacional. Este design serve para obter um processo "plug-flow" vertical. A parede interna faz com que a carga siga um caminho circular dentro do tanque e cubra toda a superfície interna. O digerido é desaguado e pode ser transformado em composto.

Figura22 - Biodigestor anaeróbico Valorga.

A Tabela 23 mostra as principais plantas Valorga existentes e as plantas futuras.

Tabela 23 - Instalações do Processo Valorga.

Planta-localização/país	Início	Capacidade (10 ³ t/ano)	Produção (Nm ³ /t)	Uso do biogás
Amiens/França	1987	85,0	140 – 160	Vapor sob alta pressão p/ uso industrial
Barcelona - Ecoparque II/Espanha	2004	240,0	114	Produção de eletricidade (4 MW _e)
Bassano/Itália	2003	55,4 (44,2 de RSU municipal, 8,2 de RSU selecionado e 3,0 de esgoto)	129	Produção de eletricidade
Beijing/China*	--	105,0 de lixo residencial selecionado	116	Co-geração
Cadix	--	--	--	--
Calais/França**	--	28,0 (27,0 de resíduo orgânico e 1,0 de graxas)	110 - 120	Co-geração (944 kW _e)
Engelskirchen/Alemanha	1997	35,0 de resíduo orgânico	100 - 110	Produção elétrica (940 kW _e)
Freiburg/Alemanha	1999	36,0	110 - 120	Produção de calor e eletricidade
Genève/Suíça	2000	10,0 de resíduo orgânico	110 - 120	Produção de calor e eletricidade
Hanovre/Alemanha	2006	100,0	90	Produção de calor e eletricidade
La Coruna/Espanha	2001	182,5	130 - 150	Eletricidade (6,25 MW _e) e produção de calor
Mons/Bélgica	2000	58,7	110 - 120	Produção de calor e eletricidade
Shangai/China*	--	268,5 (227,5 de lixo residencial e 41 de resíduo orgânico)	100	Co-geração
Tilburg/Holanda	1994	52,0	80 - 85	Rede de gás
Varenes-Jarcy/França	2002	100,0	154	Produção de eletricidade
Tondela/Portugal***	--	35,0	130	Produção de eletricidade

* Prevista para entrar em operação em meados de 2007.

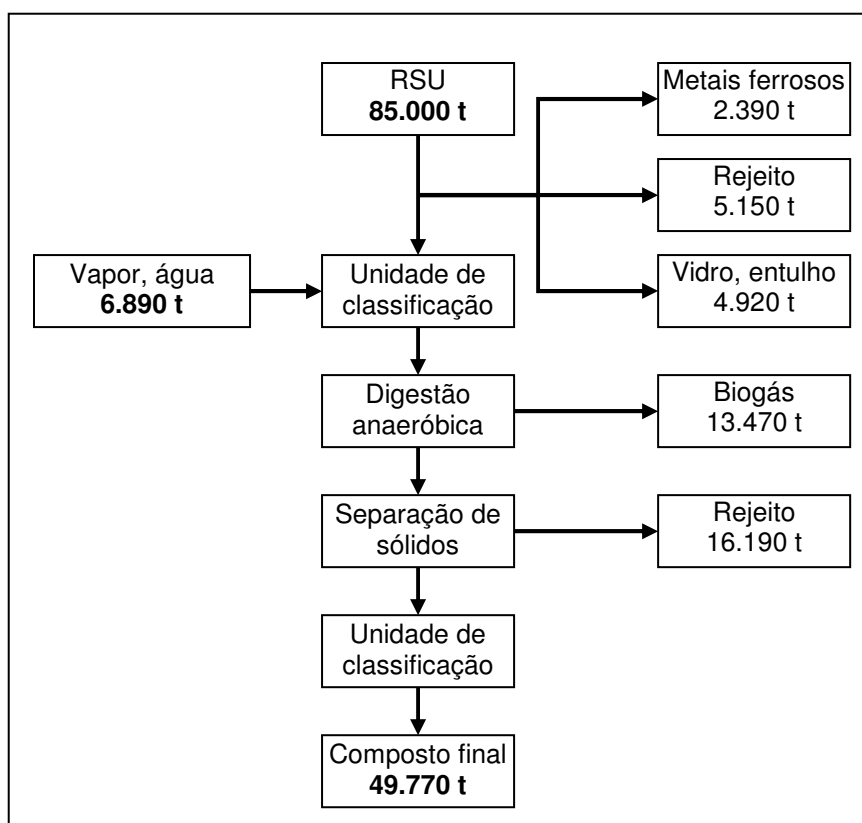
** Início de operação em 2007.

*** Atualmente em fase de testes. Início de operação prevista para 2007.

Fonte: www.valorgainternational.fr.

Na Figura23, observa-se um esquema do processo, com balanço de massa simplificado. Na Figura24, são listadas algumas vantagens e desvantagens do processo.

Figura23 - Esquema do Processo Valorga.



Fonte: <http://www.environment-agency.gov.uk/>.

Figura24 - Análise do Processo Valorga.

Vantagens	Desvantagens
Tecnologia comprovada	Risco de contaminação do produto final
Não necessita de espaços amplos	Disposição e mercado para o produto final necessita de condições locais e/ou método de coleta de resíduos
Flexibilidade para tratamento de diversos resíduos e integração a vários processos	Digerido necessita de tratamento caso não haja um mercado local de biofertilizante
Não é muito dependente da segregação dos insumos	

Fonte: <http://www.environment-agency.gov.uk/>.

Segundo a escala de uma planta típica, prevê-se uma capacidade de processamento de 52 a 300 kt/ano de RSU não-selecionado e de 10 a 52 kt/ano de resíduo selecionado (<http://www.environment-agency.gov.uk/>).

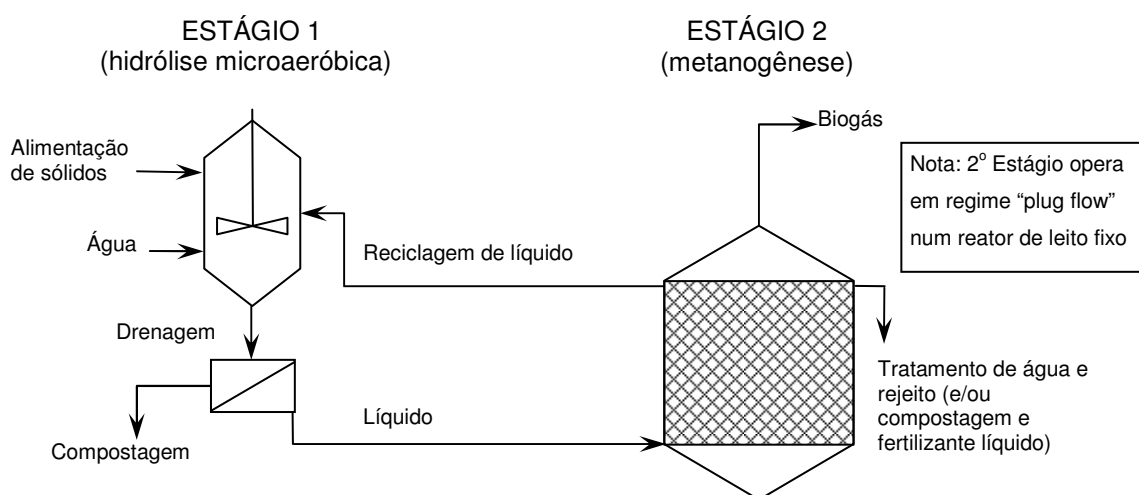
2.3.4.2. Biopercolat (Wehrle Werk AG -Emmendingen, Alemanha)

O processo Biopercolat® é um processo de dois estágios e duas fases operacionais, com processos aeróbio e anaeróbio associados (Figura25). Primeiramente a carga sofre um pré-tratamento mecânico que se resume a uma peneiração grosseira para retirar pedaços de

metais, plásticos e outros corpos rígidos. Em seguida, a carga é encaminhada para o percolador, onde a fração orgânica sofrerá hidrólise sob condições aeróbicas parciais. A água de processo é continuamente percolada através da carga no percolador e a massa é agitada mecanicamente. O tempo de residência no percolador varia entre 2 e 3 dias. Ao final da fase aeróbica são produzidos água percolada com alto teor de orgânicos, que é bombeada para o fermentador, e uma massa sólida que é enviada para a estabilização biológica. No fermentador ocorre a fase anaeróbica, com geração de biogás. O aparelho é um reator de leito fixo que opera em regime "plug-flow" em temperaturas da faixa mesofílica, que produz biogás para suprir a necessidade energética do processo e disponibilizar um excedente para ser revendido à rede. O líquido efluente do fermentador é, em grande parte, reutilizado como água de percolação, sendo a parcela restante enviada para tratamento aeróbico com remoção de contaminantes orgânicos e compostos de nitrogênio. Um resíduo sólido restante ao final da fermentação é reenviado para o percolador.

Através de intensa degradação e extração de água, o processo Biopercolat reduz o volume dos insumos para a faixa entre 50 e 60% do volume inicial. O processo também acelera a estabilização biológica dos resíduos e é caracterizado pela alta flexibilidade em relação ao tipo de resíduo, ao tempo de tratamento relativamente curto e à baixa exigência em relação ao pré-tratamento do resíduo.

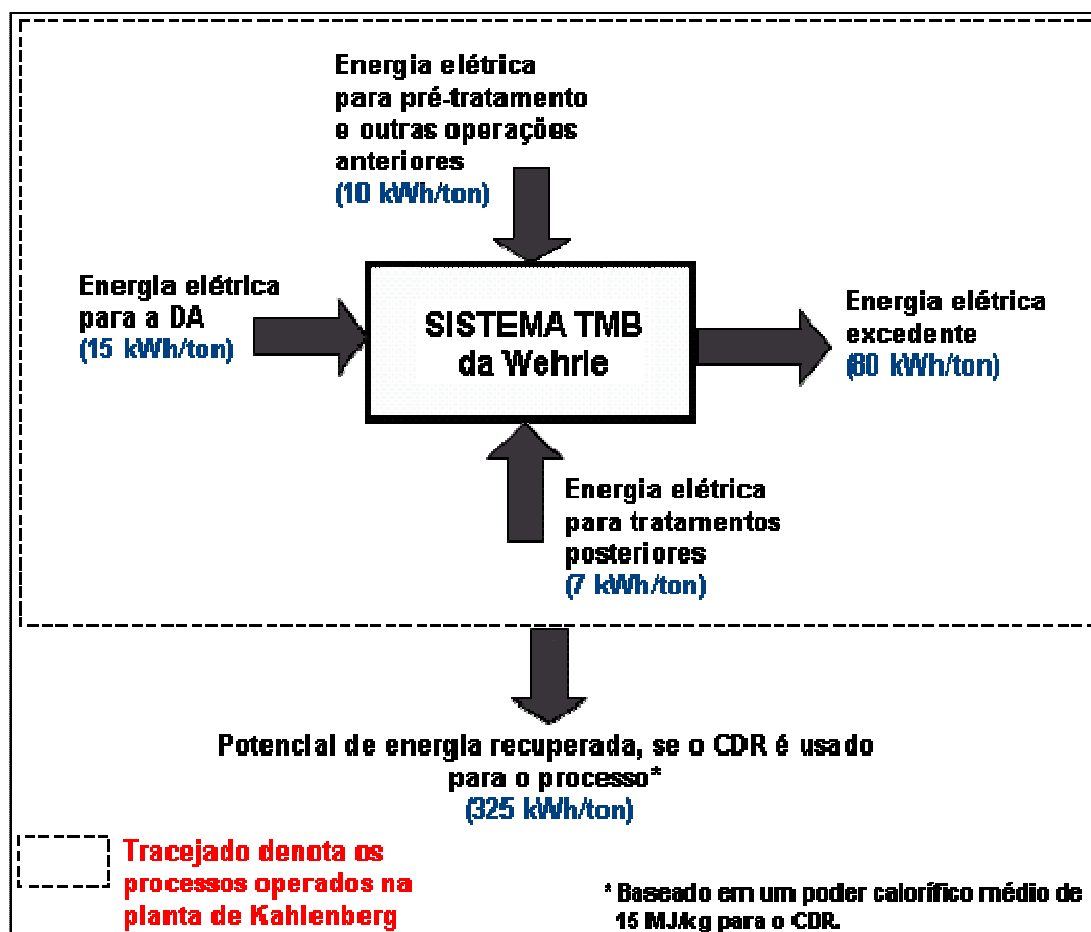
Figura25 - Esquema Simplificado do Processo Biopercolat (alto conteúdo de sólidos no 1º estágio, baixo conteúdo de sólidos no 2º estágio). Adaptado de Mata-Alvarez, J. (2003)



A empresa Wehrle, detentora da patente do processo (*Patent Nr.: EP1064240, "Processes for the Treatment of Wastes"* - Processo **BIOPERCOLAT®**), operou de Dezembro de 2000 a Dezembro de 2003, uma planta-piloto, num sítio próximo ao Aterro de Kahlenberg, na Alemanha. A planta

operou com uma capacidade de 20.000 t/ano de RSU não-selecionado. Abaixo na Figura26, é mostrado um balanço energético simplificado da planta.

Figura26 - Balanço de energia da planta de Kahlenberg.



Fonte: Relatório da Juniper, <http://www.juniper.co.uk/Publications/downloads.html>.

2.3.4.3. Linde-KCA-Dresden GmbH (Dresde, Alemanha)

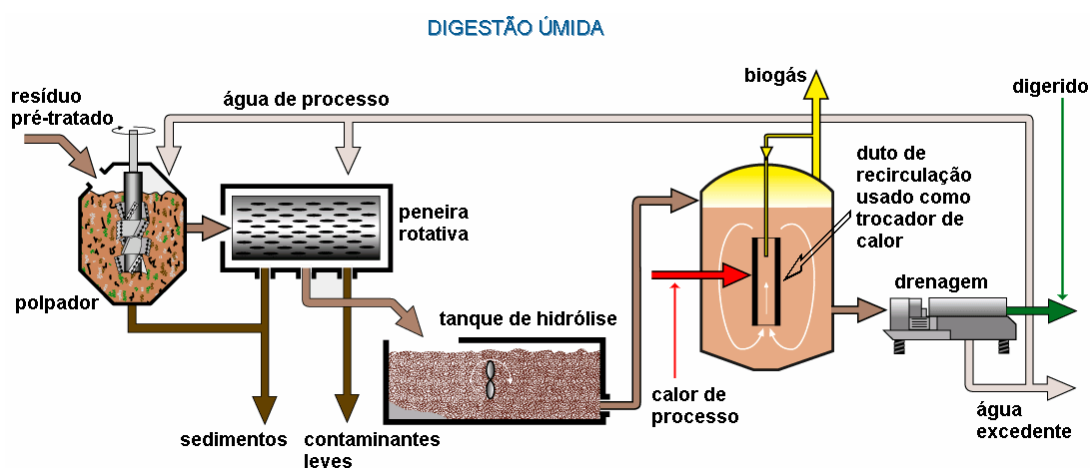
Linde-KCA é uma tradicional empresa de engenharia que projeta e constrói sistemas de DA de baixo e alto conteúdos de sólidos (seca e úmida) e sistemas de tratamento mecânico e biológico para RSU segregados. Os sistemas TMB incluem os sistemas de compostagem aeróbicos com manipulação mecânica da carga de alimentação e uma aeração intensiva. Alguns sistemas incluem a digestão aeróbica intensiva como um pré-processo para a carga de alimentação que será digerida anaerobicamente. A empresa construiu a maior planta de compostagem do mundo, na Tailândia, processando 1.200 t/dia.

Os processos de digestão anaeróbica da Linde incluem, além de sistemas de tratamento de resíduos de origem diversa, sistemas de tratamento de correntes líquidas (Sistema Laran).

a – Digestão Úmida

O sistema de digestão úmida (Figura27) ocorre em simples ou em múltiplos estágios, em temperaturas tanto da faixa termofílica como da mesofílica, dependendo do material de entrada. O sistema é designado para uma alta produção de biogás. Algumas características do sistema são: a separação automática dos contaminantes no estágio de preparação e umidificação (polpador e peneira rotativa) e o manuseio seguro dos resíduos no sistema fechado. Uma particularidade é a presença de um duto, ou tubo de recirculação, presente no interior do fermentador. O sistema é indicado para a co-digestão de resíduos agrícolas e esgoto.

Figura27 - Sistema de digestão úmida com dois estágios.

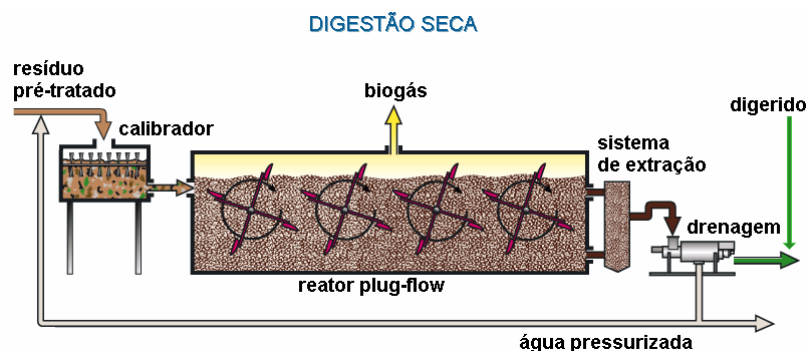


Fonte: www.linde-kca.com

b – Digestão Seca

É um processo tanto termofílico quanto mesofílico, que utiliza um reator "plug-flow" horizontal com uma seção retangular (Figura28). Antes de entrar no reator, os resíduos recebem um pré-tratamento aeróbio de hidrólise e acidificação. O processo trabalha com um teor de sólidos de 15 a 45% na carga do reator. O sistema pode tratar diversos tipos de resíduos, mas é especialmente indicado para tratar resíduos com alto teor de sólidos.

Figura28 - Digestão seca.



Fonte: www.linde-kca.com.

A Linde projetou, construiu e operou uma planta em Radeberg, Alemanha que co-digere resíduos residenciais, industriais e lama de esgoto do tratamento de efluentes. A companhia relata que esse conceito de co-digestão aumenta a degradação da lama de esgoto (aumenta a produção de biogás a partir da lama do esgoto) e resulta em um decréscimo de capital e custos de operação comparados aos custos de duas plantas separadas.

Existe outra planta da Linde localizada em Behringen, Alemanha. A planta recebe esterco com baixo conteúdo de sólidos e co-digere com sólidos de esterco suíno e vários outros resíduos alimentares. A planta processa em torno de 100 TPD (úmido), dos quais 75% é esterco bovino e abastece planta com cerca de 650 kW de potência, usando dois geradores Jenbacher de 450 KW. Trinta por cento da energia produzida é utilizada "in locu" para a operação da planta, sendo que o excedente é vendido para a rede elétrica.

Pedidos recentes de projetos incluem uma planta integrada de tratamento mecânico biológico de resíduos localizada no aterro de Leipzig-Crobern. A planta inclui separação e recuperação de materiais. A capacidade será de 300.000 t/ano. Um terço do material será reciclado, um terço termicamente convertido e um terço tratado biologicamente. Resíduos dos tratamentos térmico e biológico serão colocados em aterros.

Os projetos atualmente em construção são:

- Municipal Solid Waste Treatment Plant ECOPARC I em Barcelona, Espanha pré-tratamento úmido, digestão anaeróbica e compostagem de RSU.
- Municipal Solid Waste Treatment Plant PINTO em Pinto/Madrid, Espanha: pré-tratamento úmido, digestão anaeróbica e compostagem de RSU.
- Biowaste Treatment Plant, Lisboa, Portugal: fração orgânica do RSU.

2.3.4.4. Processo DRANCO e Sistema Sordisep (Gent-Bélgica)

A Organic Waste Systems (OWS) projeta, constrói e opera plantas de digestão anaeróbica para RSU. Também atua na área de consultoria em gerenciamento de RSU.

A OWS desenvolveu o processo Dranco (Dry Anaerobic Composting) assim como o Sordisep (Sorting - Digestion - Separation) para o gerenciamento integrado de resíduos. O processo é patenteado internacionalmente.

O processo Dranco foi desenvolvido no final da década de 1980 e consiste de um sistema de digestão anaeróbica de um único estágio com alto conteúdo de sólidos (15-40% ST) que opera a temperaturas termofílicas. A alimentação é introduzida na parte superior do reator e se move verticalmente como "plug-flow". Uma parte do material digerido é reciclada como material inoculante, rico em bactérias, enquanto que o resto do material é desaguado para produzir um composto. Não ocorrem misturas no reator além das promovidas pelo movimento descendente em "plug-flow" dos resíduos e ascendente das bolhas de gás. Os materiais mais adequados são o lixo doméstico separado e resíduos industriais.

Sistemas comerciais existentes (Tabela 24) reportam taxas de produção de biogás na faixa de 6–10 m³ de biogás por m³ de volume do reator por dia (em torno de 120 m³ de biogás por tonelada úmida da carga de alimentação). O processo DRANCO produz composto orgânico simultaneamente ao biogás. A companhia reporta uma produção de eletricidade numa faixa de 0,1 a 0,3 MWh/t de RSU – em função de sua composição.

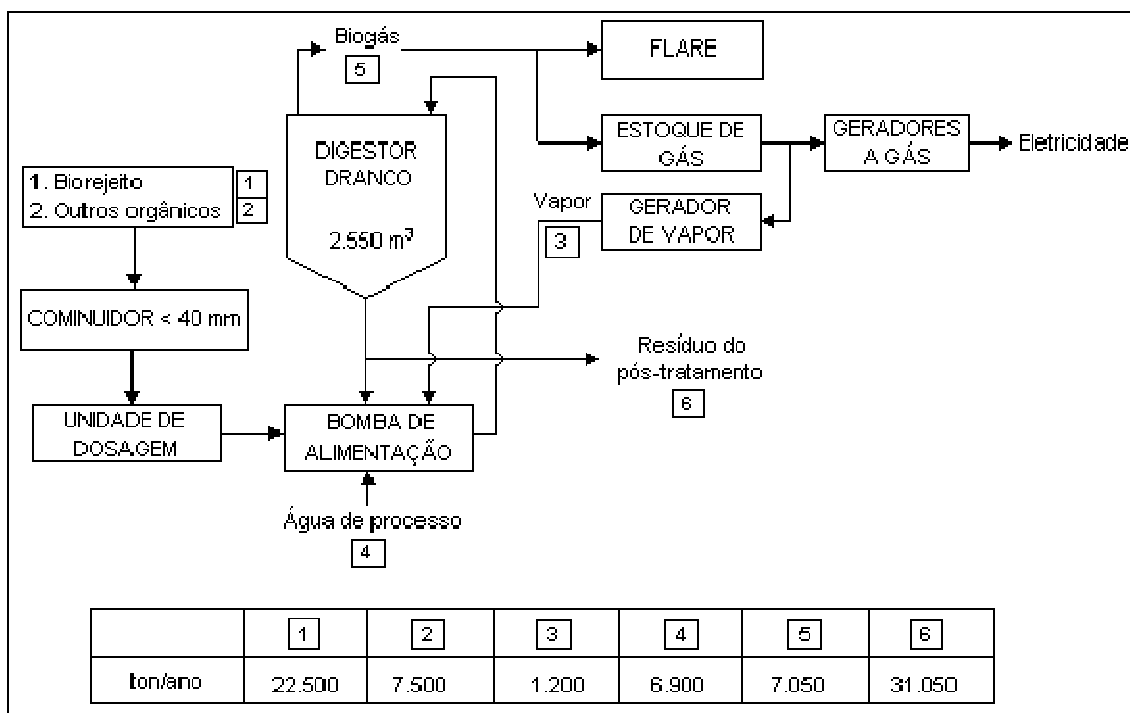
Tabela 24 - Referências do Sistema DRANCO.

Localização/país	Capacidade [t/ano]	Início
Brecht I, Bélgica	20.000	1992
Salzburg, Áustria	20.000	1993
Bassum, Alemanha	13.500	1997
Kaiserslautern, Alemanha	20.000	1999
Villeneuve, Suíça	10.000	1999
Brecht II, Bélgica	50.000	2000
Rome, Itália	40.000	2003
Leonberg, Alemanha	30.000	2004
Hille, Alemanha	38.000	2005
Münster, Alemanha	24.000	2005
Terrassa, Espanha	25.000	2005

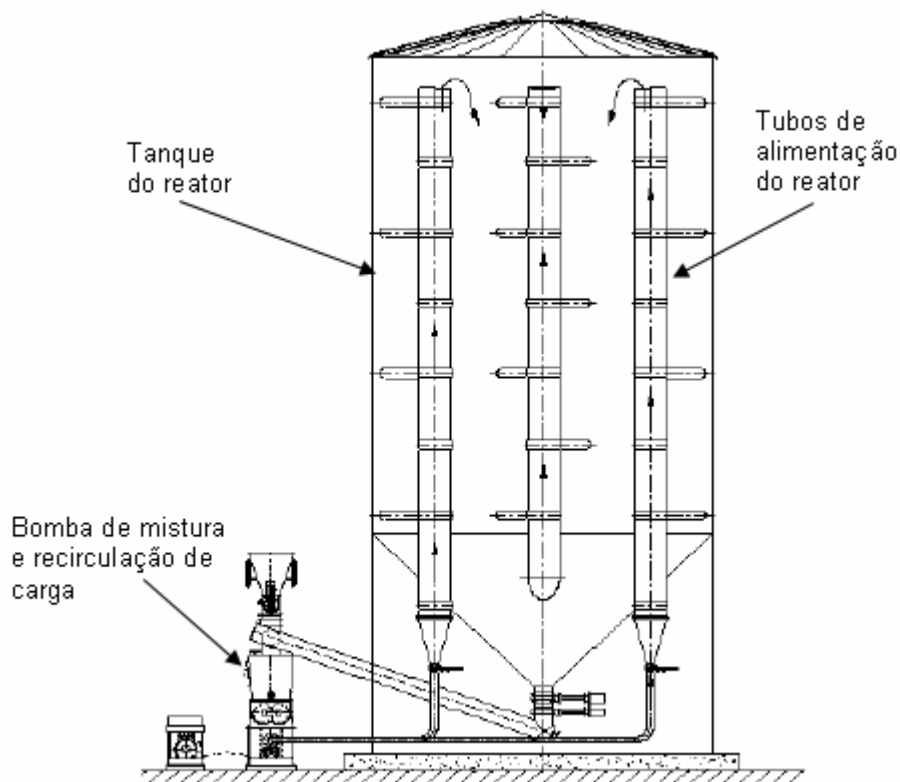
Fonte: <http://www.ows.be/>

A Figura29 mostra um esquema com um balanço de massa para um sistema DRANCO em operação. A Figura30 mostra alguns detalhes do reator.

Figura29 - Esquema e Balanço de Massa do Processo DRANCO.



Fonte: <http://www.ows.be/>.

Figura30 - Desenho do reator DRANCO.

Fonte: <http://www.ows.be/>.

Cabe ressaltar que a tecnologia demanda 18 dias para o processamento do material, além de mais 30 dias de maturação da fração orgânica retirada.

Os valores fornecidos pela representante comercial brasileira da tecnologia, a NTA Tecnologia Ambiental Ltda., foram de R\$ 28 milhões de investimento no sistema completo – desde elaboração de EIA/RIMA até início de operações, incluindo sistema de triagem de recicláveis e/ou produção de combustível derivado de resíduos (CDR), com 9% sobre o investimento de custo operacional e de manutenção por ano – para processamento de 300 t/d, que equivalem a uma usina com potência líquida de 750 kW, ou seja, exclusivamente para fornecimento de eletricidade a terceiros.

2.3.4.5. Kompogas (Glattbrugg, Suíça)

O sistema Kompogas é um sistema de digestão com alto conteúdo de sólidos, estágio simples e opera na faixa termofílica de temperatura. Ele pode ser classificado como um sistema TMB.

Kompogas trabalha similarmente ao DRANCO, exceto que o “plug-flow” é ajudado por rotores de baixa velocidade dentro do reator, que também serve para homogeneização, desgaseificação e para suspender partículas mais pesadas. A água de processo é recirculada

para alcançar o conteúdo sólido de 30% dentro do reator. Devido às restrições mecânicas, o volume do reator Kompogas é fixo e a capacidade da planta é ajustada por construir muitos reatores em paralelo, cada um com a capacidade de tratamento de 15.000 ou 25.000 t/ano. O tempo de residência é de 20 dias. Na Tabela 25, a seguir, é mostrado um balanço de uma planta típica que utiliza o processo.

Tabela 25 - Balanço de massa e energia de uma planta típica (para uma capacidade anual de 1.000 toneladas).

Produção	Quantidade
Biogás	1.054.000 Nm ³ /ano
Produção total de energia elétrica*	2.078.000 kWh/ano
Produção total de calor*	3.240.000 kWh/ano
Consumo	
Energia elétrica	290.000 kWh/ano
Calor	1.650.000 kWh/ano
Produção energética líquida	
Energia elétrica	1.788.000 kWh/ano
Calor	1.320.000 kWh/ano

* com os sistemas de co-geração operando.

Fonte: <http://www.kompogas.ch/en>.

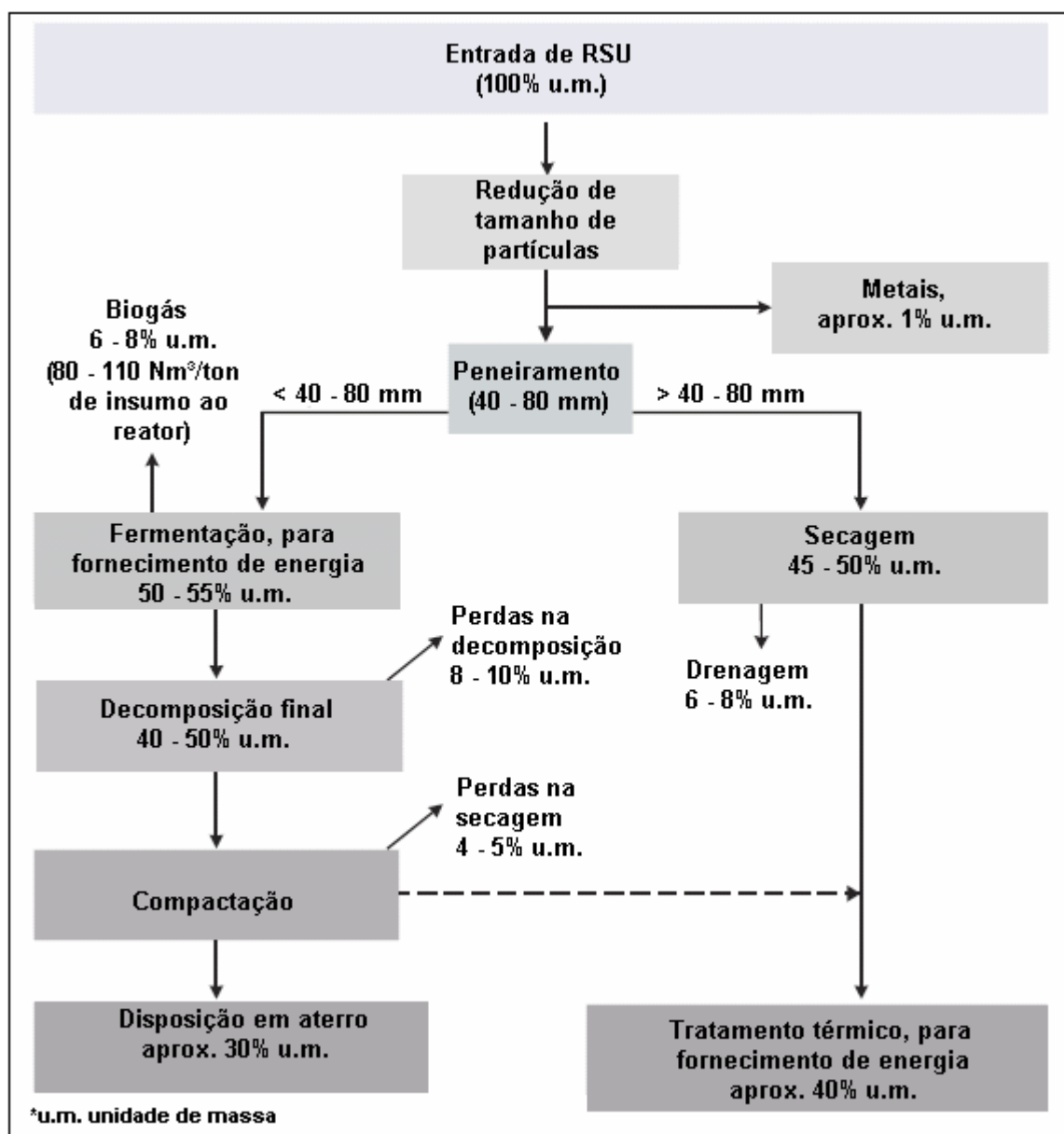
Abaixo, na Tabela 26, são listadas algumas vantagens e desvantagens do processo. Na Figura 31 é mostrado um esquema do processo.

Tabela 26 - Vantagens e desvantagens do Processo Kompogas.

Vantagens	Desvantagens
Sistema comprovado para diversos resíduos orgânicos pela Europa.	Digere apenas uma proporção do material biodegradável, fazendo com que resíduos não tratados (exemplo: materiais lenhosos) necessitem de uma disposição final.
Processo fechado e totalmente automatizado.	Os sólidos residuais do composto não podem ser classificados segundo Certificado PAS100 se resíduo misturado é alimentado ao digestor.
Pode ser usado em plantas de TMB.	

Fonte: <http://www.environment-agency.gov.uk>.

Figura31 - Esquema do Processo Kompogas.



Fonte: www.kompogas.ch/en.

2.3.4.6. Processo ArrowBio (Haifa, Israel)

O processo ArrowBio é um processo de digestão anaeróbica projetado para aceitar resíduos não selecionados. O conceito de processamento bioquímico empregado é único em relação aos sistemas de digestão anaeróbica, no qual utiliza a tecnologia "up-flow anaerobic sludge blanket" (UASB), comumente utilizada pelas plantas de tratamento de esgoto, uma vez que a companhia tem experiência em projetos e construções destas plantas.

ArrowBio fornece bastante informações, mas várias delas são difíceis de comprovar devido à ausência de comprovações independentes. A Arrow Ecology construiu e opera uma planta

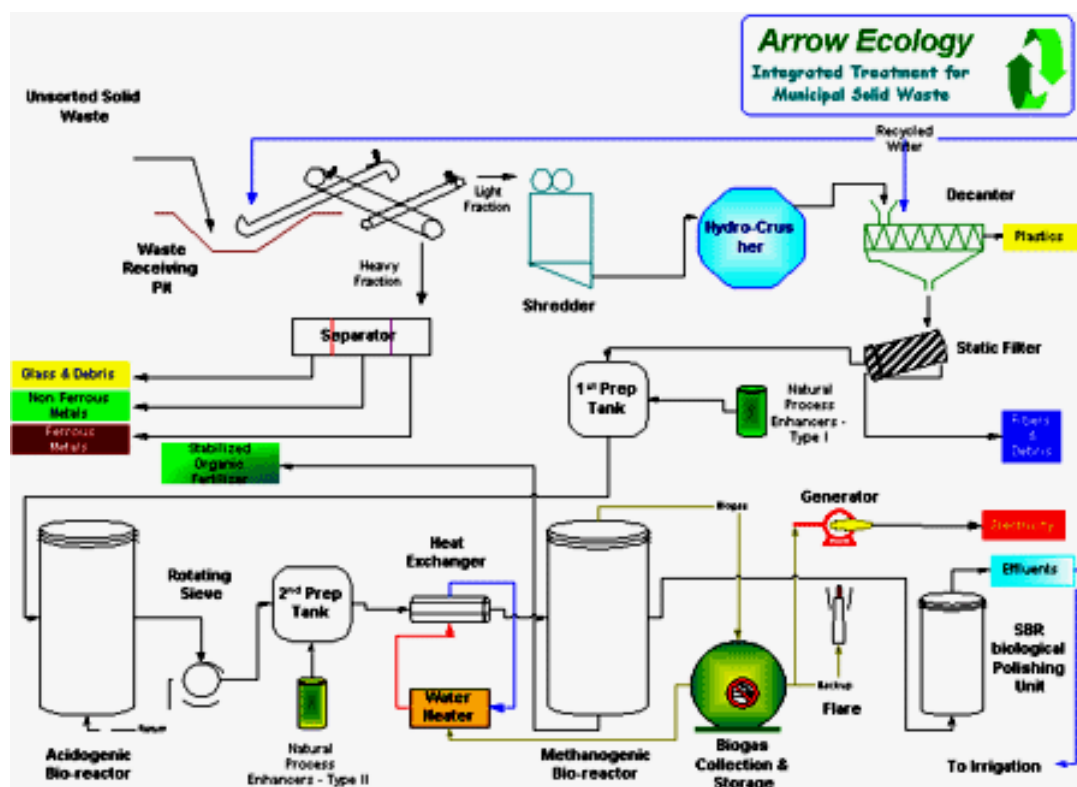
comercial processando 70.000 t/ano. A usina está situada na estação de transferência de resíduos de Tel Aviv que processa um milhão de toneladas por ano enviando a maior parte para um aterro distante.

