

SÉRIE
RECURSOS ENERGÉTICOS

NOTA TÉCNICA DEA 18/14

Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos

Rio de Janeiro
Outubro de 2014



Empresa de Pesquisa Energética

Ministério de
Minas e Energia



(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso - “*double sided*”)



Governo Federal

Ministério de Minas e Energia

Ministro
Edison Lobão

Secretário Executivo
Márcio Pereira Zimmermann

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento
Energético
Altino Ventura Filho

SÉRIE
RECURSOS ENERGÉTICOS

NOTA TÉCNICA DEA 18/14
**Inventário Energético dos
Resíduos Sólidos Urbanos**



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei n.º 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

Mauricio Tiomno Tolmasquim

Diretor de Estudos Econômicos e Energéticos
Amilcar Guerreiro

Diretor de Estudos de Energia Elétrica
José Carlos de Miranda Farias

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível
Mauricio Tiomno Tolmasquim (interino)

Diretor de Gestão Corporativa
Álvaro Henrique Matias Pereira

Coordenação Geral
Mauricio Tiomno Tolmasquim
Amilcar Guerreiro

Coordenação Executiva
Ricardo Gorini de Oliveira

Coordenação Técnica
Luciano Basto Oliveira

Equipe Técnica
Luciano Basto Oliveira
Luiz Gustavo Silva de Oliveira

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

Sede

SCN – Quadra 1 – Bloco C Nº 85 – Salas 1712/1714
Edifício Brasília *Trade Center*
70711-902 - Brasília – DF

Escritório Central

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

Rio de Janeiro
Outubro de 2014

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso - “*double sided*”)

INVENTÁRIO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 6 |
| 2. RESÍDUOS URBANOS NO BRASIL | 8 |
| 2.1 O CONTEXTO E MERCADO DE RESÍDUOS URBANOS NO BRASIL | 8 |
| 2.2 CARACTERIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE RSU NO BRASIL | 11 |
| 3. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS URBANOS | 13 |
| 3.1 ATERROS SANITÁRIOS E PRODUÇÃO DE BIOGÁS | 17 |
| 3.2 DIGESTÃO ANAERÓBICA (BIOGÁS, ADUBO ORGÂNICO) | 22 |
| 3.3 INCINERAÇÃO | 24 |
| 3.4 CICLO COMBINADO OTIMIZADO | 26 |
| 3.5 PURIFICAÇÃO (UPGRADE) DO BIOGÁS A BIOMETANO | 27 |
| 3.6 OUTRAS TECNOLOGIAS | 29 |
| 4. A RECICLAGEM DOS RSU | 31 |
| 4.1 RECICLAGEM NO BRASIL | 31 |
| 4.2 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA PROVENIENTE DA RECICLAGEM | 33 |
| 4.2.1 INDICADORES | 33 |
| 4.2.2 LIMITES, PREMISSAS E CONSIDERAÇÕES | 35 |
| 4.3 BENEFÍCIOS DA RECICLAGEM | 36 |
| 5. POTENCIAL ENERGÉTICO DO LIXO BRASILEIRO | 37 |
| 5.1 POTENCIAL TÉCNICO DO RSU PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE | 37 |
| 5.2 POTENCIAL TÉCNICO DO RSU PARA A PRODUÇÃO DE BIOMETANO | 39 |
| 5.3 POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA RECICLAGEM | 41 |
| 5.4 CONSOLIDAÇÃO DO POTENCIAL TÉCNICO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU | 42 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 43 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 45 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| <i>Tabela 1 - Composição Média e Produção de RSU</i> | 12 |
| <i>Tabela 2 Destino dos RSU em diversos países (valores arredondados)</i> | 15 |
| <i>Tabela 3 Destinação típica e quantidade dos RSU no Brasil</i> | 15 |
| <i>Tabela 4 Quantidade de Municípios por tipo de destinação em 2012</i> | 16 |
| <i>Tabela 5 Percentual de destinação de RSU por região em 2012</i> | 16 |
| <i>Tabela 6 Composição típica do biogás</i> | 22 |
| <i>Tabela 7 Poder calorífico de materiais encontrados em RSU (kcal/kg)</i> | 25 |
| <i>Tabela 8 Contaminantes e Impactos</i> | 28 |
| <i>Tabela 9 Contaminantes e Tratamento</i> | 29 |
| <i>Tabela 10 Índices de reciclagem de embalagens PET e latas de alumínio</i> | 32 |
| <i>Tabela 11 Indicadores de Energia Total Economizada por reciclável (MJ/kg)</i> | 34 |
| <i>Tabela 12 Indicadores de Energia Elétrica Economizada por reciclável (kWh/kg) - Matriz EPA</i> | 35 |
| <i>Tabela 13 Indicadores de Energia Elétrica Economizada por reciclável (kWh/kg) - Matriz Brasil</i> | 35 |
| <i>Tabela 14 Produção de CDR e disponibilidade de materiais - (Mt)</i> | 39 |
| <i>Tabela 15 Características Técnicas Consideradas</i> | 39 |
| <i>Tabela 15 Potencial de Geração Elétrica</i> | 39 |
| <i>Tabela 17 Potencial de Produção de Biometano</i> | 40 |
| <i>Tabela 18 Potencial de Conservação de Energia através da Reciclagem</i> | 41 |
| <i>Tabela 19 Consolidação do Potencial Técnico do Aproveitamento Energético dos RSU ktep</i> | 42 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1: Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos</i> | 7 |
| <i>Figura 2: Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos em 2008</i> | 16 |
| <i>Figura 3: Evolução típica da produção de biogás em aterro sanitário</i> | 18 |
| <i>Figura 4: Rotas para utilização de gás de lixo (GDL)</i> | 20 |
| <i>Figura 5: Potência máxima que um aterro recebendo 500 t/d poderia oferecer em 25 anos.</i> | 20 |
| <i>Figura 6: Fluxograma do Processo de Biodigestão Anaeróbica</i> | 23 |
| <i>Figura 7: Maquete digital do ECOPOLO para o Caju - Rio de Janeiro</i> | 27 |

