



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Bruno Quaresma Bastos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Rio de Janeiro
Agosto de 2013

TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS

Bruno Quaresma Bastos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinada por:

Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng.
(Orientador)

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.

Eng. Bruno Monteiro Cardoso

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Agosto de 2013

Bastos, Bruno Quaresma

Tecnologias de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos/ Bruno Quaresma Bastos. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

IX, 72 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Jorge Luiz Nascimento

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 76-81.

1. Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos. 2. Resíduos Sólidos Urbanos. 3. Recuperação Energética. 4. Tecnologias.

I. Nascimento, Jorge Luiz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Elétrica. III. Título.

“As paixões são os únicos oradores que persuadem sempre. São como uma arte da natureza, de regras infalíveis; e o mais simples dos homens, com paixão, persuade mais que o mais eloquente sem ela.”

La Rochefoucauld

Agradecimentos

Agradeço ao meu professor Jorge Luiz por ter aceitado orientar meu trabalho de conclusão de curso.

Agradeço à MPX, com destaque ao Maurício e à Vanessa Oliveira, pelas oportunidades que me foram dadas e pela experiência que tive. Sou grato também ao apoio no decorrer deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos pelos bons momentos e pelo suporte. Um abraço especial ao Marcio Lopes pelos anos de amizade. Tenho grande estima e carinho por todos – muito obrigado!

Agradeço à minha família pelo apoio, carinho e recordações.

Por fim, agradecimentos seriam pouca coisa a destinar aos meus pais e ao meu irmão, que muito dedicaram a mim, que estão e sempre estarão comigo. Amo vocês irrestritamente!

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Tecnologias de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos

Bruno Quaresma Bastos

Agosto/2013

Orientador: Jorge Luiz Nascimento

Curso: Engenharia Elétrica

O crescimento do consumo e da demanda de materiais e mercadorias, impulsionado pelos padrões e meios da sociedade moderna, suscita dois problemas na atualidade: o aumento da geração de resíduos (lixo) e o aumento da demanda energética. Neste contexto, surgem as práticas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, que, integradas, oferecem soluções àqueles problemas.

O aproveitamento energético do lixo, que é uma das práticas de gerenciamento do lixo, ocorre através do uso de tecnologias de recuperação de energia, como a combustão à queima direta, a digestão anaeróbica e a gaseificação. Estas tecnologias reduzem o volume do lixo, ao mesmo tempo em que o utilizam para a produção de energia elétrica e de subprodutos.

Este trabalho apresentará as tecnologias de geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos, atentando para seu funcionamento e para os parâmetros que afetam sua operação e viabilidade. Adicionalmente, serão apresentados dois casos operacionais do aproveitamento do lixo para geração de energia – e será feita a análise energética do reuso, da combustão à queima direta e da digestão anaeróbica do lixo.

Palavras-chave: Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos, Resíduos Sólidos Urbanos, Recuperação Energética, Tecnologias.

Abstract of Undergraduate Project presented to Escola Politécnica/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Technologies for the Energetic Use of Municipal Solid Wastes

Bruno Quaresma Bastos

August/2013

Advisor: Jorge Luiz Nascimento

Course: Electrical Engineering

The growth of consumption and demand of materials and wares, pushed by modern society's standards and ways, gives rise to two problems of the present: the increase of residues generation (waste) and the increase of energy demand. In this context, emerge the practices of municipal solid waste management, which, integrated, offer solutions to both problems.

The energetic use of the waste, which is one of the management practices, happens through the usage of technologies that recover energy (from the waste), such as the mass burn combustion, anaerobic digestion and gasification. These technologies reduce the volume of the waste, and, at the same time, produce electricity and byproducts from it.

This work will present the technologies that generate energy from municipal solid wastes, focusing on its functioning and on the parameters that affect its operation and feasibility. Additionally, will be presented two operational cases of the use of waste for energy generation – and will be made an energetic analysis of the reuse, the mass burn combustion and anaerobic digestion of the waste.

Keywords: Energetic Use of Solid Waste, Municipal Solid Wastes, Energetic Recovery, Technologies.

Sumário

Introdução.....	10
1 Resíduos Sólidos Urbanos.....	13
1.1 Problemas relacionados aos Resíduos Sólidos Urbanos	18
2 Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos.....	19
2.1 Principais práticas do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos	19
2.1.1 Não Geração	19
2.1.2 Redução.....	19
2.1.3 Reutilização	20
2.1.4 Reciclagem.....	20
2.1.5 Compostagem.....	20
2.1.6 Tratamento com reaproveitamento energético	20
2.1.7 Tratamento	20
2.1.8 Disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.....	21
2.2 Benefícios da adoção de estratégias de gerenciamento de resíduos sólidos	21
2.2.1 Redução da dependência de matéria virgem e economia de matéria prima	24
2.2.2 Economia de Energia	24
2.2.3 Redução de emissões de gases do efeito estufa e outros poluentes.....	24
2.2.4 Criação de empregos e suporte ao crescimento econômico	25
2.2.5 Redução dos custos de coleta e de disposição em aterro	25
2.3 Hierarquia das práticas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos	25
3 Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos.....	27
3.1 Combustão.....	29
3.1.1 Funcionamento Básico.....	30
3.1.2 Considerações.....	32
3.1.3 Vantagens e Desvantagens	37
3.2 Digestão Anaeróbica	38
3.2.1 Funcionamento Básico.....	39
3.2.2 Considerações.....	44
3.2.3 Vantagens e Desvantagens	47
3.3 Gaseificação	48
3.3.1 Funcionamento Básico.....	49
3.3.2 Considerações.....	51
3.3.3 Vantagens e Desvantagens	53
4 Exercício e Casos.....	55
4.1 Casos	55
4.1.1 Planta Likeng de Combustão Convencional em Baiyung, Guangzhou, China ..	55
4.1.2 Digestão Anaeróbica em Moncada y Reixach, Barcelona, Espanha	58
4.2 Análise de potencial energético do Reuso, Combustão Convencional e Digestão Anaeróbica de resíduos sólidos urbanos.....	60
4.2.1 Reutilização	61
4.2.2 Digestão Anaeróbica.....	63
4.2.3 Combustão Convencional	64

4.2.4	Consolidação de resultados	65
5	Considerações Finais sobre as Tecnologias	67
5.1	Premissas para a viabilidade econômica	67
5.2	Recuperação energética de resíduos sólidos para produção de energia elétrica no Brasil	70
6	Conclusão	73
	Referências Bibliográficas	76

Introdução

O crescimento do consumo e da demanda de materiais e mercadorias, impulsionado pelo caráter do sistema econômico e pela sua influência no estilo de vida das sociedades, suscitam o aumento da geração de resíduos e da demanda por energia.

O desperdício de recursos e de energia, assim como o consumismo crônico e desenfreado, é um fator agravante. Surgem, como consequência, questões relevantes para a atualidade: a disposição final de resíduos sólidos urbanos, que têm sido produzidos em maiores quantidades a cada ano, e o crescimento da demanda energética. Neste contexto, soluções que gerenciem os resíduos e matérias, e que mantenham a reserva de energia e de recursos, são de grande importância.

Estratégias de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) podem servir a ambos os propósitos, pois fomentam a redução da quantidade de resíduos a serem enviados a aterros, ao mesmo tempo em que fomentam o reaproveitamento dos materiais encontrados no lixo em processos produtivos, substituindo matéria virgem. O uso de matéria reciclada, em processos produtivos, reduz os gastos energéticos em todo o ciclo de produção do produto (e.g., extração, condicionamento, transporte, consumo, disposição). Como o ciclo de produção a partir da matéria virgem é mais energético do que a produção do produto a partir da matéria reciclada, o balanço é positivo energeticamente. Pode ocorrer, no entanto, que a produção a partir da matéria virgem seja mais barata. Isto faria com que, devido ao caráter econômico, a “melhor” opção (em termos energéticos e ambientais) seja descartada.

Dentro das práticas adotadas para gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, há o reaproveitamento energético dos RSU, que é feito através do uso de tecnologias de recuperação de energia, como a combustão à queima direta, a digestão anaeróbica e a gaseificação. Estas tecnologias reduzem o volume do lixo, ao mesmo tempo em que utilizam resíduos para a produção de energia elétrica de base e subprodutos.

No contexto da economia da energia, é importante citar que a manutenção de reservas energéticas é de grande importância ao país. O sistema elétrico brasileiro, que é predominantemente hidrelétrico, tem precisado cada vez mais de soluções que garantam a segurança energética do país. A falta de reservatórios nas hidrelétricas faz com que o parque gerador fique mais suscetível ao regime das chuvas e à sua sazonalidade. No início do ano de 2013, os reservatórios do país registraram um recorde de baixa, forçando o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) a despachar todo o parque termelétrico, para que os níveis de água fossem reestabelecidos. À época houve temor sobre possível racionamento – e os preços da

energia aumentaram sobremaneira devido ao despacho de térmicas e ao cenário. A adoção de práticas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos ajudaria a manter a segurança energética do país, através da conservação de energia (práticas como reuso e reciclagem) e da geração de energia de base (e.g., tecnologia de combustão a partir do lixo urbano).

Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar as tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, atentando para seu funcionamento e para os parâmetros que afetam sua operação e viabilidade. As tecnologias estudadas foram escolhidas de acordo com a maturidade a nível mundial (combustão e digestão anaeróbica) e o potencial futuro (gaseificação). É, também, objetivo deste trabalho apresentar casos operacionais das tecnologias de combustão e digestão anaeróbica, e avaliar o potencial energético das seguintes práticas de gerenciamento: reuso, combustão convencional e digestão anaeróbica.

Metodologia

Para a confecção deste trabalho, foi feito o levantamento de uma extensa bibliografia no tema de geração de energia a partir dos resíduos sólidos e nos temas relacionados ao gerenciamento de resíduos. Após a pesquisa, foi feita a análise e avaliação das informações obtidas na bibliografia, que serviram de referência para o trabalho. Foram elaborados, então, os capítulos que descrevem o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos e as tecnologias de aproveitamento energético. Depois foram apresentados dois casos de plantas em operação. Em seguida, foi feita uma análise energética para três práticas de gerenciamento de resíduos, de acordo com dados obtidos ao decorrer da pesquisa empreendida.

Estrutura do Trabalho

O presente projeto está estruturado em seis capítulos:

O primeiro capítulo descreve o que são os resíduos sólidos, levando em conta diferentes conceituações. Comenta-se, ainda neste capítulo, sobre a importância da caracterização dos componentes do lixo, e apresenta-se, além dos problemas relacionados aos resíduos sólidos urbanos, a situação brasileira em termos de disposição final do lixo produzido e em termos de composição dos resíduos.

O segundo capítulo trata do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, abordando as práticas existentes (e.g., não geração, redução, reutilização, reciclagem, compostagem, reaproveitamento energético, disposição ambientalmente adequada) e considerando os benefícios associados a estas práticas.

O terceiro capítulo examina as tecnologias de reaproveitamento energético dos resíduos sólidos (combustão à queima direta, digestão anaeróbica e gaseificação). Ao início da sessão de cada tecnologia, é feita uma introdução situando-as globalmente em termos de maturidade e características gerais (e.g., insumos que recebem). É descrito, em seguida, o funcionamento das tecnologias – e são apresentadas e discutidas as questões que afetam a eficiência da tecnologia, além das questões das emissões. Ao final da sessão de cada tecnologia, são apresentadas suas vantagens e desvantagens.

O quarto capítulo apresenta dois casos de tecnologias de aproveitamento energético de resíduos em operação, e analisa o potencial energético da reutilização, digestão anaeróbica e combustão convencional, caso estas práticas fossem empregadas no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos do Brasil.

O quinto capítulo expõe os fatores relacionados à viabilidade de um empreendimento de geração de energia a partir de resíduos sólidos – e apresenta a situação, no Brasil, das tecnologias que são objetos deste estudo, atentando-se para as barreiras encontradas no país, que impedem a adoção das tecnologias, e citando-se possíveis impulsionadores.

O sexto capítulo compreende a conclusão deste trabalho, com a solidificação do que foi apresentado no seu decorrer e com a proposta de trabalhos futuros.

1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos são comumente tidos como resto, e vistos como matéria sem valor, proveniente das sobras de atividades domésticas, industriais, comerciais e agrícolas. Sua imagem seria, então, relacionada a algo indesejável, que perdeu a utilidade – e que deve ser descartado.

Esta visão dos resíduos, onde há subentendida sua significação como descarte, não considera seu potencial energético e sócio-econômico. Uma segunda visão propõe a adição de valor ao resíduo, como matéria-prima para processos produtivos ou como combustível para gerar energia. Deste modo, o resíduo poderia significar, ao invés de resto sem valor, matéria-prima fora do lugar, capaz de ser utilizada para diversos fins.

Em estudo elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2008), conceitua-se “Resíduos do Lixo” como “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”.

A Norma Brasileira ABNT NBR 10004:2004 define os Resíduos Sólidos como:

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

Esta definição de resíduos sólidos, porém, é ampla, conforme cita Faria (2002) sobre outro estudo, podendo compreender uma gama significativa de resíduos – sólidos e líquidos. Quanto a esta questão, Faria (2002) diz ser equivocada a adoção do lodo, e de líquidos, como resíduos sólidos. Schübeler (1996), ao definir Resíduos Sólidos Urbanos, descarta os resíduos semisólidos de sua definição, arguindo que estes seriam da responsabilidade do gerenciamento de resíduos líquidos.

Como complemento à definição, pode-se classificar os resíduos de acordo com sua origem e características físicas (EPE, 2008):

De acordo com origem:

- Resíduos urbanos: proveniente de residências, atividades comerciais, varrição de ruas, podas de árvores e similares;

- Resíduos industriais: gerados pelos processos de transformação de matérias num produto final (gerados em processos produtivos e instalações industriais);
- Resíduos agrícolas: decorrentes da atividade produtiva do setor primário;

De acordo com as características físicas:

- Materiais inertes: vidros, metais, terras, cinzas e restos inertes (resíduos quimicamente estáveis);
- Materiais combustíveis: papéis, cartões, plásticos, madeira, couro, alimentos e outros.

A classificação adotada pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos, Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010, é mostrada no Quadro 1¹, abaixo, e arranja os resíduos quanto à sua origem e periculosidade.

¹ Informações obtidas no site http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm, acesso no dia 23 de Junho de 2013.

Quadro 1 – Classificação dos Resíduos Sólidos segundo a Lei Nº 12.305

Título III; Capítulo I; Artigo 13

Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

I - quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do SISNAMA e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II - quanto à periculosidade:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

A classificação dos resíduos sólidos serve para identificar os resíduos de acordo com, principalmente, suas características físicas e origem. A adequada caracterização dos resíduos sólidos urbanos é de extrema importância para o gerenciamento de resíduos e materiais, uma vez que permite o conhecimento de sua composição, e auxilia sua correta destinação.

A partir da caracterização do lixo, identificam-se os fluxos de materiais em regiões, possibilitando (i) a análise do potencial de reciclagem e de viabilidade das tecnologias de tratamento, (ii) a adequada destinação dos resíduos e (iii) a identificação das mudanças de hábito da população.

Cada tecnologia de aproveitamento energético dos resíduos sólidos utiliza determinados componentes dos resíduos sólidos, de modo que a composição do lixo torna-se fator importante para definir qual tipo de tecnologia é tecnicamente e economicamente viável

para um dado fluxo de lixo (Tatarniuk, 2007). Quanto à caracterização do lixo, Maier (2011) comenta que os resultados da análise gravimétrica (determinação percentual da fração de componentes – como papel, vidro, plástico, etc. – em amostra representativa de lixo) podem ser utilizados em processo pré-decisão, de modo a auxiliar na escolha dos métodos de tratamento.

A composição do lixo é, também, um dos principais fatores que influenciam as emissões a partir do tratamento de resíduos sólidos (IPCC, 2006), já que diferentes tipos de lixos contêm quantidades diferentes de “carbono orgânico degradável” (DOC – *degradable organic carbon*) e “carbono fóssil” (*fossil carbon*). Deste modo, o ideal seria destinar as frações do lixo ao tratamento mais adequado, considerando parâmetros de redução de efeitos nocivos, de viabilidade econômica (do empreendimento) e de preservação ambiental.

Inúmeros fatores influenciam a composição do lixo: poder aquisitivo da população, estação do ano, hábitos culturais, entre outros – e devem ser levados em consideração para análise de aproveitamento de resíduos sólidos urbanos. Além disso, vale ressaltar que a composição do lixo, assim como as classificações utilizadas para coletar dados, varia amplamente em diferentes regiões e países. As principais frações encontradas (no lixo) são:

- Fração orgânica biodegradável seca – baixo teor de umidade. Exemplo: papéis, papelão, tecidos, madeiras secas;
- Fração orgânica biodegradável úmida – alto teor de umidade. Exemplo: restos de alimentos, lixo de jardins, cascas de coco;
- Metais – a maioria é reciclável. Exemplo: ferro, alumínio;
- Vidros;
- Plásticos;
- Inertes – materiais quimicamente estáveis. Exemplo: entulho de obras, cinzas;
- Materiais potencialmente perigosos – há possibilidade de alguns serem reciclados, mas necessitam tratamentos especiais. Exemplo: pilhas e baterias contendo cádmio; lixo hospitalar; componentes eletrônicos.

A composição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados no Brasil, em 2011, é mostrada na Tabela I.

Tabela I – Composição dos resíduos sólidos coletados no Brasil em 2011.

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Metais	2,9	1.610.499
Papel, papelão e tetrapak	13,1	7.275.012
Plástico total	13,5	7.497.149
Vidro	2,4	1.332.827
Matéria orgânica	51,4	28.544.702
Outros	16,7	9.274.251
Total	100	55.534.440

Fonte: (Abrelpe, 2011)

Observa-se na Tabela I que a matéria orgânica compreende mais da metade dos resíduos coletados no Brasil. Em países desenvolvidos, a participação da fração orgânica na composição do lixo tende a ser menor, ficando entre 20% e 40%, enquanto que em países em desenvolvimento, ou subdesenvolvidos, a participação da fração orgânica na composição do lixo pode variar de 50% a 80% (UN DESA, 2010).

Na Tabela I, tem-se que o total de resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil, em 2011, foi de 55,5 milhões de toneladas. No entanto, neste mesmo ano, o país gerou 61,9 milhões de toneladas de resíduos (Abrelpe, 2011) – o que indica que 6,4 milhões de toneladas não foram sequer coletadas, e, por conseguinte, tiveram destino inadequado. A destinação dos resíduos sólidos nem sempre é adequada; a Figura 1 mostra o perfil da disposição do lixo no Brasil.

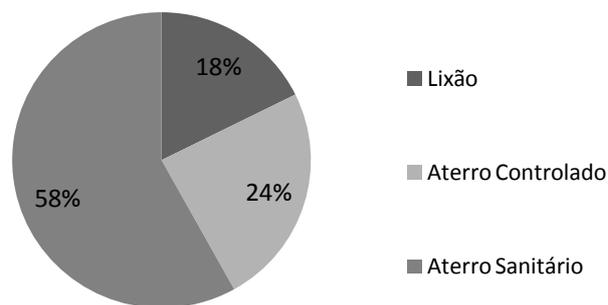


Figura 1 – Destinação de resíduos sólidos no Brasil em 2011

Referência: (Abrelpe, 2011)

Observa-se, na Figura 1, que parte dos resíduos sólidos são dispostos em Lixões e Aterros Controlados, que foram proibidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PwC, 2011) por representarem tipos de destinação inadequadas. Resulta, portanto, que 41,9% dos

resíduos coletados são destinados inadequadamente. Esta situação apresentada para o Brasil reforça a necessidade de práticas para o gerenciamento dos resíduos sólidos.

É importante ressaltar, também, que outras formas de destinação ou disposição final de resíduos sólidos estão proibidas no Brasil, como: lançamento de resíduos sólidos urbanos em praias ou corpos hídricos, lançamento *in natura* a céu aberto (excetuado resíduos de mineração), queima de resíduos a céu aberto ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para esta finalidade (PNRS, 2010: nota de rodapé nº1).

1.1 Problemas relacionados aos Resíduos Sólidos Urbanos

Os problemas ambientais associados aos resíduos sólidos urbanos podem ser tanto locais como globais. Quando o lixo é enviado para disposição final, as áreas vizinhas ao local de destino perdem atratividade, sendo desvalorizadas e afetando o comércio e as próprias condições de vida da população das áreas (EPE, 2008).

