

ESTUDOS ASSOCIADOS AO PLANO DECENAL DE ENERGIA PDE 2008/2017

OFERTA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS

*Avaliação do potencial teórico de utilização de
resíduos sólidos urbanos no horizonte decenal*



Empresa de Pesquisa Energética

**Ministério de
Minas e Energia**





GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MME/SPE

Ministério de Minas e Energia

Ministro (interino)
Nelson José Hubner Moreira

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Márcio Pereira Zimmermann

Diretor do Departamento de Planejamento Energético

Iran de Oliveira Pinto

ESTUDOS ASSOCIADOS AO PLANO DECENTAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA

PDE 2008/2017

OFERTA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS

Avaliação do potencial teórico de utilização de resíduos sólidos urbanos no horizonte decenal



Empresa de Pesquisa Energética

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

Presidente

Maurício Tiomno Tolmasquim

Diretor de Estudos Econômicos e Energéticos

Amílcar Guerreiro

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

José Carlos de Miranda Farias

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Maurício Tiomno Tolmasquim (interino)

Diretor de Gestão Corporativa

Ibanês César Cássel

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

Sede

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

Escritório Central

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

Coordenação Geral
Maurício Tiomno Tolmasquim

Coordenação Executiva
Gelson Baptista Serva

Equipe Técnica
Angela Oliveira da Costa
Luciano Basto Oliveira

Nº EPE-DPG-RE-008/2007-r0
Data: 31 de outubro de 2007

IDENTIFICAÇÃO CONTRATUAL

epe Empresa de Pesquisa Energética	<i>Contrato/Aditivo</i> MME-002/2007	<i>Data de assinatura do contrato/Aditivo</i> out.2007
<i>Área de Estudo</i> A	ESTUDOS ASSOCIADOS AO PLANO DECENAL DE ENERGIA	
<i>Estudo</i> A.2	OFERTA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS	
<i>Macro-atividade</i> A.2.9	Estudos sobre aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos	
<i>Ref. Interna (se aplicável)</i> A.2.9.1	<i>Avaliação do potencial teórico de utilização de resíduos sólidos urbanos no horizonte decenal.</i>	
<i>Revisões</i>	<i>Data de emissão</i>	<i>Descrição sucinta</i>
r0	31.10.2007	Emissão original

SUMÁRIO

SUMÁRIO EXECUTIVO	7
1. OBJETIVO.....	8
2. INTRODUÇÃO	8
3. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE RSU - TECNOLOGIAS E ABORDAGEM ECONÔMICA	9
3.1. Aterros sanitários e produção de biogás.....	10
3.2. Digestão Anaeróbica (Biogás, Adubo orgânico).....	14
3.3. Incineração (cogeração)	16
4. PROJEÇÃO DA QUANTIDADE E COMPOSIÇÃO DO LIXO BRASILEIRO	17
5. POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE RSU	21
5.1. Potencial de geração de eletricidade a partir de RSU	21
5.2. O Potencial da Conservação de Energia decorrente da Reciclagem	26
6. EXTERNALIDADES DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU NO HORIZONTE 2017	30
7. O POTENCIAL DE APROVEITAMENTO NO PERÍODO	34
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Custos do Sistema de Coleta (US \$ 1994).	14
Tabela 2 – Composição Típica do Biogás	14
Tabela 3 – Crescimento da População e Taxa de Crescimento Vegetativo	18
Tabela 4 – Produção Per Capita de lixo e taxa de incremento anual	18
Tabela 5 – Participações dos Recicláveis e taxa de incremento anual	19
Tabela 6 – Estimativa da Produção de lixo e Composição até 2017	19
Tabela 7 – Projeção da Emissão de Metano decorrente da decomposição de lixo caso fosse totalmente aterrado desde 2007	20
Tabela 8 – Potencial de geração elétrica através da recuperação de gás de lixo	22
Tabela 9 – Potencial de Geração Elétrica com a tecnologia de DAA	23
Tabela 10 – Projeção de Lixo para as Tecnologias de Incineração e CCO	24
Tabela 11 – Potencial de geração elétrica a partir da Incineração	24
Tabela 12 – Potencial de geração elétrica do Ciclo Combinado Otimizado	25
Tabela 13 – Potencial de Conservação de Energia Elétrica através da Reciclagem de Embalagens	26
Tabela 14 – Potencial de energia conservável por tonelada de lixo	27
Tabela 15 – Potenciais de Conservação de Energia Elétrica da Reciclagem de Embalagens para os casos da implantação da Coleta Seletiva - considerando aproveitamento de todos os recicláveis	28
Tabela 16 – Potenciais da Conservação de Energia Elétrica da Reciclagem de Embalagens para os casos das tecnologias de Incineração e CCO	29
Tabela 17 – Fatores de emissão de dióxido de carbono na geração elétrica por submercado	31
Tabela 18 – Potencial de Mitigação de Gases do Efeito Estufa decorrentes do Aproveitamento Energético de Lixo no Brasil até 2017 (t CO₂ eq/a)	32
Tabela 19 – Potencial de Aproveitamento Energético do Lixo Brasileiro até 2017 (MWh/ano)	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Destinação dos Resíduos Sólidos	10
Figura 2 – Rotas para Utilização do GDL.....	13
Figura 3 – Exemplos de Unidades de Processo Comumente Utilizadas com Digestores Anaeróbicos de Resíduos Sólidos Urbanos.....	15
Figura 4 – Potencial de produção de lixo (Mt) e de Oferta de Eletricidade por tecnologia (TWh), considerando a Conservação decorrente da Reciclagem.....	35

SUMÁRIO EXECUTIVO

Este estudo tem como objetivo subsidiar o MME em políticas relacionadas ao aproveitamento do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos como possibilidade de geração para atender à expansão no horizonte decenal, de modo a garantir o equilíbrio entre demanda e oferta de energia.

A opção de geração elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos já apresenta alternativas tecnológicas maduras, vantagens ambientais e sociais, além de economicidade no horizonte considerado. O presente estudo se propõe a identificar e analisar o potencial energético deste aproveitamento no país.

Para tanto, o estudo descreve, sucintamente, as tecnologias que permitem o aproveitamento destes resíduos, com seus parâmetros técnicos e requisitos operacionais. Além disso, apresenta as projeções da disponibilidade desta fonte no país no período em análise, contemplando estimativas sobre a evolução do volume e composição do lixo, funções do tamanho da população, de seu poder aquisitivo e de aspectos culturais. Com base nas tecnologias existentes e nas emergentes de maior potencial para o caso brasileiro, o trabalho elabora a projeção do potencial de aproveitamento energético de lixo no Brasil para o horizonte decenal.

O estudo apresenta, ainda, cenários de mitigação de emissões de gases de efeito estufa decorrentes do aproveitamento energético de lixo no Brasil até 2017, de acordo com as tecnologias apresentadas.

1. Objetivo

O objetivo deste estudo é estimar o potencial energético da utilização de resíduos sólidos urbanos como possibilidade de geração, contribuindo para a expansão de oferta de energia no horizonte 2008-2017.

2. Introdução

Para atender à necessidade de expansão de potência instalada no longo prazo estima-se, dependendo do cenário, valores anuais em torno de 3.000 MW médios (PDE 2016). Em paralelo à forte perspectiva de crescimento de demanda energética nos próximos anos, os estudos do PDE 2016 já salientaram o aumento da geração termelétrica na Matriz Elétrica Nacional. Esta tendência, preliminarmente, vem a ser confirmada no âmbito do Plano Nacional de Energia 2030. Os cenários econômicos energéticos do PNE2030 também destacam o aspecto ambiental como fator crítico a ser considerado no horizonte 2030. Neste contexto, as fontes alternativas de energia, em especial aquelas ambientalmente sadias, apresentam-se com maior importância.

É neste contexto que se insere esta análise sobre o aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos (doravante denominados simplesmente RSU) para fins energéticos.

Embora reconhecendo as vantagens sócio-ambientais decorrentes do aproveitamento dos RSU, o foco desta análise trata exclusivamente dos aspectos relacionados ao aproveitamento energético.

Como ficará claro ao longo do texto, a opção a partir de resíduos sólidos urbanos já apresenta alternativas tecnológicas maduras além de vantagens ambientais e sociais e economicidade no horizonte considerado. À luz destas reflexões o presente trabalho se propõe a analisar o potencial e as perspectivas de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.