A planta em operação em Israel recebe \$24.50 por tonelada de material processado e uma nova taxa de aterro elevará esse valor para \$33.30 por tonelada. A planta foi financiada com fundos da companhia e empréstimo bancário. Informações adicionais fornecidas pela companhia fornecem um custo estimado para uma instalação, nos Estados Unidos, de US\$ 12 milhões para uma planta de 220 t/dia. A taxa de lixo de equilíbrio é de aproximadamente \$50 por tonelada. Os valores de produtos e serviço para a planta de Tel Aviv estão listados abaixo:

Produto	\$/unidade
Eletricidade	\$50/MWh (\$.05/kWh).
Plástico	\$72/t.
Metal	\$63.5/t.
Vidro	Fornecido Gratuitamente
Adubo de qualidade inferior	Fornecido Gratuitamente .
Água	Usada no processo, o excesso em irrigação.

A Arrow Ecology detém a patente Americana 6.368.500 (Asa et al., April 9, 2002) para o sistema de tratamento de resíduos ilustrado na Figura32, a seguir.

Figura32 - Processo da ArrowBio.



O que chama atenção sobre o processo é a afirmação pela empresa de que geração de energia atinge 528 kWh (líquidos)/t lixo orgânico. Este valor é muito elevado assim como o valor do biogás produzido de 26% em massa do material que entra no digestor, além da elevada taxa de biodegradação (80%). Estes valores são muito elevados e precisam ser verificados a partir de dados de outras fontes de informação.

2.3.4.7. Outras Empresas.

- BRI Energy, LLC (Fayetteville, Arkansas).
- BTA (Munich, Germany).
- UC Davis anaerobic phased solids digester.
- Bioconverter (Santa Monica, CA).
- Wright Environmental Management (Ontario, Canadá).
- Waasa (Finlândia/Suécia).
- Eco Tec (Finland).

2.3.5. Aspectos Ambientais e Econômicos.

Um bom projeto de digestão anaeróbica favorece o desenvolvimento mais equilibrado entre o homem e a natureza, uma vez que o processo recupera energia – ainda que em quantidade menor que a disposição em aterros, mas de maneira contínua, sem emissões fugitivas nem posteriores ao encerramento das atividades operacionais, não deixando passivo ambiental – e, desta maneira, reduz a demanda por combustíveis fósseis e a emissão de gases de efeito estufa. Também permite que os nutrientes dos compostos produzidos voltem ao solo, mantendo o ciclo fechado sob este aspecto, e evitando a perda de áreas para disposição de materiais passíveis de (re)aproveitamento.

Um fator que tem despertado os investidores para a obtenção de energia a partir de resíduos é o que diz respeito à emissão de gases de efeito estufa. Há várias instituições interessadas em obter créditos de carbono para redução de emissão de gases de efeito estufa, preocupadas com o controle mandatário em gases de efeito estufa imposto por regulamentações ou legislações – o que também pode vir a ocorrer no Brasil após 2012, período de início da segunda fase de compromisso do Protocolo de Kyoto. Desta forma, plantas de digestão anaeróbica serão unidades muito atraentes para obtenção de créditos de carbono pela redução de gases de efeito estufa, tanto por reduzirem as emissões de metano, caso os resíduos fossem depositados em aterros, quanto por evitar a emissão de dióxido de carbono, por deslocar o consumo de combustíveis fósseis para gerar a eletricidade obtida com o lixo. O aproveitamento do adubo permitirá a redução de consumo de fertilizantes químicos e, se este for utilizado para cultivos energéticos, mais combustíveis fósseis serão substituídos.

2.4. Compostagem (adubo orgânico).

Quanto à alternativa de compostagem, ou digestão aeróbica, da fração orgânica do lixo, a dificuldade de controle de pureza do adubo - face à presença de metais pesados, poluentes e corpos estranhos - impede que sua implantação seja economicamente viável para a maioria dos resíduos disponíveis, sendo necessária a segregação – similar ao que ocorre com a digestão anaeróbica. Mesmo que a triagem fosse resolvida, a remuneração que o mercado atualmente disponibiliza ao adubo orgânico é pequena e tende a não conseguir suportar o empreendimento.

A COMLURB possui um programa de compostagem na sua usina de triagem no Caju, Rio de Janeiro, tratando aerobicamente a fração orgânica, obtida após complexa separação mecânica visando a reciclagem. O lixo orgânico separado e moído é colocado em leiras aeradas mecanicamente e umedecidas freqüentemente até que o adubo esteja “maduro”. Este produto é então doado a quem se dispuser a buscá-lo, sendo que esta atividade não está relacionada com a rentabilidade do empreendimento – é uma ação da Prefeitura para minimização da quantidade de material a encaminhar para os vazadouros.

Na Europa e EUA já existe um mercado maior para o adubo o que melhora a viabilidade do aproveitamento dos RSU através da rota de compostagem. A Figura33, a seguir, ilustra uma leira de compostagem nos EUA.

Figura33 – Leira de Digestão Aeróbica (Compostagem)



Apesar de serem várias as possibilidades de aplicação do adubo, é importante considerar a alternativa energética, para evitar o risco de que a presença de resíduos perigosos –

decorrentes do baixo engajamento popular nos primeiros anos de funcionamento do sistema integrado de gestão de resíduos sólidos – possa causar algum tipo de doença através do consumo de produtos alimentícios que utilizem o adubo. Desta maneira, a produção de oleaginosas – a serem convertidas em biodiesel e carvão vegetal, de cana-de-açúcar e o florestamento energético devem ser priorizados na aplicação do adubo.

2.5. Incineração (Vapor → Energia elétrica, Co-geração).

Em inglês a sigla WTE significa “waste-to-energy” ou energia dos resíduos. É possível extrair energia, combustíveis ou materiais valiosos do lixo por diversos processos, incluindo: incineração, gaseificação e por conversões – térmica (gaseificação, pirólise, plasma), biológica (digestão anaeróbica) ou química (hidrólise ácida, craqueamento catalítico).

Neste capítulo serão abordadas as usinas de incineração dos RSU, que serão referenciadas simplesmente usinas WTE por serem as mais comuns. Estas usinas podem produzir energia muito mais limpa do que as usinas termelétricas. Ademais o combustível lixo não está em processo de redução de oferta como o petróleo e o gás. A Figura34 mostra os principais componentes de uma moderna usina de incineração de RSU.

Figura34 – Moderna Usina de Incineração de RSU

Podem ser destacados, como principais, os seguintes itens existentes na maioria das usinas deste tipo:

- Poço de armazenamento do lixo (4)
- Grelha Móvel (8)
- Câmara de combustão (9)
- Sistema de Descarga das Cinzas (10)
- Sistema de Geração de Vapor (11,12,13 e 14)
- Depurador de Gases (15)
- Filtros de Sacos (16)
- Ventilador (17)
- Chaminé (18)

Usinas WTE trabalham na base da geração de energia elétrica, isto é, não são seguidoras de carga – pois trabalham 24 horas por dia com baixa flexibilidade, podendo também gerar calor e/ou frio em sistemas de co-geração, bastante comum nas usinas da Europa em especial na França, Alemanha, Suécia e Dinamarca.

Atualmente, a maioria das usinas WTE utiliza a incineração dos RSU para produzir o vapor, permitindo que os gases emanados pela destruição dos RSU sejam tratados. É com o vapor que será realizado o aproveitamento energético, seja movimentando uma turbina para gerar energia

elétrica ou consumido em processos industriais ou para aquecimento. No futuro estas usinas usarão tecnologias múltiplas para processar os diferentes tipos de resíduos.

Neste sub-capítulo serão abordadas as tecnologias de incineração dos RSU, incluindo a situação mundial, a situação no Brasil, os impactos ambientais e as principais empresas e processos envolvidos. Também serão examinadas as usinas de incineração avançadas, como as que combinam gás natural e lixo e as usinas com enriquecimento de oxigênio para otimizar a queima e recirculação dos gases da combustão, entre outras.

2.5.1. Situação Mundial das Usinas de Incineração de RSU.

A maioria das usinas de incineração de RSU está concentrada em três áreas do mundo: Europa, EUA e Ásia. Da Figura 35 à Figura 38, a seguir, é apresentada a situação das usinas de incineração de RSU no mundo nos últimos anos.

Figura 35- Capacidade de Incineração de RSU (10^6 t/ano).



Figura 36 - Incineração de RSU na Europa em 2003.

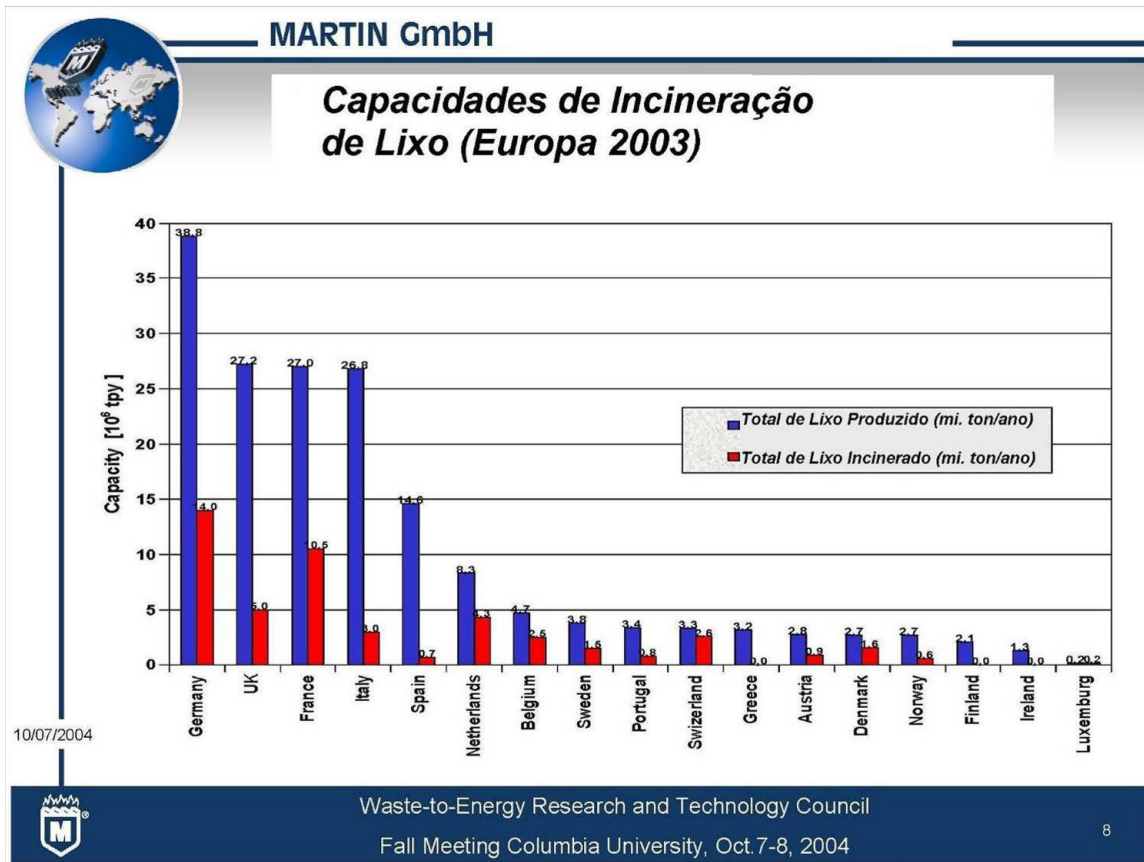


Figura 37 - Percentual do Lixo Incinerado por País na Europa (2003).

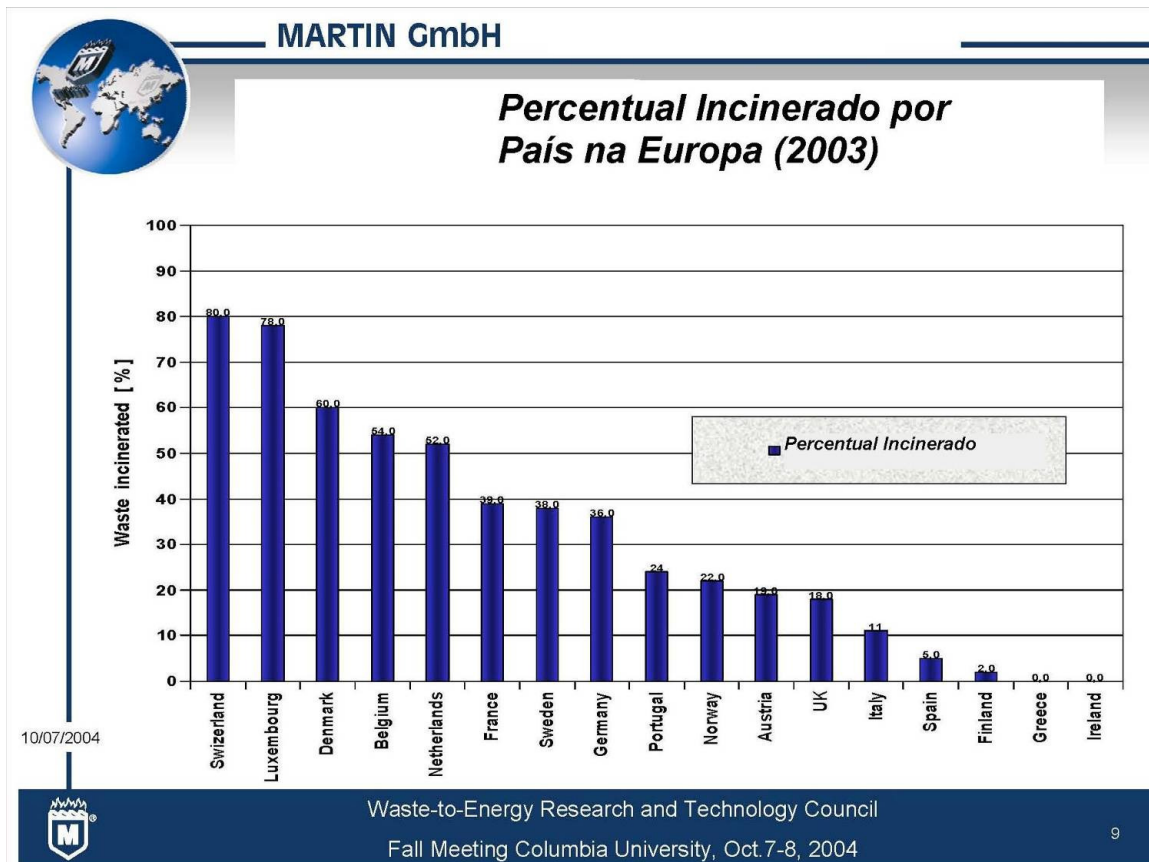
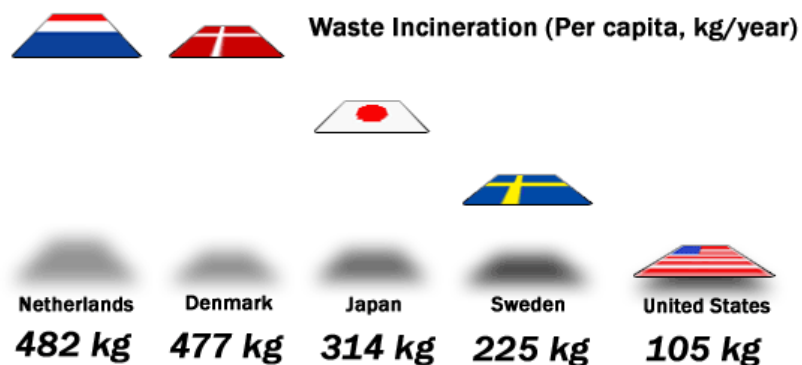
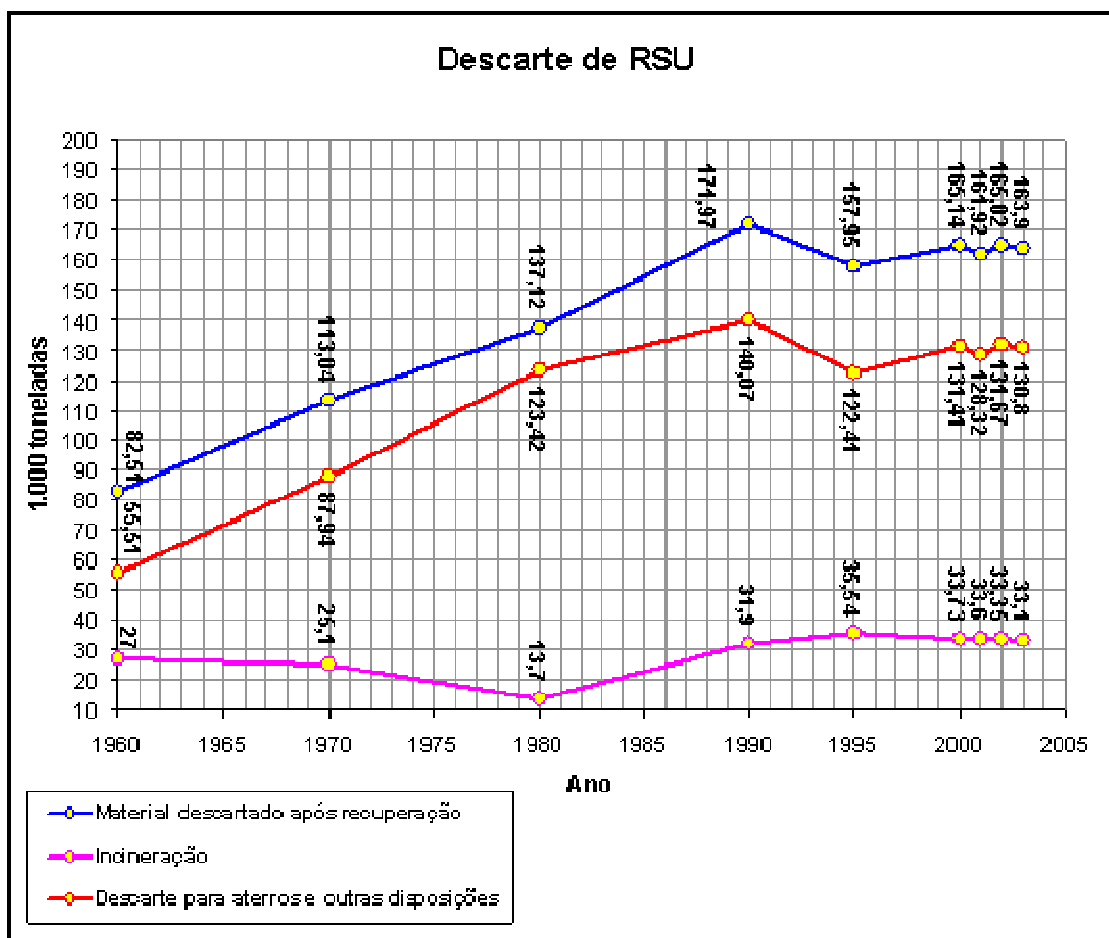


Figura 38 - Capacidade de Incineração de RSU per capita (kg/ano)



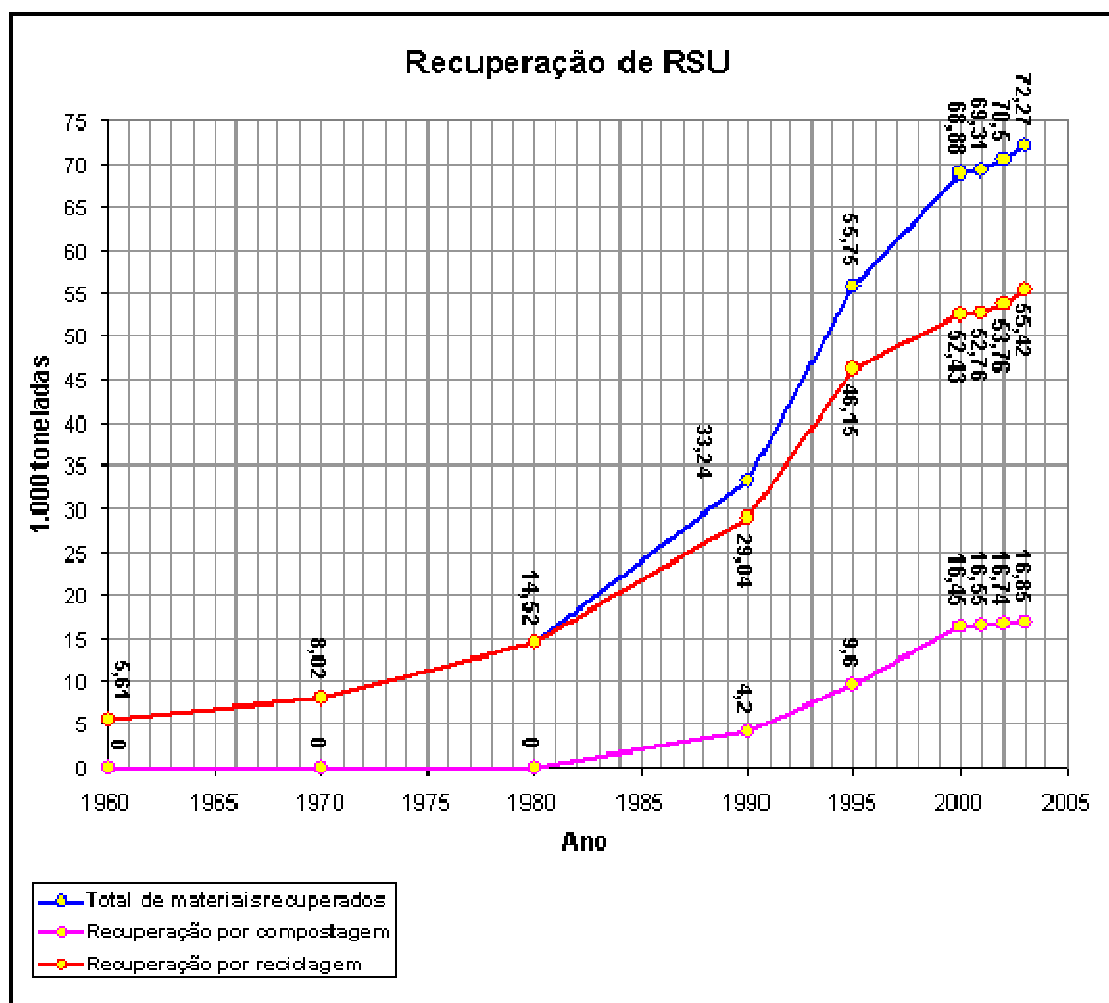
Atualmente, nos Estados Unidos, cerca de 30% do RSU produzido é reciclado. O material não reciclado ou recuperado por compostagem é descartado e tem outra disposição final. A maior parte do material descartado acaba indo parar em aterros (<http://www.epa.gov/cleanenergy/muni.htm>). A Figura39 e a Figura40 mostram a geração, recuperação e descarte de RSU nos EUA no período de 1960 a 2003.

Figura39- Quantidade de RSU descartado - Período 1960-2003



Fonte: elaborado a partir de US EPA, 2003.

Figura40- Quantidade de RSU recuperado - Período 1960-2003.



Fonte: elaborado a partir de US EPA, 2003.

Nos EUA devido às grandes distâncias e poucos sistemas municipais de aquecimento, em geral, as usinas de incineração de RSU somente produzem energia elétrica com grande desperdício do calor residual – que poderia ser aproveitado em sistemas de co-geração. As 89 usinas dos EUA compreendem 22% da capacidade global de incineração, processando 28,7 milhões de toneladas anuais de RSU e produzindo 2500 MW_e na base, o que corresponde a 0,3% da produção nacional de energia (<http://www.epa.gov/cleanenergy/muni.htm>). A maior usina de incineração de RSU do mundo situa-se no estado da Flórida (Miami-Dade), processando 4.200 t/dia de lixo e disponibilizando na rede elétrica 75 MW_e.

Apesar da enorme redução de emissões de poluentes provenientes de usinas WTE, como será mostrado adiante, grupos ambientais nos EUA continuam a se opor, por princípio, às usinas de incineração, provocando o cancelamento de novas usinas de incineração dos RSU – o principal foco de resistência é a produção de dioxinas, tema que será abordado adiante neste texto.

Na Europa encontram-se algumas das mais bem sucedidas usinas de incineração de RSU. Em 2002 um estudo da ISWA ("International Solid Waste Association", (<http://www.iswa.org/>), representada no Brasil pela Abrelpe, (<http://www.abrelpe.com.br/>), revelou que a capacidade instalada de incineração era de 40 milhões de t/ano correspondendo a geração de 11.400 GWh (1.301 MWe médios) elétricos e 30.500 GWh (equivalentes a 2.660 milhões de m³ de gás natural) térmicos. A colocação de lixo combustível em aterros deverá ser banida em menos de uma década, segundo as Diretivas Europeias, de modo que muitos países estão implementando novas usinas WTE ou expandindo sua capacidade. Os países nórdicos, além da França e Alemanha utilizam, em grande escala, a energia das plantas WTE para aquecimento. Espanha, Portugal e Hungria, assim como os EUA, geram apenas eletricidade. A Holanda usava apenas a eletricidade derivada dos RSU, mas construiu uma das maiores usinas WTE para co-geração em Amsterdã, que gera eletricidade simultaneamente ao aproveitamento do calor. O Reino Unido possui algumas usinas WTE mas, como a taxa de reciclagem é muito baixa, eles estão se concentrando em aumentá-la. Alguns países da Europa, como a Grécia e Irlanda, ainda não possuem usinas WTE mas estão planejando construí-las. A situação das usinas WTE na Europa em 2004 é mostrada na Tabela 27, abaixo:

Tabela 27 - Novas Encomendas de Usinas WTE na Europa (2004)

PAÍS (Europa)	Usinas WTE Encomendadas	Usinas WTE em Fase de Estudos	Capacidade em t/ano (encomendadas)
Albânia	0	1	
Alemanha	13	Diversas	2,7 milhões
Áustria	3	1	488.000
Bélgica	0	2	
Croácia	0	1	
Eslovênia	0	1	
Espanha	2	2	424.000
Finlândia	1	3	121.000
França	5	8	551.000
Grã-Bretanha	2	6	282.000
Grécia	0	Diversas	
Holanda	2	3	705.000
Irlanda	0	1	
Itália	4	8	1,85 milhões
Luxemburgo	0	1	
Noruega	1	1	112.000
Polônia	0	Diversas	
Portugal	2	0	494.000
Rep. Tcheca	0	2	
Rússia	1	0	357.000
Suécia	5	3	911.000
Suíça	5	0	765.000
TOTAL	46		9,76 MILHÕES

A situação na Ásia é muito diferente dos EUA. O maior mercado ainda é o Japão mas Coréia, Taiwan e China têm apresentado grande volume de encomendas.

A China é o mercado que mais cresce no mundo, com 20 usinas WTE em operação e 40 outras encomendadas ou em fase de planejamento – especialmente em consequência dos jogos olímpicos de 2008. Em breve será o maior mercado da Ásia. A capacidade total de incineração entre usinas operando e em construção é de 12,8 milhões de t/ano. A maioria das plantas usa fornos de grelha móvel (Stoker) mas existe um bom mercado para leito fluidizado. Um problema é o baixo PCI (poder calorífico inferior) do lixo chinês (< 5.000 KJ/kg) nas áreas rurais.

Em Taiwan todo o sistema de gerenciamento de RSU é controlado pelo Governo Central, tendo produzido 24.000 t/dia em 2003. O objetivo é atingir 100% com usinas WTE. Atualmente existem 19 usinas em operação processando 20.400 t/dia, além de mais sete em construção com capacidade de 4.100 t/dia.

Em Cingapura após elevada taxa de reciclagem (47%), restam 6.877 t/dia de resíduos não recicláveis. Destes 92% são incinerados e os 8% não combustíveis são dispostos em um aterro (Semakau) situado em uma ilha próxima da costa e mostrado na Figura41 abaixo.

Figura41- Aterro de Semakau, Cingapura.



No Japão 80% das usinas de incineração, com 50% do mercado, usam incineradores com grelhas (Stoker) e os 20% restantes são de leito fluidizado. Na década de 90, a tecnologia de leito fluidizado decaiu drasticamente devido à elevada emissão de dioxinas. Novo marco regulatório estabelecido reduziu sensivelmente o limite de emissões de dioxinas para 0,005 mg/t de lixo, além de impor severos limites a lixiviação de resíduos. Os resíduos da incineração precisam ser vitrificados para satisfazer estes limites. A gaseificação e a pirólise dos RSU, embora tenham apresentado alguns problemas operacionais, detém os outros 50% do mercado. A tendência atual é: gaseificação/pirólise para pequenas usinas e incineração com grelhas para plantas maiores.

2.5.2. Situação no Brasil das Usinas de Incineração de RSU.

Não existem usinas de incineração de RSU com recuperação de energia (WTE) em escala comercial no Brasil.

Existem duas empresas que se dedicam ao assunto:

- **Kompac (www.kompac.com.br):** empresa especializada no desenvolvimento de plantas e tecnologias na área de degradação térmica de resíduos urbanos e perigosos. Projeta plantas de incineração e executa serviços dentro da sua área de atuação. Através da Divisão Incitex, a Kompac executou o projeto e fabricação de seus Centros de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP), modernos sistemas de coleta, transporte, manuseio e incineração de lixo, que operam com um sistema supervisorizado computadorizado e utilizam tecnologia de incineração com elevado índice de remoção de material orgânico e diminuição do potencial poluidor dos resíduos. A Tabela 28 fornece dados de plantas CTRP espalhadas pelo país. A Figura 42, a seguir, mostra uma das usinas da Kompac, no Ceará, que incinera cerca de 11.000 t/ano de resíduos industriais e hospitalares.

Tabela 28 - Plantas CTRP da Kompac.

Unidade	Contratante	Local	Capacidade	Tipo de resíduo	Início de op.
CTRP - Fortaleza	Governo do Ceará – Secr. Desenv. Urbano e Meio Ambiente	Município de Fortaleza	1 unidade de 15 toneladas/dia - 850 kg/h - cap. final 30 t/dia	Lixo hospitalar e animais de pequeno porte, Resíduos Industriais	01/01/2001
Centro de Tratamento de Resíduos de Serviço de Saúde - UILAR - Belém	Prefeitura Municipal de Belém – Secr. de Saneamento - SESAN	Município de Ananindeua - Belém/PA	2 unidades de 21 toneladas/dia - 2x 875 kg/h	Lixo hospitalar e animais de pequeno porte	26/12/1992
Centro de Incineração de Papel-Moeda - BACEN	Banco Central do Brasil	Rua Silvino Montenegro ns 38 - Rio de Janeiro/RJ	2 unidades de 4 toneladas em 8 horas - 2x 500 kg/h	Pacotes de 3 mil notas amarradas (papel-moeda)	24/07/1990
Centro de Tratamento de Lixo de Alto Risco - AIRJ - Rio	Arsa - Aeroportos do Rio de Janeiro S.A.	Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro	2 unidades de 30 toneladas/dia - 2x1250 kg/h	Mistura de tipos 0, 1, 2 e 3 (IIA) e câmara sep. para o tipo 4	07/01/1986
Centro de Tratamento de Lixo de Alto Risco - AISP - Guarulhos	Ministério da Aeronáutica - COPASP	Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos	2 unidades de 30 toneladas/dia - 2x1250 kg/h	Mistura de tipos 0, 1, 2 e 3 (IIA) e câmara separada para o tipo 4	16/03/1985
Centro de Tratamento de Resíduos de Serviço de Saúde - UILE - Ceilândia	Companhia de Água e Esgotos de Brasília - CAESB	Central de Atividades do SLU - Setor "P" Sul Ceilândia, Brasília/DF	2 unidades de 30 toneladas/dia - 2 x 1250 kg/h	Lixo hospitalar e animais de pequeno porte	18/03/1985, reformada Setembro 1999, Upgrade em 2002

Unidade	Contratante	Local	Capacidade	Tipo de resíduo	Início de op.
Centro de Tratamento de Lixo de Alto Risco - AIBH - Confins	Ministério da Aeronáutica - COPAER - BH	Aeroporto Internacional Tancredo Neves-Confins, Lagoa Santa/MG	48 toneladas/dia - 1000 kg/h em 1 unidade	Mistura de tipos 0, 1, 2 e 3 (IIA) e câmara separada para o tipo 4	01/06/1984
Centro de Tratamento de Lixo de Alto Risco - AIEG - Manaus	Ministério da Aeronáutica - CCPAIM	Aeroporto Internacional Eduardo Gomes - Manaus/AM	16 toneladas/dia - 667 kg/h em 1 unidade	Mistura de tipos 0, 1, 2 e 3 (IIA) e câmara separada para o tipo 4	20/02/1976
Centro de Tratamento de Lixo de Alto Risco - AIBS - Brasília	Escritório de Construções de Engenharia - ECEIL S/A	Aeroporto Internacional de Brasília - Brasília/DF	14 toneladas/dia - 585 kg/h em 1 unidade	Mistura de tipos 0, 1, 2 e 3 (IIA)	07/09/1974

Fonte: www.kompac.com.br/produtos/ctrp.htm.

Figura 42 - CTRP – Fortaleza – Sistema de tratamento de gases.



Fonte: www.kompac.com.br

- USINAVERDE (www.usinaverde.com.br):** A USINAVERDE é uma empresa de capital privado criada em 2001 com o objetivo de desenvolver tecnologias de ponta para tratamento e disposição final de RSU, resíduos de serviços de saúde e alguns tipos de resíduos industriais, com recuperação de energia. A empresa desenvolveu um processo patentado, Mineralização de Resíduos Orgânicos, que consiste na neutralização dos gases de queima dos resíduos através de um método de lavagem em circuito interno. A USINAVERDE projeta e fornece unidades de tratamento de RSU em módulos para tratamento de 150 t/dia de RSU, gerando 2,6 MW_{elétr}, capaz de atender a uma comunidade em torno de 180 mil pessoas.

A USINAVERDE implantou em 2003, numa área de 5000 m² na Fundação BIORIO, Ilha do Fundão, um Centro Tecnológico dotado de planta-piloto com capacidade de processar

30 t/dia, gerando 440 kW_{elétr} para consumo próprio. Em 2005, este recebeu da Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima aprovação para ser classificado como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. A usina é mostrada na Figura 43.

Figura 43 - USINAVERDE na UFRJ, Ilha do Fundão.



O Centro Tecnológico já recebeu a visita de cerca de 40 representantes de diversos municípios espalhados pelo país. Segundo Luiz Carlos Malta, diretor da empresa, em 2006 a USINAVERDE desenvolvia o projeto de instalação de mais 4 módulos em um município do interior paulista. O executivo não deu detalhes do projeto a pedido da prefeitura local. A instalação de um módulo leva 2 anos a um custo de R\$ 23 milhões, ocupando área equivalente à de um campo de futebol. Malta diz que o retorno do negócio se dá em 6 ou 7 anos após a partida. Ele afirma que o módulo é 50% mais barato que similares internacionais, já que não há o pagamento de royalties, pois a tecnologia foi toda desenvolvida no Brasil. As patentes estão em nome da empresa ().

A empresa planeja a comercialização de um módulo maior para incinerar 100 t/dia gerando entre 3 e 4 MW_e (Figura 44).

Figura 44 - Esquema da USINAVERDE para 100 t/dia.

Uma estimativa preliminar de custos para esta tecnologia, fornecida pela empresa, é entre 2.500 a 3.000 US\$/kW instalado ou cerca de US\$ 400/t/ano. Uma estimativa, também preliminar, estima valores do custo da energia acima de US\$ 80/MWh.

2.5.3. Impactos Ambientais das Usinas de Incineração de RSU.

As usinas de incineração de RSU estão entre os assuntos mais debatidos no mundo. Muitas pessoas acreditam que a incineração é uma tecnologia poluidora, ineficiente e cara. Isto torna-se verdadeiro quando a tecnologia não é empregada corretamente. A incineração foi tão mal utilizada no passado que muitas usinas carregam o estigma de ser a principal fonte de contaminação do meio ambiente, através da emissão de substâncias nocivas e cancerígenas como as dioxinas e metais pesados (chumbo, cádmio e mercúrio). A utilização de tecnologias incapazes de atender aos padrões ambientais também tem contribuído para esta situação.