Destacam-se, entre os problemas locais, a poluição causada pelo lixo mal manejado. Um dos fatores relevantes, neste caso, é o elevado potencial de poluição do solo e do lençol freático. Outro fator presente é o do mau cheiro associado, e, também, a presença de animais vetores de doenças nas regiões onde os depósitos de lixo se encontram (EPE, 2008).

Os problemas de alcance global são relacionados às emissões de gases de efeito estufa a partir destes depósitos. Na medida em que os materiais orgânicos do lixo se decompõem, os gases, que contribuem para o aquecimento global, são liberados – notadamente o metano, CH₄.

2 Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos

A gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são fundamentais para a organização e determinação dos fluxos de lixo (resíduos, matérias, materiais) e de suas rotas de destino, em uma região. A partir de uma estratégia de gerenciamento bem planejada e implementada, é possível obter benefícios relevantes para a população e para o país, economicamente e energeticamente – através da conservação de energia (e não desperdício), geração de energia, redução da poluição local e global, geração de empregos, entre outros.

O Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos ocupa-se de práticas como: coleta, transbordo, prevenção, redução, reutilização, reciclagem, tratamento, reaproveitamento energético, recuperação e disposição final ambientalmente adequada de resíduos sólidos em áreas urbanas (Schübeler, 1996; e Schalch *et al.*, 2002). Este conceito alude aos aspectos tecnológicos e operacionais da Gestão de Resíduos Sólidos – que, por sua vez, toma parte das atividades relacionadas à tomada de decisões estratégicas e à organização do setor, envolvendo instituições, políticas, instrumentos e meios (Schalch *et al.*, 2002).

Destaca-se como os principais objetivos do gerenciamento de RSU: proteção da saúde da população urbana, promoção da qualidade ambiental e da sustentabilidade em regiões urbanas, apoio à eficiência e produtividade da economia, e geração de emprego e renda (Schübeler, 1996).

2.1 Principais práticas do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos

Para que se consiga alcançar os objetivos do gerenciamento de RSU, práticas, como a reciclagem, são propostas. A partir da implementação das práticas, é possível (i) se reduzir a quantidade de lixo gerada, (ii) se reutilizar materiais, (3) se conservar energia e evitar emissões. As principais práticas de gerenciamento de resíduos sólidos são descritas a seguir.

2.1.1 Não Geração

A não geração de resíduos ou “prevenção de resíduos” está associada à melhora de métodos de manufatura e ao comportamento do consumidor (demanda de produtos reciclados, redução de descarte, redução da demanda, etc.) (EU, 2010).

2.1.2 Redução

A Redução tem como objetivo a diminuição da quantidade de resíduos gerada, através do reordenamento dos materiais usados no cotidiano (Schalch *et al.*, 2002). Ela visa o não desperdício de materiais, a fim de preservar os recursos naturais existentes. Esta prática

compreende, também, a decisão sobre aquisição de produtos e projeto dos produtos, de modo a reduzir a quantidade de lixo que terá de, no futuro, ser disposto (EPA, 2012).

2.1.3 Reutilização

A Reutilização é o processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química (PNRS, 2010); compreende o uso repetido de produtos e componentes com o mesmo propósito pelo qual foi concebido (EU, 2010).

2.1.4 Reciclagem

É o processo de transformação dos resíduos sólidos, que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com objetivo de transformá-los em insumos ou em novos produtos (PNRS, 2010). Esta prática recupera materiais utilizáveis, como papel, vidro, plástico e metais, do lixo para a feitura de novos produtos, reduzindo-se, então, a quantidade de matéria-virgem necessária no processo produtivo (EPA, 2012).

2.1.5 Compostagem

Compreende a produção de adubo natural a partir do aproveitamento de restos alimentares e de materiais orgânicos (Oliveira, 2000). A compostagem é um processo biológico que transforma a matéria orgânica em substâncias húmicas estabilizadas (Carvalho, 1999).

2.1.6 Tratamento com reaproveitamento energético

Tratamento que converte resíduos em energia, na forma de eletricidade ou calor. Os processos para recuperação de energia do lixo incluem combustão, digestão anaeróbica, gaseificação, entre outros.

2.1.7 Tratamento

Compreende os processos físicos e biológicos que tem como objetivo a diminuição da poluição do meio ambiente, a redução de negativos impactos ambientais sanitários e o beneficiamento de resíduos – sem recuperação energética. As tecnologias, que podem ser utilizadas para tratar o lixo, são:

Tratamento térmico: tecnologia que utiliza altas temperaturas para queimar resíduos, observadas normas aplicadas ao tratamento térmico;

Autoclavagem: tratamento aplicado aos resíduos dos serviços de saúde; consiste em uma câmara a vácuo, onde, por meio de determinada pressão e temperatura, o resíduo é esterilizado após certo tempo de permanência dentro da câmara. Este tratamento não reduz o

volume dos resíduos – como no caso do tratamento térmico –, sendo recomendada a trituração prévia. No caso da autoclavagem, os resíduos são esterilizados, para que se tornem aptos à disposição final.

Micro-ondas: tratamento aplicado aos resíduos dos serviços de saúde, o resíduo é previamente triturado e colocado no forno micro-ondas, que efetua a esterilização. Assim como na autoclavagem, este tratamento visa adequar os resíduos da saúde à disposição final.

2.1.8 Disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos

Distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas que tenham por objetivo evitar danos à saúde pública e ao meio ambiente (PNRS, 2010).

2.2 Benefícios da adoção de estratégias de gerenciamento de resíduos sólidos

Muitos são os benefícios que podem surgir do gerenciamento de resíduos sólidos, principalmente devido ao não desperdício do potencial energético e sócioeconômico dos resíduos, e ao uso eficiente dos recursos. A substituição de matéria-prima virgem por resíduos reciclados ou reutilizáveis (matéria-prima secundária) em processos industriais, por exemplo, evitam impactos e gastos relativos ao ciclo de vida de produção de um produto a partir da matéria virgem. Haveria, como consequência, a conservação de energia e a redução das emissões ao longo de todo o ciclo-de-vida do produto (as emissões provenientes da extração de matéria-prima, por exemplo, não existiriam).

A Figura 2 ilustra o ciclo de vida de um produto, através do qual se observa seu “histórico” no processo produtivo. O ciclo de vida de um produto é geralmente dotado dos estágios de extração de matéria-prima (virgem), transporte, manufatura (condicionamento), uso e disposição (EPA, 2012). Esse conceito é importante para a visualização do processo de criação do bem de consumo. Ao se adotar medidas que preservem a matéria-prima (que evitem seu uso), por reuso, reciclagem ou não produção, gastos energéticos deste ciclo são evitados, assim como as emissões de poluentes relacionadas.



Figura 2 – Ciclo de vida de um material

Fonte: (EPA, 2012)

O reuso de materiais para a feitura de novos produtos reduziria significativamente os requisitos energéticos de manufatura e produção de um produto ou bem. Morris (2005) em estudo sobre San Louis Obispo, California, Estados Unidos, encontrou que a energia requerida para a produção de papel alumínio a partir de material reciclado é 5% daquela requerida para a feitura desse produto a partir de matéria-prima virgem. Do mesmo modo, para a produção de aço, o uso de material reciclado requer apenas 37% da energia requerida quando do uso de matéria-prima virgem. Isto indica que, caso se viesse a utilizar matéria prima reciclada, o consumo de energia das fábricas seria reduzido, ocasionando o aumento da reserva energética.

Apesar dos benefícios, em alguns casos a produção de produtos a partir de matéria-prima virgem é menos custosa para as indústrias (Schalch *et al.*, 2002). Outra questão, que torna menos atrativa a adoção da reciclagem, por certas indústrias, é a qualidade do material reciclado, que poderia não satisfazer os requisitos para manufatura do produto desejado. Por exemplo, quando o aço é produzido a partir da sucata, a utilização do material resultante é restrita. Este problema também ocorre com a reutilização do papel, vidro e plástico, em outras

dimensões (Schalch *et al.*, 2002). Nestes casos, o uso da matéria-prima virgem ocasiona maiores gastos energéticos, e menores gastos financeiros – pontualmente.

Um exemplo de conservação de energia, a partir de práticas de gerenciamento, é o dos Estados Unidos da América. Neste país, conservou-se, em 2010, mais de 381 TWh de energia (aproximadamente 3,24% do consumo de energia elétrica dos EUA no mesmo ano²) através da reciclagem e compostagem de mais de 85 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (EPA, 2011). Do total recuperado, 44.6 milhões de toneladas eram de papel e papelão e 19.2 milhões de toneladas eram de restos de jardinagem. A Tabela III mostra o total de lixo gerado e recuperado nos Estados Unidos em 2010. A taxa de reciclagem de então chegou a 34,1% (EPA, 2011).

Tabela III – Geração e Recuperação de materiais dos resíduos sólidos urbanos em 2010, nos EUA.

Materiais	Peso gerado (milhões de toneladas)	Peso recuperado (milhões de toneladas)	Material recuperado (%)
Papel e cartão	71,31	44,57	62,5%
Vidro	11,53	3,13	27,1%
Metais	22,41	7,87	35,1%
Plástico	31,04	2,55	8,2%
Borracha e couro	7,78	1,16	14,9%
Têxteis	13,12	1,97	15,0%
Madeira	15,88	2,30	14,5%
Outros	4,79	1,41	29,4%
Alimentos e outros	34,76	0,97	2,8%
Resíduos da jardinagem	33,40	19,20	57,5%
Miscelânea de lixos inorgânicos	3,84	-	-
Total	249,86	85,13	34,1%

Fonte: (EPA, 2011)

No caso do aproveitamento de energia dos resíduos, através de tecnologias de geração de energia a partir do lixo, seria possível a expansão de reservas de matéria-prima e energia, pois o uso das tecnologias faz com que se reduza a demanda de recursos naturais para a produção de energia (Oliveira, 2000) – e há a geração de energia. Ao mesmo tempo, a adoção destas tecnologias reduziria o volume de lixo enviado ao aterro, evitando os problemas relacionados à disposição final, aumentando a vida útil de aterros, reduzindo o uso de terra, diminuindo gastos de manejo e transporte para os municípios, e evitando, por fim, a poluição

² Referência do consumo de energia elétrica do país:

<http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/showtext.cfm?t=ptb0804a>; acesso no dia 2 de Julho de 2013.

relativa à decomposição anaeróbica de resíduos em aterros. No caso de usinas de recuperação energética do lixo, é possível chegar à redução de 90% do volume do lixo (EPRI, 2011).

Os principais benefícios do gerenciamento de resíduos sólidos, e de suas práticas, são:

2.2.1 Redução da dependência de matéria virgem e economia de matéria prima

Ao se reutilizar e reciclar materiais, é possível se reduzir a necessidade de extração de recursos naturais virgens, ampliando-se a vida útil das reservas, ao se evitar seu uso (EPA, 2012). A redução da dependência de recursos virgens pode trazer outros benefícios. Por exemplo, ao se evitar o corte de árvores para a produção de papel, aumenta-se o sequestro de carbono (EPA, 2012).

2.2.2 Economia de Energia

Ao se reduzir o consumo de matéria, ao reutilizá-la ou ao se usar materiais recicláveis em processos de produção, é possível se conservar energia. (A reciclagem é menos energointensiva que a produção de um produto a partir de matéria virgem.) A conservação de energia pela reutilização de materiais, por exemplo, faria aliviar a demanda energética (pois “impediria” o consumo de todo um ciclo de produção). Deste modo se aumentaria o *gap* entre a demanda de energia e sua oferta.

De outro modo, o reaproveitamento da energia dos resíduos sólidos urbanos, para geração, “reinjectaria” parte de sua energia na rede. Neste caso, o combustível utilizado seria produzido diariamente e enviado diariamente à usina, servindo de geração de base. (Um aspecto peculiar, neste caso, é que o custo de combustível é negativo – ou seja, a usina receberia dinheiro para tratar o lixo.)

Essas práticas seriam extremamente positivas para manutenção da segurança energética do país, que, no início do ano de 2013, esteve em situação delicada devido ao baixo nível histórico dos reservatórios do país. Na ocasião, todo o parque termelétrico de geração foi continuamente despachado, com o objetivo de se reestabelecer os reservatórios e a atender à demanda, aumentando-se o custo da energia no país.

2.2.3 Redução de emissões de gases do efeito estufa e outros poluentes

Ao se prevenir a geração de lixo, juntamente com a reciclagem e compostagem do lixo existente, alcança-se a redução das emissões dos gases de efeito estufa. Estas estratégias diminuem o consumo de combustíveis fósseis utilizados para manufaturar, transportar e dispor os bens de consumo; como consequência, se reduziria, por exemplo, a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) emitida durante as etapas.

Em outra vertente, estratégias de conservação e recuperação de recursos também ajudam a reduzir a quantidade de lixo que é, ao final, disposta em aterro (ou incinerada), prática que faz diminuir as emissões dos aterros, aumenta sua vida útil, e diminui a emissão de outros poluentes aéreos dos incineradores de resíduos sólidos (EPA, 2012).

2.2.4 Criação de empregos e suporte ao crescimento econômico

O investimento em conservação e recuperação de recursos pode estimular economias locais, encorajar o desenvolvimento de mercados e negócios de reciclagem e compostagem, além de criar empregos (EPA, 2012).

2.2.5 Redução dos custos de coleta e de disposição em aterro

Com a prevenção do envio de lixo a aterros, governos locais gastam menos com a coleta do lixo e com seu transporte a aterros (EPA, 2012).

2.3 Hierarquia das práticas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos

A hierarquia das práticas mostra as preferências do gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos, colocando as rotas prioritárias no topo, e a menos preferível na base. Ela apresenta a tendência das estratégias de gerenciamento de RSU e atua como “guia” para a escolha das práticas diletas – considerando a necessidade de desenvolvimento sustentável e conservação de recursos (Maier, 2011).

A hierarquia das práticas no gerenciamento de resíduos sólidos da Europa é mostrada na Figura 3, e consiste, por ordem de preferência, em: prevenção, preparo para reuso, reciclagem, recuperação, disposição³.

³ Referências: <http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/WASTE%20BROCHURE.pdf> e http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/ev0010_en.htm#KEY, sites acessados em 30 de Junho de 2013.

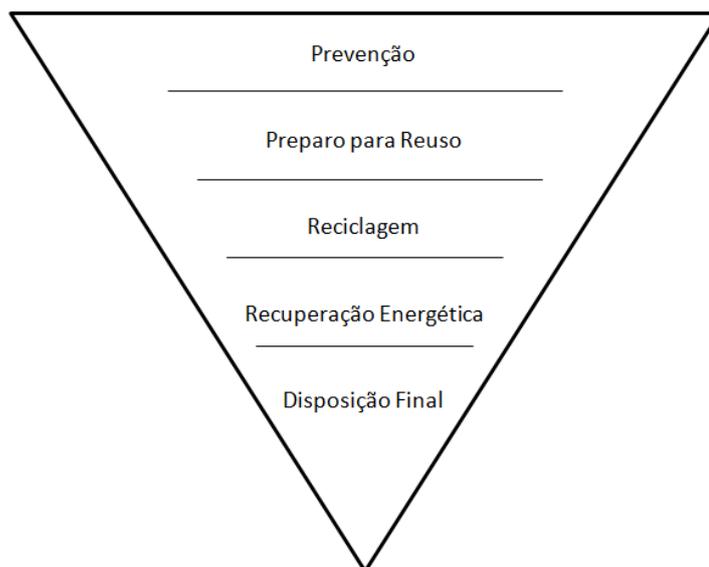


Figura 3 – Hierarquia das Práticas de Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Europa

Referência: (EU, 2010)

No Brasil, a hierarquia proposta compreende, em ordem de preferência, as práticas: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos, disposição final ambientalmente adequada (Lei N° 12.305, de 02 de Agosto de 2010 – referência: Nota de Rodapé de número 1).

3 Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos

As tecnologias de recuperação energética do lixo (chamadas, em inglês, de tecnologias *waste-to-energy*, *WTE* – em português, tecnologias de conversão de “lixo à energia”) são essenciais para as estratégias de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. Elas recuperam energia, ao mesmo tempo em que reduzem o volume de lixo a ser enviado para disposição final. Pela Europa, as usinas de recuperação energética do lixo produziram 55 TWh de energia em 2006 – sendo 31 TWh de calor e 24 TWh de energia elétrica –, o que representou, à época, 4,4% de toda geração renovável da Europa (Manders, 2009).

O uso ótimo destas tecnologias ocorre quando integradas às outras práticas de gerenciamento. Neste caso, somente os resíduos não recicláveis, que precisariam ser dispostos em aterros, seriam enviados às usinas de conversão de lixo em energia (usinas *WTE*). Isto ocasionaria, na maior parte das vezes, o aumento do valor energético dos resíduos sólidos utilizados no processo de conversão energética, o que é altamente positivo.

As tecnologias *WTE*, em definição básica, transformam resíduos sólidos em calor, vapor, eletricidade, ou em combustíveis gasosos ou líquidos (neste último caso, oferece-se maior gama de utilidade, englobando desde a produção de energia à produção de químicos, por exemplo) (EPRI, 2011). As tecnologias que geram combustíveis líquidos e gasosos são chamadas de tecnologias de conversão térmica avançada, e compreendem, principalmente, os processos de gaseificação, pirólise e gaseificação a plasma.

Muitas são as tecnologias de aproveitamento energético existentes, mas poucas são as bem estabelecidas e em operação comercial (EPRI, 2011). Apesar de diferentes, as várias tecnologias têm os mesmos objetivos gerais – o gerenciamento dos resíduos sólidos e a geração de energia. As tecnologias de conversão são geralmente divididas em duas categorias: térmicas (e.g., combustão, gaseificação, pirólise) e biológicas (e.g., digestão anaeróbica e compostagem), conforme a Figura 4.

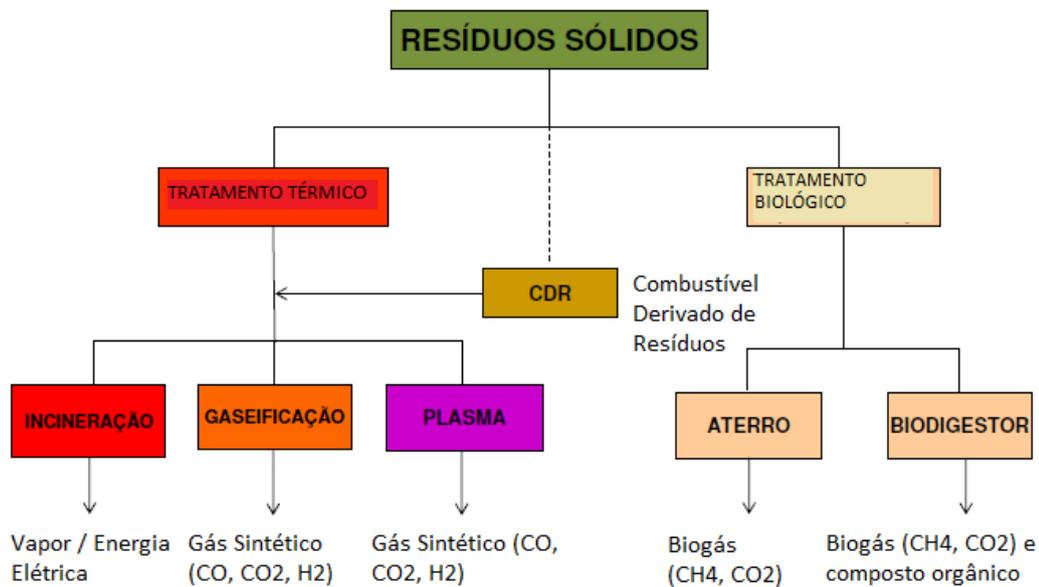


Figura 4 – Principais processos de recuperação energética

Referência: (Frate, 2011)

Alguns dos benefícios que podem surgir do uso de tecnologias WTE são:

- Redução do volume do lixo, o que ocasiona a preservação de aterros, e o que evita as emissões de metano que seriam geradas caso o lixo fosse enviado para estes;
- Recuperação da energia dos resíduos sólidos;
- Recuperação de materiais do fluxo do lixo, que podem ser reutilizados ou reciclados;
- Destruição de contaminantes que podem estar presentes no lixo;
- Geração de energia ou combustíveis;

Os principais entraves associados às tecnologias de aproveitamento energético são:

- Altos custos de investimento e de operação e manutenção;
- A viabilidade técnica e econômica dos empreendimentos depende de uma conjuntura de fatores – que, em diversos locais/países, não são atendidos (composição dos resíduos, alto preço de energia, alto valor pago pela quantidade lixo tratado, etc.);
- Percepção e hostilidade pública ao emprego de tecnologias de recuperação de energia a partir do lixo são barreiras em diversos países (oposição às tecnologias de combustão principalmente) (IEA, 2003);
- Falta de incentivo;

Neste capítulo, serão apresentadas duas das tecnologias mais conhecidas e utilizadas para diferentes fluxos de lixo – Combustão Convencional e Digestão Anaeróbica – e uma

tecnologia de conversão avançada – a Gaseificação –, que emerge no cenário mundial, mas que, no entanto, ainda não foi provada a nível comercial (EPRI, 2011).