1. INTRODUÇÃO

No ano de 2011, o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados, em todo o planeta, ofertou 90 TWh de eletricidade (World Bank, 2012; CEWEP, 2008; EPA 2007a), equivalente a 83% do consumo residencial brasileiro em 2010 (EPE, 2011a).

As cerca de 200 milhões de toneladas utilizadas, que correspondem a 15% da produção total de lixo (World Bank, 2012) ou o triplo do nacional, demandaram aproximadamente 2.000 usinas. Os principais consumidores desta eletricidade - bem como do calor disponibilizado simultaneamente - foram os EUA (28%), a Alemanha (20%) e o Japão (10%). A Finlândia teve a maior parcela de sua matriz elétrica proveniente desta fonte: 4% (IEA, 2011).

Os resíduos urbanos também ofertaram combustível veicular, o biometano, obtido a partir de tratamento do biogás. Uma frota com mais de 1.000 veículos, entre ônibus urbanos, caminhões de coleta de lixo e carros de passeio, sobretudo na Europa, já demonstraram que esta solução é viável.

Atendendo a demandas internas¹ e externas², a partir de 2007 foram criadas e regulamentadas leis federais instituindo as Políticas Nacionais de Saneamento Básico, de Mudanças Climáticas e de Resíduos Sólidos. Com isto, as esferas de governo brasileiras (Municípios, Estados e a própria União) passaram a ter prazo para a universalização do serviço de saneamento e limitações quanto ao tipo de destinação dos resíduos e às emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa decorrente destas opções. O estabelecimento dessas políticas podem acarretar novos custos para o setor de saneamento, fazendo que este marco legal possa remover a barreira financeira que, até então, é um dos entraves ao aproveitamento energético destes resíduos.