A seguir será mostrado como, no passado, os incineradores foram usados de maneira inadequada:

1. Incineradores primitivos foram usados em hospitais e escolas: o mundo tem incinerado o lixo por muito tempo. Na primeira metade do século XX era muito comum a incineração em escolas e hospitais. A fumaça preta saindo das chaminés indicava nenhum tratamento. Em 1994 um estudo feito pelo EPA nos EUA concluiu que a incineração descontrolada era a maior fonte de contaminação por dioxinas e mercúrio.
2. Lixo reciclável erroneamente incinerado: os críticos da incineração argumentam que estas usinas utilizam materiais que poderiam ser reciclados. Se uma comunidade consegue elevar a taxa de reciclagem a ponto de faltar "combustível" para as usinas de

incineração isto é extremamente favorável. A redução na fonte e reciclagem são sempre as melhores opções, ainda que não seja possível a reciclagem de todo o RSU.

3. As pessoas não se preocupam com o lixo que produzem: o que entra afeta o que sai. A físico-química básica ensina que nada se cria, tudo se transforma. A combustão é uma reação química significando que o cloro, chumbo, mercúrio ou cádmio que colocamos no incinerador tem que sair de uma forma ou de outra. O cloro pode entrar como PVC (vinil), restos de alimentos, ou mesmo na correspondência comercial clareada com cloro. O cloro pode sair como HCl, um gás que fica retido nos filtros ou como dioxinas ou PCB (bifenilas policloradas), alguns dos compostos mais tóxicos e bioacumulativos conhecidos. Os incineradores modernos são bastante eficientes na remoção destes compostos e metais pesados da corrente de gases da combustão. No entanto, a remoção destes materiais ANTES da combustão reduz o impacto ambiental produzindo uma combustão ainda mais limpa. Deve-se evitar incinerar PVC, equipamentos eletrônicos, restos de alimentos e papel reciclável.
4. Incineração utilizada para disposição de lixo contendo halogênios: os halogênios não apenas criam a oportunidade para a formação das dioxinas e furanos, mas causam corrosão dos tubos das caldeiras a temperaturas elevadas. No passado, a maneira usual de destruição dos PCB era através de navios incineradores. Estes navios dotados de incineradores inadequados, lotados de lixo tóxico, rumavam para o mar do norte criando grande poluição e foram banidos em 1991. Atualmente este tipo de lixo é incinerado em instalações especiais como a usina WTI da Von Roll no estado de Ohio, nos EUA. Atualmente novas tecnologias como a despolimerização térmica (craqueamento catalítico) e arco de plasma oferecem uma melhor opção para o tratamento deste tipo de resíduos.
5. Incineração sem recuperação da energia (pouco comum atualmente): não há sentido na incineração se a energia produzida não é utilizada. Neste caso o melhor é a disposição em aterros. Apenas a redução de volume não é o objetivo principal.

As modernas usinas de incineração de RSU, em geral, poluem menos do que os caminhões a diesel que transportam o lixo para elas. São extremamente limpas e seguras especialmente quando comparadas com outras opções de disposição do lixo ou de geração de energia. Os principais equipamentos e processos anti-poluição do ar usados pelas usinas de incineração são:

1. Boas práticas de combustão: no interior dos incineradores as temperaturas em geral excedem 800°C. Altas temperaturas destroem componentes orgânicos como as

- dioxinas. As taxas de alimentação do lixo e do ar são controladas para manter a temperatura o mais estável possível.
2. Superoxigenação: mais oxigênio significa melhor eficiência de combustão. Plantas WTE avançadas podem usar sistemas de enriquecimento de oxigênio para aumentar as concentrações de oxigênio no incinerador.
 3. Sinterização das Cinzas: as cinzas voláteis são reenviadas para o incinerador, onde são fundidas e incorporadas às cinzas do fundo do incinerador. Neste processo os poluentes orgânicos são destruídos.
 4. SNCR ("Selective non-catalytic reduction"): amônia ou uréia são injetados no incinerador durante a operação e reagem quimicamente com os óxidos de nitrogênio transformando-os em gás nitrogênio, que compõem 70% da atmosfera.
 5. Depuradores de Gases ("scrubbers"): substâncias alcalinas como soluções de carbonato de cálcio (CaO) são aspergidas na corrente de gases da combustão para neutralizar os gases ácidos e remover outros materiais.
 6. Ciclones: são usados em conjunto com precipitadores eletrostáticos e/ou filtros de sacos ("baghouses"). Os ciclones separam as partículas grandes e pesadas contidas nos gases da combustão. O direcionamento dos gases em trajetórias circulares expelle estas partículas para fora da corrente sendo coletadas em um reservatório.
 7. Filtros de Sacos ("Baghouse"): Um grande caixote com centenas de filtros de sacos de tecidos retém as partículas da corrente de gases de incineração. Estas partículas que podem conter dioxinas ou metais pesados não serão lançadas no meio ambiente. Para se limpar estes filtros a corrente de gases é desviada para outra bateria de filtros de saco e ar é soprado na direção oposta soltando as partículas retidas que são tratadas como resíduos classe I, podendo ser misturadas às cinzas de fundo e/ou estabilizadas quimicamente para serem depositadas em aterros. Estes filtros são o meio mais eficiente de remoção dos poluentes dos gases da incineração.
 8. "Remedia": alguns filtros de sacos contem um catalisador conhecido como Remedia. Isto possibilita a destruição de dioxinas gasosas que podem existir nos gases de incineração. Estas dioxinas são transformadas em HCl, CO₂ e H₂O.
 9. Precipitador Eletrostático: usado com o mesmo propósito dos filtros de sacos usando cargas elétricas para atrair as partículas para uma chapa de metal. Estes precipitadores não são sensíveis às temperaturas e podem ser colocados imediatamente após a caldeira de recuperação.

10. Carvão Ativado: funciona como uma esponja que absorve o mercúrio, dioxinas, componentes orgânicos voláteis e outros poluentes presentes nos gases de incineração.
11. Monitoração Contínua das Emissões: no interior da chaminé da usina, são colocados sensores para medir os níveis de monóxido de carbono, particulados, componentes orgânicos voláteis e gases ácidos. Os níveis destes poluentes fornecem uma visão geral da eficiência do processo. Mais CO significa que a queima não está correta. Mais HCl, significa alto teor de cloro no incinerador e que o depurador não está funcionando adequadamente.

A maior preocupação com as usinas de incineração de resíduos são as emissões para meio ambiente. As usinas modernas têm baixíssimas emissões de cinzas e outros efluentes para a atmosfera. A melhor maneira de reduzir a poluição é através do controle rigoroso do processo. Antigamente os incineradores não possuíam nenhum sistema de controle. Os operadores empurravam manualmente o lixo para o forno, jogando-os em cima dos resíduos que já estavam sendo queimados. Não havia conhecimento de como o fluxo de ar afetava a queima, nem sensores de temperatura e monitores contínuos de emissões. Na Tabela 29, abaixo, pode-se ver a evolução das emissões de dioxinas nos EUA de diversas fontes entre 1987 e 2002 (Dados do EPA). Pode-se concluir que, atualmente, as usinas de incineração de RSU são responsáveis por menos de 1% do total. As razões pelo acentuado decréscimo são discutidas a seguir.

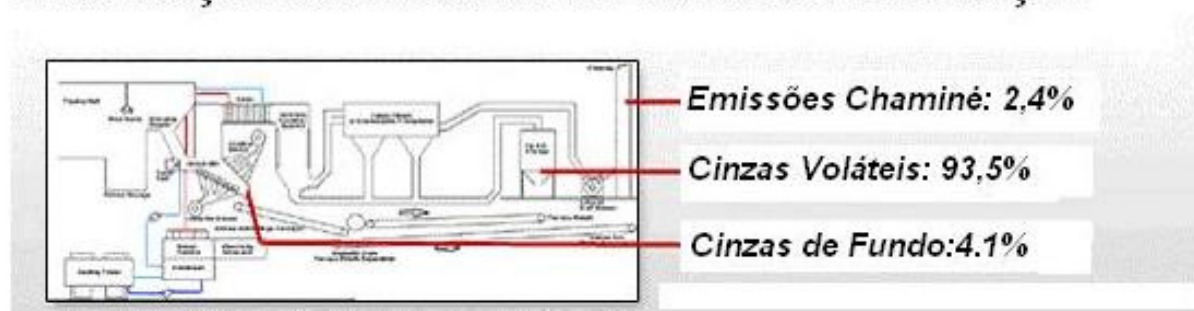
Tabela 29 - Emissões de Dioxinas nos EUA (1987-2002, Dados EPA).

Emissões de Dioxinas nos EUA (1987-2002, Dados EPA) (as quantidades de dioxinas são dadas em equivalente de toxicidade)						
Fonte:	1987	Percentual	1995	Percentual	2002	Percentual
Incineração de RSU (WTE)	8877	77%	1250	71%	12	0.96%
Incineração Lixo Hospitalar	2590	22%	488	27%	7	0.54%
Incineração de Resíduos do Esgoto	6	0.05%	14	0.84%	14	1.17%
Incineração de Lixo Tóxico	5	0.04%	5	0.33%	3	0.03%
Incineração a céu aberto	604	4%	628	19%	628	56%
Fundições de Metais	995	6%	301	9%	35	3%
Usinas de Cimento	131	0.94%	173	5%	25	2%
Resíduos de Esgoto em Aterros	76	0.55%	76	2%	76	6%
Indústria de Papel e Celulose	372	2.67%	23	0.71%	15	1%
Usinas a Carvão	50	0.36%	60	1%	60	5%
Queima de Madeira em Residências	89	0.64%	62	1%	62	5%
Queima de Madeira em Indústrias	26	0.19%	27	0.85%	27	2%
Caminhões a Diesel	27	0.2%	35	1%	35	3%
Outros	137	0.98%	103	3%	100	9%

A maior parte das dioxinas está nas cinzas voláteis como mostra a Figura 45. Estes dados são do ano de 1999 e foram obtidos de 22 usinas suecas. Atualmente, as emissões são menores, com menor quantidade nas cinzas de fundo e chaminé com a maior parte das dioxinas nas cinzas voláteis.

Figura 45 - Emissões de Dioxinas da Incineração de RSU (Suécia 1999).

Distribuição das Dioxinas em Usinas de Incineração



Diversas foram as razões para o acentuado decréscimo da emissão de dioxinas nos EUA pelas usinas de incineração de RSU:

1. Primeiramente, em 1987, aproximadamente 15% do lixo era incinerado enquanto atualmente apenas 8% o são. Obviamente isto significaria uma redução de cerca de

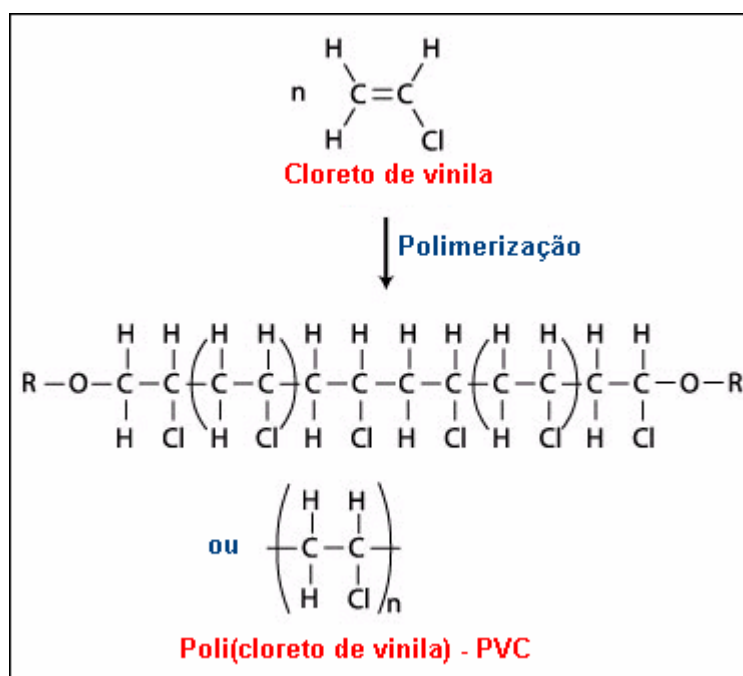
50% nas emissões de dioxinas, caso os processos de incineração continuassem os mesmos, mas a redução foi muito mais acentuada, de 77% para 0,96% do total.

2. A Agência de Proteção Ambiental tornou obrigatório o MACT ("Maximum Available Control Technology") ou que a máxima tecnologia de controle disponível fosse aplicada em todas as grandes usinas WTE até o ano 2000. As usinas capazes de aplicá-las foram aprimoradas e as que não tiveram recursos foram fechadas. O MACT também foi aplicado às usinas de incineração de lixo hospitalar. Em 1987 as chaminés das usinas WTE apresentavam uma fumaça escura, enquanto hoje em dia nada é visível ou, em dias frios, pode-se visualizar uma fumaça branca típica da condensação do vapor d'água.
3. A melhor compreensão do processo de combustão de resíduos, decorrente da experiência em utilizá-lo, permitiu significativo progresso no controle, o que viabilizou reduzir as emissões. Com respeito aos poluentes orgânicos pode-se dizer que o processo em si (a forma como se queima) é tão ou mais importante do que o insumo (o que se queima). Diversos experimentos foram realizados para ser possível compreender o processo de formação das dioxinas e furanos. Na verdade existem 75 diferentes tipos de dioxinas (PCDD) e 135 tipos de furanos (PCDF). Seus graus de toxicidades variam e o mais potente é o Tetracloro Dibenzeno Dioxina (TCDD). As dioxinas são destruídas a temperaturas superiores a 600°C e são recriadas a temperaturas entre 250°C e 500°C na presença de cloro e carbono. Uma maneira de se reduzir o processo de formação de dioxinas durante o resfriamento dos gases é fazê-lo o mais rapidamente possível. A presença de cobre aumenta a formação de dioxinas, pois este age como catalisador. Estes experimentos confirmaram que a quantidade de dioxinas formadas depende mais do processo de combustão e resfriamento do que da quantidade de cloro presente, já que apenas uma quantidade infinitesimal de cloro irá compor as dioxinas.
4. A diminuição de poluentes como PVC e mercúrio, contidos no lixo também possibilitou a redução da emissão de poluentes. Programas de segregação de lixo doméstico potencialmente tóxico, como baterias de níquel-cádmio, termômetros de mercúrio e garrafas de PVC, melhoraram o desempenho das usinas WTE referente às emissões de poluentes.

Devido a grande importância das dioxinas no processo de incineração dos RSU serão feitas algumas considerações visando esclarecer as dúvidas sobre o assunto. A análise será iniciada por uma das principais fontes de formação de dioxinas pela incineração, o PVC ("polyvinyl chloride").

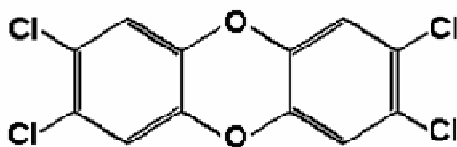
O PVC é usado pela maioria das pessoas no dia a dia. Por exemplo, nos materiais descartáveis em hospitais, pisos, forros de parede e tetos, tubulações de água, esgoto, brinquedos, filmes e vasilhames para preservação de alimentos, até o “cheirinho” de carro novo vem do PVC. Foi descoberto nos anos 1800 na Alemanha e aperfeiçoado, para usos do dia a dia, no início dos anos de 1900. Suas características principais são: durabilidade, baixo custo e simplicidade de produção. As duas matérias primas usadas para produzi-lo são petróleo e sal. Depois do polietileno, o PVC é o plástico mais consumido, no entanto também tem o lado negativo. O PVC é constituído de átomos de carbono, hidrogênio e cloro. Sua molécula possui uma espinha dorsal de átomos de carbono com átomos de hidrogênio e cloro alternados ligados aos carbonos (Figura 46).

Figura 46 - Formação da molécula de PVC.



Fonte: http://www.mpcfacity.net/mark_bishop/addition_polymers.htm.

O problema do PVC é a presença do cloro, que na sua forma elementar é bastante tóxico – tendo sido usado como gás venenoso durante a primeira guerra mundial. O cloro possui inúmeras aplicações, como eliminar bactérias da água entre muitas outras, mas também possui um lado bastante nocivo, podendo formar dioxinas. As dioxinas são tecnicamente conhecidas como policlorados dibenzo-para-dioxinas (PCDD). A Figura 47 abaixo mostra uma molécula de tetraclorado dibenzo-dioxina (TCDD). Tetraclorado porque são quatro átomos de cloro, dibenzo pelos dois anéis com seis átomos de carbono (benzeno) e dioxina pelos dois átomos de oxigênio unindo os anéis de benzeno. Esta é a mais tóxica das dioxinas se constituindo em um dos produtos mais tóxicos conhecidos.

Figura 47 - Molécula de Tetraclorado dibenzo-dioxina (TCDD)

Quantidades ínfimas de dioxinas, mesmo da ordem de nanogramas, podem ser danosas a saúde. Elas se acumulam no corpo nos tecidos gordurosos e são carcinogênicos. Ninguém, exceto pesquisadores, produz intencionalmente as dioxinas uma vez que não tem valor comercial. A combustão de matéria orgânica contendo cloro pode gerar dioxinas. Algumas provem de fontes naturais, outras das atividades humanas tais como: usinas de energia, incineradores, automóveis, sistemas de aquecimento doméstico, ou qualquer atividade que queime material orgânico. Nos EUA a principal fonte de dioxinas é a incineração de resíduos a céu aberto e não de usinas WTE.

Quanto ao tempo de vida das dioxinas, elas são consideradas Poluentes Orgânicos Persistentes (POP). São bastante estáveis e suas moléculas não são degradadas facilmente no meio ambiente. As dioxinas presentes no ar têm meia vida de aproximadamente 12 dias, dependendo da quantidade de luz ultravioleta incidente sobre elas. No corpo humano a meia vida é de aproximadamente sete anos. No solo, nas cinzas voláteis e em outros materiais a meia vida das dioxinas é desconhecida. Acredita-se que estes químicos durem praticamente para sempre no solo. Dioxinas foram encontradas em barro depositado há 65 milhões de anos. Estas dioxinas "eternas" aderem aos diversos materiais, como as cinzas voláteis e outros particulados finos que saem das chaminés das usinas de energia ou das partículas provenientes da incineração a céu aberto, e são carregadas pelo ar, eventualmente atingindo o solo e as pastagens. Se forem comidas pelos animais de fazendas, permanecerão nos tecidos, levando a que carnes gordurosas e leite possam possuir elevados teores de dioxinas. Em geral as dioxinas não contaminam as águas, aderindo aos sedimentos. As dioxinas possuem "primos" um pouco menos potentes, mas, ainda assim, muito perigosos, os dibenzofuranos e os bifenis policlorados (PCB). Na verdade os modernos incineradores podem funcionar como destruidores de dioxinas do meio ambiente já que, como visto acima, elas já estão presentes no lixo especialmente de origem animal e vegetal.

Existem duas vertentes que se contradizem em relação as dioxinas: o conhecido Greenpeace e a ONG The Chlorophiles, formada pelos trabalhadores da indústria do cloro e do PVC. Abaixo, na Tabela 30, encontra-se um resumo das posições dos dois grupos:

Tabela 30 - Posições das ONGs Greenpeace e The Chlorophiles sobre as dioxinas.

1) Greenpeace	2) The Chlorophiles
PVC = dioxinas	Dioxinas podem se formar mesmo quando materiais que não contem cloro são incinerados.
Incineração de qualquer material contendo cloro tem o potencial para gerar dioxinas.	Não é possível se atingir o nível zero de dioxinas uma vez que algumas são produzidas pela natureza.
Nosso objetivo é zero dioxinas.	O cloro que forma as dioxinas nos incineradores não é proveniente do PVC.
Incineradores (das usinas WTE) são a principal fonte de dioxinas.	Produtos clorados não são tóxicos como se afirma.
PVC é o principal causador de dioxinas nos incineradores.	A química do cloro é mais eficiente e econômica do que muitos outros processos.
Produtos tóxicos contendo cloro devem ser banidos.	Cloro: devemos conviver com ele.
Existem alternativas superiores aos polímeros clorados.	
Cloro: podemos fazer melhor.	

A questão primordial é o momento em que o PVC e o fogo se encontram. Pode ocorrer intencionalmente, como em um incinerador, ou acidentalmente, como em um incêndio. Nos incineradores as temperaturas são bastante elevadas, superiores a 1.000°C e são usados modernos equipamentos anti-poluição. Incêndios acidentais, em geral, envolvem níveis mais elevados de PVC e a queima ocorre a baixas temperaturas sem controle da poluição. Um incêndio domiciliar é uma fábrica de produtos carcinogênicos: pisos, papel de parede, tubos, fiação elétrica e utensílios contem PVC. A principal fonte comprovada de dioxinas são as queimas a céu aberto, como foi dito acima.

A indústria de papel e celulose emite dioxinas geradas pelo cloro usado no processo de produção. Usinas de papel são notórias poluidoras, mas o papel é um produto bem aceito por todos.

As condições da combustão são muito importantes para o controle da poluição. Mesmo a distribuição de ar e a turbulência devem manter a temperatura uniforme no leito de resíduos.

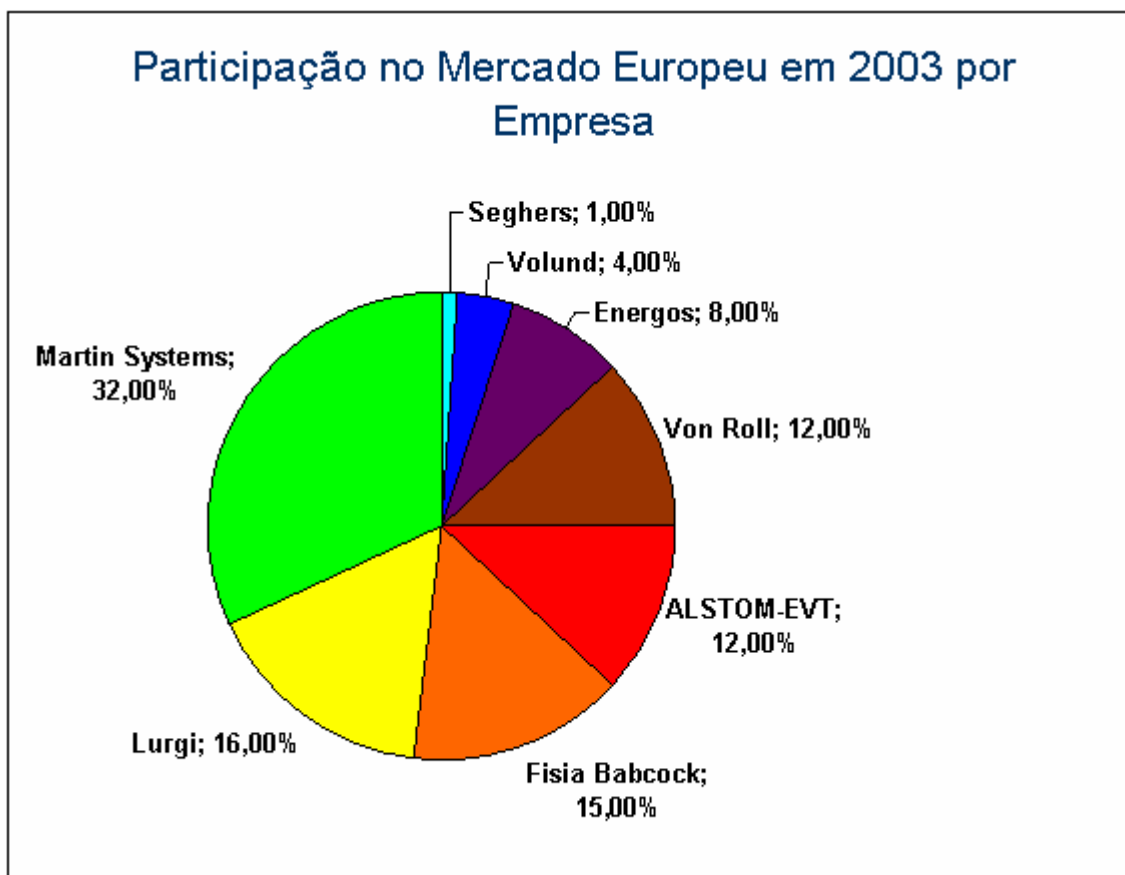
Além do cloro existem outros problemas com o PVC. Para evitar a decomposição são, usados chumbo e cádmio além dos ftalatos para torná-lo mais maleável. Chumbo e cádmio são poluidores consagrados e os ftalatos são carcinogênicos causadores de doenças glandulares, tendo sido banidos de alguns países. Como os ftalatos não são quimicamente ligados ao PVC, se desprendem e podem entrar no corpo humano. Os problemas associados ao uso do PVC transcendem o escopo deste trabalho, mas está claro que a sua produção, uso e disposição final causam grandes impactos ambientais.

2.5.4. Empresas e Processos.

Os dois principais processos usados em usinas de incineração de RSU são “Mass Burning” (MB) e “Residual Derived Fuel” (RDF). O primeiro significa a queima bruta do lixo *in natura* sem nenhum tratamento prévio, exceto remoção de itens muito grandes, prejudiciais ao processo, detectados por inspeção visual, como, por exemplo, um colchão. A primeira consequência do processo MB é que só pode ser usado em grandes incineradores, onde a abertura para a introdução do lixo deve ser bastante ampla para permitir a entrada dos resíduos sem tratamento algum. Já RDF significa que os RSU sofrem algum tipo de processo antes de serem introduzidos no incinerador. Estes processos variam desde a simples catação, para remover itens não combustíveis, ou moagem, para reduzir o tamanho máximo dos pedaços, até complexas operações de transformações (Tratamento Mecânico e Biológico – TMB, analisado adiante neste trabalho) produzindo combustível de elevado PCI. Obviamente que o custo das instalações para o pré-processamento dos resíduos deverá ser computado no custo da energia gerada. As usinas de processo RDF podem ser de qualquer tamanho, desde pequenas usinas de demonstração, tal qual o Centro Tecnológico da USINAVERDE, na Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, queimando 30 toneladas por dia até plantas gigantes, tal qual a SEMASS no Estado de Massachusetts, EUA, incinerando 3.000 toneladas por dia.

O mercado de usinas de incineração é composto por poucas empresas, a maioria europeia. A participação destas empresas no mercado europeu é mostrado na Figura 48, abaixo.

Figura 48 - Participação das Empresas de Incineração de RSU no Mercado Europeu.



2.5.4.1. Martin GmbH

A Martin GmbH, domina tanto o mercado europeu, com 32% de participação, como o mundial, com uma fatia de 33%. A Tabela 31 e a Tabela 32 ilustram o total de usinas Martin no mundo e suas principais parcerias, respectivamente. Seu produto mais bem sucedido é o incinerador de grelha reversa, ilustrado na Figura 49. Neste processo o lixo caminha na direção oposta ao movimento das grelhas.

Tabela 31 - Total de unidades da Martin pelo mundo.

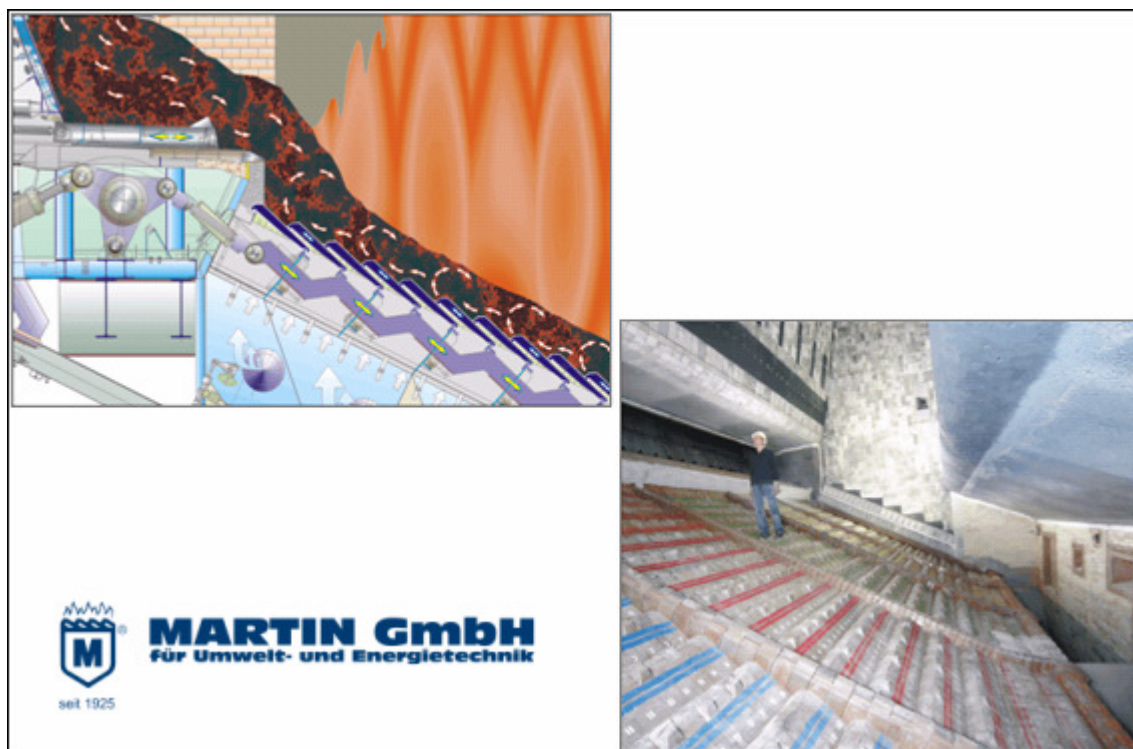
País	Número de plantas	Número de linhas	Capacidade (t/dia)
Áustria	6	10	3.188
Bélgica	5	10	3.561
Brasil	2	4	600
Canadá	2	3	720
Dinamarca	2	2	840
França	64	112	28.356
Alemanha	30	47	19.609
Inglaterra	13	24	7.245
Itália	11	18	5.721
Japão	81	184	31.923
Luxemburgo	2	3	720
Mônaco	2	3	417
Holanda	13	32	13.216
Noruega	3	6	1.056
República Popular da China	12	24	8.312
Portugal	1	2	1.280
República da China	7	18	7.400
República da Coreia	9	16	3.625
República de Singapura	3	17	10.392
República da Eslováquia	1	2	524
Rússia	3	5	1.000
Espanha	3	5	1.344
Suécia	9	11	3.365
Suíça	32	41	10.379
Tailândia	1	1	250
EUA	31	71	30.595
Total	348	671	195.638

Fonte: http://www.martingmbh.de/download_pdf.php?pfad=pdf%2Fbroschueren%2FReferenzliste.pdf.

Tabela 32 - Principais parcerias comerciais da Martin.

Companhia	País	Tipo de parceria
MARTIN AG für Umwelt- und Energietechnik - MAG	Suíça	Subsidiária
Constructions Industrielles de la Méditerranée - CNIM	França	Parceiro comercial
COVANTA Energy Corporation	EUA	Parceiro comercial
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.	Japão	Parceiro comercial
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.	Japão	Licence holder
Chongqing Luneng Environment Industry Co., Ltd.	República Popular da China	Licence holder

Fonte: http://www.martingmbh.de/index_en.php?level=1&CatID=10&inhalt_id=62.

Figura 49 - Incinerador de Grelha Reversa da Martin GmbH – Comparação com pessoa em seu interior.


A Martin tem construído diversas usinas WTE com tecnologia inovadora dentre as quais serão destacadas, na Tabela 33, as seguintes:

Tabela 33 - Usinas Avançadas da Martin, GmbH.

Nome/ localidade	Quantidade Incinerada	Potencia Elétrica Líquida	Eficiência Total	a) Particularidades
Brescia 3/ Itália	36 t/h (apenas biomassa e lama de esgoto)	Vapor a 73 bar 480°C Calor a 16 bar 130 °C	29%	Combustão com pouco excesso de ar (~5 a 6% vol.) – Max recuperação do calor, gases saem a 130°C.
Amsterdã/ Holanda	2 x 36 t/h (RSU)	Vapor a 130 bar 440°C	30%	Combustão com pouco excesso de ar (~5) – gases saem a 200°C – superaquecimento intermediário.
Schwandorf/ Alemanha		Vapor a 40 bar 400°C		Superaquecedor no interior do forno.
Mainz/ Alemanha	16 t/h (RSU)	Vapor a 40 bar 400°C	40%	Ciclo combinado Gás natural /lixo – gases a 200°C.
Bilbao (Zabalgarbi)/ Espanha	33 t/h (RSU)	Vapor a 100 bar 540°C 94 MWe	42%	Ciclo combinado Gás natural /lixo – gases saem a 200°C.

A seguir serão mostradas, da Figura 50 à Figura 52, as usinas de Brescia e Bilbao, esta também conhecida pelo nome de Zabalgarbi.

Figura 50 - Usina de Brescia, Itália.



The image shows an aerial view of the WtE Facility ASM Brescia, Italy, which is a large industrial complex with several buildings and a tall chimney. The facility is surrounded by green fields and a road. The image is presented as a slide from a presentation, with a dark blue header and footer.

MARTIN GmbH für Umwelt- und Energietechnik

WtE Facility ASM Brescia, Italy

10/07/2004

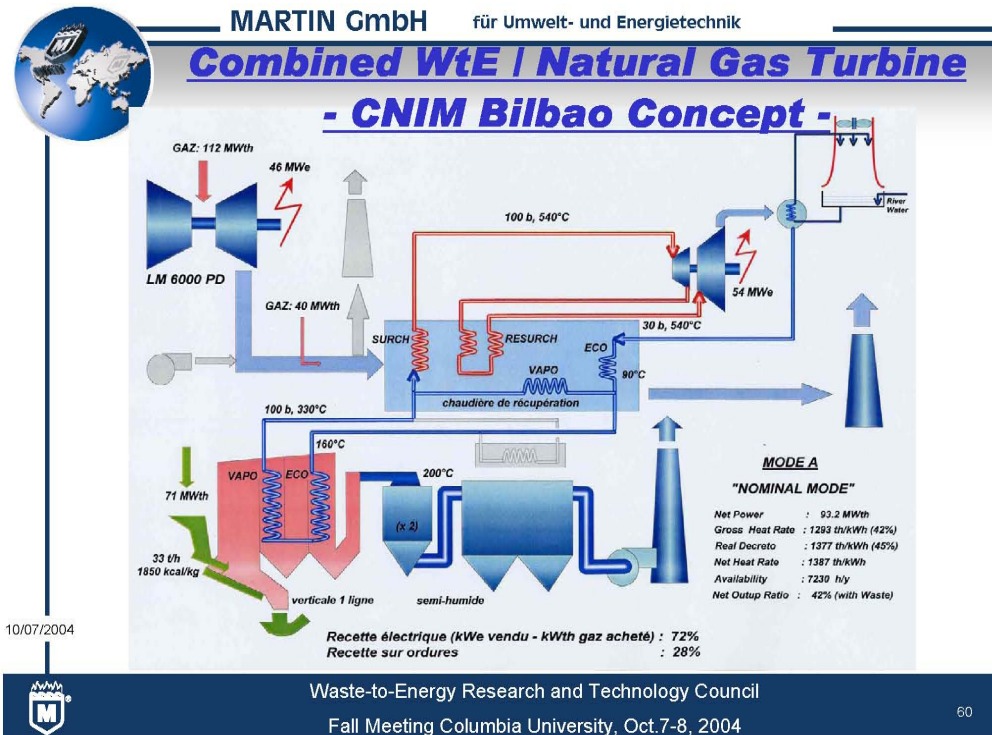
Waste-to-Energy Research and Technology Council
Fall Meeting Columbia University, Oct.7-8, 2004

49

Figura 51 - Usina de Bilbao, Espanha (Zabalgardi).



Figura 52 - Esquema da Usina de Bilbao, Espanha.



Deve-se enfatizar o elevado rendimento total da usina de Bilbao, 42%. Isto se deve a alta temperatura do vapor. Se for considerado apenas o combustível pago (gás natural), o rendimento total é superior a 70%.

Outro processo da Martin que merece destaque é o SYNCOM PLUS, que consiste em recirculação dos gases com enriquecimento de oxigênio e sensores infravermelhos para controlar a temperatura do incinerador. O processo convencional de incineração é mostrado na Figura 53, enquanto o SYNCOM PLUS é ilustrado na Figura 54 e seus efeitos positivos ilustrados da Figura 55.