3.1 Combustão

O aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos pela Combustão Convencional é feito através da recuperação da energia gerada na queima do lixo. O calor – produzido pela combustão do insumo – aquece uma caldeira, produzindo o vapor que moverá uma turbina e um gerador, para geração de energia elétrica. Além de eletricidade, pode-se obter calor como subproduto, ou vapor.

A combustão convencional é a tecnologia predominante para produção de energia a partir de resíduos sólidos urbanos (Hershfield, 2011) e, segundo Stantec (2011), foi criada há mais de 100 anos para este fim. As primeiras tentativas de se usar fornalhas para reduzir o lixo são consideradas como datadas de 1870 na Inglaterra (Stantec, 2011). No decorrer dos anos, a tecnologia foi sendo desenvolvida, ao se fazer evoluir o conhecimento do processo e da influência de parâmetros operacionais na viabilidade técnica, econômica e ambiental da tecnologia.

A abordagem mais comum da combustão convencional é a Combustão à Queima Direta, com cerca de 800 plantas ao redor do mundo (Stantec, 2011), sendo a mais utilizada (Themelis, 2008; Stantec 2011; Hershfield 2011 e CH2MHILL,2009). Esta tecnologia também é conhecida como “combustão de estágio simples” e “tecnologia de grelha”.

Além desta tecnologia, que abrange cerca de 90% das usinas de combustão de resíduos sólidos urbanos na Europa (Stantec, 2011), há aquelas de Leito Fluido e de Duplo Estágio. Pela prevalência da Combustão à Queima Direta no cenário mundial, ela foi escolhida, dentre as outras, para ser apresentada neste trabalho.

A Combustão à Queima Direta é a opção mais simples e menos custosa para geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos (EPRI, 2011; Psomopoulos *et al.*, 2008). As usinas modernas geram entre 550 a 600 kWh por tonelada de resíduos sólidos (EPRI, 2011) – esse valor depende, no entanto, de diversos fatores, como composição do lixo, seu poder calorífico, a eficiência da combustão, entre outros.

Nesta tecnologia, só um mínimo de processamento do lixo é necessário: remoção de itens muito grandes, prejudiciais ao processo, e de objetos que possam contaminar o fluxo do lixo. A Combustão à Queima Direta aceita como insumo os resíduos sólidos urbanos (RSU) e biomassas (Stantec, 2011).

3.1.1 Funcionamento Básico

Os resíduos sólidos, que serão utilizados como combustíveis na queima, são descarregados por caminhões num poço de armazenamento, de onde uma grua os retira para alimentar uma grelha móvel. Na grelha móvel ocorre a incineração do combustível, que passa lentamente por toda sua extensão – sendo queimado neste meio-tempo.

A incineração de lixo é um processo complexo, que inclui as etapas de secagem, ignição, pirólise, gaseificação e combustão de sólidos e gases (Madsen, 2009). Estas etapas ocorrem em zonas específicas da fornalha, e são, em sua maioria, difíceis de controlar, porque se lida com a combustão e gaseificação de combustíveis sólidos heterogêneos, e da combustão de gases, acima das camadas de lixo e dentro delas. É possível se controlar, no entanto, a combustão dos gases através da temperatura na fornalha e da concentração de gases (Madsen, 2009), que ocorre em um ambiente rico em oxigênio, a uma temperatura entre 700°C e 1350°C (CH2MHILL, 2009).

A Figura 5 mostra as zonas, acima da grelha, em que ocorrem as etapas citadas. O lixo, ao ser iniciado o processo na grelha, é secado e, depois, parcialmente pirolizado, gerando gases combustíveis e não combustíveis. O lixo não-pirolizado é totalmente incinerado, até um conteúdo de 3% de carbono orgânico total (em inglês, *Total Organic Carbon – TOC*), ou menos, antes de cair no sistema de manejo de cinzas *bottom ash* (Vølund, 2012).

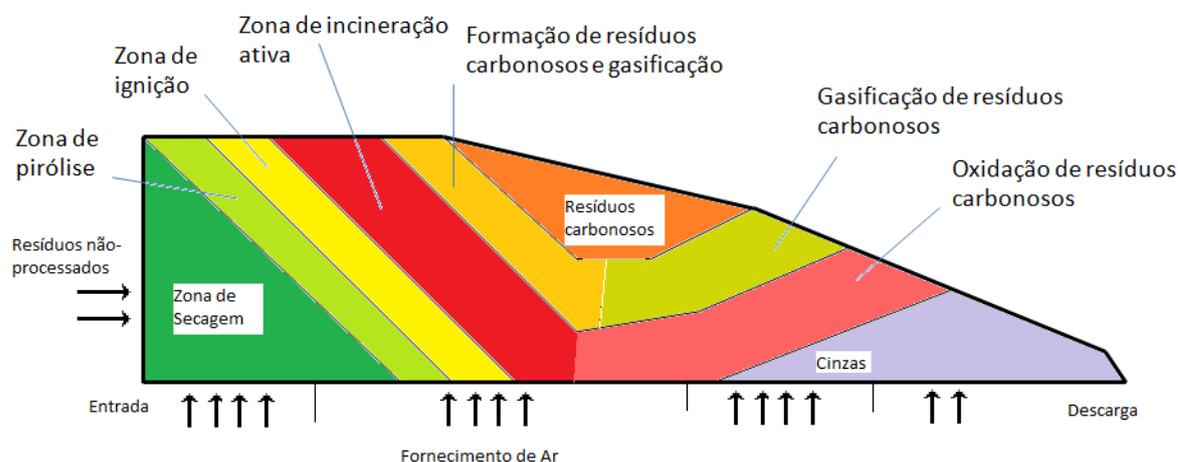


Figura 5 – Esquema das zonas em que ocorrem os processos de secagem, pirólise, gaseificação, ignição e combustão, acima da grelha.

Adaptado de (Madsen, 2009)

A queima dos resíduos gera calor, que aquecerá uma caldeira (em maioria, aquatubular), gerando vapor. Este vapor moverá uma turbina a vapor – e um gerador elétrico, para a produção de eletricidade (ciclo Rankine).

Os gases resultantes da queima passam por um sistema de limpeza antes de serem liberados. As cinzas geradas no processo devem ser testadas antes de serem dispostas – e tratadas, se necessário; elas podem, em alguns casos, ser reutilizadas por indústrias (e.g., cimenteiras).

Um fator importante desta tecnologia, do ponto de vista do gerenciamento de resíduos sólidos, é sua capacidade de reduzir o volume de lixo que precisará ser disposto: a combustão de resíduos reduz o volume do lixo em até 95% e seu peso em até 80% (Vølund, 2012). A diminuição do lixo a ser disposto é extremamente benéfica – como indicado ao decorrer do trabalho.

O esquema básico de uma planta de combustão de resíduos sólidos urbanos é mostrado na Figura 6.

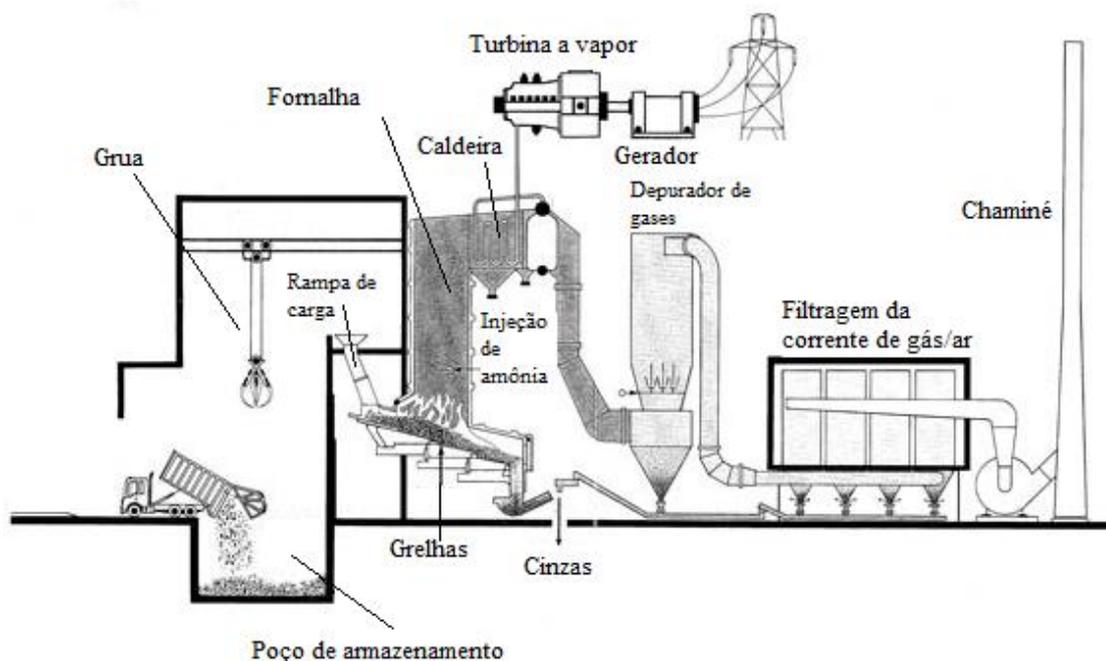


Figura 6 – Esquema básico de uma planta de combustão à queima direta⁴

Fonte: (Clarke, 2002)

O núcleo da tecnologia de Combustão de Resíduos Sólidos Urbanos à Queima Direta é o conjunto grelha – fornalha⁵. Os principais itens de uma usina do gênero são:

- Grelha de combustão;

⁴ Acesso à figura em <http://www.geo.hunter.cuny.edu/~mclarke/intromswincineration.htm>; acessado dia 25 de Março de 2013.

⁵ Referência: http://www.martingmbh.de/index_en.php?level=2&CatID=6.23&inhalt_id=19; acesso em 2 de Julho de 2013.

- Caldeira;
- Sistema de limpeza de poluentes, e equipamentos de controle da poluição do ar;
- Turbina e gerador;
- Tubos, bombas, etc.

Os sistemas de sensor e controle empregados nas usinas de combustão à queima direta são similares aos das usinas de geração de base (EPRI, 2011). As plantas de combustão de RSU se equiparam às termelétricas a carvão (IMECHE, n.d.), mas possuem desafios únicos de Operação e Manutenção (O&M) devido à heterogeneidade do insumo (EPRI, 2011). As variações na qualidade do insumo dificultam o controle do processo, e a existência de materiais não combustíveis e de possíveis condições químicas agressivas acarretam taxas aceleradas de erosão e corrosão nos componentes da planta (EPRI, 2011).

Essas dificuldades vêm sendo assessoradas com a criação de novas tecnologias de controle e com o conhecimento dos processos da combustão dentro da fornalha (através de simulações computadorizadas, por exemplo), e dos parâmetros que os influenciam.

3.1.2 Considerações

Recuperação de Energia e Eficiência Energética

A recuperação da energia dos resíduos sólidos é feita através do aproveitamento do calor gerado na sua queima. As usinas de combustão de resíduos sólidos à queima direta produzem, tipicamente, entre 550 a 600 kWh de energia elétrica por tonelada de resíduos sólidos (EPRI, 2011). Em Hershfield (2011) e Stantec (2011), cita-se que usinas antigas em operação geram de 500 a 600 kWh/ tonelada de RSU; enquanto que as usinas modernas, atuais, podem chegar a gerar de 750 a 850 kWh/ tonelada de RSU – como mostra a Tabela IV. Ao se gerar energia com carvão mineral, cujo poder calorífico inferior (PCI) é maior do que o dos resíduos sólidos urbanos (PCI do carvão poder chegar a 33,4 MJ/kg⁶, enquanto que o PCI dos resíduos sólidos urbanos, no Brasil, alcança, no máximo, 8 MJ/kg⁷), pode-se obter 3155 kWh/ tonelada de carvão – considerando-se a eficiência típica de uma termelétrica como 34% (Marreco *et. al*, 2006).

⁶ Referência: http://www.engineeringtoolbox.com/coal-heating-values-d_1675.html; acesso em 18 de Agosto de 2013, 11:01

⁷ Referência: <http://www.waste-management-world.com/articles/print/volume-12/issue-3/features/wte-the-redeemer-of-brazils-waste-legacy.html>; acesso em 18 de Agosto de 2013; 11:02

É interessante notar que a geração de energia a partir do carvão proporciona maior *output* por tonelada de insumo, como indicado acima. No entanto, a geração a carvão não é solução para o gerenciamento do lixo. A comparação entre a geração termelétrica convencional e a geração a resíduos sólidos deve levar em conta não somente a quantidade de energia gerada, mas, também, os benefícios relacionados (e.g., abatimento de emissões de gases do efeito estufa), que precisam ser quantificados.

Tabela IV – Produção de Energia a partir da Combustão de Resíduos Sólidos

Tecnologia de Combustão Convencional	Produção de Energia (kWh/tonelada de RSU)
Antiga	500 a 600
Moderna	750 a 850

Fonte: (Hershfield, 2011)

O aumento da eficiência evidenciado na Tabela IV indica o aperfeiçoamento do processo ao longo do tempo, refletindo a busca por melhoras, a busca por conhecimento sobre os parâmetros que influenciam o processo e por seu controle.

A eficiência é um importante fator a ser observado. Quanto maior a eficiência, (i) menor a quantidade de lixo necessária para gerar a mesma quantidade de energia; ou (ii) maior a produção de energia para uma mesma quantidade de lixo. No primeiro caso, o benefício mais evidente está relacionado à operação e manutenção (O&M) das usinas – a diminuição da quantidade do lixo a ser utilizado, reduz os esforços operacionais, acarretando a redução dos custos associados à O&M, e acarretando a provável diminuição do tempo de parada da usina. No segundo caso, a maior geração de energia ocasionaria a maior venda de energia – o que é economicamente favorável à usina –, e possibilitaria a substituição da geração a partir de combustíveis fósseis, sendo benéfico do ponto de vista ambiental e energético.

A eficiência energética típica das usinas de combustão de resíduos sólidos à queima direta varia entre 14% e 27% (Stantec, 2011). A utilização da usina em ciclo combinado (*combined heat and power* – CHP) permite eficiência térmica de 60% ou mais – esse valor também pode ser obtido através da recuperação de calor, apenas (Stantec, 2011).

Muitas medidas podem ser adotadas para se aumentar a recuperação e energia e a eficiência energética da usina de combustão de resíduos sólidos; em destaque:

- Pré-tratamento dos resíduos sólidos urbanos; por exemplo, homogeneização do lixo, que permitiria a otimização da queima do combustível, ao buscar evitar que partes de seu fluxo tenham poder calorífico diferente;
- Projeto da caldeira para melhor transferência de calor;
- Pré-aquecimento do ar da combustão: auxilia a combustão de resíduos sólidos com conteúdo úmido alto, e possibilita a melhora da eficiência energética geral do processo;
- Recirculação dos gases de combustão: uma porção dos gases de combustão (*flue gases*), já tratados, geralmente, é enviada à câmara de combustão, em recirculação, substituindo o suprimento secundário de ar. Essa técnica reduz as perdas de calor nos gases e pode aumentar a eficiência energética de 0,75% a 2%, além de possibilitar a redução da emissão de gases NO_x (EC, 2006). Ver a Figura 7.
- Melhoras no ciclo a vapor; por exemplo, o reaquecimento do vapor, após a saída da turbina de alta pressão, aumenta de 3% a 4% da eficiência energética do processo (Madsen, 2009); o resfriamento do líquido no condensador aumenta até 3% a eficiência energética (Madsen, 2009) – neste caso, no entanto, o local onde está a usina influi na viabilidade desta técnica.

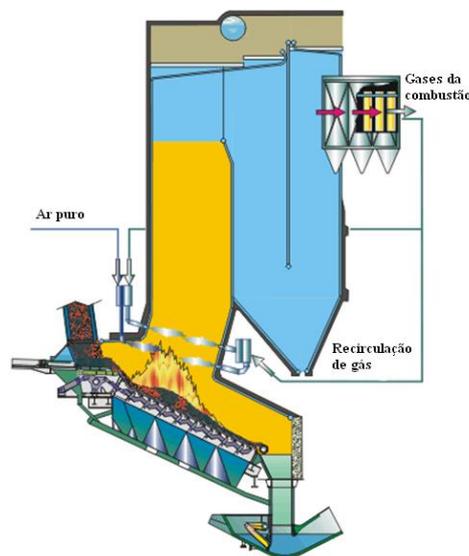


Figura 7 – Recirculação de gases da combustão

Fonte: Martin GmbH ⁸

⁸ Fonte: Martin GmbH, http://www.martingmbh.de/index_en.php?level=2&CatID=6.26&inhalt_id=22, acessado dia 29 de Abril de 2013.

Maior entendimento e controle do processo permitem a melhoria e o desenvolvimento da tecnologia. O aumento da eficiência aparece como consequência. É válido ressaltar que as técnicas citadas proporcionam a redução de emissões sólidas e gasosas, e melhoram a qualidade das cinzas e frações residuais. Há, portanto, o benefício do ponto de vista ambiental: o pré-aquecimento do ar de combustão, por exemplo, ocasiona a secagem mais eficiente dos resíduos sólidos, contribuindo para uma combustão que aproveita mais completamente os resíduos (devido ao decréscimo de conteúdo úmido); o melhor aproveitamento do combustível reduz a produção de cinzas. Do mesmo modo, a homogeneização dos resíduos enviados à grelha melhora a queima, reduzindo a fração residual da combustão (cinzas).

Emissão de poluentes

Uma das maiores preocupações existentes, quanto à tecnologia de combustão de resíduos sólidos, é a emissão de poluentes à atmosfera (Albina e Themelis, 2003).

Antigamente, devido ao mau uso de incineradores (utilização de tecnologias sem controle de poluentes) e ao desconhecimento, até o final dos anos 80, dos efeitos tóxicos de alguns componentes liberados, a incineração teve associada a si uma imagem ruim, principalmente nos Estados Unidos. A principal preocupação tornou-se a liberação de toxinas (dioxinas e furanos), metais pesados (mercúrio, chumbo e cádmio), material particulado e gases ácidos (cloreto de hidrogênio, fluoreto de hidrogênio, dióxido de enxofre e óxidos nitrosos) – que afetam negativamente a população e o meio ambiente.

Como consequência de pressões ambientais e políticas, os Estados Unidos tiveram extrema dificuldade no licenciamento de usinas de Combustão de Resíduos Sólidos, sempre havendo intervenções de grupos ambientalistas nas comunidades em que eram propostos empreendimentos – de modo a atrasar e impedir os projetos do gênero (CH2MHILL, 2009). O resultado destas pressões, nos EUA, foi que, entre 1996 e 2007, nenhuma usina de Combustão de Resíduos Sólidos foi construída (Psomopoulos *et al.*, 2009).

As usinas de Combustão de Resíduos, no entanto, são sujeitas a padrões muito exigentes de emissão de poluentes. Nos EUA, com a criação, pela Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency*, EPA), em 1990, da norma MACT (“Tecnologia de Máximo Controle Realizável”, do inglês *Maximum Achievable Control Technology*), as emissões das toxinas caíram drasticamente, como mostra a Tabela V.

Sistemas sofisticados de controle ambiental são empregados, atualmente, e minimizam significativamente as emissões de poluentes.

Como exemplo de uma regulação severa, a MACT impõe a utilização de alguns itens de limpeza, como filtros (“*baghouse filters*”), injeção de carbono ativado, redução não-catalítica seletiva, entre outros.