3. Aproveitamento energético a partir de RSU - Tecnologias e Abordagem econômica

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

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

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

1. Quanto à sua origem:

resíduos urbanos – provenientes de residências, atividades comerciais, varrição de ruas, podas de árvores e similares;

resíduos industriais – gerados pelos processos de transformação;

resíduos agrícolas – decorrentes da atividade produtiva do setor primário;

2. Quanto às suas características físicas:

materiais inertes – vidros, metais, terras e cinzas e restos inertes;

materiais combustíveis – papéis, cartões, plásticos, madeira, gomas, couro, alimentos e outros.

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

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

As diversas rotas existentes para destinação e disposição final dos resíduos sólidos urbanos podem ser hierarquizadas. Quando esta hierarquia está baseada no critério de resíduo final mínimo, é conhecida como Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (SIGRS).

O SIGRS prevê que os resíduos sólidos oriundos dos setores industrial, comercial e residencial, depois de recolhidos, passem por um sistema de gerenciamento que identifica sua destinação, em função de algumas características. Esta destinação pode ser a reciclagem, a compostagem, a geração de energia elétrica (incineração, gaseificação direta ou através do biogás (Gás de Lixo - GDL) de um aterro energético) e/ou a conversão em combustíveis (sólidos, líquidos e gasosos) ou outros produtos comerciais como fertilizantes, catalisadores, etc. ou ainda, para um aterro sanitário como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Destinação dos Resíduos Sólidos

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

Fonte: USEPA (1998).

Para o SIGRS, estas rotas devem ser priorizadas na seguinte ordem: redução da geração de lixo na fonte, reutilização do material produzido, reciclagem, recuperação de energia e aterro sanitário (SERÔA DA MOTTA e CHERMONT, 1996, apud OLIVEIRA, 2004). As tecnologias existentes para a rota de aproveitamento energético do RSU são descritas a seguir.

3.1. Aterros sanitários e produção de biogás

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

transformam em substâncias mais estáveis, como dióxido de carbono (CO₂), água, gás metano (CH₄), gás sulfídrico (H₂S), mercaptanas e outros componentes minerais.

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

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

- Fase aeróbia – produz o gás CO₂. Apresenta alto conteúdo de N₂, que sofre um declínio nas passagens para as 2^a e 3^a fases.
- Esgotamento de O₂ - resulta em um ambiente anaeróbio com grandes quantidades de CO₂ e um pouco de H₂ produzido.
- Fase anaeróbia – começa a produção de CH₄, com uma redução na quantidade de CO₂ produzido.
- Produção quase estável de CH₄, CO₂ e N₂.

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

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

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

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

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

O uso mais simples e normalmente de maior custo-efetividade do GDL é como um combustível de médio poder calorífico para caldeiras ou para uso em processos industriais - operações de secagem, operações em fornos, produção de cimento e asfalto. Nestes projetos, o gás é trans-

portado por gasoduto diretamente para um consumidor próximo para ser usado em equipamentos de combustão novos ou já existentes, em substituição, ou como suplemento, do combustível tradicionalmente usado. Torna-se necessária a remoção de condensado e um tratamento de filtração, realizando uma eventual modificação no equipamento de combustão existente.

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

O biogás coletado pode também ser utilizado para a geração de eletricidade, através da implantação de uma usina termelétrica. Existe ainda a possibilidade de co-geração de eletricidade e energia térmica a partir do GDL como alternativa mais eficiente em termos energéticos. A energia térmica pode ser usada localmente para aquecimento, refrigeração, para outras necessidades de processo, ou ainda transportado por tubo para uma indústria ou comércio próximo, obtendo um segundo rendimento para o projeto.

O biogás também pode ser tratado e utilizado como combustível em veículos (GNV). Esta opção cresceu de importância nos últimos anos pelo aumento expressivo da frota movida a GNV, especialmente nos táxis¹.

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

De um modo geral o GDL tem as seguintes vantagens:

- Redução dos gases de efeito estufa;
- Fonte de receita adicional para aterros existentes (energia + créditos de carbono);
- Permite utilização para geração de energia ou como combustível;
- Evitar a possibilidade (remota) de ocorrência de auto-ignição e/ou explosão pelas altas concentrações de metano na atmosfera.

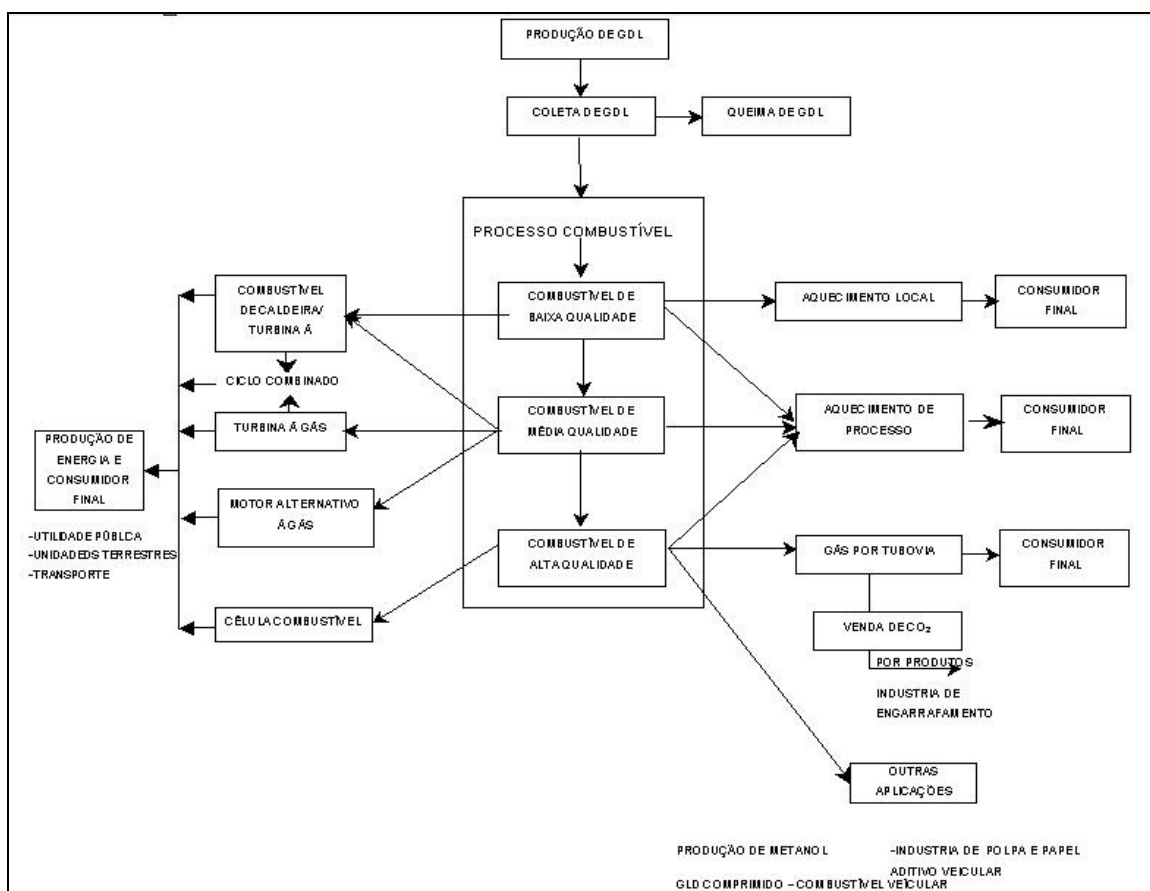
¹ Na década de 1980, a Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB) produziu GNV a partir de tratamento do biogás extraído do antigo aterro do Caju via lavagem, desenvolvido em parceria com a Companhia Estadual de Gás (CEG) e com financiamento da FINEP, o qual foi utilizado para abastecer parte da sua frota. O sistema permitia aumento do teor de metano de 50% para 86%, o que atende à resolução da ANP para o gás natural.

Como desvantagens são citadas:

- A ineficiência no processo de recuperação do gás em aterros cuja construção não foi projetada para este fim, que permite um aproveitamento máximo de aproximadamente 50% do total de GDL produzido;
- Alto custo da planta de aproveitamento do gás, decorrente do tratamento necessário.

A Figura 2 ilustra as possíveis rotas de utilização do GDL.

Figura 2 – Rotas para Utilização do GDL.



Fonte: Willumsen (2001).

O custo total de um sistema de coleta variará largamente dependendo de um número de fatores específicos do local. Se o aterro sanitário for profundo, os custos de coleta tenderão a ser altos pelo aumento no custo dos poços. A Tabela 1 mostra os custos de um sistema de coleta com *flare* para aterros sanitários de 1, 5, e 10 milhões de toneladas de lixo no local (Muylaert et alli, 2000).

Tabela 1 – Custos do Sistema de Coleta (US \$ 1994).