Figura 53 - Processo de Combustão Convencional

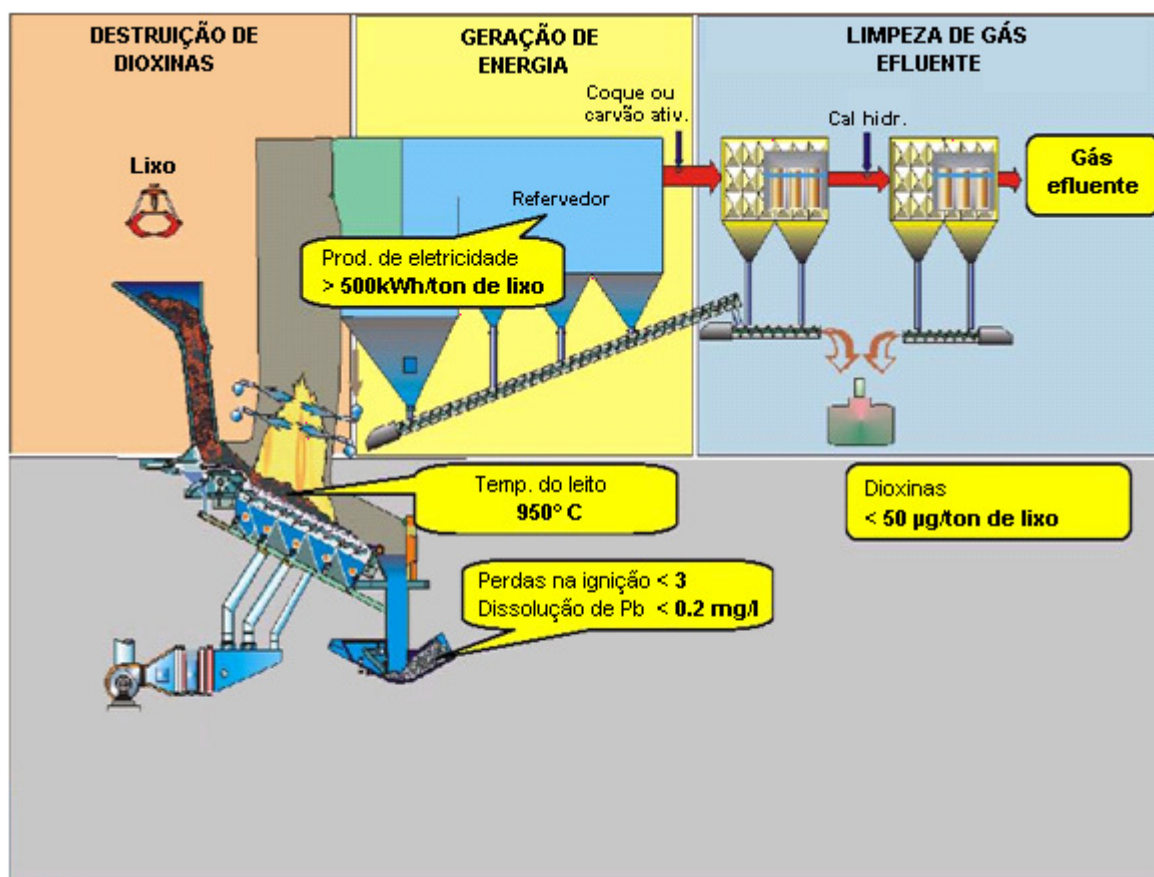
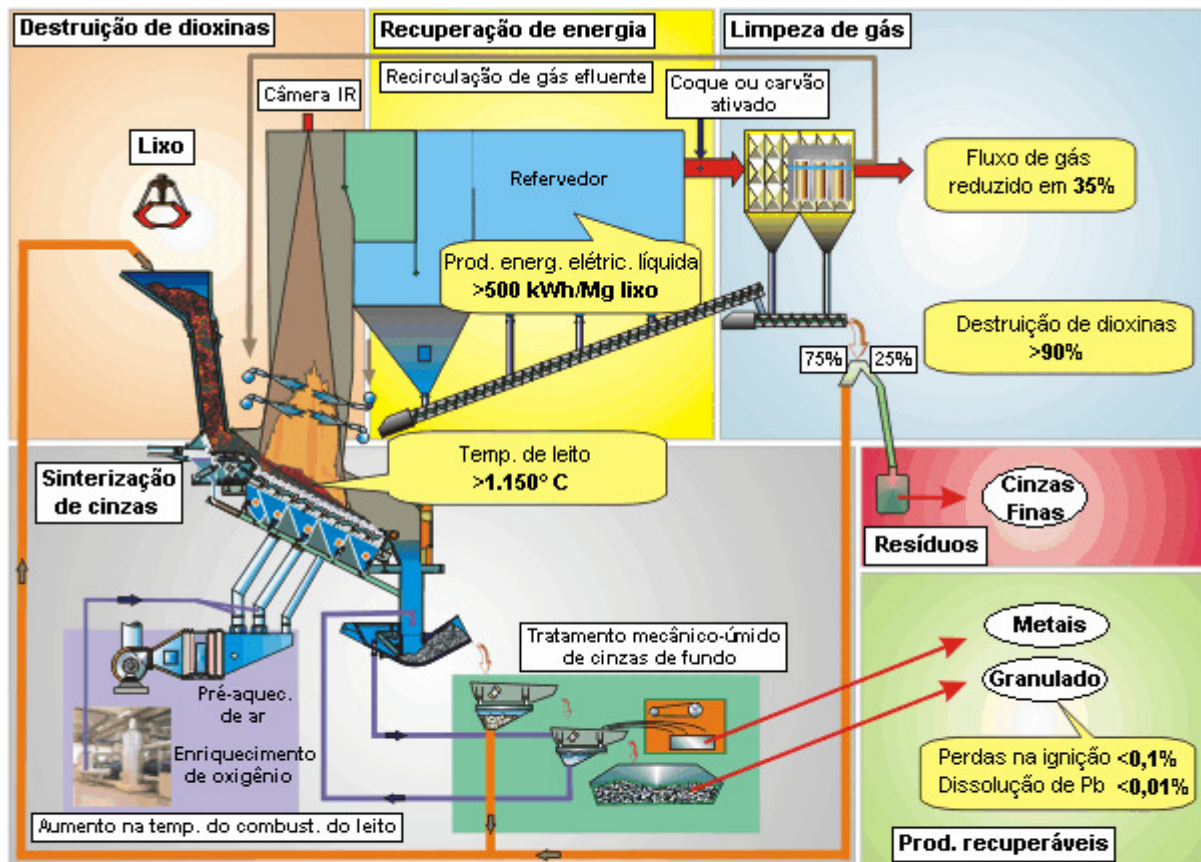
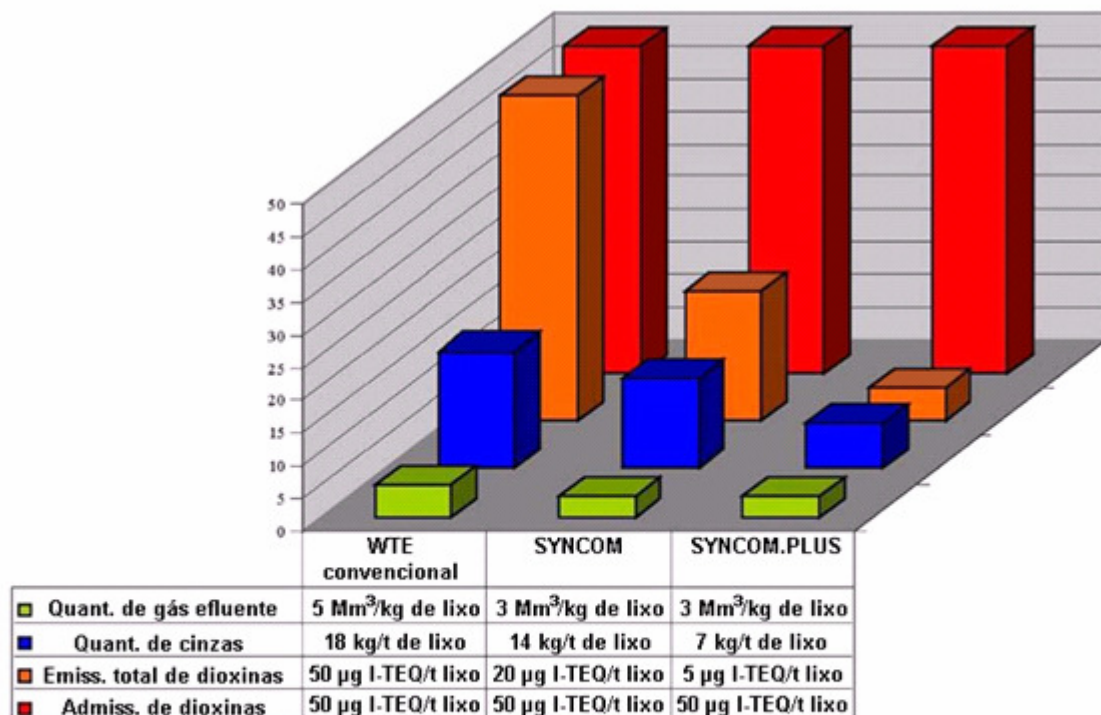


Figura 54 - Processo SYNCOM PLUS da Martin GmbH.


Fonte: http://www.martingmbh.de/index_en.php?level=2&CatID=6.73&inhalt_id=60

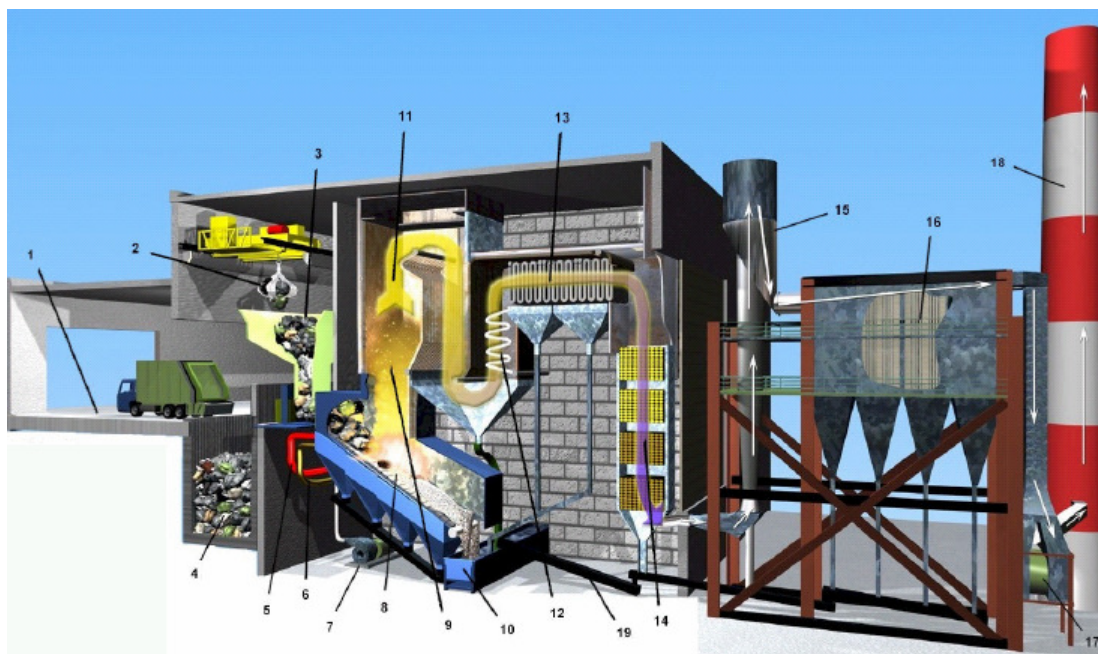
Pode-se notar a grande redução nas emissões de poluentes como dioxinas e chumbo além da melhor qualidade das cinzas que saem já sinterizadas do forno.

Figura 55 - Comparação dos processos convencional e SYNCOM PLUS em relação ao volume de gases, volume das cinzas e emissão total de dioxinas.



2.5.4.2. Barlow

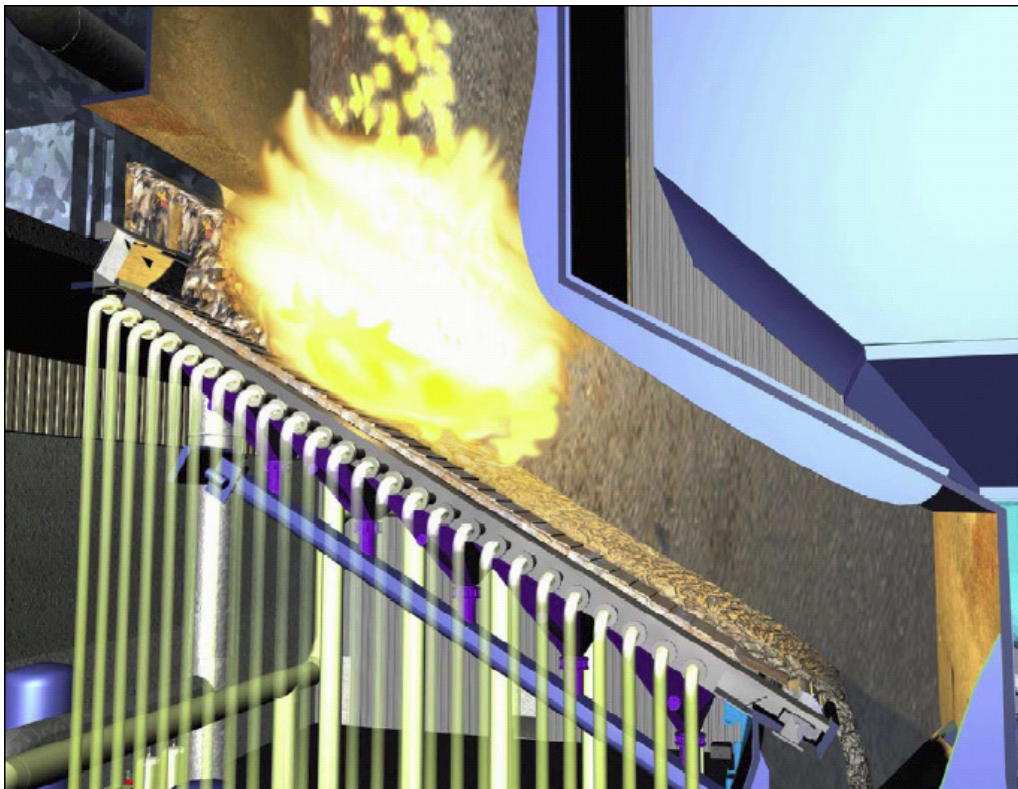
Barlow Projects, inc. é uma empresa texana que desenvolve projetos de energia renovável pelo mundo. A companhia foi formada em 1994 para desenvolver plantas de incineração que utilizam o seu sistema proprietário Aireal®, conforme mostrado na Figura 56.

Figura 56 - Modelo de planta de incineração da Barlow.

Fonte: www.barlowprojects.com.

O Sistema Aireal® (Figura 57) - patente U.S 5.044.288 - é um sistema de incineração de lixo, patenteado da Barlow, cuja inovação é um subsistema de injeção de gás combustível e ar pela superfície da grelha. Este subsistema promove o deslocamento da carga ao longo da grelha e aumenta as taxas de combustão – através de uma homogeneização e mistura da carga com o ar e um pré-aquecimento para a retirada da umidade. A injeção de gás combustível é controlada para cada orifício, permitindo que se criem zonas diferenciadas de combustão ao longo da superfície da grelha. O controle da quantidade de ar é um requisito para que se promova a completa combustão dos componentes voláteis do RSU. O Sistema Aireal não possui partes móveis, o que reduz consideravelmente os custos com a manutenção periódica.

A empresa afirma que o seu sistema consegue uma redução de volume do lixo queimado de até 90% em peso e emissões de CO nos gases de combustão em torno de 15 a 40 ppm.

Figura 57 - Sistema Aireal®.

Fonte: www.barlowprojects.com.

As plantas de incineração da Barlow contam com recuperação de calor dos gases gerados na combustão e um controle rígido da qualidade dos gases de saída, de acordo com a Legislação Americana. Sistema de recuperação de metais dos RSU é opcional.

A Barlow executa serviços de reforma e aprimoramento em pequenas plantas de incineração municipais. A seguir as características de duas plantas que utilizam o Sistema Aireal (Tabela 34e Tabela 35).

Tabela 34 - Dados da Planta de Perham.

Planta de Recuperação de Perham	
Área de atuação	Regiões de Otter Tail, Todd & Wadena e Comissão tri-regional de Resíduos Sólidos
Dono e operador	Cidade de Perham, Minesota
Termo de contrato	20 anos
Financiamento	Recursos municipais e doação de US\$3 Milhões do "Minnesota Office of Environmental Assistance"
Sistema de combustão	AIREAL® Combustion System
Linhas de processo	2
Capacidade	116 t/dia
Produção	4,5 MW com geração (2,5 MW com a queima de RSU somente)
Comprador de energia elétrica	Otter Tail Power Company
Produção de vapor	38.000 lb/hora ou 75.000 lb/hora com refeedor auxiliar.
Comprador de vapor	Tuffy's Pet Foods & Bongard's Creamery
Recuperação de materiais	Sistema de recuperação de metais da pós-combustão
Controle de qualidade do ar	Sistema de injeção de adsorvente, injeção de carbono ativado, filtros de tela, controle de emissões
Capacidade de armazenamento	4 dias (450 toneladas)
Empregados	13
Término de retrofit/início de operação	04/01/2002

Fonte: <http://www.barlowprojects.com/PerhamSS.pdf>.

Tabela 35 - Dados da Planta de Harrisonburg.

Planta de Recuperação de Harrisonburg	
Área de atuação	Cidades de Harrisonburg e Rockingham County, Virginia
Dono e operador	Cidade de Harrisonburg, Virginia
Financiamento	Recursos municipais
Sistema de combustão	AIREAL® Combustion System
Linhas de processo	2
Capacidade formal	100 t/dia
Capacidade corrente	200 t/dia
Produção de vapor	57.000 lb/hora
Comprador de vapor	Universidade James Madison
Recuperação de materiais	Sistema de recuperação de metais da pós-combustão
Controle de qualidade do ar	Sistema de injeção de adsorvente, injeção de carbono ativado, filtros de tela, controle de emissões
Capacidade de armazenamento	3 dias
Empregados	20
Término de retrofit/início de operação	03/2004

Fonte: <http://www.barlowprojects.com/HarrisonburgSS.pdf>.

2.5.4.3. Outras empresas

i. Von Roll Inova

Empresa suíça que desenvolveu um sistema de incineração de resíduos. Em 2004 executou uma reforma na usina holandesa de Moerjijk que, agora, incinera lixo e usa gás natural em ciclo combinado, semelhante à usina de Bilbao. Esta usina gera mais de 400 MWe incinerando 636.000 t/ano de RSU, além do gás natural. Também possui uma planta em Ohio, EUA, para destruição de resíduos tóxicos.

ii. American Ref-Fuel

Empresa americana que opera grandes usinas WTE entre elas SEMASS, nos EUA, queimando 3.000 t/dia e gerando 75 MWe.

iii. Wheelabrator Technologies

Opera 16 plantas nos EUA, é subsidiária da Waste Management a maior empresa americana de tratamento de resíduos.

A **usina austríaca de Arnoldstein**, a primeira a usar o processo SYNCOM da Martin, custou 75 milhões de euros e processa 90.000 t/ano, então seu custo unitário é 833 euros/t/ano, mostrando que o processo, embora excelente, custe muito caro. Esta planta gera 5 MWe e seu custo típico é de €15.000/kW.

A **usina da americana SEMASS** custou US\$ 400 milhões e incinera 900.000 t/ano, dando US\$ 444/t/ano. A usina gera 75 MWe e o custo é US\$ 5.300/kW.

Os exemplos permitem verificar a importância do fator escala para usinas WTE, ou seja, pequenas usinas têm custo unitário muito superior.

Para ter uma idéia dos custos das usinas WTE, a Martin apresentou em 2004 a tendência em torno de €500-600/t/ano.

Já a **usina de Bilbao**, que consorcia tecnologias para obter o ciclo combinado, custou 155 milhões de euros e incinera 230.000 t/ano, levando seu custo a 674 euros/t/ano. Como Bilbao gera 94 MWe, o custo por kW instalado é €1.650/kW.

De qualquer modo fica bastante claro que usinas WTE no Brasil para serem viáveis devem seguir a linha de consorciar gás natural com o lixo, além de usar tecnologias que embora seguras tenham seu custo menor no Brasil.

Outra empresa a destacar é a **canadense Naanovo** (<http://www.naanovo.com/>), com tecnologia sueca (Anovo AB), que fabrica plantas modulares de incineração de RSU processando 180 t/dia. Através de uma turbina a vapor que gera energia com vapor de baixa temperatura ("Low Temperature Turbine – LTT"), informa extrair 0,8 MWh por tonelada de lixo, tornando-se a usina de incineração convencional com melhor desempenho. No site da empresa, uma análise econômica da planta padrão mostra que o projeto se paga em cinco anos com a venda da energia elétrica a US\$ 50/MWh e taxa de lixo de US\$ 40/t. A Naanovo anuncia que está construindo duas usinas de incineração de RSU no Peru, ambas com capacidade para processar 900 t/dia (5 módulos) com capacidade instalada de 30 MWe. As prefeituras locais (Calango Canete e Huarochiri Matucana) assinaram PPA's de 20 anos para viabilizar os projetos. A empresa também assinou contrato para construir no México uma usina WTE de 12 módulos (2.160 ton /dia gerando 72 MWe) em parceria com a americana IPWG com custo de 300 milhões de dólares. O custo de capital é dos mais baixos US\$ 380/t/ano. A empresa afirma que com adequada manutenção a usina poderá operar por 75 anos.

2.6. Tecnologias de Conversão Avançadas - Hidrólise Ácida, Gaseificação/Pirólise, Craqueamento Catalítico (Combustíveis).

As tecnologias de conversão apresentam um futuro promissor, embora a maioria ainda esteja em fase piloto (Weitz, WTER 2004). O objetivo é a produção comercial, em especial de combustíveis, a partir de resíduos. Os principais produtos destas tecnologias são: etanol, diesel, gasolina e gás de síntese (syngas), sendo que alguns processos permitem a obtenção de outros produtos valiosos como adubo, catalisadores, combustíveis sólidos, etc.

Os processos de conversão dos RSU podem ser divididos em três grandes grupos:

1. Processos Termoquímicos: caracterizados pelas altas temperaturas e altas taxas de transformação.
 - Gaseificação/Pirólise.
 - Craqueamento Catalítico.
 - Arco de Plasma.
2. Processos Bioquímicos: caracterizados pelas temperaturas mais baixas e taxas de transformação mais lentas.
 - Digestão Anaeróbica.
 - Fermentação para Geração de Etanol.
 - Hidrólise Ácida.
3. Processos Físico-químicos: não serão analisados neste trabalho, pois são aplicáveis a diversas matérias primas além dos RSU, sendo largamente empregados em todo o mundo.
 - Geração de Biodiesel.
 - Destilação.

Neste capítulo serão consideradas apenas as técnicas mais promissoras de acordo com recente estudo realizado pela RTI International, Universidade da Califórnia e National Renewable Energy Laboratory (NREL) nos EUA, encomendado pelo California Integrated Waste Management Board. Este estudo compara o ciclo de vida completo de diversas tecnologias para gerenciamento de RSU e considera as seguintes tecnologias avançadas de conversão: hidrólise ácida, gaseificação/pirólise e craqueamento catalítico. As conclusões deste estudo serão apresentadas no final do trabalho.

A digestão anaeróbica, pela sua importância e imediata aplicabilidade em escala comercial, será tratada em capítulo separado neste trabalho.

O processo de arco de plasma para tratamento de RSU por estar em estágio incipiente, limitado a plantas de pesquisa e com custo elevado, também será abordado em capítulo separado.

2.6.1. Hidrólise Ácida.

Basicamente consiste na separação da lignina e da celulose nos resíduos celulósicos (papel, rejeitos de origem vegetal, etc...), através de uma lixívia ácida onde a parte celulósica sofre hidrólise, se convertendo a açúcares simples e solúveis (pentoses e hexoses). Estes açúcares são, então, separados da parte insolúvel, a lignina, para posterior fermentação.

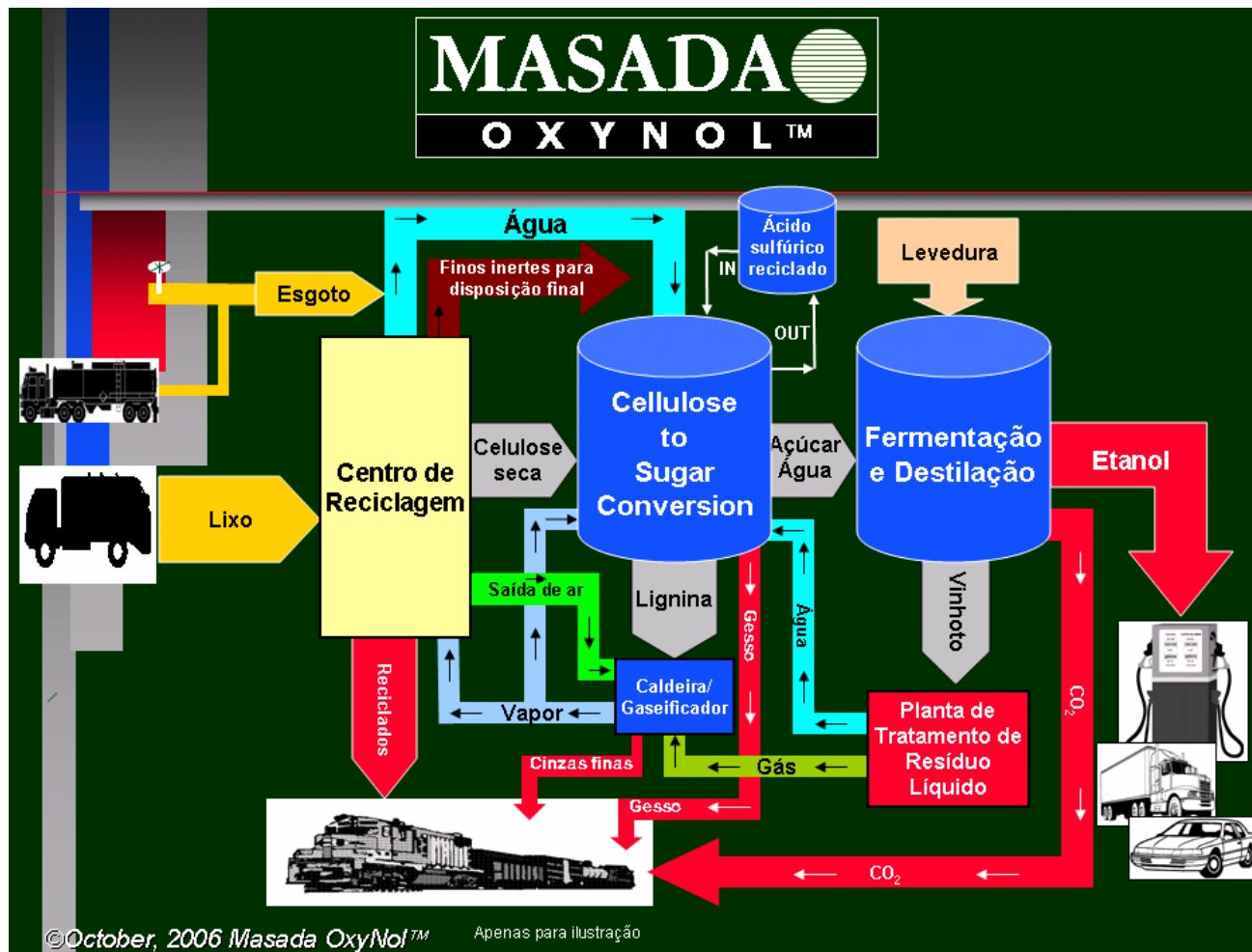
2.6.1.1. Processos e Empresas.

Entre os diversos processos disponíveis, cabe destacar o CES OxyNol™ da empresa **MASADA** (<http://www.masada.com>) e a Hidrólise Ácida Concentrada da **ARKENOL** (<http://www.arkenol.com>). Ambos os processos diluem os resíduos transformados em celulose seca com ácido sulfúrico, produzindo açúcares e lignina (combustível sólido). Os açúcares podem ser fermentados com levedura para produzir etanol ou diretamente convertidos em outros produtos (biorefinaria). No Brasil existe um projeto piloto na empresa **RM Materiais Refratários** na cidade de Lorena, São Paulo, subsidiária do Grupo Peixoto de Castro. O processo denominado BEM (Biomassa-Energia-Materiais) tem concepção semelhante aos processos descritos acima utilizando os RSU consorciados a madeira (50% RSU e 50% madeira ou 33% RSU e 66% madeira) para produzir lignina e furfural, substituto dos intermediários petroquímicos, tais como: etileno, propileno, benzeno, etc. na produção de resinas e polímeros, solventes e extratantes na indústria de óleos lubrificantes e borracha sintética bem como alguns medicamento, proteínas (lisina) e inseticidas.

O processo patenteado da MASADA, CES OxyNol™ (Figura 58), após remover vidros, plásticos e metais recicláveis, converte a celulose e bio-sólidos contidos nos RSU em açúcares simples, principalmente glicose, além de lignina. Estes açúcares são então fermentados para produzir etanol que é destilado para atingir as especificações do mercado. O processo consegue uma eficiência de até 90% de reciclagem em massa. A empresa planeja a construção de uma planta comercial na cidade de Middletown, New York, para 230.000 t/ano de RSU visando à reciclagem e a produção de etanol (120 litros/t lixo). Os metais pesados contidos nos RSU são inertizados no gesso produzido no processo de conversão da celulose. Este gesso poderá ser usado como

material de construção ou colocado em aterros. A maior parte das receitas da planta virá da taxa de lixo e não da venda dos produtos.

Figura 58 - Hidrólise Ácida – Processo MASADA.



Fonte: Judge, 2006 (<http://www.eng.auburn.edu/altenergy/ppt/Judge-Masada.ppt>)

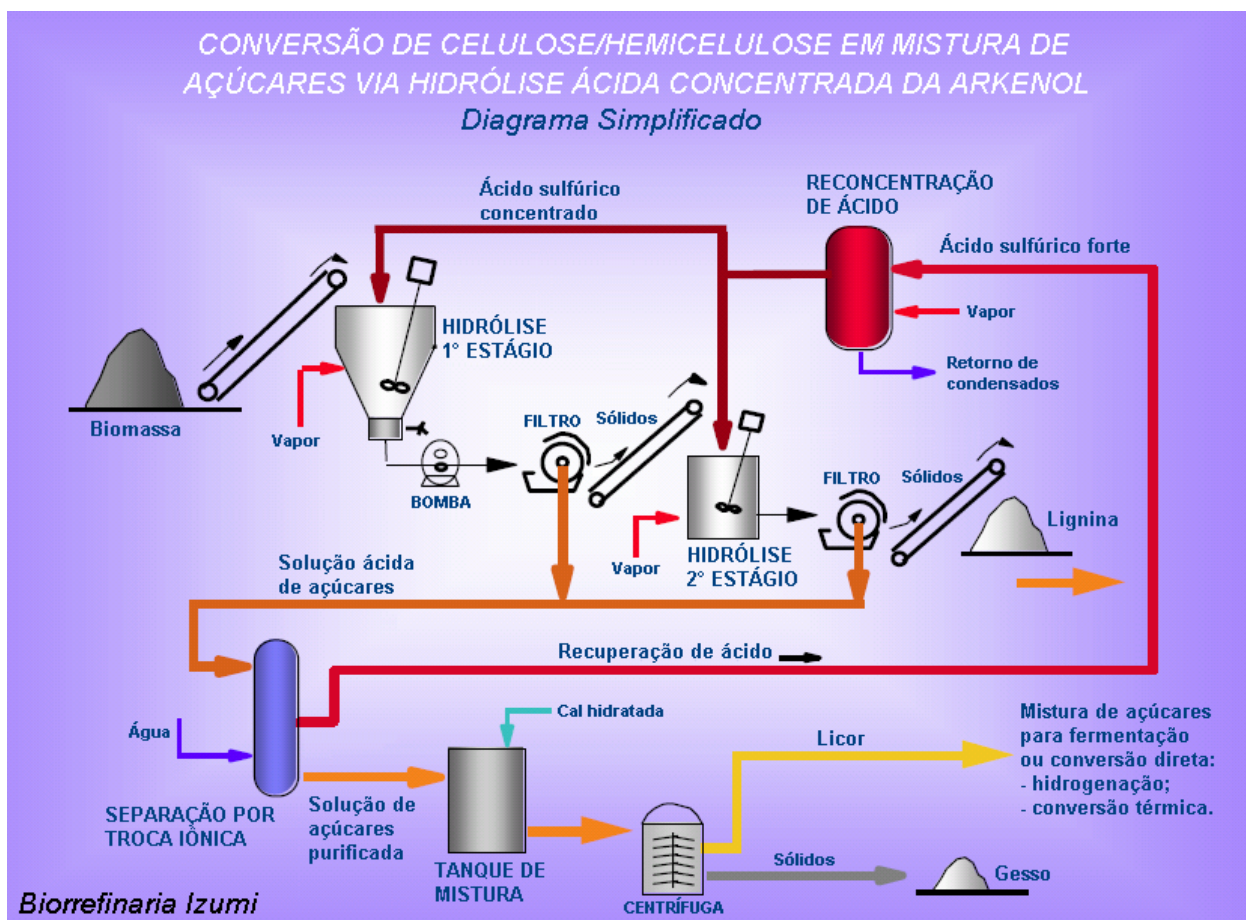
A Hidrólise Ácida Concentrada da Arkenol separa os açúcares da lixívia ácida através de um sistema de troca iônica, produzindo uma solução ácida concentrada e uma solução levemente ácida, contendo os açúcares. O ácido é reconcentrado e reciclado ao processo, enquanto a solução levemente ácida com os açúcares é neutralizada com cal hidratada, sendo o gesso formado separado depois. Ao término do processo, os açúcares se encontram em solução aquosa, pronta para a etapa da fermentação. A Arkenol afirma que o processo consegue recuperar até 98% dos açúcares durante a etapa de separação destes da lixívia ácida.

Além da fermentação, a empresa usa processos químicos para produzir diversos outros produtos comerciais além do etanol (255 litros/t lixo seco – equivalente ao processo Masada que é na base úmida). A empresa qualifica o processo como sendo uma biorefinaria. A

companhia está tentando financiamento para a construção da primeira planta comercial na cidade de Sacramento, Califórnia. A usina pretende usar como insumo principal palha de arroz para produzir etanol, ácido cítrico e zeólitas ZSM (silicato de alumínio usado como catalisador e absorvente na indústria química e de petróleo). A empresa possui uma planta-piloto próxima a sua Sede no sul da Califórnia processando uma tonelada/dia de biomassa.

A JGC Corporation e a NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Center), duas companhias japonesas, firmaram acordo com a Blue Fire Ethanol, companhia que é responsável pelos direitos relativos ao uso do processo patenteado da Arkenol, para construírem uma planta de produção de etanol segundo o processo, em Izumi, distrito do Japão. A Biorefinaria Izumi foi inaugurada em 2001 e tem-se mantido operacional desde 2002. Nela é usado, como insumo principal, resíduos de madeira, com um consumo de biomassa de até 2 t/dia. A capacidade de produção chegou a um valor ótimo de 300 litros/dia em Março de 2004. O etanol produzido é usado pelo governo japonês em testes de viabilidade de misturas E3 (3% de etanol na gasolina) (fonte: <http://www.bluefireethanol.com/facilities/>). A Figura 59 mostra o sistema.

Figura 59 - Hidrólise Ácida Concentrada – Processo Arkenol.



Fonte: http://www.bluefireethanol.com/images/IZUMI_Status_2004_for_BlueFire_051606.pdf

Uma planta hipotética para produção de etanol apenas teria o balanço de entradas e saídas segundo a Tabela 35, a seguir.

Tabela 35 - Balanço material e de energia de usina hipotética – Processo Arkenol.

Entradas	
Biomassa	454 t secas/dia
Acido Sulfúrico	21.45 t/d
Cal	8.25 t/d
Eletricidade	5,000 kW
Vapor	61,700 kg/hora
Saídas	
Etanol	227,000 litros/dia
Dióxido de Carbono	172.5 t/d
Lignina (50% umidade)	136.2 t/d
Gesso (40% umidade)	27.2 t/d
Levedura (80% umidade)	45.2 t/d

Fonte: <http://www.arkenol.com/Arkenol%20Inc/tech01.html>

A usina poderia produzir seu próprio vapor usando a lignina e/ou gás natural nas caldeiras. Caso a planta fosse instalada próxima a uma usina de co-geração poderia usar o vapor diretamente sem as emissões da combustão.