Em virtude da Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelecer que somente os rejeitos possam ser destinados a, no mínimo, aterros sanitários a partir de 2014, foi realizado pela EPE um inventário das alternativas tecnológicas existentes no mundo para seu aproveitamento energético, onde estão consideradas as diferenças decorrentes da cronologia de criação de cada uma delas.

Neste contexto esse primeiro trabalho busca analisar as principais questões da disponibilidade e caracterização dos resíduos sólidos urbanos e as condições técnicas para aproveitamento energético para o mapeamento do potencial de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.

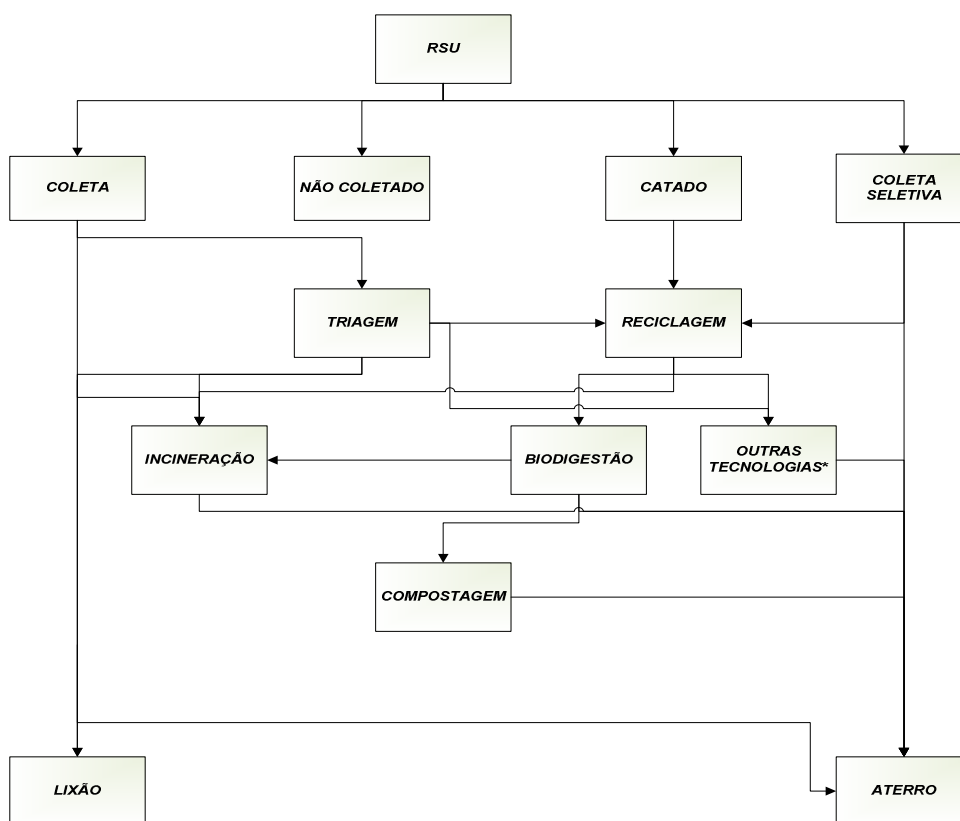
Incineração e processamento biológico são, essencialmente, as duas formas adotadas para ofertar energia elétrica e biocombustível - particularmente no segundo caso -, com a

¹ Enquanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) tramitou por 19 anos no Congresso Nacional, a Política Nacional sobre Mudanças Climáticas (PNMC) mudou a posição do Brasil perante os demais países no mercado internacional de carbono.