Tamanho do lixo do aterro sanitário	Fluxo estimado de gás (mcf/dia)	Custos de capital (1000 US\$)	Custos anual de O&M (1000 US\$)
1 milhão de toneladas métricas	642	628	89
5 milhões de toneladas métricas	2.988	2.088	152
10 milhões de toneladas métricas	5.266	3.599	218

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

3.2. Digestão Anaeróbica (Biogás, Adubo orgânico)

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

Normalmente 100 – 200 m³ de biogás são produzidos por tonelada de matéria orgânica digerida. A composição típica do biogás é dada na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Composição Típica do Biogás

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

Fonte: Verma (2002).

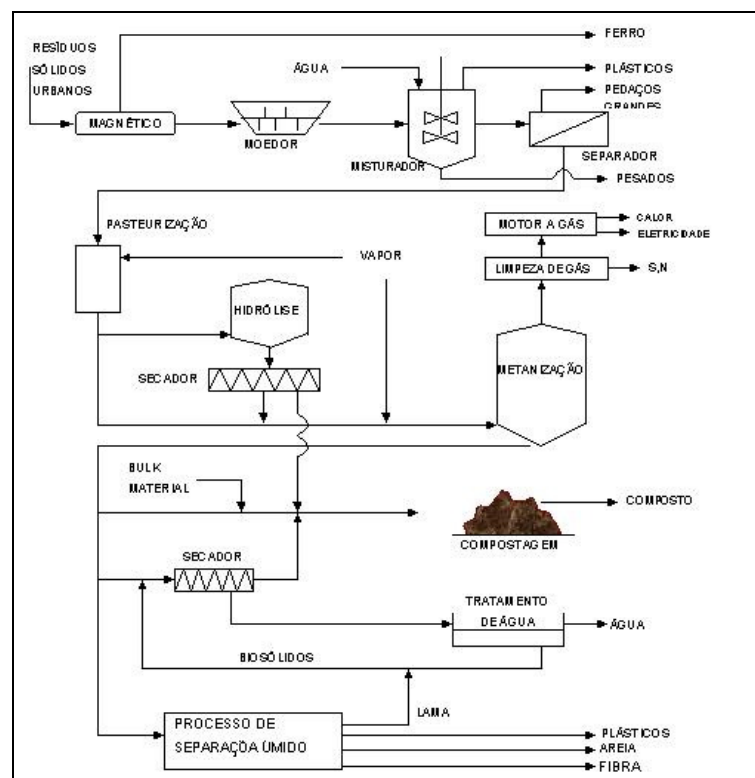
A digestão anaeróbica é a consequência de uma série de interações metabólicas com a atuação de diversos grupos de microorganismos. A produção de metano ocorre em um espectro amplo de temperaturas, mas aumenta significativamente em duas faixas: mesofílica - entre 25-40°C, e termofílica - entre 50-65°C.

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

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

A Figura 3, a seguir, mostra um esquema simplificado de um processo de digestão anaeróbica.

Figura 3 – Exemplos de Unidades de Processo Comumente Utilizadas com Digestores Anaeróbicos de Resíduos Sólidos Urbanos.



Fonte: Verstraete (2002)

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

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

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

3.3. Incineração (cogeração)

Em inglês a sigla WTE significa "*waste-to-energy*" ou energia dos resíduos. Podemos extrair energia, combustíveis ou materiais valiosos do lixo por diversos processos incluindo: incineração, gaseificação, conversão térmica (gaseificação, pirólise, plasma), biológica (digestão anaeróbica) ou química (hidrólise ácida, craqueamento catalítico).

As usinas de incineração dos RSU, que serão referenciadas simplesmente usinas WTE, podem produzir energia muito mais limpa do que outras termelétricas. Os principais componentes de uma moderna usina convencional de incineração de RSU são: Poço de Armazenamento do Lixo, Grelha Móvel, Câmara de Combustão, Sistema de Descarga das Cinzas, Sistema de Geração de Vapor, Depurador de Gases, Filtros de Sacos, Ventilador, e Chaminé.

Usinas WTE trabalham na base da geração de energia elétrica. A maioria das usinas WTE utiliza a incineração dos RSU para produzir o vapor que, ou irá gerar energia elétrica, ou será usado diretamente em processos industriais (ou para aquecimento). Ainda não existem usinas de incineração de RSU com recuperação de energia (WTE) em escala comercial no Brasil.

4. Projeção da Quantidade e Composição do Lixo Brasileiro

Para elaborar a projeção da disponibilidade de RSU no país para o horizonte em análise, foram tomadas por base as seguintes premissas:

1. A produção per capita brasileira no ano 2006: a II Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE, em 2000, divulgou valores referentes à produção de lixo no país, à qual associou-se a população divulgada pelo Censo 2000, também do IBGE²;
2. Composição do lixo brasileiro, com base no Manual de Gerenciamento Integrado de Lixo, publicado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, em 1998: A composição inicial é 60% de fração orgânica, 5% de inertes e 30% de recicláveis (15% de papéis, 10% de plásticos, 3% de vidros e 2% de metais);
3. Produção per capita e composição norte-americanas: obtidas por pesquisa nacional realizada pelo *BioCycle, Journal of Composting & Organics Recycling*, em conjunto com o Centro de Engenharias da Terra da Universidade de Colúmbia, em Nova Iorque, denominado "*State of garbage in America*", de 2005;
4. Evolução da produção per capita brasileira: definiu-se como alvo potencial para 2030 o incremento da metade da diferença entre a Produção per capita brasileira no ano 2000, tomado como base para 2006, e a norte-americana no ano 2005, sobre o que foi calculada uma taxa de crescimento geométrica no decorrer do período. Isto decorre da expectativa de que haverá melhoria do poder aquisitivo da população brasileira;
5. Evolução na composição do lixo brasileiro: definiu-se, para os recicláveis, como meta para 2030 o incremento da metade da diferença entre a composição do lixo brasileiro no ano 2000, tomado como base para 2006, e do norte-americano em 2005, sobre o que foi calculada uma taxa de crescimento geométrica no decorrer do período. Foi mantido o percentual de 5% para inertes, o que levou o cálculo da participação da Fração Orgânica à diferença entre o todo (100%) e estas duas parcelas. Isto decorre da expectativa de que haverá alteração no padrão de consumo decorrente da melhoria do poder aquisitivo da população brasileira, o que permitirá o consumo de produtos manufaturados;

² Cabe ressaltar que o valor apresentado pelo IBGE na tabela é contestado no parágrafo imediatamente posterior, no qual afirma-se que o valor real do Resíduo Sólido Urbano é 70% daquele, dos quais 20% são entulho de obra e poda de árvore. Além disso, é importante realçar o equívoco do valor apontado para a produção de lixo do município do Mairiporã, apresentada pelo IBGE como 49.375 t/d, erro comentado pelo consultor técnico da pesquisa, o engenheiro José Henrique Penido Monteiro. Assim, o número inicial é de 36,5 milhões de toneladas anuais.

6. Dentre os recicláveis a proporção será mantida igual à de 2000, tomada como base para 2006;
7. Quanto ao Teor de umidade no lixo brasileiro, normalmente na faixa de 60%, supõe-se reduzindo até 40% em 2030, por conta do aumento na participação de embalagens na composição do lixo;
8. O Modelo de Produção de Biogás aprovado pelas Nações Unidas para projetos de créditos de carbono (*Multi-Phase Model*), considerando sempre as participações de matéria orgânica e de papéis de acordo com a variação estabelecida no item 4 anterior;
9. O potencial de aproveitamento do biogás foi sempre de 85%, pois a recuperação de parcela superior a esta, nos aterros, é considerada inviável;
10. O crescimento vegetativo da população foi considerado como 1,2% a.a, com base em dados do IBGE.
11. Consumo atual de eletricidade do país de 400 TWh/ano.

Tabela 3 – Crescimento da População e Taxa de Crescimento Vegetativo

População total (hab)	1980	1991	1996	2000	2006
	119.002.706	146.825.475	157.070.163	169.799.170	186.300.338
CRESCIMENTO VEGETATIVO (% a.a.)	1,77		1,13	1,57	1,33
		1,65		1,46	1,56
			1,71		1,50
				1,67	
					De 2006 a 2030 = 1,2

Fonte: IBGE

Tabela 4 – Produção Per Capita de lixo e taxa de incremento anual

2006	Produção Per Capita brasileira	0,54 kg/p-d
2006	Produção Per Capita norte-americana	1,50 kg/p-d
2030	Produção Per Capita brasileira	1,02 kg/p-d
Incremento anual		2,70 % a.a.