2.6.1.2. Viabilidades Técnica, Ambiental e Econômica.

Nenhum dos processos considerados existe em escala comercial para tratamento de RSU. Embora seus proprietários afirmem que seus processos são adequados para gerenciamento do lixo urbano, todos estão tendo problemas para implantar suas usinas.

Nenhum dos processos aborda em profundidade o problema dos poluentes presentes nos RSU especialmente os metais pesados, partindo do princípio que o lixo já chega separado e com a fração orgânica, a ser processada, livre de poluentes.

As empresas Masada e Arkenol não fornecem informações sobre o custo das usinas sendo necessário aguardar a finalização das plantas comerciais para estudos de viabilidade econômica.

2.6.1.3. Vantagens e Desvantagens.

Vantagens

- Transforma lixo orgânico em combustível renovável.
- Produz combustível sólido que pode ser usado em caldeiras convencionais ou mesmo em turbinas a gás especiais.
- Tecnologia comprovada para biomassa

Desvantagens

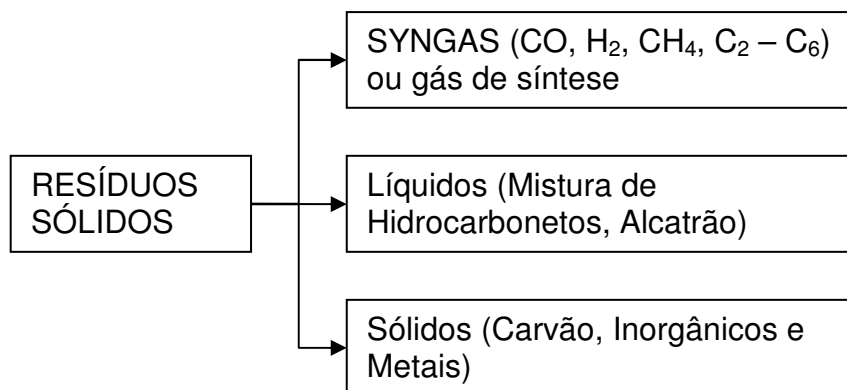
- Viabilidade econômica depende de elevadas taxas de lixo.
- Não contempla o tratamento de poluentes que podem estar presentes mesmo na fração puramente orgânica do lixo.
- Necessita tratamento prévio dos RSU.
- Não existem plantas comerciais para processamento de RSU.

2.6.2. GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE.

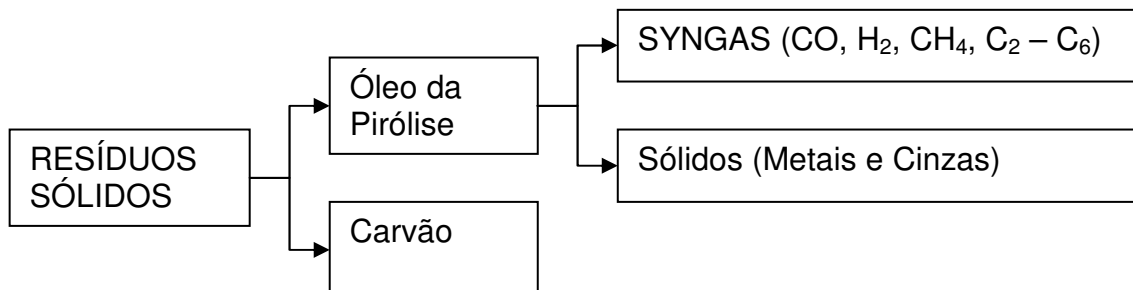
A gaseificação procura corrigir o problema fundamental da incineração, qual seja, os sólidos e os gases estarem sempre juntos no processo – o que dificulta a remoção dos poluentes. A gaseificação divide o processo em dois estágios, permitindo a eliminação dos poluentes antes da combustão do gás resultante.

A gaseificação de madeira e carvão é um processo comprovado, que permite a utilização limpa destes combustíveis considerados sujos. Antes do gás natural a gaseificação do carvão era usada para iluminação. A gaseificação dos RSU é mais complicada, pois o lixo é muito heterogêneo, possui baixo poder calorífico e a composição química é mais diversa, pois além de hidrogênio, carbono e oxigênio estão presentes flúor, cloro e bromo.

A pirólise é definida como a degradação térmica da matéria orgânica na ausência de oxigênio. As temperaturas variam entre 400-800°C e as reações químicas são endotérmicas, isto é, consomem energia e necessitam de aquecimento externo. Esquemáticamente é possível representar a pirólise como mostrado na Figura 60, a seguir:

Figura 60 - Esquema de representação da Pirólise

Na gaseificação existe uma carência (ao invés de ausência) de oxigênio ocorrendo a oxidação parcial da matéria orgânica. A maior parte do carbono é convertida em syngas pelo agente gaseificador (ar, O₂ e H₂O). As temperaturas do processo variam entre 900 e 1100°C e as reações químicas são exotérmicas do tipo $C \rightarrow CO$ e $C \rightarrow CO_2$. Esquemáticamente isto está representado na Figura 61, a seguir:

Figura 61 - Representação esquemática da gaseificação.

O gás de síntese (SYNGAS) da pirólise é mais rico em metano do que o de gaseificação, que contém principalmente monóxido de carbono e hidrogênio, com pequena quantidade de metano. A principal diferença entre a incineração convencional e a pirólise/gaseificação está apresentada na Tabela 36, a seguir:

Tabela 36 - Diferenças entre as tecnologias de incineração, pirólise e gaseificação

Quanto à utilização de oxigênio	Incineração utiliza excesso; pirólise não utiliza e gaseificação utiliza atmosfera pobre em oxigênio.
Quanto à ocorrência da reação e da oxidação em câmaras	Incineração e oxidação térmica ocorrem na mesma câmara; pirólise/gaseificação e oxidação térmica ocorrem em câmaras distintas.

2.6.2.1. Processos e Empresas

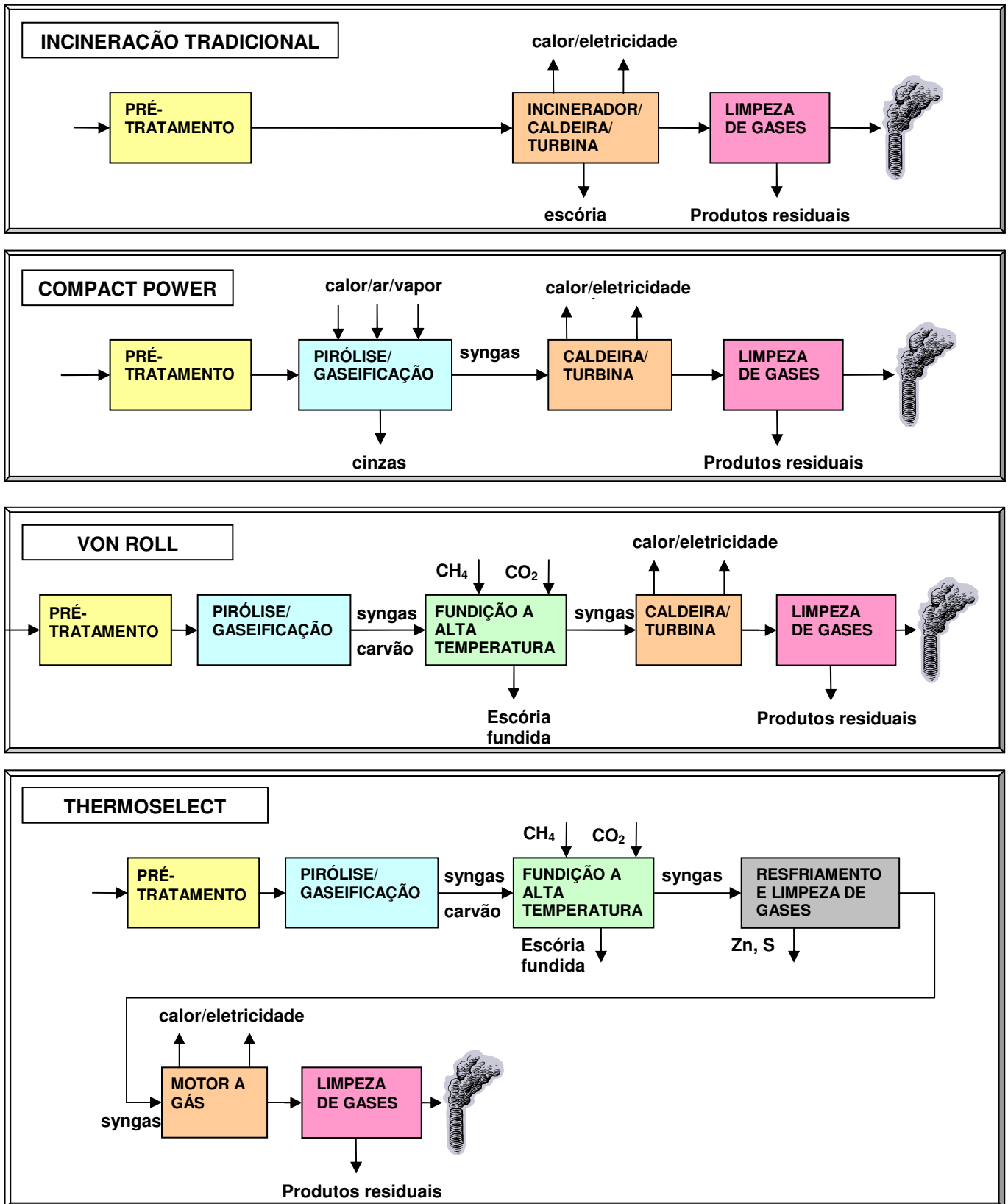
Na Figura 62 abaixo estão ilustrados alguns processos e seus proprietários:

Compact Power: planta de demonstração no subúrbio de Avonmouth, em Bristol, Reino Unido, com capacidade de processar 30 t/h de RSU.

Von Roll: a empresa, sediada em Zurique na Suíça, é especializada em grandes usinas de incineração de RSU. Construiu uma planta de demonstração para validar seu processo denominado Von Roll RCP. O processo também é descrito no endereço <http://www.vonrollnova.ch/site/english/index.html>

Thermoselect: empresa sediada na Suíça que possui usina experimental em Fondotoce, Itália, além de uma grande planta comercial com três linhas de processamento em Karlsruhe, Alemanha e duas no Japão. A planta de Karlsruhe é uma das maiores plantas de tratamento de lixo por gaseificação no mundo, projetada para processar 225.000 t/ano de RSU. Ela foi inaugurada em 1999, operou em fase de teste de 1999 a 2002 e comercialmente de 2002 a 2004, ano em que ela foi fechada.

Figura 62 - Processos Proprietários de Gaseificação



Outro processo de gaseificação/pirólise que merece destaque é o SWERF (**S**olid **W**aste and **E**nergy **R**ecycling **F**acility) da empresa Brightstar Environmental, uma subsidiária da

multinacional australiana Energy Developments Limited (EDL). O processo é descrito em <http://www.brightstarencvironmental.com/html/Swerf.htm> e pode ser resumido nas fases abaixo:

1. Pré-tratamento e Separação dos RSU.

Os RSU são recebidos e esterilizados a vapor em uma autoclave e, então, sofrem processos de separação mecânica (peneiras, separação magnética, etc.). Metal, plásticos e outros recicláveis são separados e a polpa orgânica restante é lavada para a remoção de vidro e areia, que podem ser processados para uso em outras aplicações. A polpa lavada é submetida à secagem como preparação para a conversão térmica.

2. Conversão Térmica Avançada.

Conversão térmica, comumente conhecida como gaseificação, é o próximo estágio do processo. A polpa orgânica seca é introduzida em um gaseificador de alta temperatura. A ausência de ar no tubo impede a combustão. Este processo converte a polpa seca em combustíveis sintéticos (gás de síntese) e um resíduo sólido que é inerte e pode ser depositado em aterros ou processados para outras aplicações. Os combustíveis sintéticos são purificados para uso em equipamentos para geração de energia.

3. Geração de Energia Elétrica

O processo produz gás sintético que pode ser usado para gerar energia elétrica de maneira similar ao gás de aterro. O gás de síntese ou syngas é composto de metano, hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. A empresa EDL possui larga experiência no uso de motores para combustíveis de baixo PCI, pois possui um módulo de geração de energia elétrica chamado "Series 2000 Power Generation Module", baseado em um motor a gás otimizado para misturas empobrecidas de alta eficiência.

A Brightstar Environmental construiu uma usina na Austrália na cidade de Wollongong, onde atualmente está processando 50.000 toneladas/ano e tem a previsão para chegar a 100.000 toneladas/ano. O processo está enfrentando dificuldades técnicas desde a entrada em operação em 2001. O problema é na unidade de gaseificação. O sócio majoritário, Energy Developments Ltd., está tentando vender sua parte do negócio, o que torna difícil a correção do problema. Mas o processo é considerado promissor com muitas vantagens sobre os demais, caso os problemas técnicos sejam resolvidos. A empresa pretende implementar o processo em duas cidades no Reino Unido. Na cidade de Derby, inicialmente processando 50.000 toneladas/ano e

produzindo 5 MWe, em fase de obtenção das licenças. Outro projeto na cidade de Kent, para 165.000 toneladas/ano, está em fase de planejamento.

A empresa não fornece informações sobre o custo dos projetos, apenas cita os benefícios ambientais e as Instituições (governamentais) que estão financiando as usinas.

2.6.2.2. Viabilidades Técnica, Ambiental e Econômica.

A grande maioria das plantas de gaseificação/pirólise de RSU está no Japão. Estas plantas processam aproximadamente 16.500 t/dia. As principais empresas são Ebara, Nippon Steel Corporation, Mitsui e Kawasaki Steel. As plantas de gaseificação/pirólise têm apresentado deficiências importantes, principalmente no aspecto de pré-tratamento dos RSU, limpeza dos gases liberados para o meio ambiente e/ou na parte financeira. Estes problemas têm sido maiores na Europa onde a Siemens, proprietária de um processo de pirólise pura, abandonou o mercado europeu após sério acidente na usina de Fürth, na Alemanha. O acidente foi causado por entupimento na câmara de pirólise pelo lixo que elevou a pressão causando liberação dos gases. Vários funcionários foram hospitalizados e a causa foi à falta de pré-tratamento adequado dos RSU, especialmente a moagem, pois a planta introduzia itens como colchões inteiros na câmara. A Mitsui, licenciada Siemens no Japão, possui melhor histórico com seis plantas em operação, processando cerca de 1528 t/dia desde 2000, produzindo cerca de 405 kWh elétricos por tonelada de RSU. As usinas da Mitsui possuem inúmeros melhoramentos do processo original da Siemens isto explica o melhor desempenho das usinas japonesas.

A usina de Karlsruhe, da Thermosteel, também vinha apresentando problemas de operação, desde a sua fase de testes, que fizeram com que viesse processando apenas um quinto do lixo oriundo de cidades com as quais tinha contrato, forçando estas a dar outro destino para o lixo não processado. Um dos problemas era a purificação não eficiente dos gases de saída, que vinham apresentando teores de compostos NO_x , TOC ("Total Organic Carbon" – total de carbono orgânico) em níveis acima dos permitidos e a presença de outros compostos tóxicos, tais como as dioxinas. Os problemas de operação acabaram refletindo na eficiência energética do processo. Em 2002, a usina consumiu 17 milhões de m^3 de gás para o aquecimento na câmara de gaseificação e não houve retorno energético para a rede. Os problemas da usina Karlsruhe levaram ao fechamento desta em 2004 e ao questionamento da eficiência da operação das outras usinas da Thermosteel. A empresa agora enfrenta dificuldades em fundar novas plantas na Europa.

A Thermosteel, cujo parceiro original era a Kawasaki Steel, tem a JFE como atual licenciada no Japão e a Interstate Waste Technology nos EUA.

A australiana Brighstar também apresenta problemas técnicos desde o início da operação em 2001 na sua usina em Wollongong. Diversos problemas na fase de testes impediram a planta de passar para a operação comercial; a maioria devido à limpeza ineficiente dos gases de saída, que continham níveis não permitidos de NO_x e a presença de compostos tóxicos, como halogênios, dioxinas, metais pesados, etc. Finalmente deve-se mencionar a usina da SVZ, atualmente subsidiária da americana Global Energy, Inc., na localidade de Schwarze Pumpe na antiga Alemanha Oriental, uma das maiores do mundo (gaseificação), processando 450.000 t/ano de resíduos dos mais variados tipos. A usina produz 75 MWe e 300 t/d de metanol.

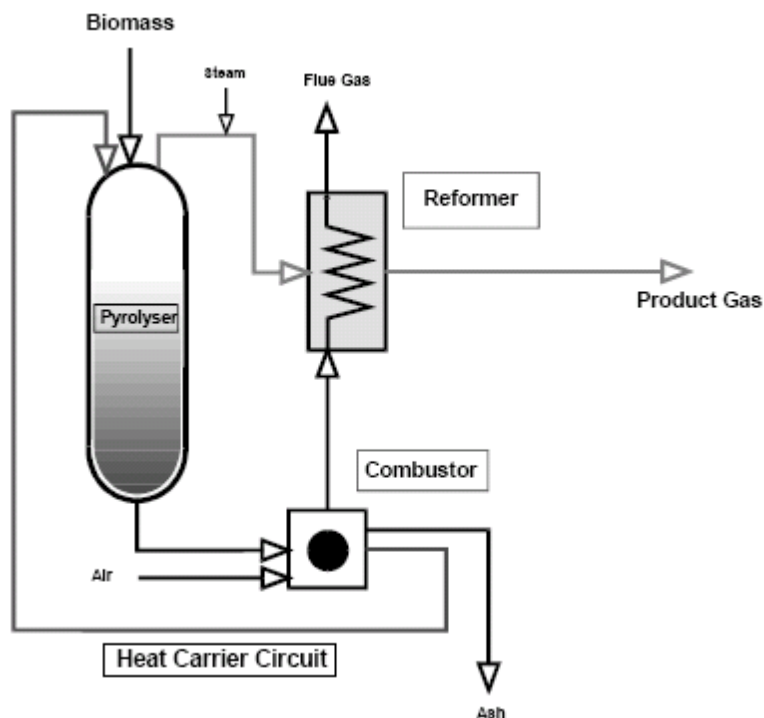
A viabilidade econômica destas usinas depende de elevadas taxas de lixo como as do Japão, que podem atingir US\$ 150/t. Isto talvez explique a razão da melhor performance destas usinas no Japão do que na Europa, embora seja consenso que a tecnologia é uma das mais promissoras.

Reforma em Estágio

O Processo de Reforma em Estágio (DMT Staged Reforming) é processo de produção de gás de síntese a partir de resíduo orgânico, desenvolvido pelo Dr. H.J. Muhlen, da DMT GmbH. O processo pode ser descrito de forma simplificada como uma gaseificação de matéria orgânica, semelhante à usada nos processos descritos anteriormente, porém com posterior reforma do gás de gaseificação gerado, o que aumenta a porcentagem dos componentes principais do gás de síntese, H_2 e CO , enriquecendo o produto final.

Um diagrama do processo básico é mostrado na Figura 63. A matéria orgânica ou biomassa, que pode estar tanto seca ou úmida, é gaseificada em um reator de gaseificação de leito fluidizado. No reator são produzidos o gás de gaseificação e o "pirocoque" (um condensado orgânico não totalmente gaseificado). O "pirocoque" e o material do leito fluidizado saem do reator e são transportados, em seguida, para um queimador, onde o "pirocoque" é posteriormente queimado, gerando gás de queima e calor. O gás de gaseificação que sai do gaseificador e o gás de queima quente, gerado no queimador, são encaminhados para o reformador, basicamente um trocador de calor, em duas linhas distintas. Dentro do reformador, o calor transferido da linha do gás da queima para a linha do gás de gaseificação irá promover as reações de reforma deste gás, convertendo-o em gás de síntese enriquecido. O processo permite que se use catalisadores na linha do gás de gaseificação, dentro do reformador ou imediatamente após este, aumentando o rendimento das reações da reforma. O material do leito fluidizado é reciclado ao final do processo.

Figura 63 - Diagrama esquemático do processo de Reforma em Estágio.



Fonte: <http://www.pacificjunction.com/blue/staged%20reforming%20WP.pdf>

A Tabela 37 mostra a composição esperada do gás de síntese para uma carga de material lenhoso.

Tabela 37 - Composição do gás de síntese do processo.

Espécies	% (base úmida)	% (base seca)
H ₂	43,63	56,68
CO	14,10	18,32
CO ₂	18,09	23,50
CH ₄ e HC(s)	1,15	1,50
H ₂ O	23,03	0

Fonte: <http://www.pacificjunction.com/blue/staged%20reforming%20WP.pdf>

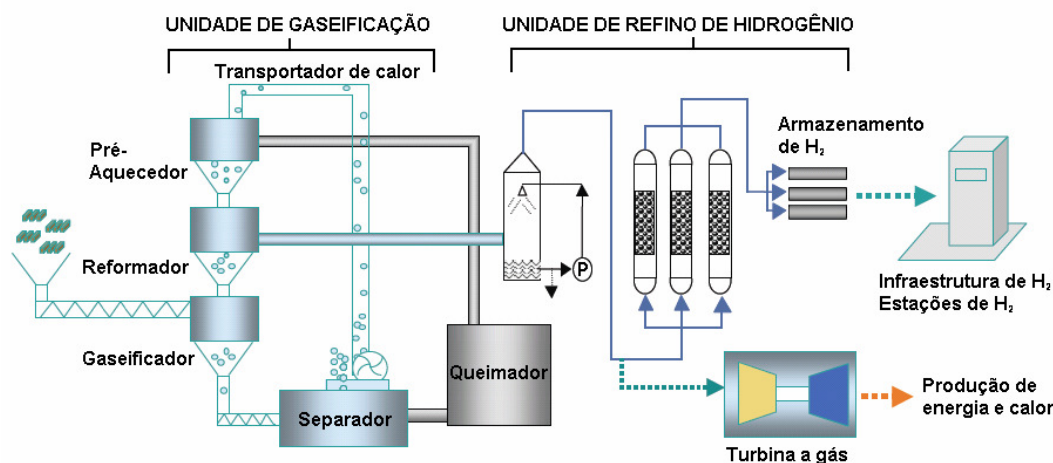
O valor calorífico chega a 9MJ/Nm³ e a razão H₂/CO é de 3.1.

Baseado no Processo de Reforma em Estágio, a equipe da empresa JPO junto com a Universidade de Ciências de Tóquio desenvolveu o projeto BLUE (Biomass Local Unit Energy), um projeto de uma usina de produção de hidrogênio a partir de resíduos orgânicos lenhosos. A planta-piloto do projeto, BLUE Tower, fica localizada em Herten, Alemanha. Ela opera a 10 toneladas/dia em base seca e produz 7800 Nm³/dia de H₂ ou o equivalente a 1,6MW_{th} de

potencial calorífico do gás gerado, sem contar com a geração de 460kWh de eletricidade e 300kW de calor. Um esquema do processo da planta está ilustrado na Figura 64.

Figura 64 - Diagrama do processo da planta Blue Tower.

TECNOLOGIA DE REFORMA EM ESTÁGIO E EXTRAÇÃO DE HIDROGÊNIO



COMPOSIÇÃO DO GÁS DE PRODUÇÃO (% VOL)	N ₂	O ₂	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C _x H _y	H ₂ O
Gaseificadores convencionais	45,8	0,0	15,7	8,8	8,6	6,5	4,9	9,5
Gás de produção do processo BLUE	0,0	0,0	18,1	14,1	43,6	1,2	0,0	23,0
Gás de produção do processo (após refino)	0,0	0,0	21,4	16,7	58,5	1,4	0,0	2,0

Fonte: <http://www.pacificjunction.com/blue/Blue%20Project%20E.pdf>

2.6.2.3. Vantagens e Desvantagens.

Podem-se resumir as vantagens e desvantagens da gaseificação/pirólise, como segue abaixo:

Vantagens

1. Menor volume dos gases na estação de limpeza.
2. Reduz volume dos sólidos até 90%.
3. Destruição de patogênicos e matéria putrescível.
4. Melhor controle do que na incineração.
5. Combustível produzido de fácil utilização.

Desvantagens

1. Tecnologia apresenta problemas técnicos para tratamento de RSU.
2. Potencial para os mesmos poluentes presentes na incineração se não forem removidos do SYNGAS.
3. Custo muito elevado dependendo de taxas de lixo elevadas como no Japão.
4. Requer usinas de grande escala.

SEFICO²⁴: A empresa desenvolveu tecnologia de combustão em reator de leito fluidizado, muito semelhante ao reator do processo de Reforma em Estágio. O sistema de combustão de leito fluidizado utiliza um leito aquecido de material silicoso e inerte em suspensão, com uma coluna ascendente de ar para queimar vários tipos de materiais combustíveis. A ação abrasiva do material do leito favorece a combustão ao eliminar a camada de material queimado e de gás carbônico que se forma na superfície das partículas de material combustível do RSU.

O processo patenteado e o reciclo do leito garante uma descida uniforme do material do leito, com limpeza e reinjeção no reator e um resfriamento integrado a ar. Isto permite que se processem materiais contendo partículas de impurezas não-combustíveis.

A turbulência no reator e a inércia calorífica do material do leito promovem uma combustão uniforme e controlada. A alta eficiência térmica dos reatores os torna indicados para tratar de materiais com baixo poder calorífico e com alta taxa de umidade.

O processo tem tratado de uma grande variedade de materiais tais como: RSU municipal não selecionado, resíduo agrícola, esgoto domiciliar e industrial, resíduos lenhosos, pneus, plásticos e carvão. A unidade tem demonstrado a capacidade de tratar diversos tipos de lixo em um único reator.

As emissões de gases de um reator de leito fluidizado são inerentemente menores que as de um reator convencional por diversas razões: as temperaturas baixas e excesso de ar inibem a formação de certos compostos como NO_x ; alta eficiência de combustão inibe a formação de CO ; emissões de NO_x e SO_x podem ser inibidas adicionando-se cal no leito e amônia na câmara de gases.

²⁴ Homepage: <http://www.sefico.com/> acessado em 29/04/2007.

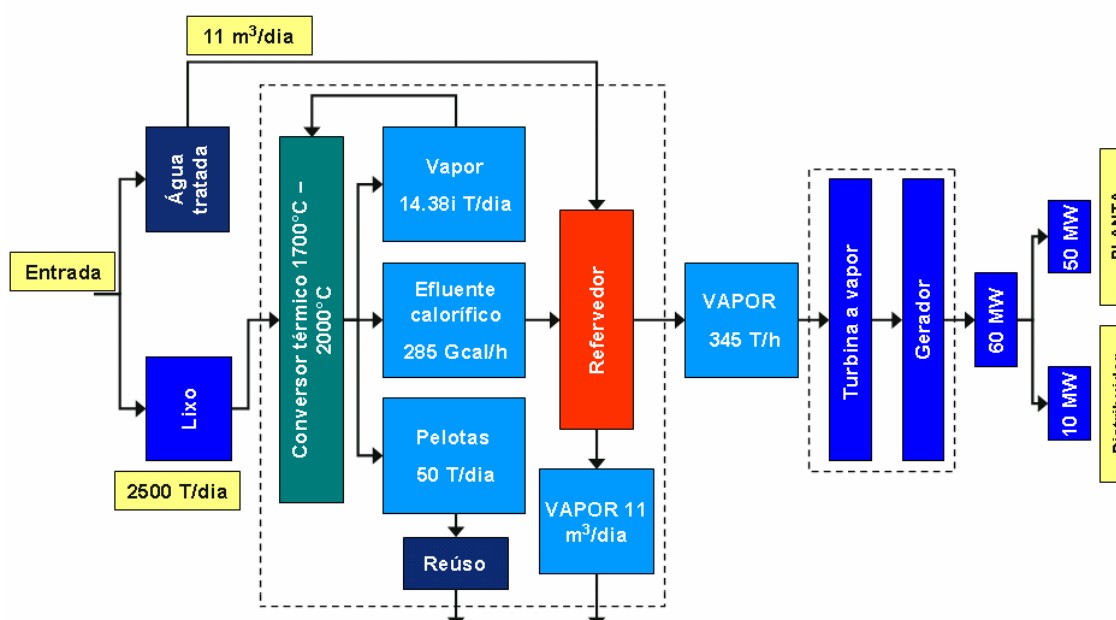
A ausência de partes móveis reduz significativamente os custos de manutenção e o tempo de vida útil dos reatores.

Em fevereiro de 2007, a empresa estabeleceu um consórcio com a brasileira Interport e juntas planejam a construção de usinas de processamento de lixo em diversas cidades brasileiras. De acordo com o diretor da Interport, Gilmar Zanatta, o custo da instalação de uma usina com capacidade de processar 500 toneladas por dia estaria em torno de 120 milhões de reais

Notícias: http://www.moginews.com.br/Web_Users/conteudo/Suplementos/lixao/23.html (05/07/2007).

A Figura 65, a seguir, apresenta o esquema de uma planta da tecnologia SEFICO.

Figura 65 – Esquema de funcionamento da tecnologia SEFICO.



Fonte: http://www.sefico.com/downloads/general_english.ppt

Sua capacidade de aceitação de insumos é variada, mas foi desenvolvida para priorizar pneus. O custo de instalação desta planta é de US\$ 100 milhões, com produção de aproximadamente 1200 MWh/d, 100 t/dia de cinzas, 11 m³/dia de vapor.

A empresa dispõe de uma planta de tratamento de esgoto operando desde 1997 que, atualmente, está em sua terceira expansão. Sua capacidade de processamento é de 10 milhões de galões de esgoto por dia, com um efluente 98% limpo. As demais plantas estão listadas na Tabela 38, a seguir.

Tabela 38 – Lista de empreendimentos da SEFICO.

Planta	Local/país
RECOPE	Costa Rica
PEMEX	México
CEPE	Equador
LAGOVEN	Venezuela
MARAVEN	Venezuela
Porto de Vacamonte	Panamá (linha de petróleo)
Hess Oil	St. Croix, U.S. Virgin Islands
O. P. E. C.	Bonaire, Antilhas Holandesas
PETRO PERÚ	Linha & Estações de Bombeamento Norte-Peruvianas
VERAUX Terminal	Porto Príncipe, Haiti
REYNOLDS ALUMINUM	Miragoane, Haiti
FLORIDA POWER & LIGHT	varias plantas na Flórida
USAICE	Costa Rica
IRHE	Panamá
EMPRESA ELÈCTRICA DE GUATEMALAE	Guatemala
E. M. B.	Barranquilla, Colômbia
MINAS DE POTOSÍ	Bolívia
CEL, Aguachapan Hydroelectric Plant	El Salvador

E outras pelas Américas do Sul e Central e Caribe.

Fonte: http://www.sefico.com/ourexper2_refine.html.

2.6.3. CRAQUEAMENTO CATALÍTICO.

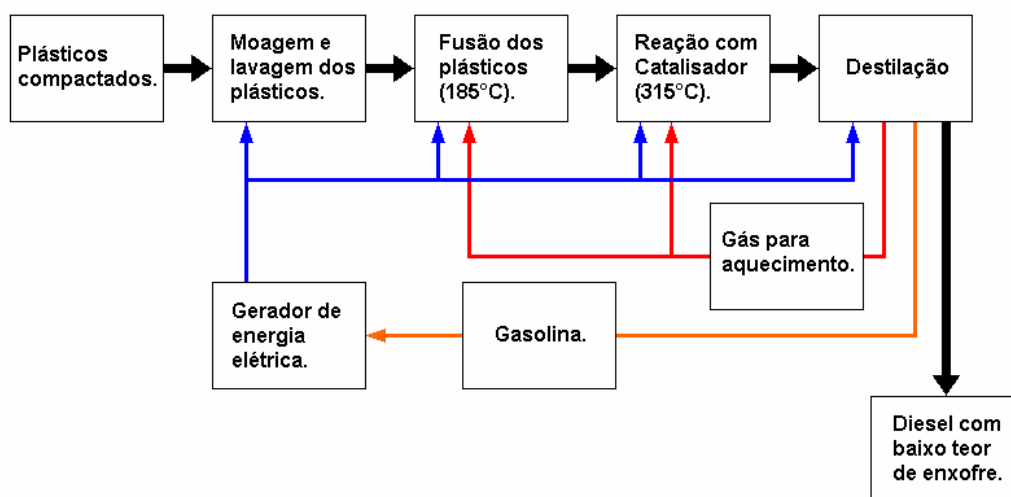
Este processo de conversão térmica (PCT) transforma diretamente o lixo em hidrocarbonetos de petróleo que podem ser refinados para produzir gasolina e diesel. Diferentemente da incineração e gaseificação, não é necessária a eliminação da água contida no lixo, pois a umidade é necessária ao processo.

2.6.3.1. Empresas e Processos.

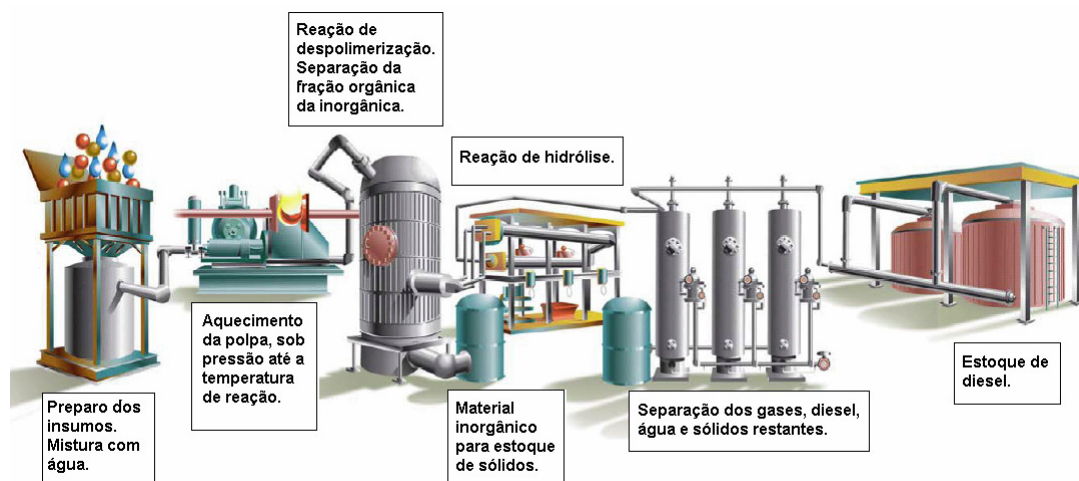
A empresa americana Plastic Energy, LLC desenvolveu um processo de produção de combustível a partir de resíduos plásticos através de craqueamento catalítico (Figura 66). Os resíduos eram convertidos a óleos primários pelo craqueamento catalítico e estes eram posteriormente destilados para produzir gasolina e diesel, onde a gasolina era consumida internamente pelo processo e o diesel se destinaria ao comércio. A empresa conseguiu a aprovação de um projeto de construção de uma usina em Hanford, San Joaquin Valley da

Califórnia em 2002. Ela alegava que o processo serviria para gerar combustível de resíduos plásticos sem a produção de gases tóxicos. Porém, em 2004, residentes de Hanford e a Greenaction, uma organização de proteção ambiental, conseguiram que o Departamento de Controle da Poluição Atmosférica de San Joaquin Valley revogasse a permissão da empresa, baseados na falta de dados concretos da própria companhia, para corroborar suas alegações. Em Novembro, 2004, técnicos da companhia compareceram a um fórum organizado por uma coalizão de moradores, na qual admitiram que o seu método pode gerar gases tóxicos e que eles realmente não possuíam dados referentes a outras usinas já construídas, baseadas no mesmo processo e eles anunciaram que a companhia interrompeu temporariamente o andamento do projeto.

Figura 66 - Craqueamento Catalítico – Plastic Energy, LLC



A empresa americana Changing World Technologies (CWT) afirma ter um processo de conversão, a Despolimerização Térmica, que pode tratar qualquer tipo de resíduo incluindo bifenilas policloradas (ascarel), além de lama de esgoto, lixo hospitalar, lixo industrial, lixo urbano, etc. O processo é descrito na página da empresa no endereço <http://www.changingworldtech.com/what/index.asp>. O processo é ilustrado na Figura 67, abaixo.