² Os custos incorridos pela Comunidade Europeia com base nas Diretivas sobre a destinação do lixo e limitação de emissões poderiam acarretar disputas comerciais embasadas no argumento de “dumping ambiental”.

drástica redução de área necessária para aterros sanitários. Dentro de uma visão mais abrangente, o aproveitamento energético dos RSU compreende também a reciclagem do material coletado que a isto se presta, como papel e papelão, vidros, plásticos, borrachas e metais. Deve-se considerar que a reciclagem permite a substituição de insumos para cuja produção há, normalmente, grande consumo de energia. Por aliviar pressões de demanda de matérias-primas, inclusive recursos naturais, e de energia, a reciclagem se constitui, em princípio, em uma forma ambientalmente eficiente de aproveitamento energético dos RSU. O fluxograma abaixo representa a maioria das opções de destinação do RSU.

Figura 1: Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos



Elaboração Própria

*Complementarmente, abrange as tecnologias de compostagem aeróbica, hidrólise ácida, gaseificação, pirólise, craqueamento catalítico, tratamentos mecânico-biológicos, arco de plasma, ciclos combinados e o Ecopolo, além de alguns conceitos ainda não postos em prática em escala comercial. Como grande parte das tecnologias mais recentes só conta com poucas usinas em operação, seus dados acabam sendo pouco representativos para extrapolações.

Em qualquer caso, é certa a necessidade de eliminar os lixões e, com vistas ao aproveitamento energético do lixo urbano, de se dispor de informações sobre a composição do RSU a ser utilizado, que se caracteriza como uma das restrições a serem superadas. Sendo assim, o principal desafio é, à luz dos dados sobre evolução da quantidade e da composição disponíveis, estimar a composição do “mix” tecnológico que poderia realizar o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos no decorrer do horizonte analisado.

2. RESÍDUOS URBANOS NO BRASIL

O termo resíduo engloba os diversos artefatos utilizados pelo homem que tenham perdido sua utilidade para cumprir o fim a que foram destinados inicialmente. Os resíduos podem ser sólidos e líquidos. Aqui serão tratados apenas os resíduos sólidos.

De acordo com a Norma Brasileira NBR 10.004, resíduos sólidos são aqueles “(...) nos Estados sólidos e semissólidos 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).

Os resíduos sólidos podem ser classificados segundo sua origem, ou de acordo com suas características físicas. Quanto à origem, podem ser:

- *Urbanos*: provenientes de residências, atividades comerciais, varrição de ruas, podas de árvores e similares;
- *Industriais*: gerados pelos processos de transformação; ou
- *Agrícolas*: decorrentes da atividade produtiva do setor primário.

Quanto às características físicas, podem ser:

- *Materiais inertes*: vidros, metais, terras e cinzas e restos inertes; ou
- *Materiais combustíveis*: papéis, cartões, plásticos, madeira, gomas, couro, alimentos e outros.

2.1 O Contexto e Mercado de Resíduos Urbanos no Brasil

A lei nº 12.305/2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) depois de mais de dezenove anos de tramitação no Congresso Nacional, sendo regulamentada em 23 de dezembro de 2010 através do Decreto nº 7.404. Dentre as principais ações introduzidas pelo novo marco regulatório do setor, cabe ressaltar o conceito de Responsabilidade Compartilhada, que torna todos os entes integrantes da cadeia produtiva e de consumo como solidários quanto à etapa pós-consumo. No intuito de reduzir parte dos custos que esta exigência representará, houve a adoção do conceito de Logística Reversa, estimulando a utilização de veículos que tenham cumprido a entrega, mesmo que parcialmente, desde que isto não comprometa a qualidade.

Outro ponto importante é a Proibição de Lixão a partir de 2014, o que exigirá investimento em fiscalização e em obras para instalação de sistemas capazes de tratar os resíduos e,

quando não houver mais viabilidade técnica, ambiental e econômica para tal, dispor os rejeitos em aterros sanitários. Aqui é importante realçar o fato de que somente os rejeitos poderão ser dispostos em aterros sanitários. Considerando que as tecnologias de aproveitamento dos resíduos cumprem os requisitos técnico e ambiental, a definição de rejeito passa a depender da viabilidade econômica - que tende a ser função da quantidade e composição do resíduo disponível. O não cumprimento destas condicionantes acarreta multa de R\$ 50 a R\$ 500 a cada reincidência³.