Fonte: Elaboração própria a partir de PNSB (2000) e OSTREM (2004)

Tabela 5 – Participações dos Recicláveis e taxa de incremento anual

2006	Participação de Recicláveis no Brasil	30 %
2006	Participação de Recicláveis nos EUA	65 %
2030	Participação de Recicláveis	50 %
Incremento anual		1,93 % a.a.

Fonte: Elaboração própria a partir de IPT (1998) e OSTREM (2004).

Tabela 6 – Estimativa da Produção de lixo e Composição até 2017

Ano	Produção de Lixo (Mt/a)	Percentual de Orgânico (%)	Percentual de Recicláveis (%)	Produção de Recicláveis (Mt/a)	Percentual de Papel no Lixo total (%)	Percentual de Plástico no Lixo total (%)	Percentual de Vidro no Lixo total (%)	Percentual de Metal no Lixo total (%)
2007	37,95	64,42	30,58	11,60	15,29	10,19	3,06	2,04
2008	39,44	63,83	31,17	12,29	15,59	10,39	3,12	2,08
2009	40,99	63,23	31,77	13,03	15,89	10,59	3,18	2,12
2010	42,61	62,61	32,39	13,80	16,19	10,80	3,24	2,16
2011	44,28	61,99	33,01	14,62	16,51	11,00	3,30	2,20
2012	46,03	61,35	33,65	15,49	16,83	11,22	3,37	2,24
2013	47,84	60,70	34,30	16,41	17,15	11,43	3,43	2,29
2014	49,72	60,03	34,97	17,39	17,48	11,66	3,50	2,33
2015	51,68	59,36	35,64	18,42	17,82	11,88	3,56	2,38
2016	53,71	58,67	36,33	19,51	18,17	12,11	3,63	2,42
2017	55,83	57,97	37,03	20,67	18,52	12,34	3,70	2,47

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 – Projeção da Emissão de Metano decorrente da decomposição de lixo caso fosse totalmente aterrado desde 2007.

Ano	Geração de metano bruto (tCH₄/a)	Recuperação de metano (85%) (tCH₄/a)
2007	660.528,58	561.449,29
2008	925.206,01	786.425,11
2009	1.157.273,32	983.682,32
2010	1.363.239,05	1.158.753,19
2011	1.548.463,43	1.316.193,92
2012	1.717.365,43	1.459.760,62
2013	1.873.592,78	1.592.553,86
2014	2.020.161,53	1.717.137,30
2015	2.159.570,74	1.835.635,13
2016	2.293.896,53	1.949.812,05
2017	2.424.869,38	2.061.138,97

Fonte: Elaboração própria a partir do MutiPhase Model (IPCC, 2006).

Como pode ser depreendido das tabelas anteriores, a projeção de produção de RSU entre 2008-2017 alcança no final do horizonte valores de 55 Mt/a de lixo, o que representa geração de metano (CH₄) da ordem de 18 Mt ao longo dos 10 anos.

5. Potencial de aproveitamento energético a partir de RSU

A partir das tecnologias anteriormente mencionadas, apresenta-se o potencial direto de aproveitamento energético dos RSU, seguido de uma análise incluindo o potencial referente à conservação de energia oriunda da reciclagem e tratamento dos RSU.

5.1. Potencial de geração de eletricidade a partir de RSU

Utilizando as projeções de produção de RSU e a disponibilidade de metano para geração elétrica³, conforme apresentado no item (4), obtém-se o **potencial de geração elétrica através da recuperação de gás de lixo** mostrado na Tabela 8.

Cabe ressaltar que o potencial apresentado pode variar por não estar sendo considerado o lixo já disposto nos aterros existentes, uma vez que a incerteza sobre a disponibilidade de biogás é grande. A rigor, estes valores devem ser agregados ao potencial dos aterros antigos, reduzindo a diferença entre o potencial dos anos mais distantes e o dos mais próximos. Entretanto, por ser esta atividade não econômica - inclusive nos países europeus, onde o custo da energia é mais elevado que no Brasil, no momento, desconsiderou-se a sua aplicação para o horizonte 2017.

De qualquer maneira, o potencial apresentado na Tabela 8 varia entre cerca de 1% do consumo atual de energia elétrica, para a disponibilidade de 2008, e cerca de 2,6% do consumo atual para a disponibilidade em 2017.

³ O cálculo é realizado através da conversão do peso em volume, através da aplicação da densidade (0,716 kg/m³), o qual será multiplicado pelo Poder Calorífico Inferior (9.256 kcal/m³) e pelo fator de conversão em Watt-hora (1,1612), convertido em eletricidade ao ser dividido por 3, visto que a eficiência típica destes equipamentos é da ordem de 33%.

Tabela 8 – Potencial de geração elétrica através da recuperação de gás de lixo

Ano	Eletricidade gerada (MWh)
2007	1.486.153,43
2008	2.854.940,42
2009	4.048.898,85
2010	5.103.245,40
2011	6.046.142,33
2012	6.902.918,13
2013	7.690.833,70
2014	8.426.430,53
2015	9.127.083,67
2016	9.799.503,08
2017	10.456.782,86

Fonte: Elaboração própria.

O **potencial de Geração Elétrica com a tecnologia de DAA** é apresentado na Tabela 9. A tecnologia de digestão anaeróbica acelerada (DAA) requer o aproveitamento apenas do lixo orgânico, que deve ser separado dos demais componentes⁴ e processado. Esta solução apresenta como co-produto o adubo. O potencial é calculado com base na relação de 5.500 m³ de metano para cada 100 toneladas diárias de lixo orgânico. A partir deste fator, o potencial de eletricidade é calculado de mesma forma que o do gás do aterro.

⁴ Esta ação disponibiliza recicláveis, cujo aproveitamento como insumo industrial representa conservação de energia, como será visto posteriormente.

Tabela 9 – Potencial de Geração Elétrica com a tecnologia de DAA

Ano	Eletricidade gerada (MWh)
2007	4.816.680,24
2008	4.960.313,26
2009	5.106.868,17
2010	5.256.297,59
2011	5.408.542,64
2012	5.563.531,88
2013	5.721.180,24
2014	5.881.387,80
2015	6.044.038,57
2016	6.208.999,10
2017	6.376.117,03

Fonte: Elaboração própria

Nota-se menor potencial no uso desta tecnologia que na anterior, mas vale ressaltar que a variação também é muito menor. A produção de gás ocorre em 18 dias, ainda que na metade da proporção possível aos aterros, os quais levam até 40 anos para tanto.

De qualquer modo, o potencial supera 1% do consumo atual de eletricidade, para a disponibilidade em 2008, e cerca de 1,5% do consumo atual para a disponibilidade de 2017.

As outras tecnologias, ***Incineração e Ciclo Combinado Otimizado***, consomem parte dos recicláveis juntamente à fração orgânica do lixo, para geração elétrica. Foi considerado que a retirada de recicláveis incineráveis – papéis e plásticos – do lixo seja da ordem de 30%, enquanto os vidros e metais serão retirados na totalidade. O teor de umidade foi reduzido, conforme o item 7 das premissas. Assim, as quantidades e a composição do lixo resultantes são explicitados na Tabela 10.

Tabela 10 – Projeção de Lixo para as Tecnologias de Incineração e CCO

Ano	Estimativa da Reciclagem (1) (Mt/a)	Produção de Lixo pós-Reciclagem, com a estimativa anterior (Mt/a)	Participação de Recicláveis pós-Reciclagem (%)	Teor de umidade da FO
2007	4,84	33,11	20	59,1
2008	5,12	34,32	21	58,3
2009	5,43	35,57	21	57,5
2010	5,75	36,86	22	56,7
2011	6,09	38,19	22	55,8
2012	6,45	39,57	23	55,0
2013	6,84	41,00	23	54,2
2014	7,24	42,48	24	53,3
2015	7,67	44,00	24	52,5
2016	8,13	45,58	25	51,7
2017	8,61	47,21	26	50,9

(1) 30% do potencial de papel e plástico e todo vidro e metal

Fonte: Elaboração própria.

O cálculo do **potencial de geração elétrica a partir da incineração** é de 500 kWh por tonelada de lixo, em média, o que permite construir a Tabela 11, a seguir.

Tabela 11 – Potencial de geração elétrica a partir da Incineração

Ano	Eletricidade gerada (MWh)
2007	16.556.373,60
2008	17.159.419,79
2009	17.783.312,70
2010	18.428.701,13
2011	19.096.249,19
2012	19.786.636,34
2013	20.500.557,32
2014	21.238.722,07
2015	22.001.855,62
2016	22.790.697,90
2017	23.606.003,55

Fonte: Elaboração própria

O potencial de geração elétrica da incineração é bastante superior ao das tecnologias anteriores, podendo atingir 4% do consumo atual, para a disponibilidade de lixo de 2008, e até 5% do consumo atual de eletricidade, para a disponibilidade de 2017.