Figura 67 - Despolimerização Térmica, da empresa Changing World Technologies (CWT)

Fonte: http://www.changingworldtech.com/what/tcp_process.pdf

A CWT inaugurou em 2004, na cidade de Carthage, estado de Missouri, EUA, uma planta que produz de 100 a 200 barris de petróleo, equivalente ao cru nº 4, por dia, a partir dos resíduos de uma planta de processamento de alimentos vizinha, da empresa ConAgra. Ao final de 2005, pretendia atingir a produção de 500 barris por dia assim como gás natural, fertilizantes líquidos e sólidos e carbono sólido. O processo compreende cinco fases:

1. Diluição da matéria prima em água formando uma polpa.
2. Aquecimento da polpa sob pressão até a temperatura desejada.
3. Descarga brusca para pressão inferior para separar a mistura.
4. Repetir aquecimento da polpa (cozimento) para eliminar a água e produzir hidrocarbonetos leves.
5. Separação dos produtos finais.

O óleo produzido é quimicamente similar às frações da faixa do diesel. Para cada 70 toneladas de óleo produzido, são produzidas: 7,5 toneladas de metano; 6,7 toneladas de carbono absorvente (tal qual o carbono ativado); 8,2 toneladas de minerais secos e 33.6 toneladas concentrado líquido fertilizante.

Existiram alguns problemas sérios com a instalação e operação da planta da CWT, relativos ao custo do processo e de ordem ambiental. Primeiro, previa-se que o projeto custaria US\$15 milhões para a implantação, porém problemas iniciais com a tecnologia subiram o custo de

implantação para US\$40 milhões. Previa-se que a operação iria produzir a um custo de US\$40,00 por barril de óleo, no entanto o custo real por barril chega a US\$80,00. A empresa não esperava pagar mais caro pela “matéria-prima” (US\$52,00 por tonelada de resíduo orgânico ao invés dos US\$24,00 esperados) e o Congresso não concedeu os créditos de imposto na produção de biocombustível (US\$42,00/barril) com a alegação de que a definição oficial de biocombustível exclui a tecnologia empregada. Um problema grave é o terrível odor fétido que a usina gera em operação, o que tem causado reações populares contrárias ao funcionamento da usina (<http://www.mindfully.org/Air/2005/Changing-World-Technologies12apr05.htm>).

No Advanced Energy Technology Center da National Shipbuilding University, na Ucrânia, existe um programa de conversão térmica de resíduos hospitalares plásticos (seringas e descartáveis) produzindo “Fuel of Wide Fraction Content” (FWFC), consistindo de gasolina, querosene, diesel leve e pesado. Este combustível pode ser usado em motores diesel e turbinas a gás.

Os autores obtiveram bons resultados porem ainda existem alguns problemas de estabilidade do combustível e emissões de poluentes na exaustão que necessitam pesquisas adicionais. A Figura 68 e a Figura 69, a seguir, ilustram o processo, descrito na referência 11.

Figura 68 - Lixo Hospitalar Usado para Produzir Combustíveis na Ucrânia.



Figura 69 - Produção de Diesel de Resíduos Hospitalares na Ucrânia.



2.6.3.2. Viabilidades Técnica, Ambiental e Econômica.

Se a matéria prima do processo for segregada, o processo é tecnicamente viável. Para RSU genérico não existem plantas comerciais.

As empresas não divulgam informações sobre a viabilidade econômica do processo.

2.6.3.3. Vantagens e Desvantagens.

Podemos resumir as vantagens e desvantagens da gaseificação/pirólise abaixo:

Vantagens

1. Produção de combustíveis líquidos nobres a partir de plásticos que iriam para aterros
2. Processo simples para matéria prima segregada.
3. Pode ser usada em resíduos hospitalares plásticos, ex: seringas descartáveis, luvas, etc.
4. Combustíveis livres de enxofre e metais pesados, baixa temperatura de congelamento, matéria prima grátis e abundante.

Desvantagens

1. Tecnologia não comprovada para RSU em geral.
2. Combustíveis com curto período de estabilidade (25-30 dias), devendo ser usados imediatamente após a produção.
3. Nível de acidez elevado (pH 7-10) aumentando problemas de corrosão.
4. Propriedades dos combustíveis muito dependentes da matéria prima.
5. Baixo ponto de fulgor.

2.7. Tratamentos Mecânicos e Biológicos.

Tratamentos Mecânicos e Biológicos (TMB) consistem no processamento parcial dos resíduos sólidos através da remoção mecânica de algumas partes do lixo e do tratamento biológico de outras, de modo que a fração residual seja menor, mais estável e adequada para outros usos.

TMB não é uma tecnologia individual, nem uma solução completa, mas um termo significando o uso de diversos processos biológicos e mecânicos que são combinados, de diversas maneiras, para se atingir os objetivos desejados. Portanto, sistemas de TMB variam enormemente em complexidade e funcionalidade.

TMB é uma ferramenta de gerenciamento dos RSU que visa minimizar os impactos ambientais associados com a disposição final de resíduos biodegradáveis, além da obtenção de produtos com valor agregado originados do lixo como: materiais recicláveis como vidros e metais, adubos e, em alguns casos, biogás e CDR.

A letra M, significando "Mecânico", refere-se a processos de triagem, separação, redução de tamanho e peneiramento, visando à extração por meios mecânicos de produtos úteis, ou passíveis de serem utilizados em processos biológicos.

- A letra B, de "Biológico", refere-se a processos, aeróbicos ou anaeróbicos, que convertem a fração biodegradável do lixo em um composto ou biogás (digestão anaeróbica).
- A letra T, de "Tratamento", promove a integração dos processos individuais que irão compor o processo de TMB.
- O termo TMB originou-se na Alemanha e Áustria. A primeira geração dos TMB eram combinações muito simples de tecnologias de separação mecânica e processos biológicos rudimentares, como compostagem em leiras (semelhante à usina de triagem da COMLURB, no Caju, Rio de Janeiro). Atualmente foram introduzidas tecnologias mais avançadas que estão sendo anunciadas como o "Estado da Arte" do gerenciamento dos RSU, em especial na Europa.
- É importante frisar que em alguns processos de TMB o produto principal é um combustível derivado de resíduos (CDR), que será processado termicamente por outro método, por exemplo, incineração. Portanto a percepção original que os processos de TMB não envolviam a obtenção de energia dos resíduos não é verdadeira.
- O principal objetivo dos TMB é diminuir a quantidade de RSU depositadas nos aterros sanitários. A Comunidade Européia estabeleceu regras rígidas visando à total eliminação

de resíduos orgânicos em aterros nos próximos dez anos, chamadas de “metas alternativas aos aterros”. Neste aspecto, a incineração seria uma alternativa viável porém, devido à severa oposição em alguns países, outras alternativas estão sendo consideradas. Um relatório do Greenpeace no Reino Unido de fevereiro de 2003, denominado “Cool Waste Management” (Gerenciamento Esperto dos Resíduos), recomenda ao governo a consideração dos TMB.

O relatório de março de 2005 da empresa inglesa de consultoria Juniper sobre TMB, de mais de 600 páginas, examina em profundidade as 26 empresas e processos mais importantes na Europa, fornece resumo das vantagens e desvantagens dos processos TMB (Tabela 39). O relatório pode ser obtido da página da Juniper na internet: <http://www.juniper.co.uk/Publications/downloads.html>.

Tabela 39 - Vantagens e desvantagens dos TMB.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Grande redução de materiais a serem depositados em aterros.	Apenas um processo intermediário de tratamento, necessitando de outros processos após seu uso.
Maior recuperação de recicláveis.	Dificuldade de se fazer uma avaliação econômica da implantação de projetos do tipo em mercados que ainda não estão bem estabelecidos
Produção de adubos orgânicos.	Qualidade do adubo difícil de controlar, dificultando a sua comercialização.
Produção de biogás.	CDR produzido pode ser difícil de usar em plantas convencionais, pois pode conter poluentes, o que iria requerer sistema de limpeza de gases semelhante às usinas de incineração de RSU.
Produção de combustíveis sólidos (CDR) que podem ser usados em caldeiras em substituição a outros combustíveis.	Dificuldades para controlar o processo para RSU.
Pode processar RSU variado desde que o processo seja otimizado para tal.	Custo elevado.
Plantas podem aumentar de tamanho simplesmente aumentando o número de módulos de processamento.	Alguns processos desenvolvidos para lixo separado não funcionam bem para RSU sem coleta seletiva.
Tecnologia melhor comprovada do que outras tecnologias inovadoras.	Tecnologia ainda não é tão comprovada como a incineração convencional.
Pode ser implementada junto com usina de incineração para processar o CDR produzido.	

2.7.1. Empresas e Processos.

A Figura 70, a Figura 71, e a Tabela 40, Tabela 41, Tabela 42 e Tabela 43 a seguir, extraídas do Relatório da Juniper, fornecem um bom resumo dos principais processos e empresas na Europa.

Figura 70 - As Quatro Opções Principais dos Tratamentos Mecânicos e Biológicos (TMB).

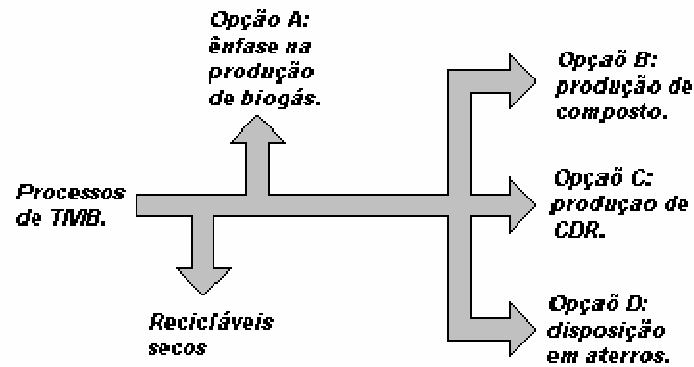


Figura 71 - As Principais Opções de TMB.

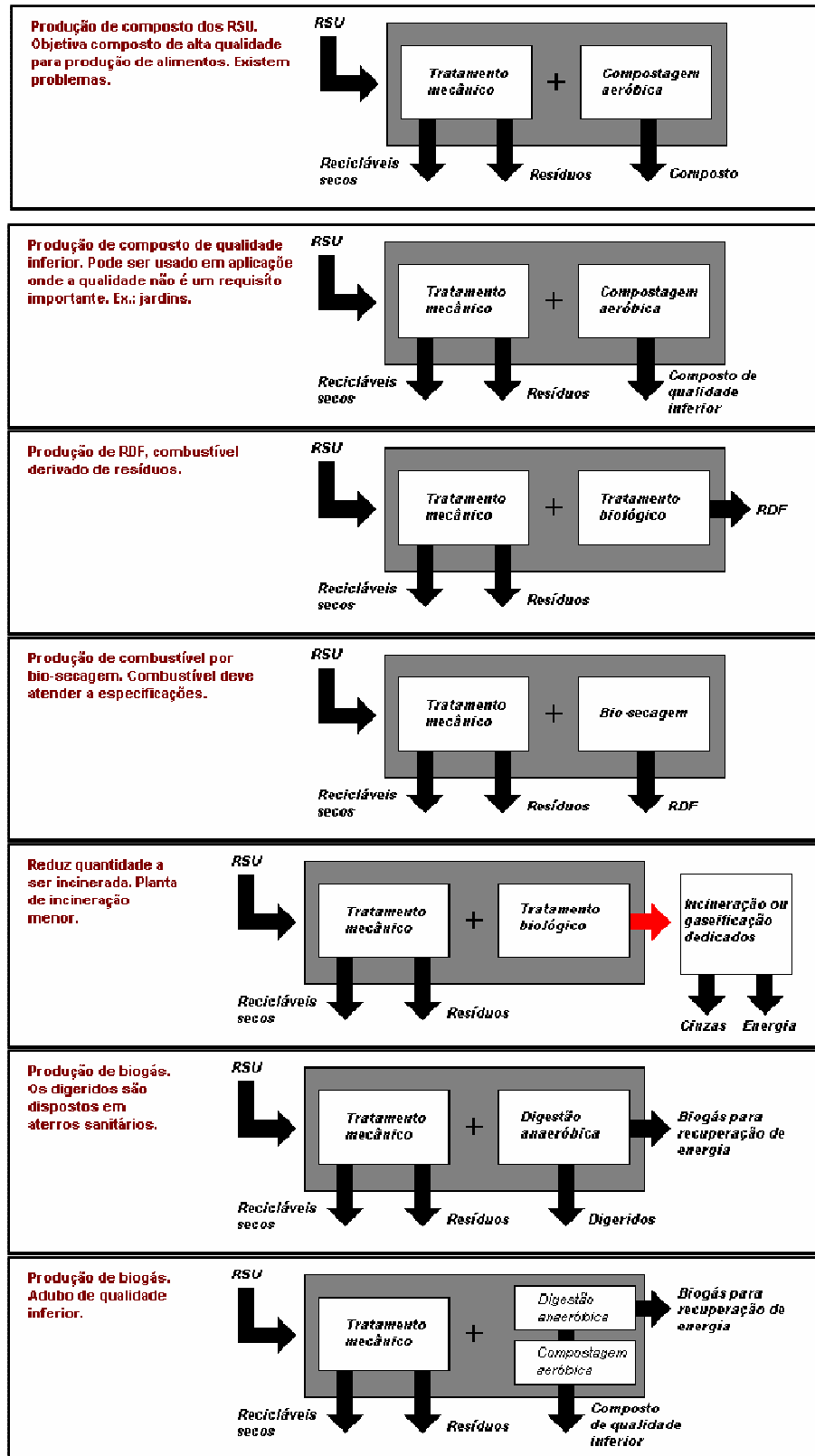


Tabela 40 - Principais Processos TMB e seus Produtos.

EMPRESA	PAIS	CDR	ADUBO	BIOGÁS P/ GERAR ELETRICIDADE	CONVERTE RSU EM INERTES P/ ATERRO
ArrowBio	Israel	N	S	S	N
Bedminster	Suécia/EUA	S	S	N	N
Biodegma	Alemanha	S	S	N	S
BTA	Alemanha	N	N	S	N
Civic	GB	N	S	N	S
EcoDeco	Itália	S	N	N	N
GRL	Austrália	N	S	S	N
Grontmij	Holanda / Finlândia	N	N	S	N
Haase	Alemanha	N	N	S	S
Herhof	Alemanha	S	N	N	N
Hese	Alemanha	N	S	S	N
Horstmann	Alemanha	N	S	N	S
Iska	Suíça / Alemanha	N	N	S	S
Komptech	Áustria	N	N	N	S
Linde	Áustria	N	S	S	S
Nehlsen	Alemanha	S	N	N	N
OWS Dranco	Bélgica	S	S	S	S
RosRoca	Espanha / Alemanha	N	S	S	S
Rúmen	Finlândia	N	S	N	N
SBI-Friesland	Holanda / Finlândia	N	N	S	
SRS (Wright)	Canadá	N	S	N	S
Sutco	Alemanha	N	N	N	S
Valorga	França	N	S	S	N
VKW	Áustria	N	S	N	S
Wastec	GB	N	S	N	N
Wehrle	Suíça / Alemanha	S	N	S	S

Tabela 41 - Classificação das 26 Empresas pela Juniper.

STATUS	DESCRIÇÃO	EMPRESAS
Totalmente Comercial	Duas ou mais instalações comerciais ambas operando há mais de um ano	Bedminster, Biodegma, BTA, EcoDeco, Grontmij, Horstmann, Linde, OWS, SRS, Valorga, VKW
Comercial	Uma instalação comercial operando há mais de um ano	Nehlsen, RosRoca, SBI Friesland, Sutco
Demonstrada	Módulo experimental de grande porte operando há algum tempo	ArrowBio, Civic, Komptech
Entrando no Mercado	Empresa já recebeu a primeira encomenda comercial mas ainda não iniciou a operação.	GRL, Haase, Hese, ISKA, Wehrle
Conceitual	Está propondo uma solução de TMB	New Earth, Rúmen, Wastec.

Tabela 42 - Infraestrutura Mundial de TMB.

INFRAESTRUTURA DE TMB	
Instalações de TMB operacionais	80
Capacidade Total	8.500.000 t/ano
Numero total de plantas em 2006	123
Capacidade Instalada esperada em 2006	13.000.000 t/ano

Tabela 43 - Capacidade Operacional por País.

PAIS	CAPACIDADE INSTALADA OPERACIONAL (t/ano)
Espanha	2.600.000
Itália	1.800.000
Alemanha	1.300.000
Austrália	500.000
Holanda	400.000
Áustria	300.000
EUA	250.000
Bélgica	200.000

O principal problema para viabilizar plantas de TMB é a comercialização dos produtos. Por exemplo, o adubo produzido, para ser usado na lavoura requer intenso pré-processamento da matéria prima para garantir a pureza do produto. Uma coleta seletiva confiável iria diminuir os custos, mas é difícil de implementar. No Brasil, uma boa opção, seria um pré-processamento para remover os recicláveis e produção de CDR de alto poder calorífico (papéis, papelão, plásticos, borracha, madeira) e o digerido do processo biológico, como Digestão Anaeróbica, poderia ser desidratado e incinerado como CDR de baixo poder calorífico (orgânicos) em uma usina de incineração adjacente. O tema será abordado mais adiante.

Apenas como ilustração, vamos listar abaixo as 10 maiores usinas de TMB do mundo (Tabela 44).

Tabela 44 - As 10 Maiores Plantas de TMB do Mundo.

Usina	Capacidade (t/ano)	País	Tecnologia	Produtos principais
Madri	480.000	Espanha	Horstmann	Adubo de baixa qualidade
Barcelona (Ecoparc I)	300.000	Espanha	Linde	Biogás, Adubo de baixa qualidade.
Calvano	270.000	Itália	VKW	CDR, aterro.
Barcelona (Ecoparc II)	265.000	Espanha	Horstmann, RosRoca, Valorga.	Biogás, Adubo de baixa qualidade.
Groningen	230.000	Holanda	Grontmij	Biogás
Friesland	220.000	Holanda	SBI Friesland, Grontmij	Biogás
Leon	217.000	Espanha	Horstmann, Haase	Biogás, Adubo de baixa qualidade
Valladolid	210.000	Espanha	Horstmann, Linde	Biogás, Adubo de baixa qualidade
Cadiz	210.000	Espanha	Valorga	Biogás
Neuss	206.000	Alemanha	Sutco	Aterro

2.8. ARCO DE PLASMA.

O método do arco de plasma para tratar RSU pode ser definido como uma corrente elétrica, contínua ou alternada, passando entre eletrodos de grafite e carbono, com injeção de vapor e/ou oxigênio (menor que a proporção estequiométrica), que produz um gás ionizado (plasma), condutor de eletricidade, em forma de chama, com temperaturas superiores a 3.900°C. Este processo converte materiais orgânicos em gás de síntese (syngas), composto de CO e H₂, e os inorgânicos em uma escória vítrea inerte. O gás de síntese pode ser utilizado em caldeiras, turbinas ou motores a gás para gerar eletricidade, ou transformado em produtos químicos. A Tabela 45, a seguir, mostra as vantagens e desvantagens desta tecnologia.

Tabela 45 - Vantagens e Desvantagens do método a plasma.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Pequeno volume de gases	Tecnologia não totalmente comprovada
Vitrificação dos sólidos ("cinzas")	Temperaturas elevadas (> 3.900°C)
Destrução de patogênicos e matéria putrescível	Alto Custo
Mais controlável do que incineração	
Gás de síntese rico em H ₂	

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Resíduos sólidos vitrificados menos tóxicos do que as cinzas dos incineradores	

Os resíduos são introduzidos no vaso de conversão que opera a temperaturas bastante elevadas possuindo três aberturas: A entrada dos resíduos, a saída do gás convertido pelo plasma (PCG), a saída da escória.

O gás produzido é o produto mais valioso do processo. Após a saída do gás do vaso de conversão o gás é resfriado rapidamente para evitar reações químicas e a formação de dioxinas. O gás passa por diversos processos de limpeza e reforma para a recuperação de gases combustíveis (hidrogênio, CO, metano), ácidos (H₂S, SO₂, HCl), remoção de compostos de nitrogênio (amônia, monóxido de dinitrogênio, dióxido de nitrogênio), metais (cromo, mercúrio, chumbo, cádmio) e arsênico. Estes produtos podem ser usados como combustíveis ou matérias primas para processos químicos.

A escória é a parte sólida dos resíduos que não é gaseificada. A escória deixa o conversor líquida, a altas temperaturas. Quando a escória é resfriada transforma-se em um produto vítreo praticamente não lixiviável, sem a presença de compostos orgânicos. A escória é composta principalmente de silício, com pequenas quantidades de ferro, potássio, sódio, alumínio, e outros metais. Pode-se reutilizar a escória vitrificada em diversas aplicações, pois, trata-se de um produto quimicamente inerte.

A tecnologia de conversão a plasma é mais apropriada para o tratamento de resíduos perigosos, tais como: pesticidas clorados, PCB (bifenilas policloradas, ex: ascarel), retardantes de fogo bromados, PVC, Teflon e outros produtos químicos obsoletos que devem ser destruídos. Pode-se também recuperar energia de materiais tóxicos com elevada eficiência.

Plasma juntamente com o craqueamento catalítico são os dois métodos mais adequados para a total destruição de resíduos hospitalares.

2.8.1. Empresas e Processos.

A gaseificação a plasma requer uma grande quantidade de energia para operação do arco. A quantidade depende do tipo de arco de plasma, configuração do reator, conteúdo energético dos resíduos, quantidade de oxidante presente (ar ou oxigênio). O gás de síntese produzido pelo processo permite o uso de turbina a gás em ciclo combinado o que aumenta o rendimento

térmico da planta. Entretanto, como o consumo do arco de plasma é elevado, a eficiência global das usinas a plasma é inferior às usinas de incineração convencionais.

Um estudo recente (Towill-Corporation 2000), preparado para a cidade de Honolulu, no Havaí, concluiu que gaseificadores a arco de plasma poderiam gerar cerca de 900 MWh de energia elétrica, por tonelada de lixo urbano processado. No entanto, somente 200 a 300 MWh estariam disponíveis para venda na rede elétrica, ou seja, um rendimento entre 22 e 33%.

A Tabela 46 abaixo compara algumas usinas a plasma e de incineração em termos de geração líquida de energia elétrica. São comparados a eficiência elétrica global, energia líquida por tonelada de lixo e consumo próprio da planta. Estas informações foram obtidas através de questionários respondidos pelas próprias empresas.

Tabela 46. Comparação das Eficiências Globais das Usinas e Tecnologias.

Companhia	Informações das Usinas				Eficiência Elétrica Global (%)	Energia Líq. por ton de RSU (kWh)	Consumo Próprio (%)
	Tecnologia	Estágio Atual	Local	Capacidade (t/d)			
Hitachi Metals	Gaseificador a Plasma	Em Operação	Utashinai, Japão	165-300	ND	413	46
Global Plasma LLC	Gaseificador a Plasma	Proposto	Honolulu, Havaí	376	15	415	39
H-power	Incineração	Em Operação	Honolulu, Havaí	2000	19	540	13
SEMASS	Incineração	Em Operação	Rochester, Massachusetts	2700	22	610	14

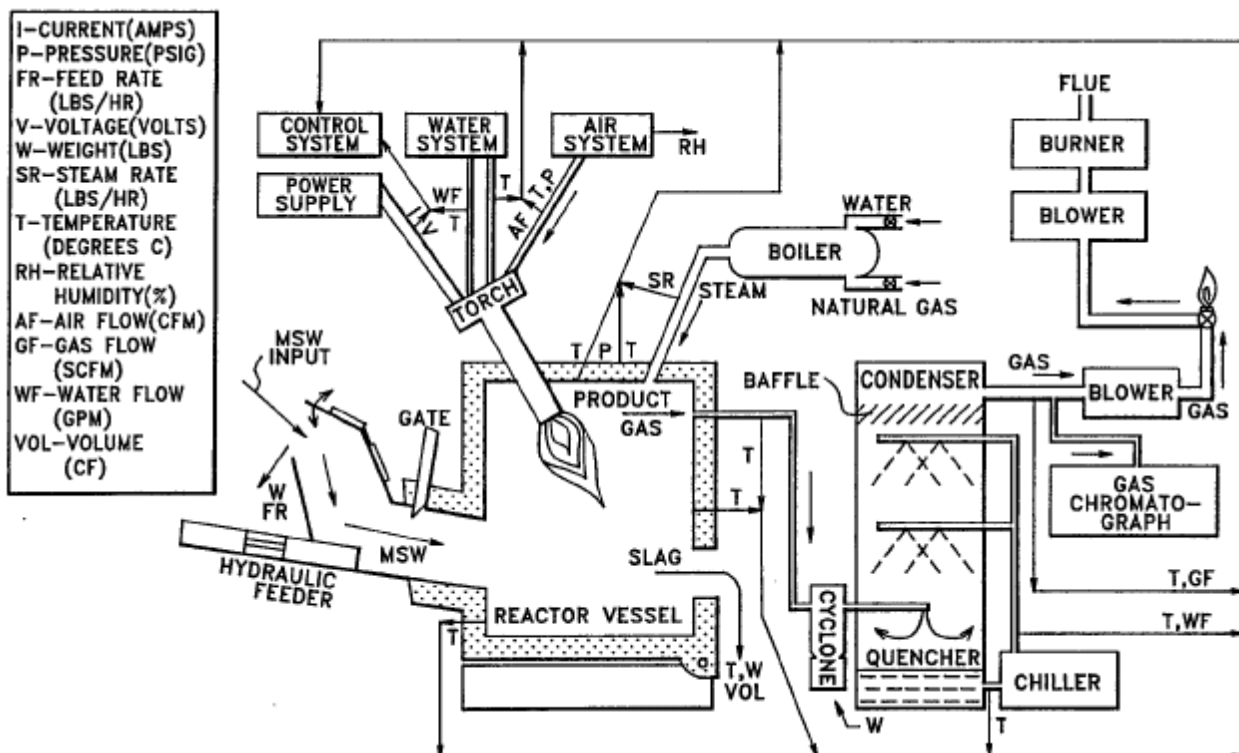
A seguir serão listadas algumas empresas que desenvolvem usinas de tratamento de RSU a arco de plasma:

2.8.1.1. RCL Plasma – Ottawa, Canadá

RCL Plasma foi criada em 1973 pelo governo Canadense para desenvolver tratamentos de resíduos por arco de plasma. A empresa possui uma planta experimental de 200 kW, não possuindo usinas comerciais. No ano de 2005 a RCL Plasma fundiu-se com outra companhia, a Plasco Energy Corp e juntas fundaram a Plasco Energy Group. A nova companhia usa a tecnologia patenteada da RCL, Plasco Conversion System (PCS) para tratamento de lixo urbano. A empresa firmou em 2006 um projeto com a cidade de Ottawa, Canadá, para a construção de uma planta-piloto que irá receber parte do lixo urbano gerado pela cidade. A planta-piloto irá tratar 85 toneladas por dia e gerar 4MW_e líquidos.

A Figura 72 mostra o esquema de um sistema de gaseificação a plasma da RCL.

Figura 72 - Usina de Gaseificação de RSU da RCL.



Fonte: U.S. patent 5280757 - Municipal Solid Waste Disposal.

Abaixo na Tabela 47 e na Tabela 48 serão mostrados os balanços de massa e energia para uma usina da RCL para RSU com 35% de umidade e conteúdo energético de 10.900 MJ/t.

Tabela 47 - Balanço de massa do método PCS.

Balanço de Massa		
Material (kg)		
Entradas	RSU (35% umidade)	193,7
	Ar para o Arco de Plasma	21,8
	Ar pelo alimentador	114,1
Total de Entradas		329,5
Saídas	Gás de Síntese Seco	276,1
	Vapor d'água no gás de síntese	10,05
	Condensado	21,5
	Escória	21,4
	Cinzas do Ciclone	0,45
Total de Saídas		329,5

Tabela 48 - Balanço de energia do método PCS.

Balanço de Energia			
Componente Energético (por Ton de RSU)			Energia (MJ)
Entradas	RSU		10.900
	Arco de Plasma		2.204
Total de Entradas			13.104
Saídas	<i>Não Recuperáveis</i>	Perdas no Arco	362
		Perdas na Escória	89
		Perdas no Vaso	60
		Outras Perdas	1.278
	Total de Perdas não Recuperáveis		1.789
	<i>Recuperáveis</i>	Energia Sensível no Gás	1.291
		Energia Química do Gás	10.020
Total de Recuperáveis		11.311	
Total de Saídas			13.100

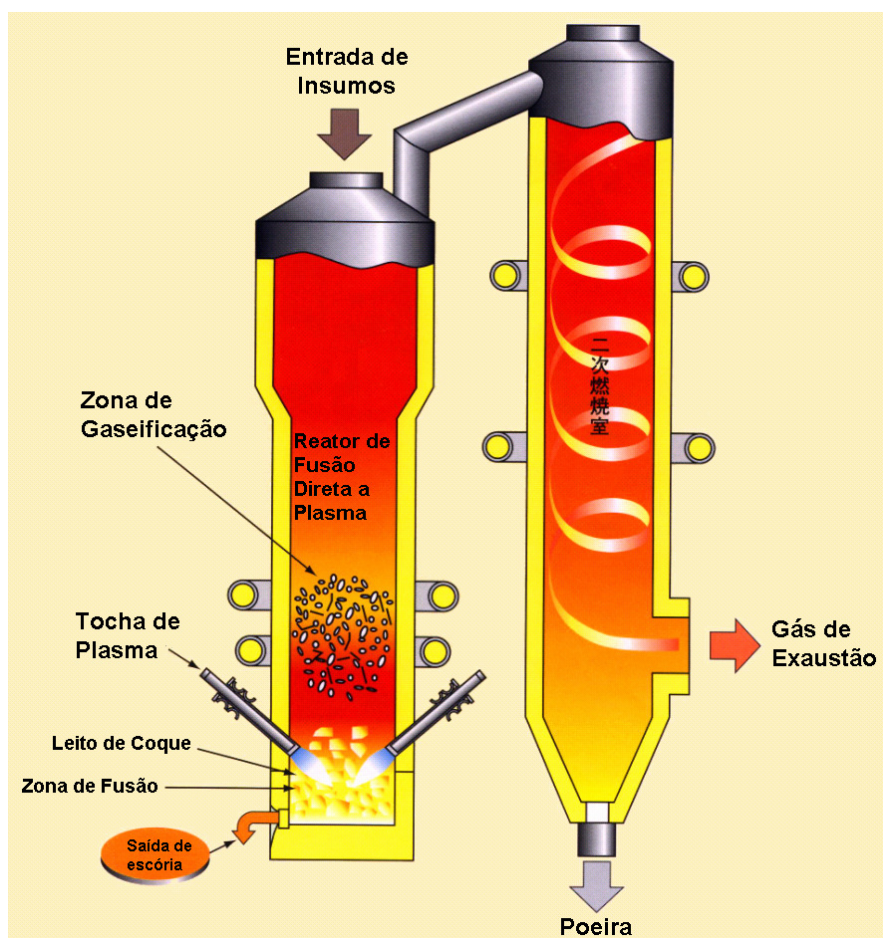
Demonstra-se que se o gás fosse utilizado em uma turbina a gás em ciclo combinado a energia elétrica líquida seria de aproximadamente 700 MWh/t de lixo, comparável às modernas usinas de incineração.

A empresa afirma que as emissões gasosas atendem as normas americanas e européias, mas não fornece dados. A escória vítrea também atende aos requisitos de não lixiviação.

2.8.1.2. Hitachi Metals - Japão

Após a demonstração para gaseificação de RSU na planta piloto de Yoshii no Japão em 1999, o governo Japonês certificou a tecnologia para a construção de uma planta comercial. O processo utiliza um reator a plasma Westinghouse. Trata-se de um gaseificador a ar para a oxidação total do carbono e inertização completa dos inorgânicos na escória. O gás de síntese é queimado logo após a saída do reator. Os gases quentes da combustão podem ser usados em uma caldeira de recuperação para a produção de vapor/energia elétrica. A Figura 73 ilustra o processo.

Figura 73 - Esquema do Gaseificador a Plasma da Hitachi.



Fonte: <http://www.westinghouse-plasma.com/gasif.htm>.

A seguir serão listadas as usinas a arco de plasma da Hitachi, em operação, processando RSU:

Yoshii

Processa 26,4 t/dia de RSU desde 1999. O gás de síntese produzido produz água quente para uma área de recreação nas proximidades. O Consumo de energia para o plasma é de 100 kWh/t de RSU (aprox. 5% do calor de combustão do RSU).

Mihama-Mikata

Processa 19 t/dia de RSU e 5,3 t/dia de lodo de esgoto desde 2002. O gás de síntese produzido produz água quente para um centro de reciclagem adjacente.

Utashinai

Processa 300 t/dia de RSU desde abril de 2003. O gás de síntese é usado para produzir 7,9 MW_e em uma turbina a vapor. A usina vende 4,3 MW_e para a rede consumindo o restante no processo (46%).

A Tabela 49 e a Tabela 50 abaixo mostram as emissões na chaminé da planta de Utashinai e uma comparação das plantas de Utashinai e Mihama-Mikata.

Tabela 49 - Emissões de Alguns Poluentes na Chaminé de Utashinai.

Emissões	Unidades	Valor Medido
Particulados	g/Nm ³	< 0,01
NOX	ppm	83
HCl	ppm	7
Dioxinas/Furanos	ng-TEQ/Nm ³	< 0,01
Alcatrão		Não detectado

Tabela 50 - Comparação de dados das plantas de Utashinai e Mihama-Mikata.

Nome	Mihama-Mikata	Utashinai
Local	Mihama-Mikata, Japão	Utashinai, Japão (próximo de Hokkaido)
Locatário	Cidades de Mihama and Mikata	Cidade de Utashinai
Technology	Hitachi Metals Plasma Direct Melting Furnace	Hitachi Metals Plasma Direct Melting Furnace
Entrada (ton ²⁵ /ano)	8.000	65.700
Insumos	RSU e esgoto	2/3 de RSU e 1/3 de resíduo de fabricação de peças (auto shredder residue ou ASR)
Inauguração	Dezembro de 2002	Julho de 2002
Custo de Capital	\$18.000,000	\$65.000.000
Custo O&M anual	\$700.000 (\$84/t)	\$5.500,000 (\$84/t)
Produtos	Água quente para aquecimento local	Eletricidade (7.9 MW por geração de turbina a vapor)
Subprodutos	Escória, metais	Escória, metais

Fonte: http://ladpw.org/epd/tf/Attachments/SubCommittee%20Attachments/CT_Eval_Rpt_App.pdf

²⁵ É a tonelada americana. 1 t = 907.18474 kg.

2.8.1.3. Solena Group - Washington, DC

A empresa desenvolveu um processo, IPGCC, para tratar RSU e resíduos perigosos, incluindo lixo nuclear de baixa atividade. A empresa está envolvida em projetos na Europa e afirma que obtém 50 MW_e processando 20 t/hora com eficiência global de 35%.

O Ciclo Combinado de Gaseificação Integrada a Plasma (Integrated Plasma Gasification Combined Cycle – IPGCC) da Solena Group Ltd. é um processo único que utiliza a tecnologia patenteada de Gaseificação/Vitrificação a Plasma (Plasma Gasification Vitrification – PGV) para converter resíduos de baixo valor combustível (coque de petróleo, rejeitos orgânicos, RSU, etc.) em syngas contendo H₂ e CO, que pode ser usado em turbinas a gás. O IPGCC pode ser visto como um processo de dois estágios: primeiro o insumo é gasificado em um reator PGV e depois o gás gerado é limpo e resfriado para ser usado em turbinas a gás para gerar eletricidade. As etapas do processo são:

- recebimento e tratamento prévio de insumo;
- gaseificação em reator PGV (Plasma Gasification and Vitrification);
- resfriamento e limpeza do syngas;
- ciclo combinado em turbina a gás

O reator PGV emprega um jato de plasma para elevar a temperatura do meio a 4.000 – 5.000°C a pressões atmosféricas. Um ambiente parcialmente oxigenado levam à oxidação parcial dos insumos a gás de síntese, contendo H₂ e CO. O gás de síntese possui um calor de combustão variando entre 150 – 300 BTU/sfc²⁶. Os inorgânicos, não-combustíveis e não-voláteis são vitrificados em uma escória que sai pelos fundos do reator.

2.8.1.4. Georgia Tech Research Institute - Atlanta, Georgia

O Georgia Tech Research Institute faz parte de um consórcio formado por oito membros (Geoplasma, LLC) que respondeu a um edital da cidade de Honolulu no Havaí para um sistema de tratamento de RSU a plasma. A instalação deverá processar 100.000 t/ano (376 t/d) com a tecnologia de plasma da Westinghouse, essencialmente a mesma usada pela Hitachi.

²⁶ Specific fuel consumption.