O artigo 37 do Decreto 7.404 estabelece a criação de um Grupo de Trabalho entre os Ministérios de Meio Ambiente, Minas e Energia e Cidades para disciplinar o aproveitamento energético por tecnologias diferentes do aproveitamento dos gases gerados na biodigestão e da recuperação do biogás disponível nos aterros, proveniente da decomposição da matéria orgânica.

Por fim, para estabelecer como realizar estas mudanças foram instituídos os Planos de Resíduos, que deverão ser elaborados por todas as esferas do poder executivo: federal, estadual e municipal. O Plano federal deverá ser de longo prazo (para 20 anos) e refeito a cada cinco anos. O estadual deverá atentar para o médio prazo, avaliando a década vindoura a cada dois anos, enquanto o municipal será de curto prazo, revendo anualmente o cenário quinzenal.

A versão do Plano Federal, após audiências públicas disponibilizada na internet em fevereiro de 2012, apresenta até três cenários para o atendimento das metas estabelecidas, que envolvem a recuperação de lixões, a disposição final ambientalmente adequada de rejeitos em todos os Municípios, a redução dos resíduos recicláveis secos dispostos em aterros e inclusão de catadores, a redução dos resíduos sólidos úmidos em aterros e recuperação de gases em aterros, etc (MMA, 2012).

De acordo com a 3ª Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada pelo IBGE no ano 2008, eram coletadas nesse ano no Brasil, diariamente, em torno de 183,5 mil toneladas dos RSU, contra 125 mil toneladas em 2000, de acordo com a 2ª PNSB, que correspondiam a 80% do total gerado⁴. A disponibilidade de resíduo urbano brasileiro é inferior à quantidade processada internacionalmente, enquanto sua composição é mais rica em restos alimentares, o que representa menor poder calorífico.

³ O Decreto 7.404/2010 no Artigo 84, inciso XVII, parágrafo 3º estabelece: "No caso de reincidência no cometimento da infração prevista no § 2o, poderá ser aplicada a penalidade de multa, no valor de R\$ 50,00 (cinquenta reais) a R\$ 500,00 (quinhentos reais)." Não definindo claramente a forma de aplicação da multa.

⁴ Conforme boletim sobre resíduos sólidos (Boletim 1) do Instituto Brasileiro de Administração Municipal - IBAM, 2004, estima-se que, em 2000, eram "gerados no país perto de 157 mil toneladas de lixo domiciliar e comercial por dia. Entretanto, 20% da população brasileira ainda não contam com serviços regulares de coleta".

A principal destinação verificada pelas PNSB do material coletado tem sido aterros controlados e sanitários, contudo grande parte ainda é enviada para áreas popularmente conhecida como lixões. Em pouquíssimos casos são aplicadas outras soluções, que poderiam trazer benefícios adicionais para as localidades. Isto se dá, provavelmente por razões financeiras, uma vez que tais soluções normalmente significam maiores investimentos - ainda que a movimentação financeira do setor, segundo a Associação Nacional das Empresas de Limpeza Pública, tenha atingido R\$ 21,2 bilhões em 2011 e R\$ 22,7 bilhões em 2012 (ABRELPE, 2012).

Em quaisquer das destinações que usualmente são dadas para RSU (aterros ou lixões), o monitoramento continuado das áreas de disposição é necessariamente uma preocupação recorrente das administrações municipais, na medida em que nessas áreas são gerados efluentes líquidos e gasosos que, em benefício das condições de saneamento urbano, demandam tratamentos específicos e por prazos superiores ao triplo do tempo de operação para recebimento de resíduos.

Nas principais cidades brasileiras, os vazadouros utilizados estão em fase de encerramento de operação. Simultaneamente à construção de novos aterros e evidenciando o reconhecimento que a solução tradicional apenas transfere o problema para alguns anos à frente sem efetivamente enfrentá-lo, essa situação tem motivado a discussão sobre a aplicação de tecnologias que reduzam a quantidade de lixo a dispor e ainda permitam benefícios adicionais como a obtenção de receitas pela comercialização de coprodutos gerados, como energia elétrica, térmica, biocombustíveis, recicláveis, adubos naturais ou cinzas para a construção civil.