É importante ressaltar a existência de emissões, inclusive de dioxinas e furanos, mesmo atendendo aos padrões estabelecidos.

Já no caso do **Ciclo Combinado Otimizado**, o potencial é de 850 kWh por tonelada de lixo – descontando o benefício possível com o combustível utilizado na máquina de combustão interna associada ao incinerador, de acordo com as condições médias apresentadas acima. Neste caso, é consumido complementarmente gás natural, cujo suprimento deverá ser economicamente avaliado, em cada caso. O resultado da aplicação do fator de geração elétrica somente ao montante do lixo associado ao benefício da integração – ou seja, desprezando a oferta decorrente do consumo de gás natural, ou sucedâneo – permitiu criar a Tabela 12, a seguir.

Tabela 12 – Potencial de geração elétrica do Ciclo Combinado Otimizado

Ano	Eletricidade gerada (MWh)
2007	26.490.197,76
2008	27.455.071,67
2009	28.453.300,33
2010	29.485.921,80
2011	30.553.998,70
2012	31.658.618,14
2013	32.800.891,71
2014	33.981.955,32
2015	35.202.968,99
2016	36.465.116,65
2017	37.769.605,68

Fonte: Elaboração própria

O Ciclo Combinado Otimizado oferece maior potencial de geração dentre as quatro tecnologias analisadas, podendo ofertar 6% da energia elétrica consumida atualmente, com a disponibilidade de lixo de 2008, até atingir 9% do consumo atual, com a disponibilidade de lixo prevista para 2017, conforme mostra a Tabela 12.

5.2. O Potencial da Conservação de Energia decorrente da Reciclagem

A reciclagem de vidros, papéis, plásticos e metais não exclui as demais etapas de compostagem, recuperação energética e disposição final. O aproveitamento energético *versus* reciclagem de plásticos e papéis requer a discussão sobre a viabilidade de cada uma das rotas tecnológicas para a oferta desse produto, comparando-as com as alternativas de mercado. Nos EUA, onde a reciclagem atinge níveis superiores aos do Brasil, muitos plásticos inicialmente separados na reciclagem terminaram em aterros sanitários, por falta de mercado (Themelis, WMW Sep-Oct 2004).

Já existe um mercado consistente de reciclados no Brasil, em especial para latas de alumínio, em que o Brasil é o país com maior taxa no mundo.

No que concerne à triagem e reciclagem de lixo, existem várias empresas e cooperativas que atuam neste setor, algumas das quais desde a década de 1950. Segundo dados do CEMPRE (2006), existem 143 municípios realizando projetos de coleta seletiva, com populações, percentuais de engajamento popular, tempo de participação e resultados muito díspares, mas com a confirmação de que nunca houve decréscimo na quantidade de participantes, desde o ano de 1998. Mesmo assim, o potencial de reciclagem ainda é maior que o triplo do reciclado atualmente.

A título de exemplo, considere-se que a reciclagem possa atender a até cerca de 15 milhões de toneladas anuais de lixo. Na Tabela 13, calculou-se o potencial de conservação de energia caso toda a parcela de papéis, plásticos, vidros e metais produzida e não reaproveitada no ano 2000, segundo o IBGE, fosse reciclada, com base nos valores fornecidos por Calderoni (1996) para conservação de energia da reciclagem de embalagens.

Tabela 13 – Potencial de Conservação de Energia Elétrica através da Reciclagem de Embalagens.

MATERIAL	Produção não reciclada	Energia elétrica desperdiçada	
	1000 t/ano	MWh/t	GWh/ano
METAL	1.800	5,3	9.540
VIDRO	1.350	0,64	864
PAPEL	11.250	3,51	39.487
PLÁSTICO	1.350	5,06	6.831
TOTAL	15.750	-	56.723

Fonte: Elaboração própria a partir de Calderoni (1996) e IBGE (2000).

O montante superior a 56 TWh/a atinge 20% do consumo atual de eletricidade do país.

A Tabela 14, a seguir, refaz o cálculo sobre o potencial de conservação de cada tipo de material, agora considerando os fatores de conservação para cada material nos EUA, segundo Morris (1996).

Tabela 14 – Potencial de energia conservável por tonelada de lixo

MATERIAL	Produção não reciclada 1000 t/ano	Energia elétrica desperdiçada	
		MWh/t	GWh/ano
METAL	1.800	3,25	5.850
VIDRO	1.350	0,08	108
PAPEL	11.250	1,75	19.687,50
PLÁSTICO	1.350	5,55	7.492,50
TOTAL	15.750	-	33.138

Fonte: Elaboração Própria a partir de Morris (1996), e IBGE (2000).

A Tabela 14 permite depreender que a reciclagem é capaz de conservar, nesse caso, cerca de 33 TWh/a, algo como 10% do consumo nacional de eletricidade.

Das tabelas acima é possível extrair um intervalo de conservação de energia por quantidade de lixo. Considerando o valor da primeira linha sobre produção de lixo da Tabela 6, igual a 38 Mt, o intervalo compreende os valores de 0,877 MWh/t a 1,493 MWh/t⁵.

Em virtude deste potencial ser superior ao da geração através de qualquer das rotas tecnológicas apresentadas anteriormente (entre 0,2 e 0,85 MWh/t), é esperado que a reciclagem seja estimulada. Neste caso, o co-produto disponível (apenas fração orgânica) somente permitirá a aplicação de tecnologias de digestão, aeróbica ou anaeróbica, sendo a primeira mais aplicada a pequenas quantidades de materiais.

Entretanto, alcançar este nível de seleção é bastante difícil, visto que historicamente os resíduos são misturados. Por outro lado, também é conhecida a segregação de recicláveis por catadores de lixo, mas que atinge apenas 3% do lixo (COOPCAJU, 2006), o que equivale a 10% do potencial de recicláveis. Desta forma, é possível que a incineração seja aplicada no período em que o aumento de segregação vá ocorrendo (incinerando parte dos materiais recicláveis), até que seja inviável dispor de material adequado à incineração.

⁵ Apesar da energia consumida pelos processos industriais e nos transportes não ser exclusivamente elétrica, todo o consumo foi convertido em eletricidade, para facilitar a análise (Morris, 1996; Calderoni, 1996).

A Tabela 15 mostra o potencial de conservação de energia elétrica no caso de implantação de sistema de coleta seletiva efetiva, a qual seja capaz de segregar todos os recicláveis da fração orgânica. Foram utilizados os fatores de conservação disponibilizados por Morris (1996) e por Calderoni (1996), para cada tipo de material, de acordo com as estimativas de produção e composição dos resíduos sólidos urbanos obtidas na Tabela 6.

Tabela 15 – Potenciais de Conservação de Energia Elétrica da Reciclagem de Embalagens para os casos da implantação da Coleta Seletiva - considerando aproveitamento de todos os recicláveis.

Ano	Conservação do Papel (TWh/a)		Conservação do Plástico (TWh/a)		Conservação do Vidro (TWh/a)		Conservação do Metal (TWh/a)		Conservação Total (TWh/a)	
	MORRIS	CALDERONI	MORRIS	CALDERONI	MORRIS	CALDERONI	MORRIS	CALDERONI	MORRIS	CALDERONI
2007	10,15	20,37	21,46	19,57	0,09	0,74	2,52	4,10	34,23	44,78
2008	10,35	20,77	22,74	20,73	0,10	0,79	2,67	4,35	35,86	46,64
2009	10,55	21,17	24,09	21,96	0,10	0,83	2,82	4,61	37,57	48,57
2010	10,75	21,57	25,54	23,29	0,11	0,88	2,99	4,88	39,39	50,61
2011	10,96	21,99	27,03	24,65	0,12	0,94	3,17	5,16	41,28	52,74
2012	11,18	22,42	28,66	26,13	0,12	0,99	3,35	5,46	43,32	55,01
2013	11,39	22,84	30,35	27,67	0,13	1,05	3,56	5,81	45,43	57,37
2014	11,61	23,28	32,18	29,33	0,14	1,11	3,77	6,14	47,69	59,87
2015	11,83	23,74	34,07	31,07	0,15	1,18	4,00	6,52	50,05	62,50
2016	12,07	24,20	36,10	32,91	0,16	1,25	4,22	6,89	52,55	65,25
2017	12,30	24,67	38,24	34,86	0,17	1,32	4,48	7,31	55,18	68,16

Fonte: Elaboração Própria.