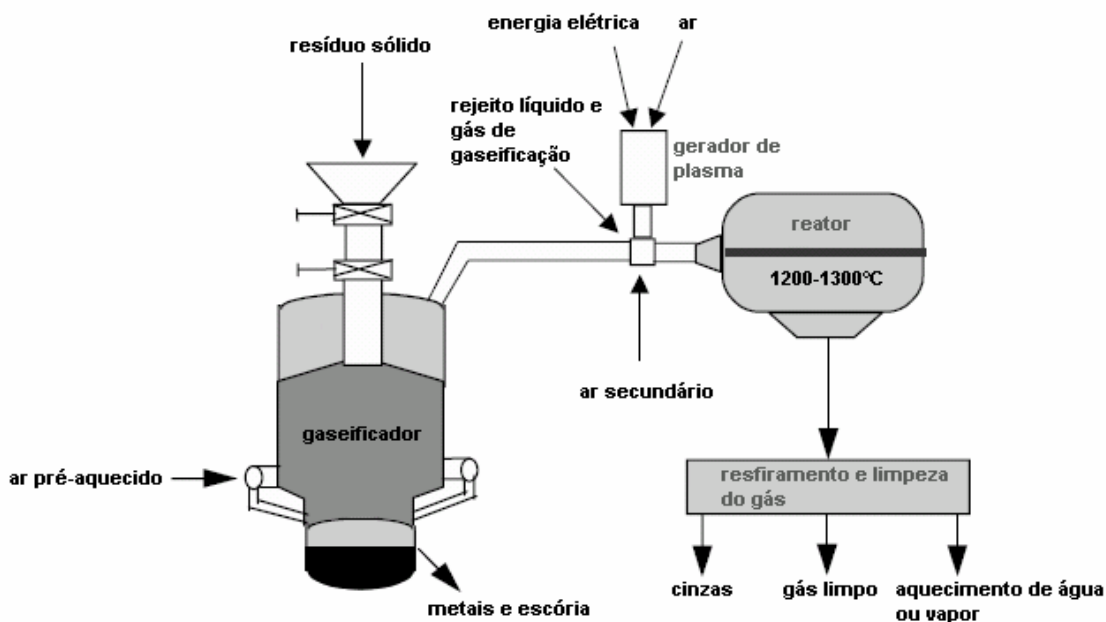
A planta deve produzir 10,6 MWe, consumindo 4,1 MWe (39%) e vendendo 6,5 MWe para a rede. Isto equivale a 415 KWh/t de RSU.

2.8.1.5. Westinghouse Plasma Corporation – Madison, PA

A Westinghouse Plasma fabrica e comercializa arcos de plasma para a indústria. A empresa também desenvolveu um gaseificador a plasma para processar resíduos sólidos usados pelas empresas Geoplasma LLC, Hitachi Metals, Recovered Energy Inc.

PiroArc™

A empresa ScanArc Plasma Technologies desenvolveu um processo de tratamento de resíduos, Pyroarc. O processo pode ser descrito como uma associação da gaseificação com a pirólise a plasma. O rejeito sólido é classificado e segregado; particulado muito fino é separado e pedaços grandes são triturados até adquirirem a faixa de tamanho indicado para a gaseificação. Após a operação mecânica, o rejeito sólido é levado para o gaseificador, que opera em contracorrente com uma injeção de vapor a alta temperatura e pressão. Os compostos orgânicos são gaseificados e seguem para o reator de arco a plasma. Os inorgânicos saem pelo fundo do gaseificador, como escória líquida e metais inertes. O gás oriundo do gaseificador, junto com o rejeito líquido, segue para o reator de decomposição em plasma, onde é submetido a temperaturas da ordem de 5.000°C na zona do jato de plasma, e segue para o reator, onde as temperaturas são da ordem de 1250°C e o tempo de residência varia entre 0.3-0.6 segundos. O gás que sai do reator segue para a limpeza e resfriamento, atingindo 800°C, com reaproveitamento do calor para o processo, enquanto que o material particulado muito fino, contendo na sua composição zinco e chumbo, é capturado. Um esquema do processo é visto na Figura 74 - Esquema do processo Pyroarc..

Figura 74 - Esquema do processo Pyroarc.


Fonte: <http://www.scanarc.se/files/PARCPAP.pdf>

Os produtos principais do processo são:

- um gás combustível com um valor calórico de aproximadamente 4MJ/m^3 e uma porcentagem de monóxido de carbono e hidrogênio entre 35 e 40%, que pode ser usado para produzir energia em aquecedores. O gás possui baixos teores de NO_x , o que dispensa o tratamento de limpeza desses compostos.
- A escória cuja composição depende da natureza dos insumos mas que, geralmente, possui altos teores de sílica, o que lhe confere propriedades vítreas.
- Metais com baixa afinidade com o oxigênio que saem do gaseificador líquidos e em fase separada da escória.

O processo Pyroarc é classificado como tendo uma eficiência térmica global alta (90-94%). A maior parte da energia gerada vem do calor de combustão do gás produzido (70-80%) enquanto que o calor sensível responde por 20-30% (Tabela 51).

Tabela 51 - Composição do gás de saída.

	Composição (%)	(%base seca)	(%limpo)
CO	20,9	24,2	23,1
CO ₂	6,1	7,0	6,7
H ₂	15,9	18,4	17,6
H ₂ O	13,8	---	5,0
N ₂	43,1	50,0	47,6
Outros	0,3	0,4	---
Total	100,0	100,0	100,0

Fonte: <http://www.scanarc.se/files/PARCPAP.pdf>

A empresa EnviroArc Technologies AS, com licença da ScanArc, construiu duas plantas industriais de tratamento de resíduos segundo o processo. A primeira está situada em Osteroy, Noruega, e trata dos resíduos gerados pela fábrica de curtimento Borge Garveri. Ela possui uma capacidade de processamento de 46,3 t/dia, um consumo energético de 1,5 MW e produção de 3,3 MW. A segunda planta localiza-se em Hofors, Suécia.

2.8.1.6. Outras Empresas

- Recovered Energy, Inc. (REI) – Pocatello, Idaho
- Integrated Environmental Technology – Richland, Washington
- PEAT – Northbrook, Illinois
- Phoenix Solutions – Crystal, Minnesota
- Hawkins Industries – Indiana, Illinois

3. Tecnologias Consorciadas para o Tratamento dos RSU – Possibilidades de Geração e/ou Conservação de Energia.

Os avanços nas técnicas de tratamentos dos RSU, que têm sido significativos, e o aumento da consciência ambiental possibilitaram que soluções adequadas para tratar as diversas frações presentes no lixo fossem desenvolvidas e passassem a ser utilizadas. A gama de soluções varia desde grandes incineradores que utilizam o processo de “mass burning” (queima bruta) ou aterros, praticamente sem nenhuma manipulação prévia dos resíduos, até processos de pré-tratamento sofisticados que separam o lixo para, então, tratar cada fração da melhor maneira, como: reciclagem, compostagem, incineração, conversão, digestão anaeróbica e aterro para a fração inerte. A consequência natural deste processo seria a combinação de tecnologias em um mesmo local, onde cada fração do lixo seria aproveitada da melhor maneira possível. Quando este processo resulta em enviar para os aterros apenas os materiais estabilizados quimicamente, com a segregação segura dos poluentes presentes nos RSU, de maneira sustentável, surge o conceito de Ecopolo.

3.1. Tratamentos Mecânicos e Biológicos Combinados (Utilização do TMB Consorciado a Diversos Processos).

À primeira vista pode parecer que a coleta seletiva em larga escala, como é feita em muitos países, poderia facilitar o tratamento dos RSU. Mas este processo depende de inúmeros fatores, inclusive sociológicos e culturais, e uma parcela da população não engajada poderia prejudicar todo o processo. Ou seja, como muito provavelmente nem todos participarão, não é possível basear a estratégia de gerenciamento dos RSU como se a coleta seletiva fosse 100% eficiente. Em resumo, sempre será necessário algum tipo de triagem inicial para garantir a qualidade dos derivados dos RSU para as finalidades mais nobres abordadas neste trabalho.

No entanto, a coleta seletiva diminuirá os custos de uma triagem inicial intensa. Após a remoção dos recicláveis, o material remanescente passaria por uma triagem mais simples, apenas para segregar frações indesejadas que pudessem interferir nos processos subsequentes.

De qualquer modo, alguma separação mecânica deverá ser sempre executada antes da etapa seguinte. No caso de grandes incineradores usando “mass burning”, esta separação se resume à remoção manual de itens de grandes dimensões como sofás, fogões, etc. Nos demais casos, são aplicáveis desde a catação manual até sofisticados sistemas automáticos de alta tecnologia e custo elevado.

Nos capítulos sobre a Digestão Anaeróbica e Tratamentos Mecânicos e Biológicos (TMB) ficou claro que os produtos finais dependem tanto do pré-tratamento dos resíduos quanto do processo biológico. No caso de plantas TMB produzindo biogás, o seu uso poderá se concretizar de diversas maneiras – da mesma forma como o biogás produzido em aterros. Do mesmo modo, os Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) e adubos podem ser processados no local da usina TMB, dando margem a um grande número de possibilidades de combinação de plantas de TMB com outras tecnologias.

Nos próximos subcapítulos serão descritas algumas possibilidades que têm se mostrado promissoras para o estágio atual do nosso País.

3.2. CICLO COMBINADO (GN + INCINERAÇÃO → ZABALGARBI).

No capítulo sobre incineração, foi descrita sucintamente a usina de Bilbao (Zabalgardi) que consorcia uma usina convencional WTE, projeto Martin GmbH, com uma turbina a gás natural em ciclo combinado, atingindo rendimento termodinâmico de 42%.

Em virtude de sua concepção diferenciada, esta alternativa foi estudada com maior nível de detalhes pela equipe do IVIG/COPPE (2005) – cuja síntese é relatada a seguir – com o intuito de verificar as mudanças necessárias ao projeto para adaptá-lo às condições do Brasil.

3.2.1. Descrição Detalhada da Usina.

A parceria entre a empresa espanhola SENER e o grupo francês CNIM, subsidiária da alemã Martin GmbH, desenvolveu uma usina WTE que produz grande quantidade de energia elétrica por tonelada de lixo incinerado, usando uma turbina a gás natural (GE LM6000) em ciclo combinado com o incinerador de lixo, como mostrado na Figura 75.

MWe²⁷. A simples soma das potências seria de 91,5 MWe. Quando ocorre o acoplamento das plantas através da caldeira de recuperação obtém-se 100 MWe, ou seja, a contribuição devida ao lixo cresce de 14 MWe para 22,5 MWe, o que representa um acréscimo de 60%. Com isto, é atingida a expressiva marca de 0,8 MWh/t lixo incinerado.

A avaliação permitiu identificar que existe uma quantidade ótima de lixo que deve ser incinerada para cada determinada turbina a gás, de modo que todo o calor rejeitado pela turbina a gás seja aproveitado no superaquecimento do vapor.

3.3. CICLO COMBINADO OTIMIZADO (ESTADO DA TÉCNICA)

A usina de incineração de lixo espanhola de Zabalgardi, na cidade de Bilbao, descrita no Anexo 1, utiliza um processo de ciclo combinado modificado onde o vapor saturado, produzido em uma caldeira convencional situada no interior do incinerador de lixo, é superaquecido pelos gases de escape de uma turbina a gás natural em outra caldeira de recuperação externa ao incinerador.

Este processo permite superaquecer o vapor até 540°C na pressão de 100 bar, sem o uso de materiais especiais nos tubos, aumentando o rendimento termodinâmico da usina resultando na produção de cerca de 0,67 MWh de energia elétrica por tonelada de lixo incinerado (para RSU com poder calorífico inferior – PCI – da ordem de 1850 Kcal/Kg, típicos do Brasil; se considerado o lixo europeu, cujo PCI médio é da ordem de 2400 Kcal/Kg, este valor é elevado para 0,87 MWh/t). O valor máximo em usinas convencionais de conversão de lixo em energia não ultrapassa 0,5 MWh por tonelada de lixo incinerado, mesmo nos EUA, onde o PCI médio é ainda superior ao europeu. Portanto, o processo apresenta um aumento de rendimento superior a 30% na energia elétrica extraída do lixo sem o uso de materiais nobres no superaquecedor. O inconveniente deste sistema se deve ao elevado consumo de gás natural, que representa cerca de 78% da energia total consumida pela usina. Várias patentes nos EUA, entre elas U.S.Pat. No. 5.724.807, U.S.Pat. No. 4.882.903, U.S.Pat. No. 4.957.049, U.S.Pat. No. 20 4.852.344. e U.S.Pat. No. 5.072.675, abordam a vantagem do gás natural para aumentar o rendimento da usina, mas não atacam o problema do elevado consumo de gás natural – um combustível fóssil – nem maneiras de reduzi-lo. O sistema proposto pelo processo brasileiro com pedido de patente número PI0701249-7 mantém o elevado rendimento termodinâmico das usinas lixo-energia com gás natural, mas eleva para mais de 80% da energia total consumida a parcela proveniente do lixo.

²⁷ Equivalente a 33 t multiplicadas por 0,55 MWh/t, em cada hora.

3.3.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O processo brasileiro permite o emprego dos dois tipos mais comuns de incineradores de lixo: com paredes de água (para fornos maiores com capacidades acima de 200 t/dia) ou com revestimento refratário/excesso de ar (abaixo de 200 t/dia).

Na Figura 76, foi considerado um ciclo de vapor com duas pressões (100 bar/420°C e 30 bar/520°C) e reaquecimento, por ser um ciclo que permite alto rendimento termodinâmico. A máquina térmica (10) deve ser especificada para suprir apenas o consumo próprio da usina, em geral cerca de 10% da produção total da planta. Esta máquina recebe a energia térmica E1 do gás natural (ou similar) e transforma parte desta energia diretamente em energia elétrica (gerador elétrico W1). A maior parte do restante da energia é encaminhada para os gases de exaustão, enquanto pequena parcela é perdida para o meio ambiente. Os gases de exaustão da máquina térmica, em geral entre 500°C e 600°C, são misturados com ar puro pré-aquecido, a cerca de 320°C, nos trocadores de calor (9) e (13).

Figura 76 – Esquema do Ciclo Combinado Otimizado

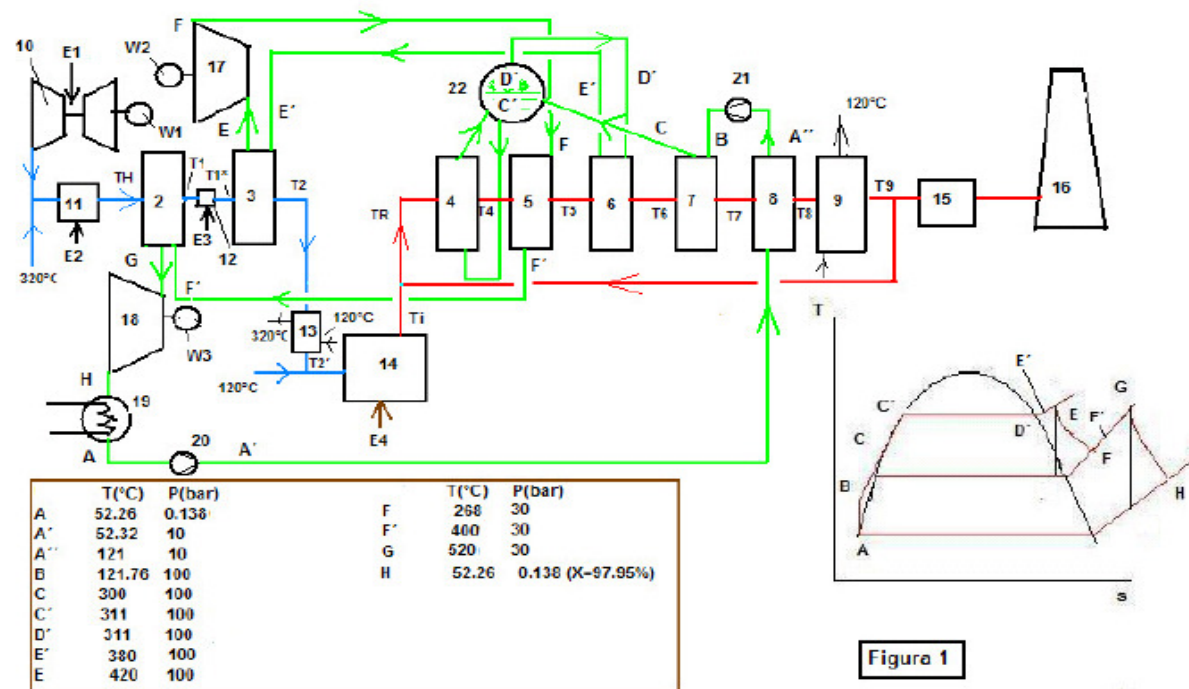


Figura 1

A mistura, a cerca de 450°C, recebe energia adicional E2 e E3 nos queimadores de gás natural suplementar (11) e (12), de modo a elevar a temperatura do vapor no superaquecedor1 (2) de baixa pressão (30 bar/520°C) e superaquecedor2 (3) de alta pressão (100 bar/420°C). Após cederem calor ao vapor nos superaquecedores, os gases, à temperatura T2, aproximadamente igual a 400°C, pré-aquecem o ar de mistura mencionado acima, à cerca de 320°C e são resfriados a valores T2', entre 200°C e 300°C, no trocador de calor (13). Estes gases são misturados com ar puro pré-aquecido a 120°C no trocador de calor (9), com os gases do incinerador de lixo, resultando numa mistura entre 150°C e 200°C usada como ar de combustão no incinerador de RSU (14), que conta com concentração de oxigênio entre 17% e 18% em volume.

Este ar aquecido, e ligeiramente empobrecido, reduz a formação de NOx no incinerador, além de promover a secagem do lixo na ante-câmara de combustão. A vazão de ar de combustão é ajustada para que os gases recebam a energia térmica do lixo E4 e deixem o incinerador à temperatura Ti entre 870°C e 1000°C, para a destruição completa dos poluentes. Esta temperatura é abaixada para TR, cerca de 750°C, através da recirculação de parte dos gases que saem do trocador (9), entre 70°C e 90°C. A mistura de gases, em torno de 750°C, cede calor na caldeira de recuperação composta dos trocadores de calor (4), (5), (6), (7), (8) e (9), que são respectivamente: evaporador, superaquecedor3 (30 bar/400°C) superaquecedor4 (100 bar/380°C), economizador1, economizador2 e préaquecedor de ar.

Como a temperatura T7 dos gases deixando o economizador1 (7) está por volta de 200°C, poderá ocorrer condensação de gases ácidos nos economizadores (8) e (9). Neste caso são empregados trocadores de calor de condensação com tubos revestidos de teflon do tipo CHX, patente Babcock & Wilcox. Os CHX já promovem a lavagem preliminar dos gases do incinerador, removendo partículas nas cinzas voláteis arrastadas pelo condensado. Os gases deixam o último trocador de calor (9) à temperatura T9 entre 70°C e 90°C e são dirigidos para o sistema de lavagem de gases (15) e, depois, para a chaminé (16). O vapor superaquecido a 100 bar/380°C no superaquecedor4 (6) e a 100 bar/420°C no superaquecedor2 (3) alimenta a turbina a vapor de alta pressão (17), gerando energia elétrica no gerador W2. O vapor deixa a turbina de alta pressão a 30 bar/268°C, é reaquecido a 30 bar/400°C no superaquecedor3 (5) e a 30 bar/520°C no superaquecedor1 (2), e escoar na turbina a vapor de baixa pressão (18) gerando energia elétrica no gerador W3. O vapor proveniente da turbina de baixa pressão é condensado em (19) e bombeado por (20) até a pressão de 10 bar, retornando ao economizador (8) de baixa pressão, bombeado por (21) até a pressão de 100 bar para o economizador (7) de alta pressão e, em seguida, ao evaporador (4), (22) onde o vapor saturado a 100 bar/311°C é gerado.

3.3.2. Descrição detalhada do Sistema

No caso da Figura 1, é utilizada uma turbina a gás de 2,75 MWe com rendimento 30,7%, com gases de escape de 9,78 Kg/s a 574°C. A capacidade do incinerador de lixo é de 600 t/dia com PCI de 1850 Kcal/Kg, correspondendo a uma potência térmica de 53,8 MWt. O ciclo de vapor adotado foi 100 bar e 420°C, na alta pressão; 30 bar e 520°C, na baixa pressão e pressão do condensador 0,138 bar. Para eficiência isentrópica das turbinas a vapor de 85% o rendimento termodinâmico do ciclo é de 34,5%. Considerando-se que a planta consome 2,75 MWe, a energia elétrica líquida exportada para a rede é de 21,28 MWe sendo que 81,72% ou 17,39 MWe provem do lixo. Neste caso, o consumo total de gás natural é de 14,79 MWt.

Uma unidade que está sendo projetada, no momento, para a UFRJ prevê a utilização de incinerador capaz de processar 150 t/d de RSU e consumo de 8,5 MW térmicos de gás natural – cerca de 17.750 m³/d, para gerar eletricidade equivalente a uma planta de 7,5 MW elétricos líquidos, ao investimento de R\$ 50 milhões. Ainda não são conhecidos os custos operacionais e de manutenção. Neste caso particular, 71% da energia é do lixo e 29% dela é advinda do GN. Estes valores dependem do ciclo de vapor adotado e do tamanho da planta, dentre outros fatores.

3.3.3. Vantagens e Originalidade do Sistema

A patente solicitada resolve os dois principais problemas das usinas lixo energia: corrosão nos superaquecedores e baixa eficiência termodinâmica. No caso de fornos de pequeno e médio porte, até 200 t/dia, onde o incinerador pode ser do tipo parede refratária, sem paredes d'água em geral revestidas de inonel, o custo da usina poderá ser amortizado com taxas de lixo bastante reduzidas, viabilizando as usinas lixo-energia nos países em desenvolvimento.

O obstáculo da baixa eficiência já teve solução encaminhada com as usinas lixo/gás natural, mas cujo consumo de gás natural é muito elevado. Por isto, outra vantagem deste sistema é o reduzido consumo de gás em comparação às soluções atuais.

Caso seja economicamente viável o uso de materiais nobres para suportar temperaturas mais elevadas, a eficiência do modelo proposto pode superar os 50% usando-se ciclos de vapor avançados. Sem prejuízo das vantagens do sistema proposto, o ciclo de vapor usado nos cálculos pode ser modificado visando a otimização da planta segundo critérios técnicos e /ou econômicos, sem prejuízo da elevada eficiência da usina. Tais critérios poderão envolver custo do gás natural, custo dos equipamentos, custo de manutenção, taxa de lixo, receitas da venda de energia, etc...

3.4. Ciclo Combinado Otimizado com Biogás de Aterro.

No subcapítulo anterior foi introduzido um novo processo que permite adaptar a tecnologia atual da incineração dos RSU no Brasil ao conceito moderno de ciclo combinado consorciando GN e lixo.

O sistema pode ter o gás natural substituído por biogás de aterro ou de estação de tratamento de esgoto, o que aumentará seu potencial de obtenção de créditos de carbono. Esta alternativa também deve reduzir o preço do combustível, visto que o biogás não dispõe da mesma mobilidade – por falta de conexão a gasodutos – do gás natural. Por este mesmo motivo, só devem ser construídas poucas termelétricas – que deverão ficar juntas aos aterros.

3.5. Ciclo Combinado Otimizado com Biogás de Digestão Anaeróbica.

Outra possibilidade que foi considerada e se mostra bastante promissora é a substituição do GN (50.000m³/d) por sistemas de digestão anaeróbica para cada unidade de incineração.

A utilização do biogás se apresenta como uma excelente oportunidade para viabilizar o projeto de Ecopolo, em virtude de aumentar a vida útil das áreas ora utilizadas para destinação final de resíduos, disponibilizar maior quantidade de créditos de carbono e não utilizar o gás natural – combustível fóssil já negociado para outros fins.

3.6. Reciclagem plena, Biodigestão Anaeróbica, Cultivo de Oleaginosas, Produção de Biodiesel e de Carvão (ECOPOLO).

Conforme verificado na Tabela 7, a conservação de energia promovida pela reciclagem encerra o maior aproveitamento energético possível do lixo, de 0,66 a 1,38 MWh/t – dependendo dos fatores utilizados.

Este benefício só pode ser atingido através da implantação de coleta seletiva, mas a dificuldade inerente ao convencimento da população impossibilita o comprometimento com prazos. Uma solução imediata, ainda que só consiga atingir 80% do potencial (COMLURB, 2007), é a triagem dos recicláveis em Usinas que utilizem equipamentos para auxiliar os catadores.

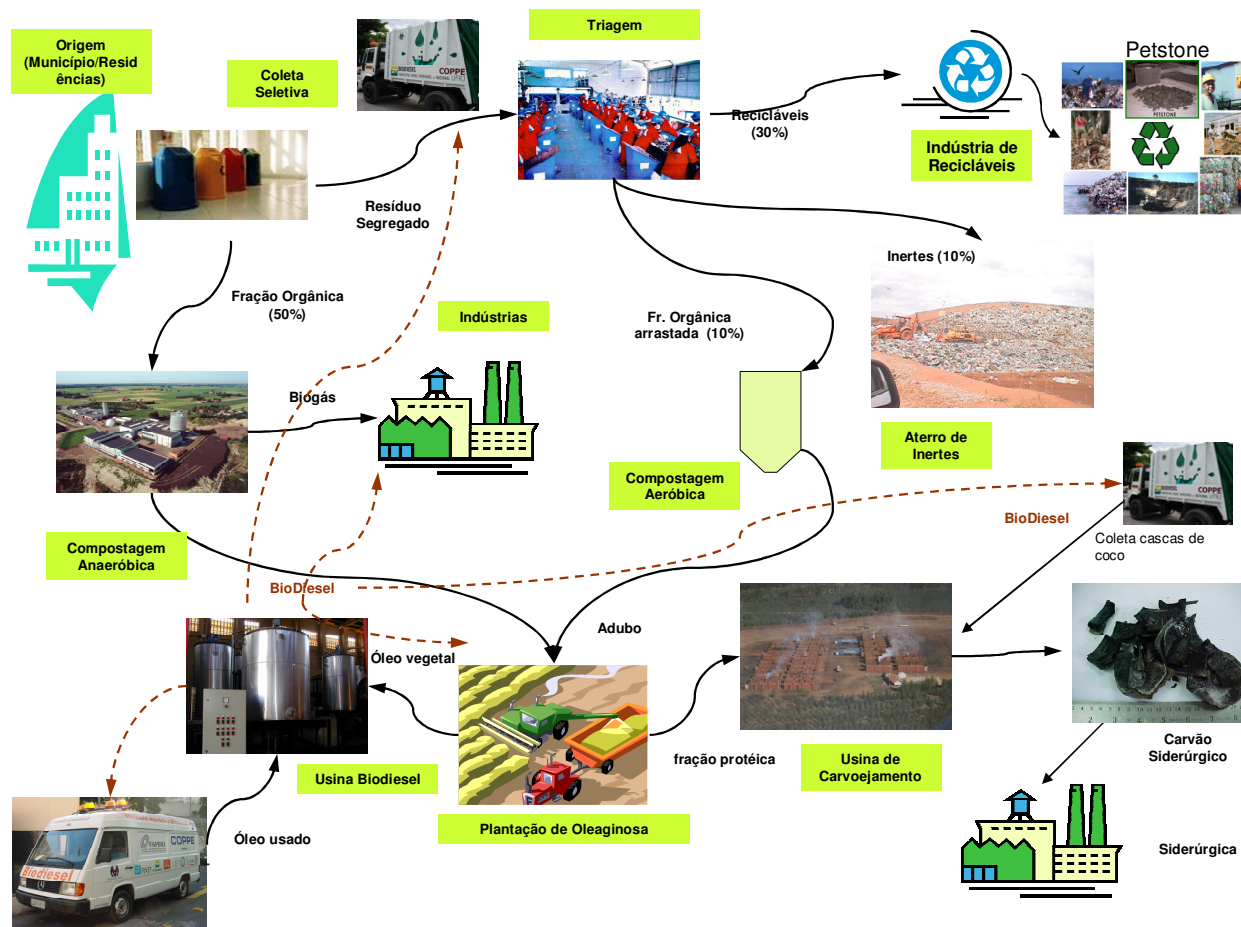
Nestes casos, sobrarão material orgânico com até 5% de mistura de recicláveis, para o que apenas as tecnologias de biodigestão serão economicamente aplicáveis – a aeróbica, para pequenas quantidades, e a anaeróbica, quando houver mais de 100 t/d de disponibilidade de insumo –, fornecendo adubo equivalente a cerca de metade da quantidade de matéria-prima. Segundo os valores típicos apresentados pela empresa detentora da tecnologia DRANCO, é

possível obter até 0,3 MWh/t de fração orgânica – o que equivale a 0,2 MWh/t de lixo bruto, no qual a fração orgânica representa 60%.

Considerando a necessidade da aplicação deste adubo na sustentabilidade no empreendimento, para não ser convertido em resíduo e onerá-lo, a alternativa de cultivos energéticos mostra-se como a mais atraente em virtude da escala de produção, ou capacidade de assimilação. Para cada hectare há um consumo médio de 25 t de adubo por ano (EMBRAPA, 2007a), de onde podem ser produzidos 1.000 litros de óleos vegetais e 2 t de fração protéica (EMBRAPA, 2007b). Este óleo vegetal deve ser processado em biodiesel, com rendimento próximo a 98% (EPE, 2007), enquanto a fração protéica pode ser carbonizada, com rendimento de 20% (MONTEIRO et al, 2007), e disponibilizar carvão vegetal com características siderúrgicas. Assim, o risco do adubo não ter aplicação é evitado, pois os produtos decorrentes de sua utilização são materiais ora importados e com baixa perspectiva de que o Brasil atinja autonomia no horizonte decenal. Neste caso, se calculado o complemento energético destes co-produtos à energia proveniente do RSU, o incremento seria muito pequeno – da ordem de 0,01 MWh/t de RSU, mas permitiria identificar os limites do intervalo entre 0,87 e 1,59 MWh/t de RSU bruto.

Ao óleo vegetal pode ser consorciado o óleo de fritura coletado em restaurantes da região, enquanto à fração protéica podem ser consorciados outros materiais disponíveis nas redondezas, como cascas de coco verde, podas de árvore, etc. A Figura 77 abaixo apresenta a visão sistêmica do projeto.

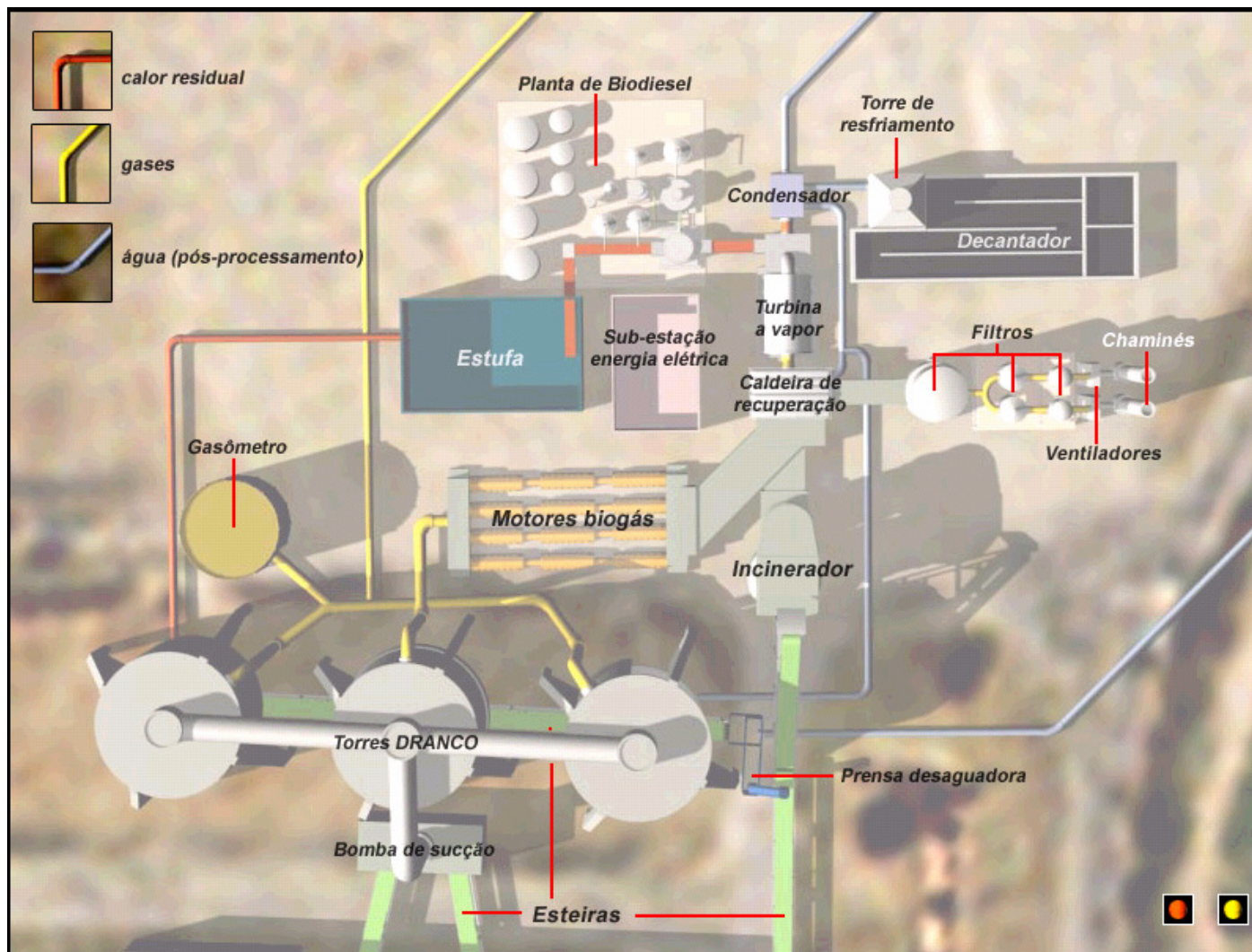
Figura 77 – Esquema do ECOPOLO



Fonte: Elaboração própria a partir de OMA-BRASIL (2007).

A Figura 78, em seguida, mostra a maquete digital desta proposta para o caso da Estação de Transbordo de RSU no bairro do Caju, no Rio de Janeiro, onde a estufa pode ser trocada pela usina de carvoejamento.

Figura 78 - Maquete digital do ECOPOLO para o Caju - Rio de Janeiro



Fonte: IVIG, 2005

O sistema proposto como ECOPOLO é muito similar ao implantado pela LIPOR no decorrer dos últimos 25 anos e que é apresentado a seguir.

A LIPOR²⁸ – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto, em Portugal – é uma entidade responsável pela gestão, valorização e tratamento dos RSU produzidos por oito municípios que a integram: Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Valongo e Vila do Conde. Constituída como associação de municípios em 1982, a LIPOR tem implementado a gestão integrada de resíduos, recuperando, ampliando e construindo infraestruturas, além de desenvolver campanhas de sensibilização junto à população.

A LIPOR trata, todos os anos, cerca de 480 mil toneladas de RSU produzidos por cerca de 1 milhão de habitantes. Tendo em conta os modernos conceitos de gestão de RSU, que preconizam a adoção de sistemas integrados, e a minimização da deposição de resíduos em aterro, a LIPOR desenvolveu uma estratégia integrada de valorização, tratamento e confinamento dos RSU, baseada em três componentes: Valorização Multimaterial, Valorização Orgânica e Valorização Energética, completadas por um Aterro Sanitário para recepção dos rejeitados e de resíduos previamente preparados. A Figura 79 apresenta o sistema integrado desenvolvido pela LIPOR.

Figura 79 - Sistema de Gestão de Resíduos da LIPOR



²⁸ <http://www.lipor.pt>

Os resultados divulgados em seu site na internet demonstram grande eficiência no processo, o que pode ser referenciado ao domínio dos detalhes quanto às aplicações de cada tecnologia. A coleta seletiva seguida de pré-triagem e triagem, com valorização dos materiais recicláveis encaminhados para as indústrias, compostagem da fração orgânica e valorização energética do material restante, através de incineração, e encaminhamento dos inertes para aterro sanitário integram um sistema de aproveitamento máximo. O modelo da LIPOR só diverge da proposta do ECOPOLO pela fase anaeróbica da compostagem.

4. Considerações Finais, Conclusões e Recomendações.

O presente trabalho permitiu verificar que o aproveitamento energético ideal dos resíduos sólidos urbanos (RSU) está vinculado à reciclagem de todos os papéis, plásticos, vidros e metais disponíveis no lixo, acrescida da compostagem anaeróbica dos restos orgânicos restantes, variando entre 0,87 e 1,59 MWh/t de RSU bruto, no sistema integrado denominado ECOPOLO.