No Município de São Paulo, a geração de energia elétrica nos dois maiores aterros da cidade, Bandeirantes e São João, já é uma realidade. Estão em operação duas termelétricas, com 20 e 24,8 MW de potência instalada, respectivamente. Tomando como referência um fator de capacidade de 80% e tendo em conta o atual consumo médio do consumidor residencial brasileiro, em torno de 150 kWh/mês, a geração de energia nesses dois aterros é suficiente para atender ao consumo de cerca de 170 mil residências, ou o equivalente a uma população entre 500 e 600 mil habitantes. Em Minas do Leão (RS) será inaugurada uma planta de 6,5 MW e na região metropolitana de Belo Horizonte (MG) outra de 6 MW, ambas também a gás de aterro.

Ao lado dos evidentes benefícios ambientais, sanitários e sociais que proporciona o aproveitamento energético dos RSU já apresenta hoje alternativas tecnológicas maduras. Aliás, as tecnologias disponíveis nem são tão recentes assim, visto que tiveram início nos anos 1960 as primeiras termelétricas implantadas na Europa acionadas por RSU, enquanto as pioneiras nos Estados Unidos e no Japão datam dos anos 1980.

Embora o aproveitamento energético de resíduos urbanos não se apresente com potencial de escala suficiente para sustentar uma estratégia de expansão da oferta de energia elétrica ou de biocombustível do país no longo prazo, o mesmo é elemento que deve ser considerado importante de uma estratégia regional ou local que transcende a dimensão energética. Na realidade compõe um arranjo de políticas de cunho social (saúde,

saneamento, etc.), regional (desenvolvimento local) e ambiental (mitigação de impactos dos resíduos).

2.2 Caracterização e Produção de RSU no Brasil

A base de dados censitários sobre o tema é a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada pelo IBGE em 1989, 2000 e 2008, que divulga valores referentes à produção de lixo no país. Até que os resultados da terceira pesquisa sejam disponibilizados no nível municipal, não é possível estabelecer uma tendência a partir desta base.

Existem, ainda, duas alternativas para projetar o potencial energético dos RSU: o total do país, considerado num único ponto, e a produção descentralizada de cada Município. Ambas contam com vantagens e desvantagens. Ao considerar todo o lixo do país num mesmo ponto, a partir dos dados da II PNSB atualizada, reduzem-se os efeitos da dinâmica demográfica - homogeneizada pela escala nacional - mas estima-se o limite superior do potencial. A escolha pela produção descentralizada encerra a aceitação de premissas nacionais que, a rigor, deveriam ser desenvolvidas para cada localidade, mas permite identificar o limite superior do potencial das soluções isoladas. Este intervalo pode ser preenchido pelos Municípios abaixo da escala que consigam integrar consórcios, tanto os que associarem-se entre si, de maneira a atingir o patamar requerido, quanto os que passarem a fornecer àqueles com escala - que deverão ampliá-la.

Neste trabalho foram aplicadas as duas metodologias de maneira complementar, com o intuito de reduzir os defeitos e aumentar as qualidades. Para tanto, as projeções foram realizadas para o lixo nacional e para as cidades com base nos dados de 2000 - uma vez que a 3ª PNSB, com dados de 2008⁵, só divulgou resultados nacionais e estaduais, não permitindo realizar a atualização por Municípios -, utilizando as mesmas taxas. Em seguida, foi realizada a avaliação sobre o potencial do aproveitamento dos RSU perante o total nacional. Identificou-se, então, quantas cidades teriam capacidade de dispor de usinas individuais e qual a representatividade dos RSU a ser utilizado nestas plantas modulares sobre o total nacional. Este fator foi considerado como o limite superior, neste momento, do potencial de oferta de energia a partir dos RSU.