Obs.: A conservação de energia considera o potencial nacional de disponibilidade de resíduos, sendo que uma parcela deste total já é encaminhada para a reciclagem – ainda que não tenha como motivação a conservação de energia.

Deve ser realçado o fato de que a conservação de energia elétrica decorrente da reciclagem de embalagens presentes no lixo pode atingir 8,5% do consumo atual de eletricidade, com base na de lixo de 2008, e aproximadamente 16% do consumo atual, com base na disponibilidade em 2017.

Este potencial da conservação é muito relevante e passível de ser consorciado à tecnologia de Digestão Anaeróbica Acelerada, pois esta requer o fornecimento de lixo exclusivamente orgânico para ser utilizada. No caso da tecnologia de recuperação de Gás de Lixo, apesar de parte das embalagens de papel também ser – no cenário atual – destinada a esta alternativa e, por isto, responsável pela produção de biogás, considerou-se que todas as embalagens seriam encaminhadas para a reciclagem e que os aterros receberiam apenas material orgânico.

A Tabela 16 apresenta os limites do potencial de conservação de energia elétrica para os casos em que as tecnologias de incineração ou ciclo combinado otimizado sejam aplicadas.

Tabela 16 – Potenciais da Conservação de Energia Elétrica da Reciclagem de Embalagens para os casos das tecnologias de Incineração e CCO.

Ano	Conservação do Papel (TWh/a)		Conservação do Plástico (TWh/a)		Conservação do Vidro (TWh/a)		Conservação do Metal (TWh/a)		Conservação Total (TWh/a)	
	MORRIS	CALDE- RONI	MORRIS	CALDE- RONI	MORRIS	CALDE- RONI	MORRIS	CALDE- RONI	MORRIS	CALDE- RONI
2007	3,05	6,11	6,44	5,87	0,09	0,74	2,52	4,10	12,09	16,83
2008	3,11	1,77	6,82	6,22	0,10	0,79	2,67	4,35	12,69	13,13
2009	3,17	1,81	7,23	6,59	0,10	0,83	2,82	4,61	13,32	13,84
2010	3,23	1,84	7,66	6,99	0,11	0,88	2,99	4,88	13,99	14,59
2011	3,29	1,88	8,11	7,39	0,12	0,94	3,17	5,16	14,68	15,37
2012	3,35	1,92	8,60	7,84	0,12	0,99	3,35	5,46	15,43	16,21
2013	3,42	1,95	9,10	8,30	0,13	1,05	3,56	5,81	16,21	17,11
2014	3,48	1,99	9,65	8,80	0,14	1,11	3,77	6,14	17,04	18,04
2015	3,55	2,03	10,22	9,32	0,15	1,18	4,00	6,52	17,92	19,05
2016	3,62	2,07	10,83	9,87	0,16	1,25	4,22	6,89	18,83	20,08
2017	3,69	2,11	11,47	10,46	0,17	1,32	4,48	7,31	19,81	21,20

Fonte: Elaboração Própria.

Obs.: A conservação de energia considera o potencial nacional de disponibilidade de resíduos, sendo que uma parcela deste total já é encaminhada para a reciclagem – ainda que não tenha como motivação a conservação de energia.

Nestes casos, os potenciais são menores que os encontrados na tabela anterior, visto que parte dos recicláveis será consumida conjuntamente à fração orgânica para geração elétrica. Mesmo assim, o potencial supera 3% do consumo atual de eletricidade, para a disponibilidade de lixo de 2008 e 6% do consumo atual de eletricidade, para a disponibilidade de 2017. Para este cálculo foi considerada a reciclagem de todos os vidros e metais, além de 30% dos plásticos e dos papéis, visto que seu complemento é necessário para elevar o poder calorífico dos resíduos urbanos e permitir viabilidade às rotas tecnológicas em questão.

6. Externalidades do aproveitamento energético de RSU no horizonte 2017

O aproveitamento energético do lixo oferece alguns benefícios colaterais, denominados externalidades, como a redução da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa (GEE), a criação de emprego e renda para população de baixa qualificação profissional, a menor poluição por chorume⁶ (pois haverá menos lixo sendo decomposto de maneira tradicional), a redução da necessidade por áreas para disposição final dos resíduos (excluindo-se a opção por aterros sanitários) e a redução do consumo de recursos naturais.

Do ponto de vista social, segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio (1998), a reciclagem de materiais presentes no lixo pode ofertar 1.000.000 de postos de emprego para população de baixa qualificação profissional, apenas nas regiões metropolitanas brasileiras.

No tocante aos benefícios ambientais, os referentes ao efeito estufa são bastante relevantes, pois suas mitigações podem representar recursos financeiros para apoiar os empreendimentos. O governo brasileiro e as Nações Unidas já dispõem de metodologias aprovadas para a maior parte dos processos supracitados, sendo que apenas a tecnologia Ciclo Combinado Otimizado, por ser inovação nacional, e a Conservação através da reciclagem, ainda não solicitada em nível internacional, ainda não contam com metodologias aprovadas. É importante atentar para o fato de que esta situação pode ser revertida muito rapidamente, em prazo inferior a um ano, bastando, para tanto, elaborar a documentação e solicitar análise ao Painel Metodológico do Executive Board do MDL.

A seguir serão apresentadas estimativas das quantidades de créditos de carbono que cada alternativa pode oferecer. Estes créditos decorrem da eliminação da emissão do biogás produzido espontaneamente pela decomposição do lixo, acrescida da redução no consumo de combustíveis fósseis para geração elétrica proporcional à eletricidade a ser gerada e àquela a ser conservada. O biogás produzido espontaneamente nos aterros possui cerca de 50% de metano, gás que prejudica mais a atmosfera que o dióxido de carbono, em relação ao efeito estufa. O fator de conversão entre os GEE é conhecido como Potencial de Aquecimento Global (GWP), expresso para períodos de 15, 100 e 500 anos, sendo mais comum utilizar o período de 100 anos. No caso do metano, seu GWP é de 21, para este período. Assim, as emissões são multiplicadas por este fator, para poder ser estimada a emissão potencial em dióxido de carbono equivalente.

⁶ Líquido ácido produzido pela decomposição do lixo.

Por outro lado, como o fator de emissão da eletricidade brasileira depende da região geográfica em que esteja o empreendimento, foram tomados os fatores já aprovados em projetos de carbono brasileiros submetidos à Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMA) e apresentados na Tabela 17, a seguir.

Tabela 17 – Fatores de emissão de dióxido de carbono na geração elétrica por submercado

2006	Margem de Construção
Submercado	(tCO ₂ /MWh)
Norte	0,0000
Nordeste	0,0197
Sudeste/Centro-Oeste	0,0678
Sul	0,1737

Fonte: O.N.S. (2006), apud MCT.

Verifica-se, na tabela anterior, que os fatores variam de zero, no submercado Norte, a 0,1737 t CO₂/MWh no submercado Sul. A Tabela 18, a seguir, mostra as mitigações de emissões decorrentes do aproveitamento energético de lixo no Brasil até 2017, de acordo com as tecnologias apresentadas. Foram utilizados, para a hipótese 1, os fatores de conservação de energia de Morris (1996) e o fator de emissão da Margem de Construção para o submercado Nordeste, enquanto para a hipótese 2 foram utilizados os fatores de conservação de energia de Calderoni (1996) e o fator e emissão da Margem de Construção para o submercado Sul, de modo a estabelecer os limites deste intervalo.