Tabela V – Comparação de Emissões de Unidades de Combustão de Resíduos Sólidos Urbanos, antes e após a Regulação MACT

Poluentes	Emissões em 1999 (ton/ano)	Emissões em 2005 (ton/ano)	Redução Percentual
Merúrio	57	2.3	96%
Cádmio	9.6	0.4	96%
Chumbo	170	5.5	97%
Material Particulado	18600	780	96%
Cloreto de Hidrogênio	57400	3200	94%
Dióxido de Enxofre	38300	4600	88%
Óxidos Nitrosos	64900	49500	24%

Fonte: EPA⁹

Como consequência da adoção de técnicas de limpeza de gases, as emissões nocivas foram largamente eliminadas – mas resultaram, também, em aumento de custos de Operação e Manutenção, e em aumento do consumo de energia no sistema (“cargas parasitas” de até 20% da geração inicial) (EPRI, 2011).

Algumas das medidas empregadas, para minimização de poluentes, são:

- Utilização de Carvão Ativado, que permite a absorção do mercúrio, dioxinas, componentes orgânicos voláteis e outros poluentes presentes nos gases de incineração;
- Controle das taxas de alimentação do lixo e de ar, de modo que se mantenha estável a temperatura da combustão;
- Emprego de Depuradores de Gases (“scrubbers”): substâncias alcalinas são borrifadas na corrente de gases para neutralizar gases ácidos e remover outros componentes;

⁹ <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/wte/airem.htm>; acessado em 2 de Julho de 2013.

- Uso de Filtros (“Baghouse Filters”), cujo objetivo é remover as partículas da corrente de gases da combustão;
- Monitoração contínua das emissões;
- Utilização de Precipitadores Eletrostáticos, que atraem partículas dos gases de combustão para uma chapa metálica, atuando como um filtro;
- SNCR (*Selective Non-Catalytic Reduction*, ou “Redução Não-Catalítica Seletiva”) – injeção de amônia, ou uréia, na fornalha, durante a operação, que reage com os óxidos de nitrogênio (NO_x), transformando-o em gás nitrogênio (N₂), que compõem 70% da atmosfera;
- Superoxigenação na fornalha, com objetivo de aumentar a eficiência da combustão;
- A Temperatura no interior da fornalha deve ser alta (maior que 800°C) – o que garantiria a destruição de componentes orgânicos, como as dioxinas;

Por fim, além do rigor no controle das emissões, outro fator positivo, atribuído à tecnologia da combustão, é a redução das emissões de gases do efeito estufa, notadamente o metano, CH₄, – que tem um potencial de aquecimento global 21 vezes maior que o dióxido de carbono –, relacionados à disposição de resíduos em aterros.

3.1.3 Vantagens e Desvantagens

A seguir, para que se situe a tecnologia de combustão de resíduos sólidos urbanos, quanto a seus proveitos e dificuldades, são apresentadas suas vantagens e desvantagens, na Tabela VI, com informações obtidas da bibliografia pesquisada.

Tabela VI – Vantagens e Desvantagens da Combustão de Resíduos Sólidos Urbanos

Vantagens	Desvantagens
Reduz o volume do lixo que seria enviado para aterros em até 95%, e reduz seu peso em até 80% - ocasionando benefícios ao meio ambiente (redução da emissão de gases do efeito estufa);	A operação torna-se inviável com resíduos de baixo poder calorífico (abaixo de 6 MJ/kg) e com resíduos clorados;
Recupera energia do lixo, produzindo eletricidade e/ou calor;	Altos custos de investimento e de operação e manutenção;
Tecnologia bem estabelecida mundialmente;	Resíduos com umidade excessiva e baixo poder calorífico podem prejudicar a combustão;

Unidades modernas não têm impactos significativos no meio ambiente, e resultam, geralmente, num balanço positivo em termos de Gases do Efeito Estufa;	Necessidade da utilização de equipamento auxiliar para manter a combustão;
Comparado aos sistemas avançados de conversão térmica, a combustão é relativamente simples e de menor custo;	Cinzas podem conter componentes tóxicos, dependendo da composição do lixo tratado e da operação, necessitando, com isso, tratamento.
Aceita diversos insumos (outros lixos, além de RSU, podem ser utilizados como combustível no processo: biosólidos e materiais biomédicos, por exemplo);	
O espaço requerido à planta é pequeno (em contraposição aos aterros), e pode localizar-se próximo aos grandes centros urbanos (onde os resíduos são gerados), reduzindo custos de transporte, consumo de combustível e emissões relacionadas.	

Referências: (Henriques, 2004); (Maier, 2011) e (Oliveira, 2000).

3.2 Digestão Anaeróbica

A Digestão Anaeróbica (DA) é um processo bioquímico em que microorganismos anaeróbicos degradam matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo biogás (majoritariamente constituído de metano e dióxido de carbono) e compostos que podem ser utilizados como condicionadores de solo. Este é um processo biológico que ocorre naturalmente em aterros. A *tecnologia* de DA, por sua vez, faz o uso de recipientes fechados (digestores), com características específicas, para otimizar e controlar a produção de biogás, através do controle do processo.

A tecnologia da Digestão Anaeróbica vem sendo utilizada por décadas, e é tipicamente aplicada no tratamento de efluentes de esgoto, em unidades de tratamento, para degradação do lodo e para sua estabilização (Rapport *et al.*, 2008). Sua aplicação inicial ocorreu nas zonas rurais, onde resíduos agropastoris eram utilizados para a produção de biogás, que seria queimado em fornos. Mais recentemente (a partir dos anos 90), sistemas de digestão anaeróbica para tratamento de resíduos sólidos urbanos, visando a produção de energia elétrica, começaram a ser desenvolvidos e implantados na Europa (Rapport *et al.*, 2008). A aplicação da Digestão Anaeróbica para o tratamento de resíduos sólidos foi aumentando ao decorrer dos anos. Até 2010, na Europa, 197 plantas haviam sido construídas (Mattheeuws,

2012), sendo que 86 delas foram criadas entre 2006 e 2010 (Mattheeuws, 2012) – quase 44% do total.

O biogás produzido nas plantas de digestão anaeróbica é principalmente usado para geração de energia elétrica, havendo outras possibilidades de uso, no entanto: (i) purificação para emprego como gás natural (que poderia, em seguida, ser enviado à rede de distribuição de gás); (ii) refino para produção de biometano (combustível veicular); (iii) queima para aquecimento (Henriques, 2004; DEFRA, 2011).

O uso de motores de combustão interna a gás (motores de ciclo Otto), acoplados a geradores elétricos, é o mais comum para produção de eletricidade. Plantas de digestão anaeróbica típicas atingem potências de 350 a 1200 kW por motor instalado (Henriques, 2004). Segundo indica EPE (2008), as plantas de digestão podem vir a produzir de 120 a 290 kWh de energia por tonelada de resíduos sólidos.

Os insumos utilizados na digestão anaeróbica compreendem materiais orgânicos, como resíduos pastoris, resíduos da agricultura, restos de alimentos, lodo de esgoto, e frações biodegradáveis dos resíduos sólidos urbanos. Para este último, seleção e pré-tratamento devem ser aplicados para separação dos resíduos recicláveis e não combustíveis, e isolamento dos materiais orgânicos que serão introduzidos no digestor (EPRI, 2011). A tecnologia da digestão anaeróbica é mais apropriada do que a combustão, quando são tratados resíduos com alto conteúdo úmido – caso em que a queima do material na fornalha seria dificultada (Rapport *et al.*, 2008).

Nesta seção, tratar-se-á da tecnologia da Digestão Anaeróbica “acelerada” (que utiliza digestores para a produção de biogás). Existem várias categorias de digestores, que dependem do tipo de insumo (seco ou úmido), da característica do digestor (de estágio simples ou estágio múltiplo) e da temperatura do processo (mesofílica ou termofílica); nas considerações, serão abordadas suas principais diferenças.

3.2.1 Funcionamento Básico

A tecnologia de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, com Digestão Anaeróbica, é constituída, basicamente, de quatro partes: pré-tratamento do lixo, digestão do insumo, recuperação do gás produzido e tratamento dos subprodutos sólidos do processo. A Figura 8 ilustra uma planta de Digestão Anaeróbica de estágio simples.

O pré-tratamento do lixo visa a obtenção de insumos mais homogêneos e apropriados ao digestor. Nesta etapa, separa-se os materiais não digeríveis do fluxo do lixo, assegurando a remoção de itens como vidro, metais, pedras, entre outros. Além da triagem dos materiais,

pode-se triturar os insumos, de modo a adequá-los às características do digestor (baixo conteúdo de sólidos, por exemplo).

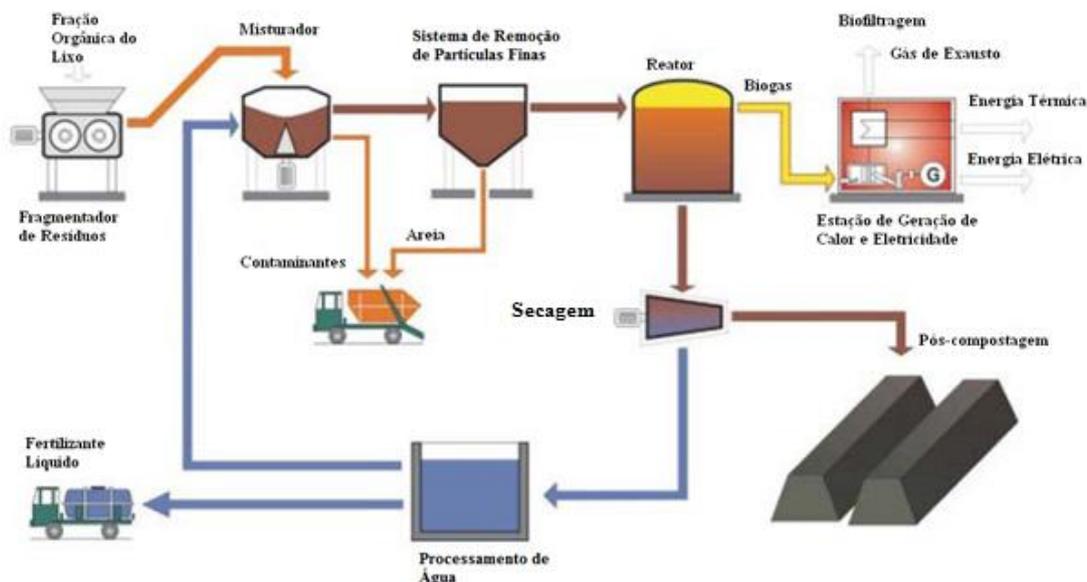


Figura 8 – Tecnologia de Digestão Anaeróbica da empresa BTA (Processo de Estágio Simples)

Fonte: BTA International

Dentro do digestor, a digestão anaeróbica ocorre a partir da ação de um conjunto de microorganismos anaeróbicos (Rapport *et al.*, 2008), que degradam o material orgânico na ausência de oxigênio, produzindo dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). Este processo biológico ocorre em quatro etapas, ilustradas na Figura 9, e a seguir descritas:

- Hidrólise: conversão de Polímeros, que são materiais orgânicos complexos como as proteínas, gorduras e carboidratos, em Monômeros, que compreendem substâncias como a glicose, aminoácidos e ácidos graxos de cadeia longa;
- Acidogênese: fermentação dos Monômeros para a formação de Ácidos Graxos de três a cinco carbonos (como o ácido butírico, o propanoico e o valérico);
- Acetogênese: consumo dos produtos da acidogênese por bactérias, gerando ácido acético (CH_3COOH), hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2);
- Metanogênese: consumo de acetato (CH_3COO^-), do hidrogênio, e de parte do gás carbônico, por microorganismos metanogênicos, para a produção de metano (CH_4).

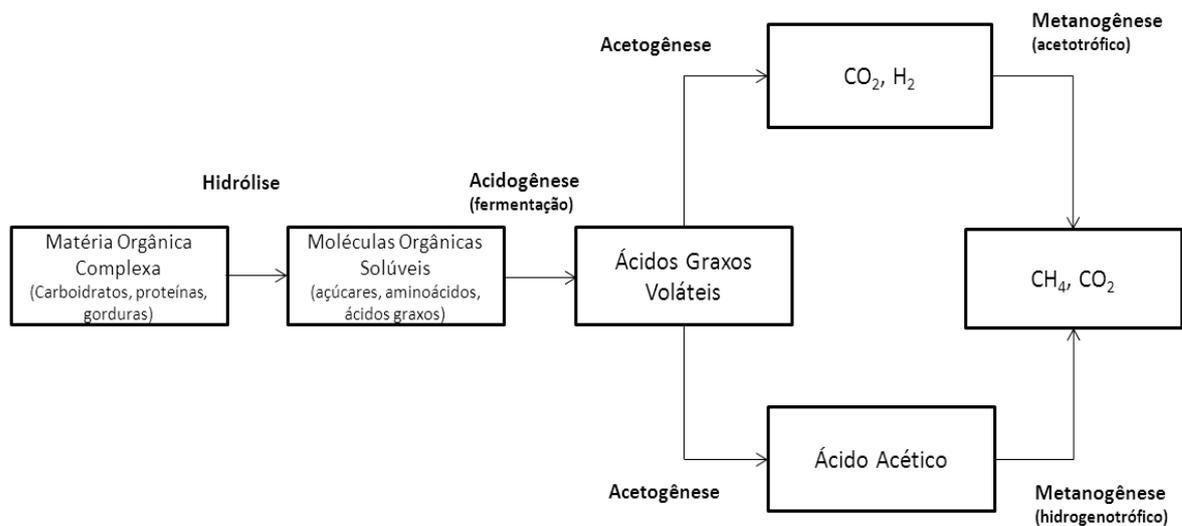


Figura 9 – Esquema do processo de degradação da matéria orgânica na digestão anaeróbica
Referência: (Rapport *et al.*, 2008)

Nota-se a partir da reação acetotrófica da metanogênese - o caminho mais comum para produção de metano -, que os produtos seriam 50% dióxido de carbono e 50% metano; no entanto, na acetogênese (etapa anterior à metanogênese), produz-se hidrogênio (H_2), e para cada quatro moles de hidrogênio, um mol de CO_2 é convertido em metano (Rapport *et al.*, 2008). Dependendo dos substratos das reações químicas, a quantidade de metano e de CO_2 mudará; mas, tipicamente, produz-se de 40% a 70% de metano, em relação ao volume do gás total produzido. Após a produção do biogás, este deverá ter suas impurezas reduzidas de acordo com a aplicação final.

A quantidade produzida de biogás dependerá de diversos fatores, como a tecnologia empregada, as condições dentro do digestor e a composição dos resíduos. Em EPE (2008), indica-se que o volume de biogás produzido por tonelada de RSU é de 60 a 75 m^3 . Neste mesmo estudo, cita-se que a empresa Kompogas, fabricante de biodigestores, sugere o volume de 120 m^3 por tonelada de RSU como o valor médio existente. Em Banks (2009), no entanto, estima-se a produção de biogás por tonelada de RSU como 180.6 m^3 . Esses dados mostram a variabilidade da geração de biogás, que mudará de acordo com a tecnologia, o fluxo de lixo a ser tratado, o pré-tratamento empregado, etc. Na Tabela VII mostra-se a faixa de volume de gás produzido pelos digestores conhecidos no mercado internacional.

Tabela VII – Produção de Biogás para diferentes digestores no mercado

Empresas fabricantes de Digestores utilizados em DA	Biogás produzido (m³/tonelada de insumo)
BTA	80 - 120
Valorga	80 - 160
WAASA	100 - 150
DRANCO	100 - 200
Linde	100
Kompogas	130

Fonte: (Ostrem, 2004)

Existem vários tipos de digestores, cujas características diferem para que atendam da melhor forma o insumo que será tratado. Os digestores podem ser classificados em:

- Sistemas “Secos” ou “Úmidos”, dependendo do insumo a ser utilizado. Os sistemas úmidos processam insumos com conteúdo sólido total menor que 15% (baixo conteúdo sólido), enquanto os sistemas secos processam insumos com conteúdo sólido total entre 25% e 30% (alto conteúdo de sólidos) (Ostrem, 2004). Nos digestores úmidos, o insumo precisa ser diluído e condicionado para que atinja o total de sólidos adequado, o que não é necessário no caso dos digestores secos. O sistema úmido consome, portanto, grande quantidade de água – e necessita de reator volumoso e tecnologia pós-tratamento custosa (Verma, 2002). Os sistemas secos utilizam equipamentos de pré-tratamento menos complicados, no entanto, requerem equipamentos mecânicos mais complexos (Nayono, 2009), para tratar o insumo com maior quantidade de sólidos dentro do reator. Em geral, ambos os processos podem ser considerados hábeis tecnicamente para tratamento de resíduos sólidos orgânicos.
- Sistemas de Estágio Simples (ES) ou Múltiplos Estágios (MS)¹⁰, de acordo com a configuração do digestor. Nos sistemas de estágio simples, as etapas do processo da digestão ocorrem em um único reator, enquanto que, nos sistemas de estágio múltiplo, há a separação dos estágios da acetogênese e metanogênese em reatores diferentes (Verma, 2002). O fato de todas as reações se passarem no mesmo lugar (no caso do Estágio Simples) é desvantajoso, porque todas ocorrem sob as mesmas condições

¹⁰ Sistemas de Estágio Simples e Múltiplos Estágios são chamados de sistemas *de fluxo contínuo*. Há também os sistemas de *Batelada*, que são os mais simples e mais baratos de todos, mas produzem menos biogás, devido à baixa efetividade do processo de filtração (Henriques, 2004).

operacionais – entretanto, os grupos de microorganismos de cada etapa bioquímica têm diferentes taxas de crescimentos e diferentes PHs, e deveriam operar em condições distintas, para melhor atuação microbiológica (Nayono, 2009). Apesar deste empecilho, os digestores de Estágio Simples são os mais utilizados (em 2008, mais de 90% dos digestores anaeróbicos eram ES), por serem mais simples de operar, construir e projetar, e por serem mais baratos (Rapport *et al.*, 2008). Os digestores de Múltiplos Estágios, que são mais caros que os de Estágio Simples, otimizam as reações da digestão, mas incorrem em complicações operacionais por sofrerem falhas técnicas.

- Sistemas de temperatura Mesofílica ou Termofílica, de acordo com a temperatura empregada no interior do digestor. Sistemas onde as bactérias atuam entre 35 e 40°C são chamados de mesofílicos; sistemas onde as bactérias atuam entre 50 e 60°C são chamados termofílicos. A operação a temperaturas mais altas requer *input* maior de energia, mas facilita a produção mais rápida de biogás, e ajuda a “qualificar” o composto final, devido à esterilização durante a digestão (DEFRA, 2011). Sistemas com temperatura mesofílica sempre foram predominantes, pois sua faixa de temperatura é a preferível para aplicações em tratamento de esgoto, esterco e lodo (*sewage sludge*), e porque não requerem muita energia e são mais estáveis (De Baere e Mattheeuws, n.d.). Apesar disso, os sistemas termofílicos sempre tiveram importância na digestão da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (De Baere e Mattheeuws, n.d.). A capacidade instalada cumulativa até 2014 na Europa indica que 67% dos sistemas de digestão anaeróbica utilizam temperatura mesofílica, enquanto que os 33% restantes utilizam a termofílica (De Baere e Mattheeuws, n.d.).

Os digestores são, portanto, classificados de acordo com Total de Sólidos, Complexidade e Temperatura, baseados nos seus projetos. A Tabela VIII ilustra a capacidade instalada cumulativa até 2014, na Europa, levando-se em conta as classificações apresentadas, dando uma visão geral do uso de digestores anaeróbicos no mundo, mesmo sendo dados somente da Europa.

Tabela VIII - Percentagem da Capacidade Instalada Cumulativa de Sistemas de Digestão Anaeróbica, na Europa.

Parâmetro	Temperatura		Complexidade		Conteúdo Úmido (Sólidos Totais)	
	Mésófila	Termófila	Estágio Simples	Múltiplos Estágios	Sistemas Secos (Altos Sólidos)	Sistemas Úmidos (Baixos Sólidos)
Percentagem da Capacidade Instalada Cumulativa	67%	33%	93%	3%	62%	38%

Referência: (De Baere e Mattheuws, n.d.)

Após o processo da digestão anaeróbica, o gás produzido deverá ser conduzido, por meio de uma rede coletora, à turbina, ou motor, que deverá estar adequada ao uso com gás pobre em metano, no caso da geração de energia elétrica. Caso a opção seja condicionar o gás para a rede de distribuição, deverá ocorrer a limpeza do gás, de modo que as exigências de qualidade sejam satisfeitas.