Esta solução promove tanto a disponibilização energética decorrente da conservação que a reciclagem permite quanto a geração possível a partir do gás obtido com a compostagem anaeróbica dos restos orgânicos. A conservação de energia é devida à redução do consumo energético de todo o ciclo de vida dos recursos naturais até tornarem-se insumos industriais, uma vez que serão substituídos por insumos recicláveis. A geração decorre do aproveitamento direto do biogás – ou de similar ao gás natural obtido após tratamento do biogás – e do indireto do adubo resultantes da compostagem anaeróbica dos restos orgânicos. O adubo permite o cultivo de oleaginosas, das quais podem ser produzidos biodiesel e carvão vegetal, inclusive com fins siderúrgicos, energéticos renováveis e sucedâneos dos fósseis ora importados.

Inclusive, este sistema é o de maior potencial de oferta de emprego e renda para população de baixa qualificação profissional.

Entretanto, atingir o nível de segregação dos materiais que permita a situação acima descrita é uma tarefa que pode demorar. Nestes casos, assim como quando as soluções devem ser mais imediatas ou quando a escala de produção não possibilita este sistema, outras tecnologias podem ser mais viáveis – ainda que seu aproveitamento não supere 0,85 MWh/t, o que dependerá do tipo de resíduo disponível e das aplicações dos co-produtos gerados.

As tecnologias avançadas ainda contam com poucas experiências e os dados identificados remetem a custos elevados, que acabam por ser proibitivos para a realidade nacional. As tecnologias convencionais, se utilizadas individualmente, enfrentam barreiras quanto à viabilidade financeira.

O Brasil conta com significativa quantidade de resíduos, sobretudo quando considerada a concentração de 80% dos RSU em cerca de 300 municípios, que podem passar a utilizar tecnologias já aplicadas a diversas cidades, principalmente do hemisfério norte. Grande parte dos demais pode ser agregada em consórcios para atingir o patamar mínimo, aumentando o nível de aproveitamento.

A viabilidade destas alternativas depende de vários fatores, como créditos de carbono, aproveitamento térmico da energia e contratos de longo prazo, dentre outros. Dentre os fatores ainda dependentes de solução estão os vinculados ao governo federal, como a remuneração pela conservação de energia decorrente da reciclagem, a possibilidade de financiamento diferenciado pelas instituições oficiais e o modelo de negócio estabelecido, visto que a comercialização de energia é fato causador de significativa incidência tributária.

Os próximos relatórios abordarão a composição típica de algumas capitais brasileiras, para análise sobre as tecnologias que melhor se adequam a cada situação, e as possibilidades de incentivos que podem ser concedidos para estimular esta atividade.

5. Referências

Nº.	TÍTULO
1.	ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). Resíduos Sólidos: classificação. NBR 10.004. Rio de Janeiro. ____ (1989). Aterros Sanitários. NBR 10.703. Rio de Janeiro. ____ (1992). "Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos." NBR 8419. ____ (1995). "Apresentação de Projetos de Aterros Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos." NBR 8849.
2.	AFONSO, J.R.R. (1993). "Financiamento e gasto público na área ambiental no Brasil e na região metropolitana do Rio de Janeiro". In: Em busca do desenvolvimento sustentável – O caso do Rio de Janeiro. Anais do seminário: Degradação ambiental e vulnerabilidade urbana. Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro. pag 81-121.
3.	ANDERSEN, P. H. – "State-of-the-Art Gasification (Emerging Technologies)", Head of Department, RAMBOLL, http://www.ramboll.dk/wte
4.	ANEEL (1998). Resolução nº 242. Versa sobre Fundo para Conservação de Energia.. ____ (1999). Resolução nº 245. Versa sobre a Conta de Consumo de Combustíveis.
5.	ANP (2002). Estatísticas sobre a importação e o consumo de óleo diesel no Brasil. Disponível em http://www.anp.gov.br/estatisticas . Recuperado em 18 de março de 2003. ____ (2003). Estatísticas sobre a importação e o consumo de óleo diesel no Brasil. Disponível em http://www.anp.gov.br/estatisticas . Recuperado em 26 de fevereiro de 2004.
6.	ARANDA, D. A. G. (2001). A incineração controlada de resíduos sólidos - status mundial. Rio de Janeiro, Brasil, Mimeo.
7.	ARANDA, D.A.G.; RAMOS, A. L. D.; NOVA, G. D.; MARTINS, B. B. "Catalisadores para Tratamento de Gases Tóxicos Provenientes de Incineração de Lixo". In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Catálise, 2001, Bento Gonçalves. IBP, 2001. v. 1, p. 228-231.
8.	AUGENSTEIN, D. and PACEY, J., "Landfill Gas Utilization: Technology Options and Case Studies", EPA-600/R-92-116, USEPA, Air and Energy Engineering Research Laboratory, Research Triangle Park, NC, June 1992.
9.	B.E.N (2006). "Balanço Energético Nacional".
10.	BAIRD, C. (2002). Química Ambiental, Editora Bookman: 196-242.
11.	BARBOSA, F. e TAVARES, M. (2000). "Governo exige consumo menor em prédio público", O Globo. Rio de Janeiro. p.27. 10-set.
12.	BNDES (2002). Programa para Apoio Financeiro a Investimentos em Energia. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, acessado em 30/06/2002, disponível em: http://www.bndes.gov.br/produtos/financiamento/energia.asp .
13.	BNDES, (1997). "Resíduos Sólidos Urbanos." Informe Infra-Estrutura, n.º 12.
14.	BORDALO, F. (2003). Faculdade de Engenharia Mecânica. 2003.
15.	BOGNER, J., et al, Waste Management, in Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY USA.
16.	BRASIL (1998). Ministério da Indústria, do Comércio e do Turismo. Portaria nº 92 de 06 de agosto de 1998. Cria Grupo de Trabalho para propor Programa Brasileiro de Reciclagem. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, n. 150, 7 ago. Seção 1.
17.	BRAZÃO, A. d. P. D. (2003). Dispõe da Política Estadual de Resíduos Sólidos e da Outras Providências.
18.	CALDERONI, S. (1997). Os bilhões perdidos no lixo. São Paulo. Humanitas Publicações.

Nº.	TÍTULO
19.	CAPELA, I. F. A., C.; ARROJA, L. and DUARTE, A.C. (1999). "Effects of pre-treatment (composting) on the anaerobic digestion of primary sludges from a bleached kraft pulp mill." II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste vol. 1: 113-120.
20.	CARTER, G. W., and TSANGARIS, A., "Municipal solid waste disposal process," U.S. Patent Number 5280757, 1994
21.	CEMPRE (1998). Pesquisa CICLOSOFT. São Paulo: IPT, 1994. Disponível: http://www.cempre.org.br/index2.htm [capturado em 20 set.]. ____ (2002). Recicláveis no Brasil. 2003.
22.	CENPES, 2000. "Análise de biodiesel de óleo de frituras para uso como combustível substituto ao óleo diesel". Rio de Janeiro.
23.	CETESB (1998) Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de resíduos – Enabling Brazil to Fulfill its commitments to the United Nations Convention on Climate Change – vol. I – Relatório Final – Julho/ 1998. ____ (1999). Pesquisa sobre emissões de metano dos depósitos de lixo no Brasil. São Paulo. 1999. Disponível em http://www.mct.gov.br/residuo9.htm [capturado em 23 maio]. ____ (2001). "Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares - Relatório Síntese." VOLUME I.
24.	CHARNES, A., COOPER, W. W., RHODES, E. (1978). "Measuring the efficiency of Decision-Making Units". European Journal of Operational Research, vol. 2, pp. 429-444.
25.	CHAYB, L. (1998). "E o lixo do Brasil?", ECO-RIO, Rio de Janeiro, set./out. p. 21 - 5.
26.	CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (1986), Manual do Gás Natural, Coleção José Ermírio de Moraes.
27.	COASE, R.H. (1960). "The problem of social cost", The Journal of Law & Economics, 3, p. 1 – 44.
28.	COELHO, S. T. (1999). "Biomassa: um produto nacional", CENBIO Notícias, São Paulo. ano 2, número 5. p. 2, jan-fev.
29.	COMLURB (2005). "Destinação Final do Lixo." Diretoria Industrial.
30.	CORMA, A., (1995) "Inorganic Solid Acids and their use in hydrocarbon reactions". Chem. Rev. v. 95, pp. 559-624.
31.	COSTA NETO, P. R.; et alli., 1999. "Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras". Química NovaCor.
32.	CPUNET (2003). " http://www.cpunet.com.br/bluesite/physics/termo2.htm ."
33.	CUNHA, I. (2000). Marketing ambiental. A questão dos resíduos sólidos urbanos. Dissertação (de Mestrado). UFF. Rio de Janeiro.
34.	DE BAERE, L. (1999). Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art. In: II International symposium on anaerobic digestion of solid waste. Barcelona, 15-17 june.
35.	DETRO. (1999). Matriz de distâncias do estado do Rio de Janeiro. PET/COPPE/UFRJ.
36.	DI LÁSCIO, M.A. (2001). "Relatório do Projeto Equinócio". Universidade de Brasília.
37.	DI LASCIO, M.A.; ROSA, L.P.; MOLION, L.C.B., 1994. "Projeto de Atendimento Energético para Comunidades Isoladas da Amazônia". COPPE/UFRJ, UNB, UFAL.
38.	DIAS Fº, O. (1998). Estrutura do serviço de coleta e disposição final do lixo no estado do Rio de Janeiro. PNUD.
39.	DIGHE, S. V., and LAZZARIA, D., "Westinghouse plasma gasification technology for coal and co-fired coal/biomass gasification," Pittsburgh Coal Conference., 2002.
40.	ECOLOGY AND ENVIRONMENT INC (1998), Preliminary Environmental Report for Bom Jardim Energética Thermal Electric Plant.

Nº.	TÍTULO
41.	<p>ELETROBRÁS (1991) Cadernos do Plano 2015 - Anais dos Seminários Temáticos: Utilização de Termelétricidade, Volume 4, Rio de Janeiro.</p> <p>____ (1998) Plano Decenal de Expansão 1998/2007 – Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos.</p> <p>____ (1999) – “Plano de Expansão do Setor Elétrico de 1999-2010”.</p> <p>____ (2000). Capturado no site http://www.elektrobras.gov.br/ em 10-ago</p> <p>____ (2003). CICLO COMBINADO. 2003.</p>
42.	<p>EMBRAPA (2007a). “Consumo de adubo em cultivos oleaginosos na região sudeste”.</p> <p>____ (2007b). “Rendimento protéico das oleaginosas”.</p> <p>____ (2002). “Ricinocultura consorciada com no Semi-Árido nordestino, visando produção de biodiesel, emprego e renda”. 8p.</p>
43.	EMBRATUR. (1998). Limpeza urbana nos municípios turísticos. Brasília, DF, MICT/ Oficina de Planejamento. Relatório.
44.	Emissions from Waste-to-Energy: A Comparison with Coal-Fired Power Plants.” (WTER Report)”.
45.	EMPRESA coleta lixo e vende a indústrias. (1992a) O Globo, Rio de Janeiro, 25 ago. Jornal de Bairro: Botafogo.
46.	EMPRESA coleta lixo e vende a indústrias. (1992b).O Globo, Rio de Janeiro, 17 ago. Jornal de Bairro: Copacabana, p. 8.
47.	<p>EPA, U.S. E. P. A.-. (1993). Opportunities to Reduce Anthropogenic Methane Emissions in the United States, EPA.</p> <p>____ (1996). "Turning a Liability into as asset: A Landfill Gas-to-energy Project Development Handbook." USA Environmental Protection Agency - EPA.</p> <p>____ (2002). Solid Waste Management and Green house Gases - A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, US.EPA.</p> <p>____ (2004). National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Proposed Standards for Hazardous Air Pollutants for Hazardous Waste Combustors (Phase I Final Replacement Standards and Phase II); Proposed Rule. Washington, EPA: 189.</p>
48.	EPE (2007). Plano Decenal de Energia 2007-2016. Disponível em http://www.mme.gov.br/ . Acessado em 20 de agosto de 2007.
49.	ETHERIDGE, S. P. (2003). "Biogas Use in Industrial Anaerobic Wastewater Treatment." Environmental Biotechnology Limited(CETESB).
50.	FARIA, F. S. (2002). Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos. Engenharia Civil. Rio de Janeiro, UFRJ.
51.	FARRO, W. (1997). Sucata vira matéria-prima e gera lucro. Revista da Indústria, São Paulo, p. 22 – 6, set.
52.	FIRJAN (2004). Relatório do Conselho Empresarial de Energia. Rio de Janeiro.
53.	FREEDMAN, B.; BUTTERFIED, R. O.; PRYDE, E. H.; 1986. J. Am. Oil Chem. Soc. 63, 1375
54.	GARCIA, A.G.P. (2003). Impacto da Lei de Eficiência Energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria. Dissertação (de mestrado). Programa de Planejamento Energético. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 139 p.
55.	GASNET (2004). Turbina a Gás em Ciclo aberto. 2004.
56.	GOLDEMBERG, J. (2002) Secretário José Goldemberg propõe a ONU, em Nova Iorque, a adoção de 12% de energias renováveis no mundo na próxima década. Disponível em: http://www.ambiente.sp.gov.br/destaque/goldemberg%5Frio%2B10.htm , acessado em 04/06/2002.
57.	GOMES, E.G. (1999). “Integração entre Sistemas de Informação Geográfica e Métodos Multicritério no Apoio à Decisão Espacial”. Tese (de mestrado). Programa de Engenharia de Produção. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. RJ. 229 p.
58.	GOMES, M. S. P., MUylaert, M. S., PAULA, R. R. C. (2004). “Analysis of a CDM project involving alcohol-fueled cars in Brazil: local emissions during the production and use of the fuel alcohol versus the production and use of gasoline”. In: Proceedings of the 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress, London, UK.
59.	GRADEL, T. E., CRUTZEN, P.J., (1997). Atmosphere, climate and change. Scientific American Library, New York.

Nº.	TÍTULO
60.	GRADY, C. P. L., DAIGGER, G. T., and LIM, H. C., Biological wastewater treatment, 2nd edition, Marcel Dekker, New York, 1999.
61.	HENRIQUES, R. M., PIMENTEIRA, C.A.P., OLIVEIRA, L.B. (2003). Geração de Energia a Partir de Resíduos de Lixo e Óleos Vegetais. Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Interciência. Rio de Janeiro. 1: 93-131.
62.	HICKMAN L.H. (1999). "Principles of Integrated Solid Waste Management." American Academy of Environmental Engineers Publication.
63.	HIDROVEG (2002). "Estimativa sobre o potencial de insumos residuais no país". Comunicação pessoal.
64.	HOUAISS, A. (2001). Dicionário de Língua Portuguesa, Editora Objetiva Ltda. http://www.ows.be/
65.	IBAMA, 2001. "Fatores de emissão dos motores homologados pelo PROCONVE". Comunicação pessoal.
66.	IBGE (1989). I Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ. ____ (1996). Anuário Estatístico do Brasil 1996. Anu. Estat. Brasil. V. 56. ____ (2000). II Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/lixo_coletado/defaultlixo.shtm , acessado em 04/06/2002.
67.	IEA (1997). "APPENDIX K WASTE INCINERATION." Renewables in Power Generation: Towards a Better Environment. ____ (2003). International Energy Agency. "International demand of diesel oil". Disponível em: www.iea.org . ____ (2004). International Energy Agency. "International electric demand". Disponível em: www.iea.org/statistics .
68.	IPCC (1996). Intergovernmental Panel on Climate Change Greenhouse gas inventory reference Manual, revised – chapter 6 – Waste. 350 p. ____ (1996). Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions - Intergovernmental Panel on Climate Change - Guidelines for National Green house Gas Inventory. Londres, Cambridge University Press. ____. (2000). Third Annual Report, Cambridge University Press.
69.	IPM, -. (2002). Histórico da Incineração no Brasil. Divisão de Sistemas e Métodos. São Paulo: 9.
70.	IPT (1998). Lixo Municipal – Manual de Gerenciamento Integrado – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 227p. São Paulo.
71.	ISWA (1993) Working Group on Sanitary Landfill Yearbook. International Solid Waste Association, Copenhagen.
72.	ITALIA, I. d. R.-A. (1998). Digestione Anaerobica: Utilizzo di Rifiuti Organici per la Produzione Di Biogas. Appendice C.
73.	IVIG (2005). Maquete digital do ECOPOLO BIOENERGÉTICO.
74.	JACKSON, F. R. (1974). Energy from Solid Waste. Nova Jersey, EUA, Noyes Data Corporation.
75.	JONES, K. H. (1994), "Comparing Air Emissions from Landfills and WTE Plants". Solid Waste Technologies. v. March/April, pp. 28-39.
76.	JUNIPER Consultancy Services Ltd., "Mechanical-Biological-Treatment: A Guide for Decision Makers Processes, Policies and Markets", March, 2005.
77.	JURAS, I. d. A. G. M. (2000). Destino dos Resíduos Sólidos e Legislação sobre o tema. Brasília - DF, Consultora Legislativa da Área XI - Meio Ambiente, Geografia, Urbanismo, Arquitetura: 6.
78.	KAPAZ, E. (2001). "Política Nacional de Resíduos – Relatório Preliminar."
79.	KÜBLER, H. a. W., M. (1992). "The BTA-process high rate biomethanisation of biogenous solid wastes." Proc. Int. Symp. on Anaerobic Digestion of Solid Waste: 535-538.
80.	KUMAR, S. (2000). "Technology options for municipal solid waste-to-energy project." TIMES (TERI Information Monitor on Environmental Science) Volume 5(Number 1): 1-11.

Nº.	TÍTULO
81.	LA ROVERE e BRAGA (1981). "Óleos vegetais para fins energéticos: análise comparativa de algumas avaliações econômicas". FINEP. 43p.
82.	LA ROVERE, E. L & AMERICANO, B.B. (1998) Environmental Impacts of Privatizing the Brazilian Power Sector; PPE/COPPE/UFRJ; mimeo.
83.	LA ROVERE, E. L. (1999) Política Ambiental e Planejamento Energético; PPE/COPPE/UFRJ; mimeo.
84.	La ROVERE, E. L. A., B.B. (2002). "Domestic actions contributing to the mitigation of GHG emissions from power generation in Brazil." Climate Policy 2: 247-254.
85.	LA ROVERE, E. L. et alli. (2001). "Assessment of CDM Project Candidates and Selection of Five Proposals in The Brazilian Context". South North, available at http://www.southsouthnorth.org/ , since august 2001
86.	LEONE, J. (2003). "America Experience on Landfill Biogas Recovery." AMERESCO _ CETESB.
87.	LIU, T. a. G., S, (1997). "Phase separation during anaerobic fermentation of solid substrates in an innovative plug-flow reactor." Proc. 8th International Conference on Anaerobic Digestion vol. 2: pp. 17-24.
88.	LIPOR (2007) Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. Disponível em http://www.lipor.pt/ . [Capturado em 23 de outubro de 2007].
89.	MARTIN, Johannes – "Global Use and Future Prospects of Waste-to-Energy Technologies", WTERT Fall Meeting, 2004 – Columbia University, New York, NY.
90.	MCT (2002) – "Comunicação Nacional" – Inventário de emissões de gases do efeito estufa. Disponível em http://www.mct.gov.br/mudancasclimaticas [capturado em 23 de outubro de 2002].
91.	MCT E BNDES. (2000). Efeito estufa e a convenção do clima.
92.	MCT (2007). Teor de Carbono da margem de construção do setor elétrico por região. Disponível em http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/50862.html . Acessado em 11 de setembro de 2007.
93.	MDIC (1998). Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior. Programa Brasileiro de Reciclagem. PBR. Disponível em: http://www.reciclagem.ibict.br/pbr . Acessado em: 20/04/1999.
94.	MENEZES, R. A. A., GERLACH, J. L., e MENEZES, M.A. (2000). "Estágio Atual da Incineração no Brasil." ABLP - Associação Brasileira de Limpeza Pública VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública.
95.	MERCEDES, S.S.P., SAUER, I. L., COELHO, S. T. (1999). Barriers to Implementation of Waste-to-Energy (WTE) Technologies in Brazil. In: Proceedings of Fourth Biomass Conference of The Americas. v.2. p.1777 – 1783.
96.	MICHAELIS. (1998). Moderno dicionário da língua portuguesa. 1ª ed. São Paulo. Melhoramentos.
97.	MME (2000). Programa Prioritário de Termelétricas. Disponível em www.mme.gov.br [capturado em 15 de maio de 2002].
98.	MME (2001). Plano Decenal de Expansão 2001/2010. Disponível em http://www.mme.gov.br/planodecenal [capturado em 12 de setembro de 2001].
99.	MME (2002). Plano Decenal de Expansão do Setor Elétrico. Ministério das Minas e Energia. Disponível em http://www.mme.gov.br/ , acessado em 04/06/2002.
100.	MONTEIRO, S.N. et al. (2007). Carbonização de cascas de coco. In: Anais do 62º Congresso Anual do Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 23 a 27 de julho de 2007 – Vitória – ES.
101.	MOREIRA, J.R., CORRÊA, F. FREITAS, M.A.V. (1997). Foro permanente das energias renováveis - Plano Nacional de Energias Renováveis Biomassa, CENBIO.
102.	MORRIS, J. (1996). Recycling versus incineration: an energy conservation analysis. Journal of hazardous materials, 47. Elsevier. p 277-293.
103.	MORRIS, M. W., L. (1999). Energy Recovery from solid waste fuel using advanced gasification technology. International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Orlando, Florida/EUA, University of California.

Nº.	TÍTULO
104.	MUYLAERT, M. S., (coord.) (2000). Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta - Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL - do Protocolo de Quioto - Estudos de Caso. Rio de Janeiro, Editora da COPPE. 247 p.
105.	NOGUEIRA, L.A.H. E WALTER, A.C.S. (1997) Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: experiências e perspectivas. CENBIO.
106.	NREL (National Renewable Energy Laboratory), 1998. Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus. USA.
107.	OLIVEIRA, L. B. (2000). Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e abatimento de gases do efeito estufa. Dissertação (de mestrado). Programa de Planejamento Energético. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. RJ. 148 p.
108.	OLIVEIRA, L. B. and ROSA, L.P. (2003). "Brazilian Waste Potential: energy, environmental, social and economic benefits." Energy Policy 31: 1481-1491.
109.	OLIVEIRA, L., HENRIQUES, R., PEREIRA, A. (2002). "Coleta Seletiva, Reciclagem e Conservação de Energia". In: Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia, vol. 3, pg. 1461, Rio de Janeiro.
110.	OLIVEIRA, L.B. (1999). Internalizações da coleta seletiva. COPPE/UFRJ. Mimeo.
111.	OLIVEIRA, L.B. (2004) Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil. Tese (de doutorado). Programa de Planejamento Energético/ COPPE. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
112.	OLIVEIRA, L.B., LIMA, J.P.C.e FERREIRA, A.M.M. (1999). Loteria da coleta seletiva. Rio de Janeiro, ENCE/IBGE. Monografia (Especialização em Análise Ambiental e Gestão do Território).
113.	OLIVEIRA, L.B., PEREIRA, A.S. e REIS, M.M. (2000). "Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos". In: ROSA, L.P., FREITAS, M.A e MUYLAERT, M. S. Relatório de Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL - Estudos de Caso – PNUD – ANEEL – MCT - IVIG/COPPE/UFRJ.
114.	OMA-BRASIL (2007). Projeto integrado de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos. ECOPOLO.
115.	ONU (2000). Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies. Ed. United Nations. 315 p.
116.	OSTREM, K. "Greening Waste: anaerobic Digestion for Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes", M.S. Thesis, Dept. of Earth and Environmental Engineering, Columbia University, New York, NY, 2004.
117.	OSTREM, K.; MILLRATH, K., and THEMELIS, J.N. "Combining Anaerobic Digestion and Waste-to-Energy", 12th NAWTEC, 2004.
118.	OWS (1998). Traitement de Dechets Municipaux par le Systeme Dranco, organic waste system NV. 2002.
119.	OWS (2002). http://www.ows.be/ acessado em 03 de outubro de 2002.
120.	PALMOWSKI, L. M., J. (1999). "Influence of the Size Reduction of Organic Waste on their Anaerobic Digestion." II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste vol. 1: pp. 137-144.
121.	PAULA, C.P., SAUER, I. L. (2002). "Cogeração e Geração Distribuída". In: Soluções para a Energia no Brasil. In: IX Congresso Brasileiro de Energia e IV Seminário Latino-americano de Energia, Rio de Janeiro. v.4. p.1915 – 1924.
122.	PBR – Programa Brasileiro de Reciclagem. Ministério do Desenvolvimento. Disponível em: http://www.reciclagem.ibict.br/pbr [capturado em 20 abr. 1999] – Ao verificar o link acima, constatou-se não estar mais disponível.
123.	PEARCE, D. e TURNER, R. (1990). Economics of natural resources and the environment. London, 287 p.
124.	PENIDO, J.H. (2000). Compostagem. RESOL Engenharia. Capturado no site http://www.resol.com.br/ em 23 de janeiro.
125.	PERES, S. (1999) Aproveitamento energético do lixo, uma nova alternativa para geração de energia. In: CENBIO Notícias, São Paulo. ano 2, número 5. p. 3, jan-fev.
126.	PERRY, D. W. G. R. H. (1999). Chemical Engineer´s Handbook. Kansas/EUA, McGraw-Hill.
127.	PIMENTEIRA, C. A. P. (2002). Aspectos Sócio-Econômicos da Gestão de Resíduos Sólidos no Rio de Janeiro - Uma Análise Insumo Produto. Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Nº.	TÍTULO
128.	PIMENTEIRA, C. A. P. et al (2004). Energy conservation and CO2 emissions reductions due to recycling in Brazil. Waste management 24. p. 889-897.
129.	PINATTI, D. G. (1996). Programa BEM-Biomassa, Energia e Materiais. Lorena, SP, Documento Básico DEMAR.
130.	PINATTI, D.G et al (1999). Report on bioenergy in Brazil. In: Annual meeting of international energy agency. Auburn University Conference Center. Auburn, Alabama, USA.
131.	POOLE, A.D, HOLLANDA, J.B & TOLMASQUIM, M.T.(1998) Conservação de Energia e Emissões de Gases do Efeito Estufa no Brasil; Instituto Nacional de Energia Energética.
132.	RAYLANDER, H. and HAUKOHL, J. – “Status of WTE in Europe”, Waste Management World, ISWA, May-June 2002.
133.	RECICLOTECA, (2000). Informativo da. Número 13. Rio de Janeiro.
134.	REINHART, “Landfill Gas Quality and Quantity”, apresentação PowerPoint (http://msw.cecs.ucf.edu/gas.ppt) , no curso sobre RSU da University of Central Florida, July 2004.
135.	RIBEIRO, M. A. D. A. S. K. (2003). Airport Contributions to Local Air Pollution Case Study: Rio de Janeiro International Airport. Air Pollution XI, Catania, Itália.
136.	RIBEIRO, S. K. (2003). The importance of the Road Transport Sector in the Global Warming - The Case of the City of Rio de Janeiro. 12 th Symposium on Transport and Air Pollution, Avignon, France.
137.	RIBEIRO, S. K., D'AGOSTO, M.A. (2003). Transport and Carbon Dioxide Emissions - The Brazilian Case. urban Transport IX - Urban Transport and the Environmental in the 21st Century, Creta, Grécia.
138.	RIBEIRO, S. K. R., M.V.; AGOSTO, M.A.D.; COSTA, C.V.; DAVID, E.G. (2003). Transport and Climate Change. Rio de Janeiro, Brasil, Creatio Design e Comunicação Ltda.
139.	RIBEIRO, S. K. V., A.G.F. (2003). O potencial de Redução das Emissões de Monóxido de Carbono, através da implementação de Programas de Inspeção e Manutenção - O caso do Estado do Rio de Janeiro. XVII ANPET, Rio de Janeiro, Brasil.
140.	Rise-AT. (1998). "Review of Current Status of Anaerobic Digestion Technology for treatment of MSW."
141.	RM Materiais Refratários. Relatório da Empresa – Programa BEM, Biomassa, Energia, Materiais – rm@easygold.com.br.
142.	ROSA, L.P., LA ROVERE, E.L., RODRIGUES, A.P. (1985). Economia e tecnologia da energia.
143.	ROSA, L. P. e. a. (1996). Carbon Dioxide and Methane Emissions: a Developing Country Perspective. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
144.	ROSA, L. P. e SANTOS, M.A. (1996). Green House Gas Emissions under Developing Countries Point of View. Rio de Janeiro, ENERGE - COPPE/UFRJ.
145.	ROSA, L. P. (1996). Risks, uncertainty and the equity issue in GHG emissions: A latin american viewpoint. p.261-2. In: ROSA, L.P. & SANTOS, M.A. (editors). Greenhouse gas emission under developing countries point of view. COPPE/ENERGE/ALAPE. 283 p. Rio de Janeiro.
146.	ROSA, L.P. e LACERDA, W. (1996). Tormentas cariocas COPPE. Rio de Janeiro.
147.	ROSA, L.P. e SCHECHTMAN, R. (1996). Avaliação de custos ambientais da geração termelétrica: inserção de variáveis ambientais no planejamento da expansão do setor elétrico. In: ROSA, L.P. (Coord. Geral) Cadernos de Energia, nº 9. março.
148.	ROSA, L. P. (1997). Biomassa Tropical e o Risco de Mudança Climática Global: Desenvolvimento Sustentável da Amazônia. O Uso da Biomassa no Brasil - Potenciais para uma Política de Desenvolvimento Regional. CENBIO. São Paulo, CENBIO.
149.	ROSA, L. P. (1998). New Partnerships for Sustainable Development and Key Issues for Operationalising the Clean Developing Mechanism. Global Change Center. Rio de Janeiro, PPE-COPPE/UFRJ.
150.	ROSA, L.P. (1999) O Efeito Estufa. Mimeo. COPPE/UFRJ.
151.	ROSA, L.P. (2001) O apagão – Por que veio? Como sair dele? Editora Revam – 1ª edição – Rio de Janeiro. 125 p.

Nº.	TÍTULO
152.	ROSA, L.P. et alli (2003). "Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos e Óleos Vegetais". In: TOLMASQUIM, M.T. (Coord) Fontes Alternativas de Energia no Brasil - CENERGIA. 1a Ed. Editora Interciência. 515 p.
153.	SALAMA, C. (1982). Estudo da viabilidade de utilização de óleos vegetais em substituição ao óleo diesel. Tese (de mestrado). Programa de Planejamento Energético. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
154.	SANT'ANNA, L.A.F.P. (1999). Análise de Envoltória de Dados Aplicada à Avaliação de Performance no Sistema Elétrico Brasileiro. Tese (de mestrado). Programa de Engenharia de Produção. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 123 p.
155.	SCHARF, R. (1998a). Certificados ambientais viram negócio bilionário, Gazeta Mercantil. São Paulo.
156.	SCS Engineers, "Helping Landfill Owners Achieve Effective, Low-cost Compliance with Federal Landfill Gas Regulations", USEPA, LMOP, contract No. 68-W6-0004.
157.	SERÔA DA MOTTA, R. & CHERMONT, L. (1996). Aspectos econômicos da gestão integrada de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: IPEA (Texto para discussão nº 416).
158.	SHAPIRO, A (1999). Lixo urbano: tecnologia e economia. Jornal Gazeta Mercantil em 09/11/1999.
159.	SILVA, V.L. (2002). O Futuro das Indústrias e o Papel da Universidade no Desenvolvimento Sustentável. Disponível em, www.mdic.gov.br/tecnologia/revista/artigos/PE/art09vandinete.PDF , acessado em 04/06/2002.
160.	SMAC-COPPETEC. (2000). Inventário de emissões de gases do efeito estufa do município do Rio de Janeiro.
161.	TAVARES, P. (1992). Universidades investem na melhoria da qualidade de vida. Jornal da FACHA, Rio de Janeiro, nov. p. 2.
162.	TEIXEIRA, E.N., et al. (1997). Potencial de minimização de resíduos sólidos domésticos em termos de matéria orgânica e embalagens. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19º. Foz do Iguaçu: ABES, 14 a 19 set. Anais em CD-ROM.
163.	TEIXEIRA, P. R. M. (2004). Análise do Aproveitamento Energético de Gases de Aterros Sanitários - Simulação do Processo de Combustão. Dissertação (de Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
164.	TEIXEIRA, P. R. M., GOMES, M. S. P. (2004). "Simulação do Processo de Combustão de Gases Provenientes de Aterros Sanitários". In: Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém, PA.
165.	THEMELIS, N. J., KIM, Y. H., and BRADY, M. H., "Energy recovery from New York City municipal solid wastes," Waste Management & Research, Vol. 20, No. 3, 2002, pp. 223-233.
166.	THEMELIS, N.J. - "An Overview of the Global Waste-to-Energy Industry", Waste Management World, ISWA, July-August 2003.
167.	THEMELIS, N.J. - "US - Waste in a Land of Plenty", Waste Management World, ISWA, Sep-October 2004.
168.	TOLMASQUIM, M. T. e. a. (2003). Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro, Interciência.
169.	TORRESANI, M. and PEOTTER, B., " A Case Study in the Development of a Landfill Gas-to- Energy Project for the Antioch, Illinois, Community School District", OLKS, Z860001923-155.doc, March 22, 2004.
170.	Towill-Corporation, R. M., "New Systems Research for Refuse Disposal- Oahu Municipal Refuse Disposal Alternatives Study" City&County of Honolulu, Honolulu, 2000.
171.	TYMOSHEVSKYY, B.G. e TKACH, M.R. - "Resource recovery from medical resource recovery from medical plastic and rubber wastes", WTER Fall Meeting, 2004 - Columbia University, New York, NY.
172.	USAID. (1997). Characterization of landfill sites in Brazil for landfill gas recovery. Business Focus Series. 106 p.
173.	USEPA (1998). Greenhouse gases emissions of management of municipal solid waste. 144 p.
174.	UMA solução limpa e muito econômica. (1992). Mulher de Hoje, Rio de Janeiro. nº. 149, p. 54, abr.
175.	USEPA, 1998. Summary results from NBB/USEPA tier I. "Health and environmental effects testing for biodiesel under the requirements for USEPA registration of fuels and fuel additives" (40 CFR Part 79, Sec 21 1 (b) (2) and 21 1 (e)). Final report.

Nº.	TÍTULO
176.	VELEVA, V. and ELLENBECKER, M. (2001). "Indicators of sustainable production: framework and methodology". Journal of cleaner production, 9. 519-49 p.
177.	VERMA, S. , "Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes", M.S. Thesis, Dept. of Earth and Environmental Engineering, Columbia University, New York, NY, 2002. _____, "Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes" Earth Resources Engineering, New York, Columbia University, Vol. 56, 2002.
178.	VERSTRAETE, W. V., P.; BAERE, L. (2002). Types of anaerobic digester for solid waste. Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. U. o. Adelaide. Adelaide, Hardback.
179.	VOIGT. N. et al. (1999). Gestão ambiental de resíduos. COPPE/UFRJ. Mimeo.
180.	WARNKEN ISE (2007). Potential for greenhouse gas abatement from waste management and resource recovery activities in Australia. 54 p.
181.	WEILAND, P. (1992). "One- and two-step anaerobic digestion of solid agro industrial residues." Proc. Int. Symp. on Anaerobic Digestion of Solid Waste: 193-199.
182.	WEITZ, Keith – "Waste Conversion Technologies Life Cycle Assessment", WTERT Fall Meeting, 2004 – Columbia University, New York, NY.
183.	WILLUMSEN, C. H., "Energy Recovery from Landfill Gas in Denmark and Worldwide", LFG Consult Houkjasojen 9, OPET 2001.
184.	WILLUMSEN, H. C. (1999). "State of the Art of Landfill Gas Development in EU and World wide." Joule-Thermie International workshop on Landfill Gas in kaunas.
185.	WILLUMSEN, H. C. (2001). "Energy Recovery from Land Fill gas in Denmark and worldwide." LG Consultant.
186.	WILLUMSEN, H. C. (2001). "Energy Recovery From Landfill Gas in Denmark and Worldwide". Disponível em: http://www.lei.lt/Opet/Pdf/Willumsen.pdf ; acessado em 25/09/2002.
187.	ZHANG, R., and ZHANG, Z., "Biogasification of solid waste with an anaerobic-phased solids-digester system," U.S. Patent No. 6,342,378, Regents of the University of California, USA, 2002.