Tabela 18 – Potencial de Mitigação de Gases do Efeito Estufa decorrentes do Aproveitamento Energético de Lixo no Brasil até 2017 (t CO₂ eq/a)

ANO	CENÁRIO BIOGÁS 1 (70% do lixo nos aterros)		CENÁRIO BIOGÁS 2 (todo biogás para eletricidade)		CENÁRIO INCINERAÇÃO		CENÁRIO D.A.		CENÁRIO CCO	
	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 1	Hipótese 2
2007	4.187.821	11.452.218	5.693.637	13.026.694	5.554.532	10.788.832	5.759.253	13.605.252	5.826.454	13.186.443
2008	7.456.128	15.158.261	10.348.841	18.182.872	10.174.201	14.847.228	10.390.315	18.548.558	10.457.771	17.347.538
2009	10.312.615	18.445.630	14.415.083	22.735.157	14.207.849	19.087.347	14.435.922	22.918.895	14.503.573	21.694.820
2010	12.841.184	21.406.702	18.011.948	26.813.236	17.773.999	22.870.903	18.014.966	26.839.851	18.082.472	25.590.791
2011	15.107.544	24.106.431	21.233.680	30.511.898	20.966.757	26.288.239	21.221.117	30.401.120	21.288.437	29.124.571
2012	17.173.229	26.619.018	24.167.476	33.932.180	23.871.894	29.431.459	24.141.101	33.699.626	24.207.520	32.390.761
2013	19.077.666	28.976.900	26.870.254	37.124.805	26.547.048	32.356.730	26.831.460	36.782.751	26.897.139	35.443.574
2014	20.861.269	31.230.010	29.399.185	40.157.228	29.047.777	35.116.923	29.349.037	39.715.056	29.412.987	38.337.078
2015	22.564.357	33.418.396	31.812.197	43.087.907	31.432.757	37.776.340	31.751.469	42.552.449	31.813.780	41.135.914
2016	24.203.190	35.558.612	34.132.345	45.940.504	33.724.065	40.350.577	34.061.609	45.316.804	34.121.557	43.855.363
2017	25.809.077	37.688.730	36.404.209	48.766.965	35.966.403	42.893.853	36.323.835	48.058.289	36.381.201	46.551.233
TOTAL										
2008-2017	179.594.080	315.373.154	252.488.856	360.279.447	249.267.283	311.808.431	252.280.084	358.438.651	252.992.892	344.658.085

Fonte: Elaboração própria.

A **Tabela 19** mostra que o potencial de mitigação das emissões de gases do efeito estufa representa valores entre 179 e 360 milhões de toneladas de CO₂ equivalente durante o período 2008-2017, dependendo do fator de emissão utilizado.

Este montante de créditos pode ser utilizado para auxiliar na implantação das unidades produtivas, pois o comércio internacional de créditos flutua entre US\$1 e US\$ 35/tCO₂eq (www.carbonpoint.com). Tomando um valor de US\$ 20/tCO₂eq, praticado no primeiro leilão de carbono – realizado pela Bolsa Mercantil e de Futuros de São Paulo em setembro de 2007, seria possível obter cerca de US\$ 7 bilhões. Outra oportunidade é utilizar a receita potencial como auxílio ao fluxo de caixa, remunerando anualmente os empreendimentos, o que tende a elevar o valor a ser pago pelos créditos.

7. O Potencial de Aproveitamento no Período

A síntese do potencial de energia elétrica decorrente do lixo brasileiro, no período 2008-2017, reunindo geração e conservação – com os dois fatores utilizados (Morris e Calderoni), é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Potencial de Aproveitamento Energético do Lixo Brasileiro até 2017 (MWh/ano)

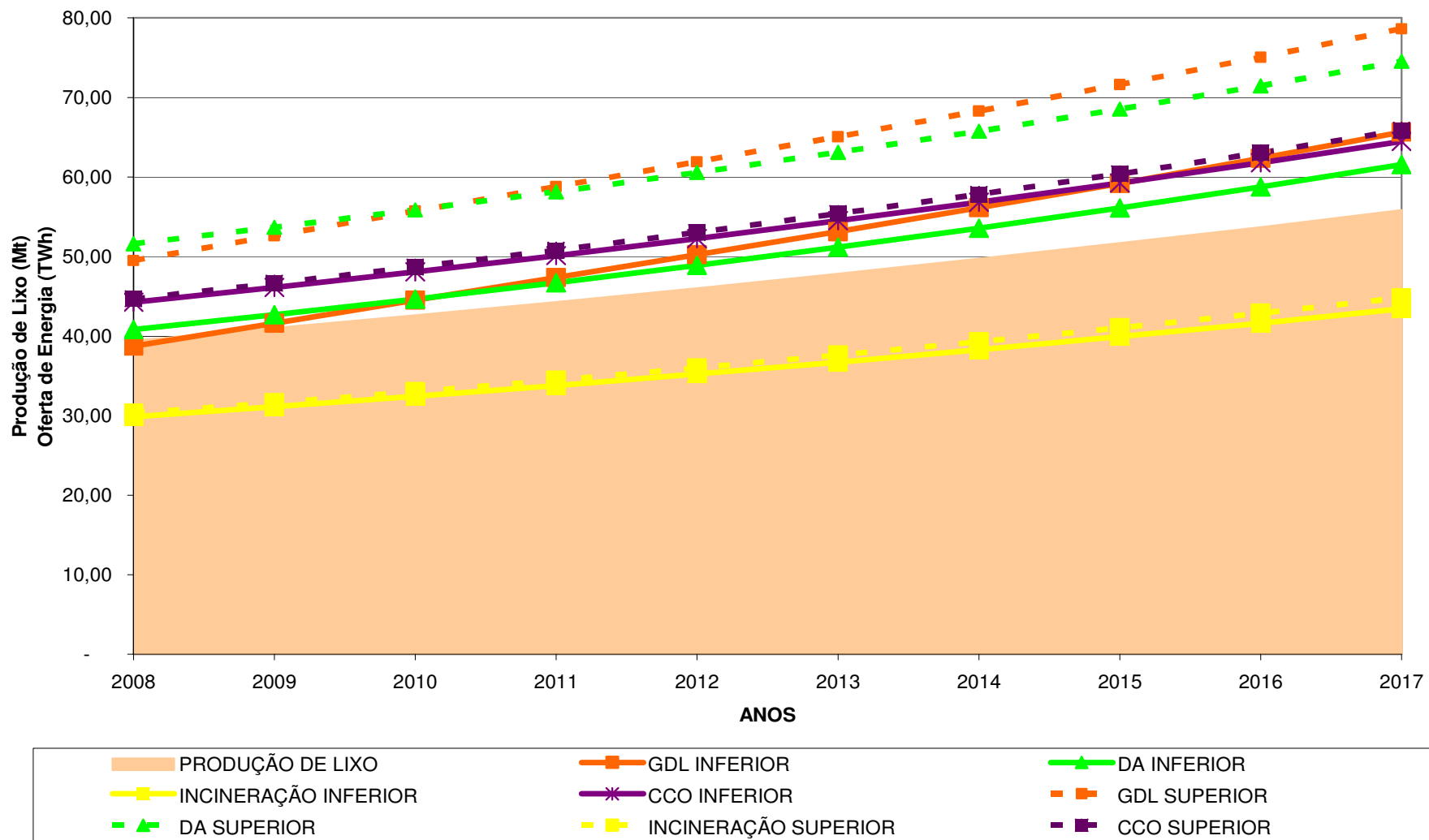
ANO	Bg + Rec		Inc + Rec		DA + Rec		CCO + Rec	
	MORRIS	CALDERONI	MORRIS	CALDERONI	MORRIS	CALDERONI	MORRIS	CALDERONI
2007	35.712.044	46.267.040	28.650.884	33.383.549	39.042.829	49.597.824	42.454.058	47.186.723
2008	38.716.114	49.491.874	29.851.146	30.288.393	40.821.387	51.597.147	44.245.563	44.682.810
2009	41.622.002	52.619.614	31.102.516	31.618.980	42.679.795	53.677.407	46.113.874	46.630.338
2010	44.497.530	55.716.121	32.418.917	33.019.903	44.650.750	55.869.340	48.077.452	48.678.439
2011	47.326.705	58.782.695	33.777.298	34.466.865	46.688.951	58.144.940	50.106.212	50.795.780
2012	50.218.564	61.911.396	35.214.397	36.000.510	48.879.735	60.572.567	52.251.250	53.037.363
2013	53.120.364	65.060.577	36.713.970	37.610.521	51.151.143	63.091.355	54.485.095	55.381.646
2014	56.114.902	68.298.829	38.276.926	39.281.530	53.569.293	65.753.220	56.815.526	57.820.129
2015	59.181.115	71.626.813	39.920.212	41.047.848	56.098.456	68.544.154	59.261.452	60.389.088
2016	62.345.679	75.051.058	41.620.803	42.869.553	58.755.007	71.460.385	61.798.039	63.046.788
2017	65.639.680	78.617.491	43.416.050	44.805.678	61.559.795	74.537.607	64.471.776	65.861.404

Fonte: Elaboração Própria.

Obs.: A conservação de energia considera o potencial nacional de disponibilidade de resíduos, sendo que uma parcela deste total já é encaminhada para a reciclagem – ainda que não tenha como motivação a conservação de energia.

A Figura 4, a seguir, representa os valores da **Tabela 6** e da **Tabela 19**.

Figura 4 – Potencial de produção de lixo (Mt) e de Oferta de Eletricidade por tecnologia (TWh), considerando a Conservação decorrente da Reciclagem.