3.2.2 Considerações

Recuperação de Energia e Eficiência Energética

A recuperação energética dos resíduos, a partir da Digestão Anaeróbica, se dará através do uso do biogás produzido. Seu principal uso, como já comentado, é na geração de energia elétrica em motores à combustão interna e microturbinas a gás – acoplados a geradores.

Os equipamentos de conversão possuem eficiência da ordem de 24 a 40%¹¹, quando da geração de apenas energia elétrica.

Como já citado, as plantas de digestão anaeróbica podem vir a produzir entre 120 e 290 kWh de energia por tonelada de resíduos sólidos urbanos (EPE, 2008). Este valor dependerá, no entanto, do dispositivo utilizado para conversão do biogás em energia e do conteúdo energético do biogás (que dependerá do processo da digestão). Ao se comparar a combustão convencional, que pode gerar entre 500 a 850 kWh/tonelada de resíduos sólidos urbanos, com a digestão anaeróbica, vemos que esta produz menos energia por tonelada de

¹¹ Referência: http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/apresentacoes/cetesb2011_suani.pdf; acessado em 2 de Julho de 2013.

insumo – no entanto, representa a melhor opção para reaproveitamento da fração orgânica do lixo.

A produção do biogás está diretamente relacionada aos processos bioquímicos da digestão, que dependem do insumo enviado ao digestor e das condições criadas dentro dele. A recuperação da energia dos resíduos será ótima (i) quando o insumo a entrar no digestor for bem selecionado ou pré-tratado – o que impediria o envio de resíduos não digeríveis ao reator –, (ii) quando as condições dentro do digestor forem ótimas para a produção do biogás (temperatura, pH, etc.) – acarretando a melhor atuação dos microorganismos nas etapas da digestão –, e (iii) quando a eficiência da transformação do biogás em energia elétrica for a maior possível. As duas primeiras medidas permitiriam a melhora na produção do biogás, o aumento de seu poder calorífico (supondo a utilização de insumos adequados e a melhora das etapas de digestão), e o aumento da energia elétrica convertida (como consequência do aumento do poder calorífico).

As condições ótimas para a digestão anaeróbica da matéria orgânica têm, em geral, o pH quase neutro, a temperatura mantida constante – termofílica ou mesofílica –, e uma taxa de alimentação de insumos relativamente constante (Rapport *et al.*, 2008). Apesar destas condições ótimas, outros parâmetros afetam a digestão, e devem ser controlados, buscando otimizar a atividade microbiana e, conseqüentemente, aumentar a eficiência da degradação anaeróbica do sistema e a produção de biogás (Verma, 2002). Caso contrário, é possível que se iniba a atuação dos microorganismos. A seguir são apresentados parâmetros importantes ao processo da Digestão Anaeróbica.

- Composição do Lixo: dependendo da composição do lixo, é possível que a atuação dos microorganismos anaeróbicos seja afetada, causando ineficiência na degradação da matéria orgânica. Em insumos com grandes quantidades de esterco e lodo, os micróbios atuam rapidamente, enquanto que em materiais mais resistentes, como a madeira, a digestão é limitada (Verma, 2002). O pré-tratamento e a separação do lixo, neste sentido, são de grande importância para a operação ótima da planta e para a produção de biogás.
- Nível de pH: no digestor, o nível de pH afetará o crescimento das bactérias anaeróbicas. As bactérias metanogênicas, por exemplo, podem ter seu desenvolvimento inibido por condições ácidas, onde o pH é menor que 7 (Verma, 2002).

- Temperatura: determinará a taxa de degradação dos processos anaeróbicos – particularmente as taxas da hidrólise e metanogênese (Nayono, 2009).
- Proporção Carbono – Nitrogênio: uma proporção alta de C/N indica que há o rápido consumo de nitrogênio pela metanogênese, resultando em baixa produção de gases (Verma, 2002). Baixos índices de C/N ocasionam valores altos de pH, o que é prejudicial às bactérias metanogênicas. Proporções ótimas de C/N para a digestão anaeróbica ficam entre 20 e 30 (Verma, 2002).

Outros parâmetros importantes para a digestão anaeróbica são (a) Conteúdo Sólido e Taxa de Alimentação de Orgânicos, (b) Tempo de Residência dos resíduos no digestor e (c) Mistura de resíduos. Estes fatores todos afetam o processo de produção de gás, a qualidade e quantidade do gás produzido e a produção de subprodutos, de modo que é importante observá-los e controlá-los, para otimização da geração de gás.

Emissões

A digestão anaeróbica produz gás com alto teor de metano, que precisará, tipicamente, ser comprimido, desidratado e tratado antes de ser utilizado na geração de energia (EPRI, 2011).

Esta tecnologia – assim como as outras de aproveitamento da energia do lixo para produção de energia elétrica – emite gases à atmosfera. Todas as tecnologias, no entanto, têm seu impacto ambiental reduzido por técnicas de limpeza de gases. Comparado aos aterros, as tecnologias são muito preferíveis, pois evitam as emissões de metano produzidos neles. (Do ponto de vista do ciclo-de-vida, também, as tecnologias se sobressaem significativamente.)

Na digestão anaeróbica, os gases que fogem das áreas enclausuradas das plantas são tratados por biofiltros, que utilizam microorganismos para degradar o gás passante e a matéria particulada presente no gás (Phong, 2012). Os biofiltros reduzem o Carbono Orgânico Total (TOC) do gás, seus Compostos Orgânicos Voláteis (à exceção de metano) e a amônia (NH₃) presente no gás. A eficiência do filtro dependerá da composição do gás passante, da temperatura, pH, etc. (Phong, 2012).

A qualidade do biogás enviado à unidade conversora (e.g., microturbinas a gás), assim como a capacidade da unidade conversora de queimar todo o metano, afetará as emissões finais de gases à atmosfera. Neste sentido, o tratamento do biogás, antes de seu envio às unidades conversoras, possibilita o melhor desempenho destas, fazendo decair a emissão de poluentes – e diminuindo, possivelmente, a necessidade de manutenção do dispositivo

gerador (o que favorece a geração contínua, e impede, conseqüentemente, a utilização de recursos fósseis para produção de energia).

3.2.3 Vantagens e Desvantagens

A seguir, na Tabela IX, são apresentadas as vantagens e desvantagens da Digestão Anaeróbica dos resíduos sólidos urbanos para aproveitamento energético, segundo informações obtidas da bibliografia pesquisada.

Tabela IX – Vantagens e desvantagens da Digestão Anaeróbica de Resíduos Sólidos Urbanos

Vantagens	Desvantagens
Recuperação da energia dos resíduos sólidos urbanos e produção de biofertilizantes valiosos.	Garantir a remoção de substâncias tóxicas antes do lixo entrar no digestor é difícil.
Produção de biogás, que pode (i) ser utilizado para gerar calor e eletricidade, (ii) ser convertido em biocombustíveis, ou (iii) passar por limpeza e ser injetado na rede de gás.	Somente aceita insumos homogêneos, o que faz com que a tecnologia dependa de extensivo pré-tratamento e seleção.
Redução dos gases do efeito estufa associados à disposição de resíduos em aterros.	O fato de requerer espaço relativamente grande e de haver dificuldade de lidar com odores, torna a tecnologia inadequada para áreas urbanas.
Tecnologia flexível: as plantas podem ser construídas em diferentes escalas, de largas unidades que tratam lodo ou resíduos urbanos, até unidades menores que tratam materiais de uma fazenda ou de uma pequena comunidade.	Eficiências menores que a combustão, pois nem toda matéria orgânica é convertida em biogás.
Tratam lixo com alto conteúdo úmido, que não é adequado às usinas de combustão de resíduos sólidos urbanos.	

Referências: (DEFRA, 2011), (Tatarniuk, 2007) e (IMECHE, n.d.).

3.3 Gaseificação

A gaseificação, para tratamento do lixo, compreende o aquecimento dos resíduos sólidos urbanos a temperaturas acima de 700°C, em um ambiente com quantidade reduzida de oxigênio, que permita a oxidação parcial do insumo, mas que impeça sua combustão (EPRI, 2011). A gaseificação do lixo produz gás de síntese (*synthesis gas* ou *syngas*), que é constituído de uma mistura de gás hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO), principalmente, e de quantidades menores de metano (CH₄), vapor de água, e outros (EPRI, 2011). O principal subproduto sólido do processo é a escória vítrea, um produto quimicamente inerte que pode ser reutilizado como material agregado (EPRI, 2011).

O gás de síntese tem ampla aplicação, podendo ser utilizado para produção de energia elétrica, calor, combustíveis de alta qualidade (e.g., diesel, gasolina e hidrogênio líquidos) ou produtos químicos (Arena, 2012; Stantec, 2011; CH2MHILL, 2009).

A gaseificação é um processo antigo, tendo sido utilizado há 200 anos na produção de gás para iluminação de ruas e para cozimento de alimentos. Sua utilização para tratamento de resíduos sólidos urbanos, no entanto, é recente, e começou após a década de 1980 nos Estados Unidos, Europa e Japão (CH2MHILL, 2009). As unidades iniciais tiveram problemas operacionais devido à heterogeneidade do insumo e muitas foram fechadas por motivos técnicos e econômicos. A gaseificação só voltou a ser cogitada para o tratamento de RSU após seu sucesso com o carvão e com o coque de petróleo, e como consequência da necessidade de se reduzir o volume de lixo enviado a aterros (CH2MHILL, 2009).

A tecnologia de gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) é considerada como não provada *comercialmente*, assim como outras tecnologias avançadas de conversão térmica. Altos custos e riscos impedem a implementação da tecnologia (EPRI, 2011). A gaseificação de RSU somente representa opção no Japão, onde há plantas em operação; fora deste país são poucas as plantas que tratam resíduos, devido, principalmente, aos problemas operacionais que podem surgir do uso do lixo como combustível (Stantec, 2011). A existência de plantas no Japão se deve ao ambiente favorável criado a tecnologias de tratamento por altas temperaturas (Stantec, 2011), e à necessidade deste país de arranjar soluções ao lixo produzido – uma vez que carecem de espaço. Estes fatores resultam em incentivos às tecnologias que tratam RSU, e em altas receitas pelo volume de lixo tratado.

EPRI (2011) indica que as plantas de gaseificação produzem entre 300 e 700 kWh de energia elétrica por tonelada de resíduos sólidos, podendo variar de acordo com o projeto. Cargas parasitas no sistema podem, no entanto, reduzir a quantidade de energia enviada à

rede. Pode-se citar como exemplos de cargas parasitas: o uso de energia para dar início ao processo de conversão, e para sustentá-lo, o fornecimento de oxigênio ao processo, e a utilização de carga para tratar o *syngas* (EPRI, 2011).

A composição do insumo é crucial para o desempenho da tecnologia – os insumos aceitos pelo processo da gaseificação devem ser, na maior parte das vezes, significativamente homogêneos (Stantec, 2011). Para isso, pré-processamento será necessário: é desejada a redução da heterogeneidade de seu conteúdo úmido e das cinzas (Arena, 2012), visando a adequação dos *inputs*. Nos itens seguintes, será apresentada a tecnologia da gaseificação dos resíduos sólidos urbanos.

3.3.1 Funcionamento Básico

A gaseificação funciona de modo a volatilizar e oxidar parcialmente os insumos carbônicos para geração de gás de síntese, que poderá, em seguida, ser utilizado para produção de calor e/ou eletricidade, de combustíveis líquidos (pelo processo Fischer-Tropsch, por exemplo) ou gasosos, ou de produtos químicos. Os resíduos sólidos urbanos enviados ao processo passam por pré-processamento (e.g., seleção, trituração, secagem) e também são pré-aquecidos antes de entrarem no gaseificador, objetivando a homogeneização do insumo, a redução de seu conteúdo úmido e sua secagem.

A tecnologia requer fonte direta de calor (CH2MHILL, 2009) para dar início ao processo, e não queima diretamente o insumo, mas o aquece, para que gasifique.

Dentro do gaseificador, acrescenta-se oxigênio, que, junto ao calor inicial injetado, oxidará parcialmente uma porção do insumo, formando CO₂ e liberando calor, e fará com que temperaturas de até 2000°C sejam alcançadas (CH2MHILL, 2009; e Stantec, 2011). As altas temperaturas obtidas fazem com que o material orgânico dos resíduos sólidos seja dissociado em gás de síntese, que é processado, em seguida, para que se remova vapor de água e contaminantes, de modo a condicioná-lo ao uso em produção de energia e químicos (Stantec, 2011). A Figura 10 ilustra o processo da gaseificação de resíduos sólidos urbanos.

Ressalta-se que, diferente da combustão, a quantidade de oxigênio é escassa, havendo somente o suficiente para que o processo da gaseificação do insumo ocorra, oxidando-o parcialmente. No caso da tecnologia de combustão, há um excesso de oxigênio (comburente).

Na gaseificação, ao se utilizar o ar, no lugar do oxigênio, o poder calorífico do gás de síntese (*syngas*) produzido será reduzido, devido à presença de nitrogênio no ar, que diluirá o *syngas* (CH2MHILL, 2009).

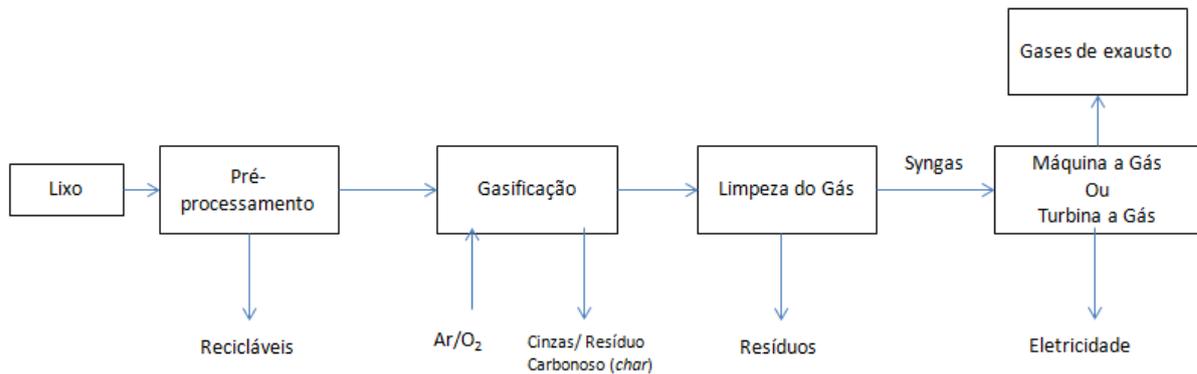


Figura 10 – Esquema do processo da gaseificação

Referência: (Arena, 2012)

Há basicamente três tipos de gaseificadores existentes, conforme indica CH2MHILL (2009) e conforme mostrado na Figura 11, os de Leito Fixo (*Fixed Bed*), os de Leito Fluido (*Fluid Bed*) e os de Leito Arrastado (*Entrained Flow*). Suas principais características são descritas a seguir.

- Gaseificadores de Leito Fixo: operam a temperaturas relativamente baixas, e têm longo tempo de residência; são bons para insumos que reagem lentamente.
- Gaseificadores de Leito Fluido: operam a baixas temperaturas e pressão; são utilizados para melhorar a turbulência no reator, ajudando no desempenho da completa gaseificação de insumos de baixa qualidade e reatividade. Estes gaseificadores geralmente utilizam ar ao invés de oxigênio.
- Gaseificadores de Leito Arrastado: operam a altas temperaturas e pressão, e têm baixos tempos de residência.

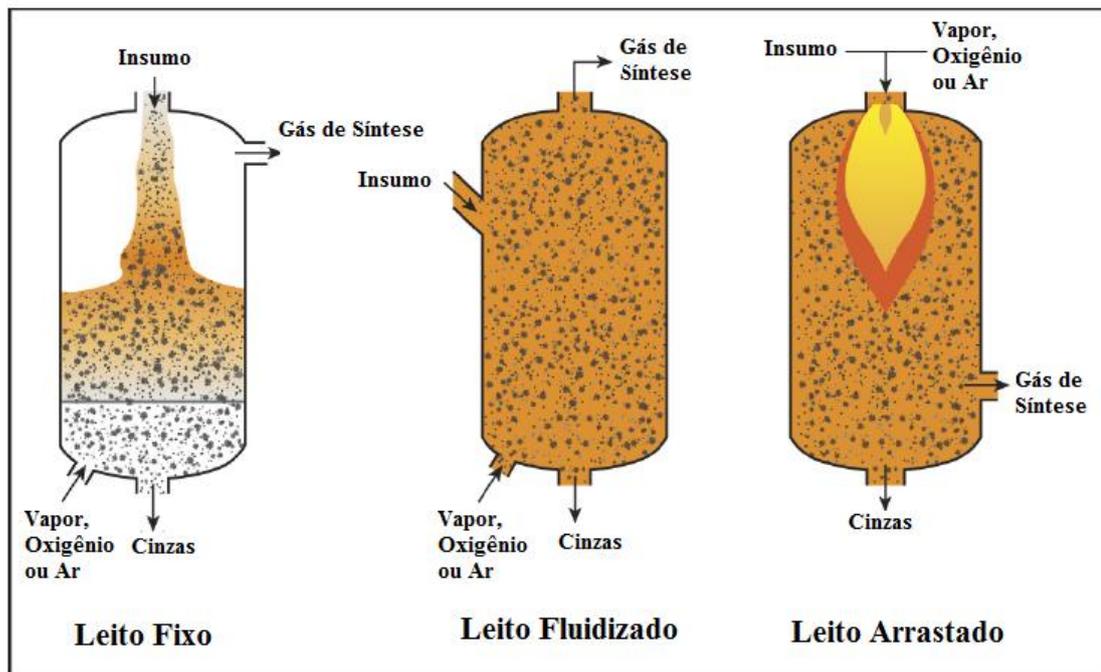


Figura 11 – Tipos básicos de gaseificadores

Fonte: (CH2MHILL, 2009)

Para tratamento de resíduos sólidos urbanos, CH2MHILL (2009) indica a predominância dos gaseificadores de Leito Fluido e Leito Fixo, porque os insumos de baixa reatividade e qualidade, como o lixo, se adequam mais a estes. Apesar de disso, os sistemas de gaseificação mais utilizados, no geral – não somente para tratamento de resíduos sólidos –, são os de Leito Arrastado.

Após a gaseificação do insumo, o *syngas* passará, geralmente, por um sistema de tratamento de gás, para sua limpeza, visando (i) a combustão em turbinas a gás ou em motores de combustão interna ou a vapor – para a produção de energia elétrica –, ou (ii) a produção de químicos (CH2MHILL, 2009). É válido citar que Cardoso (2012) apresenta o ciclo da turbina a gás para gaseificação em seu trabalho.

3.3.2 Considerações

Recuperação de Energia e Eficiência Energética

A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, a partir da Tecnologia de Gaseificação, se dará através do uso do gás de síntese, que, depois de tratado, poderá ser utilizado para a produção de energia elétrica ou de químicos. No caso da produção de energia, é possível obter entre 300 e 700 kWh por tonelada de resíduos sólidos urbanos, conforme comenta EPRI (2011). Estes valores se assemelham àqueles da combustão convencional (que geraria entre 500 e 850 kWh por tonelada de RSU).

Segundo Arena (2012), os principais dispositivos utilizados para conversão do gás de síntese em energia elétrica são: turbinas a vapor, turbinas a gás ou máquinas de combustão interna a gás.

A eficiência elétrica da planta de gaseificação varia de acordo com o dispositivo utilizado, e também dependerá da eficiência da conversão do conteúdo carbônico em gás de síntese e do seu poder calorífico. Ao se utilizar turbinas a vapor, é possível se alcançar eficiências de 15 a 24% para a planta, enquanto que ao se utilizar de turbinas a gás, é possível se alcançar eficiências de 20 a 30%. Quando são utilizadas máquinas de combustão interna a gás, é possível obter eficiências entre 14 e 26% para a planta (Arena, 2012).

A preparação do insumo, conforme já apontado para o caso da Digestão Anaeróbica, afeta significativamente a operação e desempenho da planta. Ao se reduzir o conteúdo úmido até uma faixa específica (geralmente de 10 a 20% de conteúdo úmido), e.g., por secagem, é possível aumentar a eficiência do processo (CH2MHILL, 2009).