A Tabela 19 e a Figura 4 evidenciam que o Brasil dispõe de potencial de aproveitamento energético de lixo que varia entre 28 TWh/a e 49 TWh/a, a depender da tecnologia a ser empregada, respectivamente cerca de 7,3% e 10% do consumo atual de eletricidade (400 TWh/a), para a disponibilidade de lixo prevista para 2008. Estes valores podem atingir, em 2017, 43 TWh/a e 78 TWh/a, respectivamente o equivalente a 10% e 19% do consumo atual de eletricidade.

É importante ressaltar que a conservação de energia decorrente da reciclagem das embalagens presentes no lixo é responsável pela maior parcela deste benefício energético nas tecnologias de produção de biogás (recuperação de biogás dos aterros e digestão anaeróbica acelerada), atingindo valores de 87% a 90%. No caso da incineração, a conservação representa entre 44 e 45% da oferta total desta tecnologia consorciada à reciclagem. Para a tecnologia CCO, a conservação representa sempre mais de 29%.

Deve ser realçado o fato do maior potencial de aproveitamento dos gases presentes nos aterros decorrer da maior produção de gás por unidade de resíduo nesta alternativa de disposição final, quando comparada com a digestão anaeróbica acelerada. Este fato demanda o monitoramento continuado dos aterros, mesmo após seu encerramento, como medida de segurança para evitar acidentes, além de impossibilitar a utilização do adubo produzido simultaneamente ao gás, visto que o procedimento operacional – cobertura com argila – impede sua recuperação. Este adubo poderia ser utilizado para estimular cultivos energéticos, como cana-de-açúcar e oleaginosas, por agricultores familiares, atendendo às premissas do governo federal.

Além de não ser possível prever o prazo necessário para viabilizar o total aproveitamento dos resíduos urbanos, bem como não se poder determinar qual a tecnologia que será empregada prioritariamente, a incerteza sobre o aproveitamento energético também decorre da necessidade de identificar as características quanto à composição dos resíduos de cada região, da capacidade de produção de equipamentos – tanto pela indústria nacional quanto por fornecedores estrangeiros, além das relacionadas aos financiamentos específicos, aos estímulos e à legislação.

O benefício ambiental destas alternativas é muito significativo, a ponto de poder representar aporte de até US\$ 7 bilhões para o Brasil – considerando-se a comercialização dos créditos de carbono a US\$ 20/t CO₂ eq, conforme ocorreu no primeiro leilão de créditos de carbono, por conta das mitigações de gases do efeito estufa normalmente

emitidos por vazadouros de lixo e pelo consumo de combustíveis fósseis para geração elétrica.

No entanto, a despeito destas vantagens, existem barreiras que dificultam a penetração do aproveitamento energético dos RSU. A alternativa encontrada pela União Europeia, para as distorções presentes no mercado liberalizado frente à entrada das tecnologias renováveis, foi o estabelecimento de instrumentos normativos e institucionais que viabilizem a sustentabilidade dos mercados competitivos, os quais afiançarão o desenvolvimento das tecnologias renováveis. Nestes termos, a Comissão Europeia mostra que as energias renováveis oferecem um considerável potencial a ser incorporado à matriz energética do continente, como forma de reforçar a segurança de seu provisão energético. Além disso, explicita que o desenvolvimento da sua utilização encontra-se dependente do estabelecimento de efetivos esforços políticos e intervenções econômicas.

O único valor disponível no mercado atual é o resultado do leilão do setor elétrico brasileiro, realizado em junho de 2006, no qual a eletricidade gerada com o gás proveniente do aterro São João, em São Paulo, foi contratada a R\$ 139,20/MWh para entrega a partir de 2009.

Em outros locais onde a obtenção do biogás seja possível com os mesmos custos, esta oportunidade já pode ser reproduzida, pois é considerada menor que o custo marginal de expansão.

Quanto às demais tecnologias, ainda que a tendência seja de investimentos superiores aos do aproveitamento do biogás recuperado dos aterros, é preciso considerar que as receitas complementares (tratamento do lixo, créditos de carbono, conservação de energia, crédito de carbono da eletricidade) tendem a aumentar, o que reduzirá os custos finais da eletricidade. A comercialização dos co-produtos também poderá auxiliar neste sentido.

8. Considerações Finais

O aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos já é uma realidade internacional, existindo, atualmente, mais de 1.700 usinas termelétricas, congregando mais de 100 tecnologias. No Brasil, apenas uma usina está funcionando comercialmente, para consumidor cativo, sendo que a segunda cuja entrada no mercado já está garantida, com sua proposta vencedora no Leilão do Setor Elétrico realizado em junho de 2006, o que demonstra a competitividade desta alternativa.

O desenvolvimento desta solução para o Brasil depende da associação de receitas provenientes do tratamento dos resíduos à comercialização da energia elétrica e, se possível, também da térmica, além da conservação de energia possível com a reciclagem de embalagens e dos créditos de carbono relacionados a estas três atividades (emissão evitada de metano, de dióxido de carbono do combustível substituído na geração, do combustível fóssil evitado pela conservação).

A implantação destas soluções – que demandam de 6 a 24 meses – pode representar aumento de garantia ao sistema interligado, por conta de sua distribuição natural, além de oferecer oportunidades de emprego e renda para profissionais de baixa qualificação profissional.

9. Referências Bibliográficas

Nº.	TÍTULO
1.	ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). <i>Resíduos Sólidos: classificação</i> . NBR 10.004. Rio de Janeiro.
2.	CALDERONI, 1996. Os Bilhões Perdidos no Lixo. Editora USP. 220 p.
3.	CEMPRE (2006). Pesquisa Ciclosoft. Disponível em www.cempre.org.br . Acessado em 23 de maio de 2007.
4.	COOPCAJU (2006). Relatório mensal sobre comercialização de recicláveis.
5.	EPE, 2006. Análise Periódica do Setor Energético. Boletim de Análise e Conjuntura Energética (ref.: ago/2006).
6.	IBGE (2000). II <i>Pesquisa Nacional de Saneamento Básico</i> .
7.	IPT/CEMPRE. (1998). <i>Lixo municipal. Manual de gerenciamento integrado</i> . 2. reimp. São Paulo: CEMPRE
8.	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio (MDIC), 1998. Programa Brasileiro de Reciclagem
9.	MME / EPE (2015). Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2006-2015.
10.	MORRIS, J. (1996). Recycling versus incineration: an energy conservation analysis. <i>Journal of hazardous materials</i> , 47. Elsevier. p 277-293.
11.	MUYLAERT, M.S. et alli (2000). <i>Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta</i> . Ed. COPPE/UFRJ. 247 p.
12.	OLIVEIRA, L.B. (2004). Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil. Tese (de doutorado). Programa de Planejamento Energético. COPPE/UFRJ. 247 p.
13.	O.N.S. (2006). Fatores de emissão da margem de construção do sistema elétrico nacional. Disponível em http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/50871.html . Acessado em 30/10/2007.
14.	OSTREM, Karena, "Greening Waste: anaerobic Digestion for Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes", M.S. Thesis, Dept. of Earth and Environmental Engineering, Columbia University, New York, NY, 2004.

Nº.	TÍTULO
15.	RISE-AT,.-. (1998). "Review of Current Status of Anaerobic Digestion Technology for treatment of MSW."
16.	SERÔA DA MOTTA, R. & CHERMONT, L. (1996). Aspectos econômicos da gestão integrada de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: <i>IPEA</i> (Texto para discussão nº 416).
17.	TEIXEIRA, E.N., et al. (1997). Potencial de minimização de resíduos sólidos domésticos em termos de matéria orgânica e embalagens. <i>Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental</i> , 19º . Foz do Iguaçu: ABES, 14 a 19 set. Anais em CD-ROM.
18.	THEMELIS, Nickolas J. – "US – Waste in a Land of Plenty", <i>Waste Management World</i> , ISWA, Sep-October 2004.
19.	USEPA, 1998. Summary results from NBB/USEPA tier I. "Health and environmental effects testing for biodiesel under the requirements for USEPA registration of fuels and fuel additives" (40 CFR Part 79, Sec 21 1 (b)(2) and 21 1 (e)). Final report.
20.	VERMA, S., "Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes" <i>Earth Resources Engineering</i> , New York, Columbia University, Vol. 56, 2002.
21.	VERSTRAETE, W. V., P.; BAERE, L. (2002). Types of anaerobic digester for solid waste. <u>Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste</u> . U. o. Adelaide. Adelaide, Hardback.
22.	WILLUMSEN, H. C. (2001). "Energy Recovery from Land Fill gas in Denmark and worldwide." <u>LG Consultant</u>