Emissões

O processo de gaseificação não inclui chaminés ou, por exemplo, saídas de escape para gases da combustão (CH2MHILL, 2009). A tecnologia gera como produto final o gás de síntese (*syngas*), com composições que variam de acordo com as características da planta. Dependendo da aplicação final do gás gerado, este precisará passar por sistemas de limpeza. O uso do *syngas* na produção de energia elétrica e na produção de químicos, por exemplo, requer certo grau de pureza – como consequência, estas aplicações necessitarão limpeza do gás antes de sua utilização (CH2MHILL, 2009). No caso da geração de energia, é necessário processar o gás, pois é preciso minimizar a corrosão de equipamentos e as emissões pós-uso (CH2MHILL, 2009), que seriam agravadas caso os gases tivessem alta concentração de poluentes.

De acordo com Stantec (2011), o uso de sistemas de controle da poluição do ar dependerá justamente da aplicação final do gás, e serão implantados no caso em que o *syngas* produzido for utilizado no próprio local de sua produção, para geração de energia. Diferentemente, não será necessário o uso de sistemas de controle da poluição na planta quando o *syngas* for exportado do local onde foi produzido, visando produção de metanol ou hidrogênio, por exemplo.

O extensivo preparo dos resíduos sólidos urbanos e a pureza do gás de síntese fazem com que o sistema de controle de emissões seja menos intensivo que os da combustão, mas similares (EPRI, 2011). As duas principais diferenças entre os sistemas de controle de

poluentes das plantas de gaseificação e das plantas de combustão são: (i) na gaseificação, a limpeza ocorre antes da combustão do gás de síntese na turbina ou motor, de modo que, na realidade, o controle é da qualidade do próprio *syngas*. (ii) dependendo da composição do gás de síntese, este pode ser diretamente queimado, possibilitando o uso de sistemas de controle de poluentes mais convencionais, menores e com menos componentes (Stantec, 2011).

A seguir, são apresentadas algumas técnicas que podem ser empregadas para limpeza de gases e controle da poluição do ar, quando a planta de gaseificação é configurada para a produção de energia, de acordo com indicações de CH2MHILL (2009).

- Projeto de controle da combustão para otimização do tempo de residência, da temperatura e da turbulência, visando alcançar a completa combustão do *syngas*. (Utilizado no caso da queima do *syngas* em turbinas a gás, motores de ciclo Otto e caldeiras.)
- Injeção de amônia ou ureia nas correntes de gás pós-combustão para redução de emissões NOx (método conhecido como *Selective Non-catalytic Reduction*, SNCR, ou Redução Não-catalítica Seletiva; utilizado no caso da caldeira);
- Utilização de filtros para remoção de particulados dos gases de exausto produzidos pela combustão do *syngas* em caldeira;
- Depurador de gases para remoção de ácidos;

Além da emissão de poluentes gasosos, há a produção de cinzas *bottom ash*, que provavelmente precisarão ser dispostas em aterro. O subproduto sólido do processo, a escória vitrificada, é tipicamente vendida, e, quando não há mercado, deve também ser disposta em aterro (CH2MHILL, 2009; EPRI, 2011).

3.3.3 Vantagens e Desvantagens

A seguir, na Tabela X, são apresentadas as vantagens e desvantagens da Gaseificação dos resíduos sólidos urbanos para aproveitamento energético, segundo informações obtidas da bibliografia pesquisada.

Tabela X – Vantagens e desvantagens da Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos

Vantagens	Desvantagens
Reduz volume dos sólidos em até 90%	Tecnologia não estabelecida comercialmente
Recupera energia do lixo, produzindo combustível gasoso que pode ser utilizado para	Remoção de materiais inertes é essencial para o desempenho do processo (necessidade de seleção e

produção de energia, químicos e combustíveis líquidos	pré-tratamento)
A manipulação de gases é mais fácil do que a de combustíveis sólidos (e.g., para transporte).	Altos custos e riscos
Sistemas de limpeza de gases são menores e mais baratos para a gaseificação.	Manutenção regular requerida pelo sistema de limpeza.
Menor geração de gases poluentes.	
Redução de gases do efeito estufa associados à decomposição de resíduos em aterros (que produziriam metano)	

Referências: (Henriques, 2004), (EPRI, 2011), (Stantec, 2011) e (Tatarniuk, 2007).

4 Exercício e Casos

Na primeira seção deste capítulo, serão apresentados casos de empreendimentos *Waste-to-Energy* – um de combustão convencional de resíduos sólidos urbanos, e outro de digestão anaeróbica da fração orgânica separada de resíduos sólidos urbanos. Na segunda seção deste capítulo, será feita uma análise do potencial energético de três práticas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (reuso, combustão convencional e digestão anaeróbica) para o Brasil, e serão discutidos aspectos relacionados ao seu uso (e.g., custos de disposição de resíduos são evitados ao se utilizar o reuso de materiais). O objetivo é fazer uma comparação entre as práticas e avaliar qual seria a preferível para determinado fluxo de lixo.

4.1 Casos

Nesta seção serão mostrados dois casos de empreendimentos que reaproveitam energia de resíduos para geração de eletricidade. O objetivo é apresentar exemplos práticos de duas das tecnologias que foram alvo deste trabalho – combustão convencional e digestão anaeróbica. Serão apresentados dados gerais (e.g., energia gerada, custo do empreendimento) destas usinas, e o contexto em que estão inseridas.

4.1.1 Planta Likeng de Combustão Convencional em Baiyung, Guangzhou, China

Guangzhou (cidade também conhecida como Cantão) foi uma das primeiras cidades da China a implantar formalmente a reciclagem de seu lixo (Dong, 2011). Cinco aterros sanitários e uma planta *Waste-to-Energy* fazem parte da estratégia de gerenciamento de lixo da cidade (Dong, 2011). 91% do lixo pós-reciclagem da cidade é enviado para os aterros sanitários da região. O restante é enviado para a planta de *Waste-to-Energy*, onde ocorrerá a redução de volume e geração de energia.

Sistema de Combustão Convencional

A usina Likeng de Guangzhou utiliza a tecnologia de combustão convencional, e atende um milhão de pessoas, tratando 1040 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia e gerando 126000 MWh por ano (Dong, 2011) – o que representa, aproximadamente, 1% do consumo residencial de eletricidade do estado do Rio de Janeiro em 2021, ou 14,1% do consumo residencial de eletricidade de Sergipe (EPE, 2013). A planta foi construída em dois

anos pela empresa japonesa Mitsubishi Corporation – e foi a primeira do gênero a ser implantada em Guangzhou¹². O início de sua operação ocorreu em Janeiro de 2006.

A usina foi financiada pelo governo de Guangzhou, e custou aproximadamente 110 milhões de dólares à época (capacidade instalada de 22 MW). A tecnologia de grelha nela aplicada é da Martin GmbH, empresa que domina o ramo *Waste-to-Energy*, com quase 400 plantas instaladas ao redor do mundo.¹³ A planta têm sua operação e manutenção (O&M) feitas por uma empresa privada, que possui um contrato de 10 anos para serviços O&M (Dong, 2011).

Os componentes usados nesta usina foram importados tanto da Europa como do Japão. Os principais componentes e as empresas associadas a eles são:

- Tecnologia de grelha – fornecida pela Martin GmbH, da Alemanha;
- Fornalhas, caldeiras e sistema de desnitrificação (*Selective Non-Catalytic Reduction*, SNRC) – fornecidos pela Mitsubishi Corporation, do Japão;
- Sistema de controle de emissões – da empresa Keppel Seghers, da Bélgica;

A planta Likeng gera energia a partir da combustão de resíduos sólidos urbanos. O lixo, antes de ser enviado à usina, passa por seleção na cidade de Guangzhou. A eficiência térmica da planta, ao gerar eletricidade, é de 24%, o que é raro na China, segundo Dong (2011), devido ao baixo poder calorífico do lixo neste país. Os dados gerais da planta são apresentados na Tabela XIV.

Tabela XIV – Dados gerais da planta *Waste-to-Energy* Likeng

Dados da Planta <i>Waste-to-Energy</i> Likeng	
Investimento total	110 milhões de dólares
Tipo de lixo tratado	Resíduos sólidos urbanos
Poder calorífico projetado do lixo	4 a 7,5 MJ/kg
Capacidade (duas linhas de tratamento)	1040 ton de RSU/ dia
Capacidade de geração da turbina	22 MW
Disponibilidade da planta	7500 horas/ano
Eficiência térmica	24%
Energia produzida pela planta	158000 MWh/ano
Energia consumida pela planta	32000 MWh/ano
Energia elétrica enviada à rede	126000 MWh/ano
Início da operação	Janeiro de 2006

¹² Referência: http://www.veolia-esasia.com/column/2008-12/04/content_2612163.htm; website acessado em 13 de Julho de 2013.

¹³ Ver: <http://www.martingmbh.de/pdf/broschueren/Referenzliste.pdf>; website acessado em 13 de Julho de 2013.

Fonte: (Dong, 2011)

Um fator que pesa na implantação de usinas *Waste-to-Energy* é a opinião pública. A maior preocupação que costuma existir é a poluição ambiental local e global. No caso da planta de Likeng, há uma contrariedade grande da mídia em relação a impactos ambientais supostos.

A planta de Likeng mantém registro das emissões produzidas. Segundo a empresa que opera a usina, o sistema de monitoramento ambiental é rigoroso, e atende a normas europeias de poluição. Em Dong (2011) é mostrado que a usina mantém um monitoramento online das emissões, que fica exposto em um painel na entrada do estabelecimento da usina. Apesar disso, os componentes mais preocupantes – em termos de nocividade – não são exibidos neste painel, e não são informados ao público. A Tabela XV mostra o desempenho ambiental da planta de Likeng, de acordo com seu operador (empresa Veolia), comparado à norma europeia de emissões.

Tabela XV – Comparação das emissões da planta Likeng, com a norma europeia.

Poluentes	Norma Europeia (1996)	Valores reportados pela planta Likeng
Poeira, mg/Nm³	30	10
Ácido clorídrico (HCl), mg/Nm³	50	50
Ácido fluorídrico (HF), mg/Nm³	2	2
Óxidos de nitrogênio (NO_x), mg/Nm³	-	200
Óxidos de enxofre (SO_x), mg/Nm³	300	100
Monóxido de carbono, mg/Nm³	100	100
Mercúrio, mg/Nm³	0,1	0,1
Cádmio, mg/Nm³	0,1	0,1
Chumbo, mg/Nm³	-	0,5
Dioxina e Furanos, nTEQ/Nm³	0,1	0,1

TEQ: “Toxic Equivalent Quantity”, ou quantidade tóxica equivalente.

Fonte: (Dong, 2011)

É possível perceber que, segundo os operadores da planta, a norma europeia é atendida (a norma chinesa, que é menos rigorosa que a europeia, também é atendida – ver Dong, 2011). A usina de Guangzhou possui filtros e técnicas de limpeza importadas de empresas conhecidas mundialmente (sistema de controle de emissões da Keppel Seguers, e sistema de desnitrificação da Mitsubishi). Apesar disso, a mídia e uma parte da população mantém a opinião contrária – o que, em certa medida, é positivo. No entanto, segundo Dong (2011),

problemas de odor nas redondezas da usina – reclamados por residentes locais – são atribuídos ao deslocamento, nas ruas, de caminhões com lixo úmido.

Esta usina pode ser considerada uma solução positiva para o lixo da cidade em questão. O empreendimento é bem operado e possui meios efetivos para aprimorar seu desempenho ambiental (Dong, 2011). Além disso, a usina Likeng é composta por tecnologias de empresas que lideram o setor ou se destacam nele (e.g., Marting GmbH, Mitsubishi Corporation, Keppel Seghers), fornecendo credibilidade tecnológica à operação e desempenho da planta. Por fim, a empresa que opera a planta, Veolia, é experiente no ramo, com 63 usinas *Waste-to-Energy* ao redor do mundo¹⁴.

4.1.2 Digestão Anaeróbica em Moncada y Reixach, Barcelona, Espanha

A região metropolitana de Barcelona possui três complexos, chamados “Ecoparks”, que tratam os resíduos de suas áreas. Estes complexos têm como proprietário a agência de meio ambiente da região metropolitana de Barcelona, mas quem os opera são as empresas que os construíram e que detém suas concessões (Arsova, 2010).

Os chamados “Ecoparks” são sites construídos especialmente para tratamento da fração orgânica do lixo (Arsova, 2010). Neles, há, geralmente, uma unidade de digestão anaeróbica e uma de compostagem aeróbica.

A planta de digestão anaeróbica de Moncada y Reixach, objeto desta seção, é a maior do gênero na Europa (Arsova, 2010), e está localizada na zona industrial de Can Salvatella Andis, no complexo “Ecopark 2”. Este ecopark atende todos os municípios da região metropolitana de Barcelona, mas não atende Barcelona.

O Ecopark 2 teve sua operação iniciada em 2003. Inicialmente, a unidade de digestão anaeróbica tratava todo o lixo pós-reciclagem que chegava à planta – mas isto acabou por gerar problemas aos reatores. A partir de então, os digestores anaeróbicos (três no total) passaram a tratar somente a fração orgânica previamente separada.

Sistema de digestão anaeróbica

A planta de digestão anaeróbica tem capacidade de tratar 120.000 toneladas de lixo orgânico por ano. O processo se inicia com pré-tratamento mecânico – para recuperação de recicláveis.

¹⁴ Referência: <http://www.veolia-environmentalservices.com/solutions/treatment-recovery/energy/>; acesso no dia 5 de Agosto de 2013.

O pré-tratamento dos resíduos orgânicos ocorre em uma linha de separação simples com capacidade de receber 30 toneladas de resíduos por hora, e inicia-se com remoção manual de itens recicláveis volumosos. Em seguida, os resíduos passam por um separador mecânico (“trommel”) e por um separador eletrostático. Os resíduos destas linhas de pré-tratamento são prensados, empacotados e enviados à disposição final em aterros sanitários controlados. Parte da fração orgânica do lixo é enviada para a planta de digestão; a outra parte, juntamente com resíduos pós-reciclagem de toda sorte, são enviados para compostagem.

A planta de digestão anaeróbica possui três digestores no estabelecimento, cada qual com capacidade de 4500m³. Os digestores possuem um tempo de retenção de 25 a 30 dias e atuam em temperaturas mesofílicas (35%), que é sustentada através do aquecimento do reator com vapor. Sua configuração é de altos sólidos (conteúdo sólido total entre 40% e 45%) (Arsova, 2010).

Há quatro geradores de energia elétrica na planta de digestão, cada qual com 1 MW de potência. Gera-se, na planta, tanto vapor – que é utilizado no próprio processo de digestão para aquecimento – como eletricidade, que é utilizada no local (59%) ou vendida à rede elétrica (41%). Em 2008, 20.2 GWh de energia elétrica foram produzidos (Arsova, 2010) – o que representa 0,2% do consumo residencial de eletricidade do estado do Rio de Janeiro, ou 2,3% do consumo residencial de eletricidade de Sergipe (EPE, 2013). Os principais dados da planta se encontram na Tabela XVI.

Tabela XVI - Dados gerais da planta de digestão anaeróbica de Moncada y Reixach

Dados da Planta de Digestão Anaeróbica de Moncada y Reixach	
Investimento total	68.4 milhões de dólares
Tipo de lixo tratado	Fração orgânica separada do lixo
Capacidade de tratamento	120.000 toneladas por ano
Geração de biogás	150 Nm ³ por tonelada de orgânicos
Eletricidade produzida	20200 MWh/ ano
Início da operação	2003

Referência: (Arsova, 2010) e Database de Tecnologias de Gerenciamento de Lixo¹⁵

A tecnologia de digestão anaeróbica utilizada no Ecopark 2 é a mais eficiente dos três Ecoparks da região metropolitana de Barcelona. Segundo Arsova, (2010), isto se deve à tecnologia da Valorga – empregada na planta –, que é uma das mais favoráveis à digestão mundialmente, devido à sua flexibilidade quanto ao insumo que entra no digestor.

¹⁵ http://www.epem.gr/waste-c-control/database/html/case_study-17.htm; acesso no dia 20 de Julho de 2013.

Quanto à questão ambiental: todo o complexo, incluindo as unidades de pré-tratamento e compostagem, ficam sob pressão negativa, para controle de odores. Todo o ar coletado, segundo Arsova (2010), é tratado, primeiro, por depuradores de gases (“*scrubbers*”) e, depois, por biofiltros inorgânicos.

O odor emitido deste tipo de complexo faz com que o público vá contra sua implantação. No caso dos Ecoparks, as principais fontes de odores são a unidade de pré-tratamento e a unidade de compostagem. Mesmo que estas fiquem sob pressão negativa, o problema persiste.

Concluindo, o gerenciamento de resíduos da região metropolitana de Barcelona – através do uso de ecoparks – é um grande exemplo de sucesso da aplicação da digestão anaeróbica (Arsova, 2010). Estas unidades tratam a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, e transformam a energia neles contida em eletricidade – além de condicionar a parte residual do processo em composto orgânico, por meio da compostagem. Deste modo, uma solução positiva à fração orgânica do lixo é alcançada: resíduos são tratados, transformados e recebem uso.

4.2 Análise de potencial energético do Reuso, Combustão Convencional e Digestão Anaeróbica de resíduos sólidos urbanos

Para que se possa avaliar o potencial das práticas de gerenciamento, é essencial conhecer a composição do lixo e suas características – além do ambiente socioeconômico associado. Dependendo do conteúdo do lixo, algumas opções de gerenciamento são descartadas – por exemplo, resíduos sólidos urbanos com baixos teores de matéria orgânica são inviáveis para a digestão anaeróbica (que precisa selecionar e pré-tratar o lixo para que receba somente a fração orgânica).

Como comentado neste Trabalho, as práticas diletas para gerenciamento de resíduos sólidos são a reutilização e a reciclagem de materiais, pois reduzem gastos energéticos, custos, emissões e poluição durante todo o ciclo de produção de um produto a partir de matéria-prima virgem. Será mostrada, a seguir, uma avaliação do potencial energético da Reutilização, da Digestão Anaeróbica (tecnologia de tratamento biológico) e da Combustão Convencional (tecnologia mais comum de tratamento térmico) no Brasil, considerando-se: a taxa de recuperação de resíduos dos Estados Unidos, a penetração da Digestão na Europa, e a penetração da Combustão nos EUA, respectivamente.

Para que as práticas sejam comparadas, a análise tomará o lixo coletado no Brasil como referência, os fatores de uso das regiões selecionadas (EUA e Europa) e fará os cálculos sobre este espaço amostral, supondo a adoção das práticas para o tipo de lixo adequado a cada uma. Isto permitirá o exercício da comparação e a idealização de qual seria o ganho energético do país se este gerenciasse o lixo de acordo com as práticas propostas e caso manejassem o lixo similarmente a outros países. A quantidade de lixo coletado no Brasil é mostrada na Tabela I (capítulo 1), bem como sua composição.

4.2.1 Reutilização

Para a reutilização, será avaliado o potencial de conservação de energia, caso o Brasil alcance a recuperação de resíduos dos Estados Unidos. Se aplicará, portanto, a taxa de recuperação deste país no lixo brasileiro, e se calculará, segundo Oliveira (2000), seu potencial de conservação.

É interessante ressaltar que, neste caso, supõe-se que o lixo “recuperável” seja todo “reutilizável”. Isto, em realidade, não procederá sempre, pois é possível que o resíduo “recuperável” não seja apto a ser utilizado novamente ao fim a que foi produzido – necessitando, por exemplo, condicionamento ou reciclagem antes do reuso.

Com base em Oliveira (2000), se apresenta, portanto, na Tabela XI, o potencial de conservação energética da reutilização.

Tabela XI – Potencial energético da Reutilização de materiais (conservação de energia).

Resíduo	Quantidade (ton/ano)	% de peso recuperado (referência dos EUA)	Energia elétrica economizada por tonelada de produto (MWh/ton)	Energia elétrica economizada total (MWh/ano)
Metal	1.610.499	35,1%	5,3	2.996.011
Vidro	1.332.827	27,1%	0,64	231.166
Papel	7.275.012	62,5%	3,52	16.005.026
Plástico	7.497.149	8,2%	5,06	3.110.717
Total (MWh/ano)				22.342.920
Total (TWh/ano)				22,3

Referências: (Abrelpe, 2011), (EPA, 2011) e (Oliveira, 2000)

O total de energia conservado, ao se reutilizar o metal, vidro, papel e plástico coletado no país, à mesma taxa que se recupera nos Estados Unidos, seria, portanto, 22,3 TWh por ano

– o que corresponde a 4,5% do consumo de energia elétrica do país no ano de 2012¹⁶ (EPE, 2012) e a 22,7% da energia gerada por Itaipú no ano de 2012¹⁷.

Diferentemente das práticas que serão analisadas em seguida, a reutilização atua de modo a reduzir a produção de produtos e a evitar a produção de lixo. Deste modo, ela reduziria gastos energéticos, custos, emissões, poluição e impactos relacionados tanto ao ciclo de produção de produtos criados a partir de matéria-prima virgem (extração de materiais, transporte, beneficiamento, etc.) como ao ciclo de disposição do lixo (manejo, transporte, tratamento e disposição final). No caso das outras práticas, isto não aconteceria expressamente, pois elas gerenciam o lixo já produzido, ao invés de evitar a produção de lixo. No entanto, é válido comentar conforme EPRI (2011) que cidades que possuem usinas *Waste-to-Energy* geralmente apresentam maiores taxas de reciclagem, o que é benéfico.

A reutilização de materiais reduziria, portanto, (i) o uso de energia e combustível (criando, deste modo, reserva de energia e recursos), (ii) emissões, poluição e impactos (e.g., mau cheiro, perda de atratividade de áreas, vetores de doenças), e (iii) custos – associados às atividades:

- Extração de matéria prima-virgem;
- Transporte de matéria prima-virgem;
- Beneficiamento de matéria prima e manufatura de produtos;
- Transporte de produtos;
- Uso de produtos;
- Manejo de lixo;
- Transporte de lixo;
- Uso de tecnologia de tratamento do lixo;
- Disposição final de resíduos;
- Geração de energia a partir de fontes convencionais;

Vale ressaltar, no entanto, que a reutilização não abrange todo o lixo produzido, de modo que são necessárias outras práticas para que seja dado tratamento próprio a todo lixo.

¹⁶ Consumo em 2012: 500,1 TWh.

¹⁷Energia gerada por Itaipú em 2012: ~98,3 TWh. Referência: <http://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>; acessado em 7 de Julho de 2013.

4.2.2 Digestão Anaeróbica

Para a digestão anaeróbica, se avaliará o potencial da geração de energia, caso esta tecnologia consiga alcançar, no Brasil, a mesma representatividade que alcança na Europa, conforme De Baere e Mattheeuws (n.d.). Isto é, se considerará que 5% do lixo orgânico será enviado à digestão anaeróbica.

Quando a opção de gerenciamento é a digestão anaeróbica, a fração do lixo a ser tratada será a orgânica, que precisará ser separada do lixo e pré-tratada antes de enviada ao processo. Conforme a Tabela I (capítulo 1), a quantidade de matéria orgânica produzida no Brasil é de 28.544.702 toneladas por ano (Abrelpe, 2011). Em EPE (2008), cita-se que a fabricante Kompostogas sugere uma produção de 120 m³ de biogás por tonelada de material orgânico. Nesta mesma referência, indica-se o poder calorífico do biogás entre 4500 a 6000 kcal/m³. Aqui, adotar-se-á o menor valor, 4500 kcal/m³ (~5,23 kWh/m³). Tomar-se-á, como eficiência do dispositivo conversor de biogás em energia elétrica, o valor de 32% (média do valor apresentado no capítulo 3, seção 3.2.3). Na Tabela XII se apresenta, portanto, o potencial da digestão anaeróbica, de acordo com o cenário proposto.

Tabela XII – Potencial energético da Digestão Anaeróbica (geração de energia)

Resíduos orgânicos produzidos no Brasil (ton/ano)	% destinada à digestão anaeróbica	Biogás produzido por tonelada de lixo (m³/ton)	Poder calorífico do biogás (kWh/m³)	Eficiência da conversão para energia elétrica	Total de energia gerada por ano (TWh/ano)
28.544.702	5%	120	5,23	0,32	0,29

Referências: (Abrelpe, 2011), (De Baere e Mattheeuws, n.d.) e (EPE, 2008)

O potencial a ser gerado, com toda a matéria orgânica coletada no país, seria 0,29 TWh (0,06% do consumo de energia do país em 2012) – valor consideravelmente menor do que aquele alcançado pela reutilização.

É válido notar, no entanto, que ambas as práticas (digestão anaeróbica e reuso) não se excluem uma a outra, de modo que seria possível haver a adoção de ambas as práticas – aumentando-se, com isso, o benefício. A necessidade de seleção e pré-tratamento do lixo, que será enviado à digestão, é positivo por facilitar a separação de recicláveis do fluxo do lixo, criando um ambiente favorável à reciclagem. No entanto, este preparo – que é necessário para a operação e funcionamento adequados da tecnologia – implica custos, que não estão presentes na combustão convencional ou na reutilização.

No caso da digestão anaeróbica, *existirão* os gastos energéticos, custos e impactos (e.g., emissões de gases do efeito estufa, poluição do solo, mau cheiro, perda de atratividade de áreas, vetores de doenças) relacionados ao manejo, transporte, preparo, seleção, tratamento e disposição de resíduos. A digestão também não reduziria a produção de novos produtos a partir de matéria-prima virgem, a menos que sejam fomentados, em paralelo, a reciclagem e o reuso.

Apesar disso, esta tecnologia é a preferível para o tratamento do lixo orgânico (que não é reciclável ou reutilizável – e que não é bem aceita pelas tecnologias de tratamento térmico). A digestão transforma a fração orgânica em biogás, que pode ser utilizado para geração de eletricidade, e em compostos, que podem servir de adubo – criando, assim, valor aos resíduos. Adicionalmente, ao se gerar energia a partir de resíduos, se evita a geração por outras fontes e os custos e impactos relacionados a ela, aumentando a segurança energética do país (por manter uma reserva de energia).

4.2.3 Combustão Convencional

Para a combustão convencional, se avaliará o potencial de geração de energia no Brasil, caso esta tecnologia alcance a mesma representatividade que tem nos Estados Unidos, conforme (EPA, 2011). Ou seja, se avaliará o potencial de geração da combustão ao tratar 11,7% do lixo coletado no Brasil.

Associar-se-á à quantidade total de resíduos o poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos brasileiros – que será considerado 7,5 MJ/kg, de acordo com a referência da nota de rodapé nº19. A eficiência da usina será considerada como 20% (a faixa de eficiência deste tipo de tecnologia é de 14 a 27% para geração de energia elétrica – conforme comentado no capítulo 3, seção 3.1.3). Na Tabela XIII, é apresentado, portanto, o potencial energético da combustão convencional, de acordo com o cenário proposto.

Tabela XIII – Potencial energético da Combustão Convencional (geração de energia)

Resíduos sólidos urbanos coletados (ton/ano)	% do lixo destinado à combustão (referência dos EUA)	Poder calorífico (MWh/ton)	Eficiência da conversão para energia elétrica	Potencial de energia a ser gerada por ano (TWh/ano)
55.534.440	11,7%	2,08	0,20	2,7

Referências: (Abrelpe, 2011) e (EPA, 2011)

A energia que poderia ser gerada, então, se 11,7% do lixo fosse enviado para conversão de energia – através da combustão convencional –, seria de 2,7 TWh/ano. Esse valor corresponde a 0,54% do consumo de energia elétrica do país em 2012, e 12,1% da energia conservada pela reutilização. Em termos energéticos, nota-se, pois, a preferência por se reutilizar e/ou reciclar a parte do lixo que pode servir a estas práticas (papeis, metais, vidro, etc.).

Salienta-se que, no caso da Combustão à Queima Direta de resíduos sólidos urbanos, haverá o ciclo do lixo (manejo, transporte, tratamento e disposição final) e o ciclo da produção dos produtos a partir da matéria-prima virgem (extração de materiais, transporte, beneficiamento, etc.) que se transformaram, finalmente, em resíduos. Ou seja, desta vez estarão presentes gastos energéticos, custos, emissões, poluição e impactos gerais (e.g., emissões de gases do efeito estufa, poluição do solo, mau cheiro, perda de atratividade de áreas, vetores de doenças) relacionados àqueles ciclos. É importante visualizar que, por estes motivos, é preferível evitar a produção de resíduos e reduzir a produção de materiais a partir de matéria-prima virgem. Deste modo, as atividades preferenciais seriam reuso (reduziria impactos de ambos os ciclos) e a reciclagem (reduziria impactos do ciclo de produção de produtos criados a partir de matéria virgem).

4.2.4 Consolidação de resultados

A reutilização apresenta o cenário mais positivo em termos de recuperação energética – e, por evitar custos e impactos gerais do “ciclo do lixo” e reduzir os do ciclo produtivo, também representa a melhor opção em termos ambientais e em questão de redução de custos.

A digestão anaeróbica é opção preferida para o tratamento da fração orgânica do lixo, que não pode ser reciclada – e que não é bem aceita pela combustão convencional e gaseificação (devido ao alto conteúdo úmido). Seu funcionamento e desempenho estão condicionados à seleção, ao pré-tratamento do insumo e à tecnologia empregada. A digestão anaeróbica não deve competir por insumos recicláveis, que seriam separados antes do envio da fração orgânica do lixo ao processo.

A geração de energia a partir da combustão corresponde a 12,1% do total de energia que seria conservada através do reuso – o que indica a preferência à adoção desta última prática de gerenciamento, quando se trata de resíduos reutilizáveis. Com efeito, a reutilização e a reciclagem deveriam ser priorizadas. A combustão deveria, portanto, receber somente resíduos combustíveis não reutilizáveis e não recicláveis, para que todo o potencial de

conservação seja explorado. A Tabela XIV apresenta os dados consolidados para as três práticas analisadas neste capítulo.

Tabela XIII – Dados consolidados do exercício proposto

Práticas de Gerenciamento		
Reutilização	Digestão Anaeróbica	Combustão Convencional
Potencial de Conservação de Energia (TWh/ano)	Potencial de Geração de Energia (TWh/ano)	Potencial de Geração de Energia (TWh/ano)
22,3	0,29	2,70

Deste exercício pode-se concluir que a reutilização é a prática mais proveitosa em termos energéticos e ambientais.

Uma nota que deve ser tomada se refere ao potencial frente ao consumo energético do país. O aumento das taxas de reciclagem e reuso ajudariam a manter as reservas de energia e matéria-prima virgem do país. De modo similar, a geração de energia através do lixo também auxiliaria na manutenção das reservas de matéria-prima dedicadas ao setor elétrico – e auxiliaria na solução de dois problemas atuais: gerenciamento de resíduos sólidos e segurança energética.

É interessante observar que, do ponto de vista da economia de moldes modernos, a redução da demanda (e.g., de produtos) não é positiva, pois a retrai. Ou seja, ao se reduzir a demanda, se “minaria” a produção e o consumo, fazendo-se diminuir o capital girando na economia. No entanto, ao manter-se o fomento ao giro de capital, através do aumento de consumo e gastos – sem adoção de práticas sustentáveis na sociedade, comércio e indústria –, se aumentaria a disposição final de resíduos, que devem ser propriamente gerenciados e reduzidos para salvaguarda da população e do meio ambiente, e se aumentaria o consumo de energia. O reaproveitamento de resíduos em processos produtivos, neste sentido, é imprescindível. Deste modo, é importante dar destaque ao gerenciamento integrado dos resíduos – que teria como objetivo tornar ótimo o tratamento e aproveitamento de materiais.

5 Considerações Finais sobre as Tecnologias

No Capítulo 3, as tecnologias da Combustão à Queima Direta, Digestão Anaeróbica e Gaseificação foram apresentadas. Foi possível mostrar a situação destas tecnologias em termos de maturidade a nível global e em termos de custo – conforme EPRI (2011). Além disso, foram apresentadas questões relevantes relacionadas ao funcionamento e desempenho das tecnologias.

Tendo consolidada a visão proporcionada pelos capítulos anteriores, o presente capítulo apresentará as premissas para a viabilidade econômica das tecnologias de *Waste-to-Energy*, e a situação das tecnologias, e da recuperação energética dos resíduos sólidos para produção de energia, no Brasil, considerando-se os incentivos e entraves existentes no país.

Na seção das premissas da viabilidade econômica, não se chegará a detalhar um modelo de cálculo da viabilidade de um empreendimento de *Waste-to-Energy*. O objetivo é mostrar os parâmetros que influenciam a economia do empreendimento, de modo a indicar quais fatores devem ser observados para que se consiga abordar a questão, que é de grande importância para implantação de usinas. A tese de mestrado de Maier (2011) elabora um modelo de cálculo da viabilidade econômica de métodos de tratamento de resíduos sólidos urbanos, que, caso se deseje mais aprofundamento no assunto, deve ser visitada.

5.1 Premissas para a viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica de empreendimentos é imprescindível para sua implantação. A viabilidade de usinas *Waste-to-Energy* depende de diversos fatores, como: características do insumo, custos capitais, custos de Operação e Manutenção, condições de mercado, regulações (EPRI, 2011), entre outros. Além disso, a economia deste tipo de negócio é muito específica para cada localidade, dependendo largamente de incentivos locais, características dos resíduos, etc. (EPRI, 2011).

O empreendimento será viável economicamente quando o retorno for tão positivo que, além do pagamento das taxas de empréstimo do financiamento, o negócio seja lucrativo. Para que isso aconteça, as receitas devem exceder os gastos por ano da usina. O custo capital influenciará significativamente a viabilidade econômica do empreendimento; usinas de combustão à queima direta, por exemplo, podem chegar a investimentos capitais de \$7,500 a \$9,000 USD por kW de capacidade: três vezes o custo de se instalar a capacidade de termelétricas à carvão (Themelis e Reshadi, 2009). Ressalta-se que estes valores seriam para as plantas com geração de 605 kWh de energia elétrica por tonelada de RSU (Themelis e

Reshadi, 2009) – vale ressaltar, também, que usinas modernas servindo grandes áreas podem chegar a ter até 75 MW de potência, e que usinas de 25 MW ou menores são comuns.

O Fluxo de Caixa do negócio será a soma do total da receita ao ano e do total de gastos ao ano, como mostra a equação (1), conforme Maier (2011).

$$\text{Fluxo de Caixa}_{[\text{R\$/ano}]} = -\text{Custos}_{[\text{R\$/ano}]} + \text{Receitas}_{[\text{R\$/ano}]} \quad (1)$$

Os gastos no ano são geralmente associados à Operação e Manutenção da planta, e à taxa que se deverá pagar para a disposição final das cinzas do processo de conversão ou dos subprodutos diversos. Há de se ressaltar que, em alguns casos, os subprodutos podem se tornar fonte de renda, quando houver submercado para seu uso. Isto dependerá do subproduto, de sua qualidade e das condições de mercado. Os custos podem ser, portanto:

- Custos de Operação e Manutenção da planta: gastos relacionados ao pagamento do trabalho empregado na operação e na manutenção da planta, e ao pagamento do uso/aquisição do material empregado na manutenção da planta.
- Custos de disposição final de subprodutos, como as cinzas *fly ash* e *bottom ash*: gastos relacionados ao pagamento feito a aterros para que os subprodutos do processo de conversão sejam dispostos.

As receitas ao decorrer do ano estão associadas aos retornos possíveis do empreendimento, sendo o principal (retorno) a venda de energia. Há também a venda de metais ferrosos e não ferrosos recuperados do fluxo de lixo, que podem ser revendidos para reuso – além do pagamento que é feito às usinas para o tratamento do lixo. Dependendo da tecnologia empregada, as receitas variarão – a Digestão Anaeróbica, por exemplo, poderá ganhar com a venda de seus compostos (adubo/fertilizante). Além desses itens, também é possível abater o caixa entrando-se no mercado de créditos de carbono. As receitas serão, portanto:

- Ganhos relacionados à venda da energia elétrica produzida;
- Ganhos de caixa relativos ao tratamento do lixo: a usina será paga para receber quantidades de resíduos sólidos urbanos;
- Ganhos relacionados à venda de metais ferrosos e não-ferrosos;

A economia do empreendimento será, portanto, reflexo do fluxo de caixa e do abatimento das taxas de empréstimo. O fluxo de caixa, no entanto, variará de acordo com diversos parâmetros – ou seja, a quantidade de receitas e gastos dependerá de diversos parâmetros – como, por exemplo, disponibilidade da planta e preço da energia a ser vendida.

A seguir são apresentados os principais fatores que influenciam a viabilidade econômica de um empreendimento *Waste-to-Energy*, incluso fatores que afetam a variação de receitas e custos:

- Disponibilidade da planta: o tempo parado da usina afetará a quantidade de lixo que será tratada. A planta não tratará lixo enquanto estiver parada¹⁸, e, portanto, não gerará energia neste meio tempo; como consequência, cairá a quantidade de energia vendida, e a respectiva receita.
- Eficiência da planta: dependendo da eficiência da planta, maior será a quantidade de energia gerada, fazendo aumentar a receita do empreendimento. De outra maneira, a eficiência poderá afetar o custo com serviços de Operação e Manutenção – supondo a geração de uma quantidade fixa de energia, a eficiência ditaria a quantidade de resíduos sólidos a ser enviada à planta, ocasionando em maior ou menor esforço, dependendo do volume de lixo a ser tratado. (Ver seção 3.1.3 deste trabalho.)
- Valor dos serviços de Operação e Manutenção (O&M): o valor a ser pago pelos serviços de Operação e Manutenção afetará os custos do empreendimento. Os custos de O&M são compostos de parcelas fixas e variáveis, e são influenciados principalmente pela composição do lixo e pela eficiência da queima – fatores que afetam a frequência e intensidade do uso de serviços de O&M e, portanto, os gastos relacionados.
- Preço da energia a ser vendida: influenciará a receita do empreendimento. Quanto maior o valor da energia, maior o retorno. Valores muito altos de energia podem, no entanto, fazer com que o negócio seja pouco competitivo.
- Valor a ser recebido pelo tratamento dos resíduos sólidos: quanto maior o valor pago por tonelada a ser tratada, maior a receita do empreendimento. Esse valor variará de região para região. Por exemplo, regiões densamente povoadas, com escassez de áreas livres, pagam mais para ter os resíduos sólidos tratados (e.g., no Japão paga-se aproximadamente R\$ 250 por tonelada de resíduos sólidos urbanos¹⁹), enquanto que regiões com áreas livres em abundância geralmente pagam menos (e.g., *tipping fee* no

¹⁸ Plantas de combustão, no entanto, podem manter parte de sua operação, caso tenham linhas múltiplas de tratamento do lixo.

¹⁹ Referência: http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/publicacoes/usinas_lixo_energia_no_brasill.pdf, acesso no dia 13 de Junho de 2013.

Brasil varia de \$15 a \$20 USD por tonelada de resíduos sólidos enviados para tratamento²⁰).

Além destes fatores apresentados, também influenciam a economia do empreendimento a Taxa de Empréstimo e o Custo Capital. A viabilidade dos empreendimentos depende não somente de questões financeiras, mas também de questões operativas – e de questões externas à usina, como competitividade do mercado, incentivos governamentais, entre outros. É essencial que se haja uma análise de viabilidade econômica do empreendimento, que leve em consideração diferentes cenários macroeconômicos, antes de qualquer tomada decisão relativa à realização do empreendimento.

5.2 Recuperação energética de resíduos sólidos para produção de energia elétrica no Brasil

Muitas são as barreiras encontradas no Brasil para a implantação de usinas *Waste-to-Energy* – como o elevado investimento necessário, o custo de geração elevado, e a falta de políticas públicas de incentivo às tecnologias para geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos urbanos²¹.

A situação, no Brasil, da geração de energia a partir do lixo é descrita na referência citada na Nota de Rodapé nº 19, onde é dito que o país discute há muitos anos sobre a implantação de tecnologias de reaproveitamento energético de resíduos sólidos, mas sem resultados práticos, já que não há usinas comerciais em construção (e nem construídas). Cita-se como barreira à implantação de usinas WTE no país:

- Valor pago pelo tratamento da tonelada de lixo é baixo no Brasil - de \$15 a \$20 USD por tonelada.
- O lixo no Brasil possui, em geral, Poder Calorífico Inferior (PCI) baixo - abaixo de 8 MJ por quilograma de resíduos sólidos urbanos;
- Usinas WTE são relativamente desconhecidas;
- Investimento inicial elevado;

Em contrapartida, é citado, como possibilidade positiva, que cidades grandes, como Rio de Janeiro, São Paulo e outras, estão tendo problemas para achar lugares para construir

²⁰ Referência: <http://www.waste-management-world.com/articles/print/volume-12/issue-3/features/wte-the-redeemer-of-brazils-waste-legacy.html>, acesso no dia 13 de Junho de 2013.

²¹ Referência: http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/apresentacoes/cetesb2011_suani.pdf; acesso no dia 15 de Junho de 2013.

novos aterros, o que significa que, se estes forem implantados em regiões distantes dos centros (pois ao se afastar-se do centro se encontraria espaço livre), os custos (e.g., de transporte) aumentarão – criando oportunidades a outras formas de abordagem.

Fora das cidades grandes, oportunidades poderiam surgir para a digestão anaeróbica de resíduos agropastoris – em áreas rurais. (No caso das aplicações em áreas rurais, a geração de energia seria de pequena escala.)

No entanto, há limitações à implantação de digestão anaeróbica para geração de energia elétrica: as dificuldades do uso de tecnologias para a transformação do biogás produzido em aterro, zonas rurais e estações de tratamento de esgoto, estão ligadas ao fato de que muitos equipamentos não são fabricados no Brasil. Motores, voltados especificamente ao uso do biogás, não são fabricados no Brasil (há a fabricação de motores comuns, que seriam, em seguida, adaptados para o uso do biogás); turbinas a gás são importadas; e a limpeza do biogás precisa ser aperfeiçoada no país. Além destes fatores, falta, no país, mão de obra especializada para operação e manutenção de sistemas de médio e grande porte. Adicionalmente, há falta de investimentos na área, o que é reflexo da falta de mercado para o aproveitamento energético do biogás.²²

A utilização das tecnologias para aproveitamento energético dos resíduos sólidos, no Brasil, é ainda muito incipiente, principalmente quando se refere à Combustão e Gaseificação (esta segunda tecnologia é uma opção incipiente a nível mundial). A digestão anaeróbica é conhecida no país, no entanto a geração de energia a partir do biogás produzido ainda encontra barreiras (citadas no parágrafo anterior).

Recentemente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) propôs um Projeto Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento voltado ao reaproveitamento do biogás produzido por resíduos e efluentes líquidos (Projeto Estratégico de P&D nº 14/2012 da ANEEL) – o que indica interesse do governo em iniciar medidas que desenvolvam as tecnologias de biogás no país. Há, no Brasil, incentivo às usinas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos e biogás, que podem se isentar do pagamento das taxas de transmissão e de distribuição (TUST e TUSD, respectivamente): empreendimentos com potência abaixo de 30 MW, que utilizem mais de 50% de resíduos sólidos urbanos e/ou de biogás (provindo de aterro sanitário ou de biodigestores de resíduos vegetais ou animais), podem receber 100% de

²² Referências:

http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/apresentacoes/seminariobrasilalemanha_suanicoelho.pdf e

http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/apresentacoes/cetesb2011_suani.pdf; acesso no dia 16/06/2013.

desconto nas tarifas citadas – assim como aqueles que utilizam lodo de estações de tratamento de esgoto.²³ Em modo similar, há o incentivo da contratação de energias renováveis no mercado livre (Ambiente de Contratação Livre, ACL), dentre as quais a biomassa (Resolução Normativa ANEEL nº 247).

Ainda recentemente, foi declarado pelo presidente da Empresa de Pesquisa Energética, Maurício Tomalsquim, que as fontes Solar e de Lixo serão incluídas no próximo leilão de energia A-3.²⁴ A princípio, este seria um teste de “mapeamento” das ofertas (preços propostos e número de interessados), uma vez que o mais provável é que estas fontes não sejam competitivas com as demais. (No entanto, não houve esclarecimento sobre quais seriam as fontes disputando o certame.) Estes fatores indicam tendências relacionadas ao setor elétrico e ao aproveitamento energético de resíduos sólidos.

Por fim, há a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que fará com que os municípios busquem soluções adequadas para o lixo, criando, possivelmente, oportunidades para o aproveitamento energético de resíduos. Neste contexto, o estado de Minas Gerais tem estudado a proposta de uma Parceria Público-Privada para o transbordo, tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Esta proposta incluiria, como obrigação da concessionária, a adoção da recuperação energética do lixo.²⁵

²³ Resolução Normativa N°77, 2004 (ANEEL) e Resolução Normativa N°271, 2007 (ANEEL).

²⁴ http://www.jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=13939&id_secao=2; acessado em 6 de Julho de 2013.

²⁵ Referência:

http://www.metropolitana.mg.gov.br/system/attachments/122/original/Apresentacao_Audi%C3%Aancia_P%C3%BAblica_Contrato_de_Programa.pdf?1362418554; Acesso em 18 de Agosto de 2013, 18:13.

6 Conclusão

As tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos são ferramentas importantes para estratégia de gerenciamento do lixo. Elas evitam a expansão de aterros e a poluição associada à disposição final de resíduos, além de gerarem energia. O uso destas tecnologias possibilitaria, portanto, solução para dois problemas hoje existentes: o aumento da produção de lixo e a crescente demanda energética.

O trabalho apresentou três tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos – a combustão convencional, a digestão anaeróbica e a gaseificação. O trabalho atentou para o funcionamento destas tecnologias e para os fatores que afetam sua operação, eficiência e viabilidade econômica. Antes da descrição das tecnologias de aproveitamento energético, discorreu-se sobre as práticas de gerenciamento de resíduos sólidos, apontando seus benefícios e questões associadas.

O quarto capítulo apresentou dois casos da geração de energia a partir do lixo – um na China (tecnologia de combustão convencional) e outro na Espanha (digestão anaeróbica). A tecnologia utilizada no primeiro empreendimento provém de empresas de renome internacional, e a operação é feita por uma empresa experiente no setor; além disso, as emissões da planta atendem normas europeias, provando-se uma solução positiva ao lixo. O empreendimento de digestão anaeróbica compreende um exemplo de sucesso para esta tecnologia, que foi empregada juntamente à compostagem nos chamados *ecoparks*.

Ao final do quarto capítulo, foi feita uma avaliação energética de três práticas de gerenciamento (reuso, digestão anaeróbica e combustão convencional), levando-se em consideração o lixo produzido no Brasil. Analisou-se o potencial de cada prática, tendo em vista a fração de lixo cabível a cada uma. Ficou evidenciado que o reuso é a prática diletta quando se trata de materiais reutilizáveis. Além de conservar mais energia do que a combustão dos materiais geraria, o reuso impede emissões e custos em todo o ciclo de vida da produção de um produto a partir de matéria-prima virgem, e do manejo do lixo. A reciclagem, de modo similar, também é preferível, quando se considera o lixo reciclável. É importante notar, no entanto, que estas práticas não lidam com todas as frações do lixo, de modo que é indispensável buscar soluções adequadas a seu gerenciamento e aproveitamento. A digestão anaeróbica é a opção para a fração orgânica do lixo, e a combustão convencional seria a opção ao lixo que sobrou após a triagem de recicláveis.

No capítulo 5, a questão da viabilidade econômica dos empreendimentos Waste-to-Energy foi abordada; na ocasião, foram indicados os fatores que a afetam. Ainda neste

capítulo, foi traçado o cenário atual das tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos no Brasil, indicando possíveis tendências.

Este trabalho atingiu os objetivos propostos – com a apresentação das questões que envolvem o gerenciamento do lixo, com a descrição das tecnologias de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos que se destacam no cenário mundial, com a indicação dos fatores operacionais que afetam sua viabilidade técnica e econômica e com a análise energética do Reuso, Combustão à Queima Direta e Digestão Anaeróbica.

A principal dificuldade encontrada ao decorrer do trabalho foi obter dados específicos de usinas em operação (e.g., decomposição da receita anual de uma usina). Geralmente as finanças de empreendimentos pontuais não são abertas, o que não permitiu uma análise da composição dos custos de usinas. Em contrapartida, são diversas as referências sobre *Waste-to-Energy*, o que facilitou, em parte, a pesquisa. A profusão de referências provavelmente se deve ao fato de que este tipo de solução para o lixo, e para geração de energia, tem ganhado cada vez mais visibilidade por sua importância.

Como proposta de estudos futuros, pode-se destacar: (i) avaliação do potencial de adoção das tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos mediante cenários da Política Nacional de Resíduos Sólidos; (ii) quantificação dos benefícios das práticas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos para casos específicos (selecionados).

Referente às tecnologias que foram objeto deste trabalho (mas não limitado a elas), pode-se concluir:

A composição dos resíduos sólidos urbanos é de grande importância para a viabilidade técnica e econômica das usinas *Waste-to-Energy*. O conhecimento da composição do lixo permitiria, portanto, a escolha do tratamento adequado a cada caso, auxiliando o processo pré-decisório. Tecnologias que utilizam o lixo como combustível apresentam desafios únicos devido à heterogeneidade do insumo (no caso da combustão, por exemplo, taxas aceleradas de corrosão).

A combustão à queima direta de resíduos sólidos pós-reciclagem representa a opção mais madura a nível mundial, provada técnica e comercialmente; ela é a mais simples e barata opção de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos. Também é madura a digestão anaeróbica, que trata a fração orgânica do lixo. O desempenho desta tecnologia está diretamente relacionado à composição do insumo que entra no digestor, às condições criadas dentro do digestor e à eficiência do dispositivo conversor.

Diferentemente das outras tecnologias, a gaseificação (tratamento térmico avançado do lixo) ainda não está comercialmente estabelecida a nível mundial, e precisa do sucesso de demonstrações em escala comercial para confirmar a habilidade de tratar grandes quantidades de lixo de forma confiável, durante longo período de tempo.

Custos altos ainda são empecilhos à adoção das tecnologias de recuperação de energia dos resíduos. A viabilidade econômica depende de diversos fatores, como incentivo de governos, receita recebida pelo lixo tratado, etc., fazendo-a possível somente em lugares específicos, que possuam um ambiente favorável à adoção daquelas tecnologias.

As tecnologias apresentadas representam oportunidades de melhora das práticas de gerenciamento de resíduos, de aumento da segurança energética do país e de atendimento de metas de gases do efeito estufa. Progresso técnico é necessário em diversas áreas para que haja a redução de custos e riscos nas tecnologias de aproveitamento energético do lixo. Neste sentido, inovações que reduzam custos de capital, e de operação e manutenção, são essenciais. O entendimento e controle dos parâmetros operacionais e conjunturais que afetam o desempenho, viabilidades técnica e econômica também são imprescindíveis para a inserção das tecnologias numa região.

No Brasil, elevados custos capitais e falta de incentivos impedem a adoção das tecnologias – mas a importância do gerenciamento adequado dos resíduos, a criação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, e iniciativas recentes (e.g., P&D Estratégico), podem criar oportunidades – ou, ao menos, mostram tendências futuras.

O gerenciamento ótimo dos resíduos ocorrerá quando as diversas práticas estiverem integradas. Neste caso, a conservação de energia – obtida da reciclagem e reuso de materiais – seria bem explorada, e somente resíduos não recicláveis e não reutilizáveis seriam enviados a usinas de recuperação energética do lixo. Como consequência, haveria o aumento do valor energético dos resíduos sólidos enviados aos processos de conversão energética.

Por fim, o problema do lixo tem sua gênese nos padrões de consumo da sociedade, nas suas escolhas, e no modo como se relaciona com as coisas. O gerenciamento ótimo e a conscientização da sociedade precisam ser “empregados” para que este problema comece a ser confrontado. A adoção das práticas de gerenciamento dos resíduos sólidos é fundamental para o desenvolvimento sustentável da sociedade.

Referências Bibliográficas

Abrelpe [Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais], 2011, *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2011*.

Albina, D. O., Themelis, N. J., 2003, “Emissions from Waste-to-Energy: A Comparison with Coal-fired Power Plants”. *2003 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Washington, D.C., November 16-21, 2003.

Arena, U., 2012, “Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review”. *Waste Management*, v.32, pp 625-639, 2012.

Arsova, L., 2010, *Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product*, Tese de M.Sc., Columbia University, 2010.

Banks, C., 2009, “Optimising Anaerobic Digestion”. *Evaluating the Potential for Anaerobic Digestion to provide Energy and Soil amendment*, University of Reading, 25th March 2009.

Cardoso, B. M., 2012, *Uso da Biomassa como Alternativa Energética*, Projeto de Graduação, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

Carvalho, G. J., 1999, *Compostagem de Resíduos Agrícolas*, UFLA, 1999 (Circular Técnica). Disponível em < <http://www.editora.ufla.br/upload/boletim/extensao-tmp/boletim-extensao-017.pdf>>. Acesso em 18 de Agosto de 2013, 23:33.

CH2MHILL, 2009, *Waste-to-Energy Review of Alternatives*. CH2M HILL Canada Limited, May 2009.

Clarke, M. J., 2002, “Introduction to Municipal Solid Waste Incineration”. *Air and Waste Management Association Annual Meeting*, Baltimore, MD, June 23-27, 2002.

De Baere, L., Mattheeuws, B., n.d., “Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe – Status, Experience and Prospects”. Disponível em <

<http://www.ows.be/wp-content/uploads/2013/02/Anaerobic-digestion-of-the-organic-fraction-of-MSW-in-Europe.pdf>>. Acesso em 19 de Agosto de 2013, 01:29.

DEFRA [Department for Environment Food and Rural Affairs], 2011, Anaerobic Digestion Strategy and Action Plan.

Dong, Y., 2011, *Development of Waste-to-Energy in China; and Case Study of the Guangzhou Likeng WTE plant*, Tese M.Sc., Columbia University, 2011.

EC [European Commission], 2006, *Integrated Pollution Prevention and Control: Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*, August 2006.

EPA [United States Environmental Protection Agency], 2011, "Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2010". Disponível em <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/pubs/MSWcharacterization_508_053113_fs.pdf>. Acesso em 18 de Agosto de 2013, 23:39.

EPA [United States Environmental Protection Agency], 2012, "Resource Conservation and Recovery: A Guide to Developing and Implementing Greenhouse Gas Reduction Programs". Disponível em <<http://www.epa.gov/statelocalclimate/documents/pdf/ResourceConservGuide.pdf>>. Acesso em 18 de Agosto de 2013, 23:26.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética], 2008 *Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS*. Rio de Janeiro: EPE, 2008. Disponível em <http://www.epe.gov.br/SerieEstudosDemanda/20081208_1.pdf>. Acesso em: 12 de Agosto de 2013, 23:32.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética], 2012, Plano Decenal de Expansão de Energia 2021, Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2012.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética], 2013, Balço Energético Nacional 2013: Ano base 2012. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2013.

EPRI [Electric Power Research Institute], 2011, “Waste-to-Energy Technology: Opportunities for Expanding Renewable Generation & Reducing Carbon Emissions”.

EU [European Union], 2010, Being wise with waste: the EU's approach to waste management, Luxembourg: Publications Office of the European Union. Disponível em < <http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/WASTE%20BROCHURE.pdf>>. Acesso em: 18 de Agosto de 2013, 22:47.

Faria, F. S., 2002, *Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos*, Tese de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

Frate, S., 2011, “Tecnologias disponíveis e emergentes para o tratamento de resíduos sólidos visando a geração de energia”. *3º Seminário de Bioenergia: Desafios e Oportunidades de Negócios*, São Paulo, 24 de Novembro de 2011. Disponível em < <http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/3seminbioenergia/sergiofrate.pdf>>. Acesso em 18 de Agosto de 2013, 23:49.

IEA [International Energy Agency], 2003, “Municipal Solid Waste and its Role in Sustainability: A Position Paper Prepared by IEA Bioenergy”. Disponível em < <http://www.ieabioenergy.com/LibItem.aspx?id=165>>. Acesso em 19 de Agosto de 2013, 00:02.

IMECHE [Institution of Mechanical Engineers], n.d., “Energy from Waste: A Wasted Opportunity?”. Disponível em < <http://www.imeche.org/knowledge/themes/energy/energy-supply/renewable-energy/energy-from-waste>>. Acesso em 19 de Agosto de 2013, 00:32.

IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change], 2006, “Waste Generation, Composition and Management Data”. In: IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Vol.5, chapter 2, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories

Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Disponível em: < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>, Volume 5. Acesso em 14 de Agosto de 2013, 23:27.

Henriques, R. M., 2004, *Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

Hershfield, M., 2011, *Waste to Energy Business Case Analysis (FINAL) – Technical Report*, 6 de Setembro de 2011. Disponível em < http://yukonenergy.ca/downloads/db/1073_WTE%20Technical%20Report%20%20Final%20Sept%206_11.pdf>. Acesso em 19 de Agosto de 2013, 00:07.

Madsen, O. H., 2009, “New Furnace Concept Improving the Electrical Efficiency in Waste Fired Power Plants”. *PowerGen Europe 2009*. Disponível em < http://www.volund.dk/Waste_to_Energy/Self_study>. Acessado em 19 de Agosto de 2013, 00:20.

Maier, S., 2011, *Model for Economic Feasibility of Municipal Solid Waste Treatment Methods*, Tese de M.Sc., PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.

Manders, J., 2009, “The Renewable Energy Contribution from Waste across Europe”. *ISWA Dakofa Conference*, 3 de Dezembro de 2009. Disponível em < http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Renew_Energy_Europe_JM_7.pdf>. Acesso em 18 de Agosto de 2013, 23:46.

Marreco, J. M., Júnior, A. P., Tavares, M. E., 2006, “Perspectivas para a geração termelétrica a carvão”. *Revista Brasileira de Energia*, v. 12, n. 2.

Mattheeuws, B., 2012, “State of the Art of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste in Europe”. *DAKOFA Conference 2012*, February 29th, Copenhagen.

Morris, J., 2005, “Comparative LCAs for Curbside Recycling Versus Either Landfilling or Incineration with Energy Recovery”.

Nayono, S. E., 2009, *Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste for Energy Production*, Tese D.Eng, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe, 2009.

Oliveira, L. B., 2000, *Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos e Abatimento de Emissões de Gases do Efeito Estufa*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

Ostrem, K., 2004, *Greening Waste: Anaerobic Digestion for Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*, Tese de M.Sc., Columbia University, 2004.

Phong, N. T., 2012, *Greenhouse Gas Emissions from Composting and Anaerobic Digestion Plants*, Tese de D.Sc., Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, 2012.

PNRS, 2010, Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em 18 de Agosto de 2013, 23:25.

Psomopoulos, C. S., Bourka, A., Themelis, N. J., 2009, “Waste-to-Energy: A review of the status and benefits in USA”, *Waste Management*, v.29, pp 1718-1724.

PwC [PricewaterhouseCoopers], 2011, Guia de orientação para adequação dos Municípios à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS),

Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B. M, *et al*, 2008, “Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste”, *California Integrated Waste Management Board*, March 2008.

Schalch, V., Leite, W. C. A., Júnior, J. L. F., et al., 2002, *Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos*, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2002.

Schübeler, 1996, *Conceptual Framework for Municipal Solid Waste Management in Low-Income Countries*. Working Paper N°9, Swiss Centre for Development Cooperation in

Technology and Management, 1996. Disponível em http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/CWG%20folder/conceptualframework.pdf. Acesso em 14 de Agosto de 2013, 22:46.

Stantec, 2011, *Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices – Final Report*, Março de 2011.

Tatarniuk, C., 2007, *The Feasibility of Waste-to-Energy in Saskatchewan Based on Waste Composition and Quantity*, Tese de M.Sc., University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canadá, 2007.

Themelis, N. J., 2008, “Developments in Thermal Treatment Technologies”. *16th Annual North American Waste-to-Energy Conference*, May 19 – 21, 2008, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

Themelis, N. J., Reshadi, S., 2009, “Potential for Reducing the Capital Costs of WTE Facilities”. *Proceedings of the 17th Annual North American Waste-to-Energy Conference*, Chantilly, Virginia, USA, May 18-20, 2009.

UN DESA [United Nations Department of Economic and Social Affairs], 2010, “Trends in Solid Waste Management”. In: *International Consultative Meeting on Expanding Waste Management Services in Developing Countries*, Tokyo, Japan, 18- 19 March 2010.

Verma, S., 2002, *Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes*, Tese M.Sc, Columbia University, 2002.

VØlund, 2012, 21’ Century Advanced Concept for Waste-Fired Power Plants. 4 ed. Babcock & Wilcox VØlund A/S.