Por isto, foi utilizada a base amostral do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), que dispõe de dados entre os anos de 2002 e 2006 de todas as cidades com mais de 850.000 habitantes - correspondendo a 40,5 milhões de habitantes urbanos -, 86% das com mais de 500.000 habitantes, que equivale a 74,5 milhões de habitantes urbanos e 57,2 milhões de habitantes urbanos metropolitanos - ainda que a

⁵ A diferença entre o dado obtido na previsão, de aproximadamente 60 Mt/a, e o dado disponibilizado pela III PNSB, de 66 Mt/a, equivale a cerca de 10% para baixo. Com isto, pode-se assumir que a estimativa de potencial está subestimada.

representatividade dos pequenos Municípios esteja comprometida, o montante analisado equivale a cerca de 90% da população brasileira. Mesmo assim, tais dados devem ser analisados com certa cautela, uma vez que são encontrados valores nulos ou excessivamente elevados em alguns Municípios, o que demandou os seguintes ajustes: eliminação dos Municípios com valores superiores aos da cidade de São Paulo e reprodução dos valores do ano anterior para os Municípios que não dispusessem de dados. Em seguida, foram obtidas as somas das produções e calculada a produção per capita dos RSU na amostra. Como não há dados de censo para o ano base trabalhado, 2010, foi realizada uma projeção de disponibilidade dos RSU tomando por base as seguintes premissas descritas.

A composição do lixo brasileiro é estimada 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 35% de recicláveis (18% de papéis, 12% de plásticos, 3% de vidros e 2% de metais). A partir destes valores foram realizadas projeções atentando para o crescimento populacional e aumento da renda per capita, levando em consideração que dado o aumento da renda per capita haverá uma mudança na composição dos resíduos gerados, como acontece hoje em países de maior renda⁶. Quanto ao Teor de umidade no lixo brasileiro, atualmente na faixa de 60% sobre a parcela de restos alimentares, foi considerado o mesmo. Quanto à produção foi utilizado um fator de produção per capita para o ano base de 2010 de 0,89kg/dia.

Tabela 1 - Composição Média e Produção de RSU

| | | <i>Papel</i> | <i>Plástico</i> | <i>Vidro</i> | <i>Metal</i> |
|-----------------------------|-------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
| <i>Matéria Orgânica</i> | 59,0% | - | - | - | - |
| <i>Recicláveis</i> | 36,0% | 18,5% | 12,3% | 3,1% | 2,1% |
| <i>Outros</i> | 5,0% | - | - | - | - |
| <i>Produção de RSU [Mt]</i> | 62,87 | 11,63 | 7,76 | 1,94 | 1,32 |

Fonte: Elaboração própria.

O trabalho na base de dados de disponibilidade e composição dos resíduos sólidos urbanos é extremamente dependente da qualidade e disponibilidade de dados, fato esse que ainda apresenta diversas deficiências para o caso brasileiro. Neste primeiro trabalho de potencial técnico será somente apresentado para o ano base agregado em nível nacional, assim como a disponibilidade de RSU.

A disponibilização de potencial técnico regionalizado, por estado o por município também depende de uma base de dados consistente, não somente com a disponibilidade de resíduos mais com a composição (através da gravimetria).

⁶ Essas projeções serão apresentadas detalhadamente em estudo posterior que analisa o potencial de aproveitamento energético de resíduos urbanos para o longo prazo.

3. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS URBANOS

O aproveitamento energético dos RSU já apresenta hoje alternativas tecnológicas maduras. Algumas das tecnologias disponíveis e diferentes de aterros datam da década de 1960, dentre as quais as primeiras usinas implantadas na Europa, na China e na Índia.

Os principais energéticos que podem ser obtidos através do aproveitamento dos RSU são: o biogás, de aterro e conhecido como gás de lixo (GDL) ou de digestão anaeróbica, e que ainda pode sofrer um processo de purificação para ser utilizado como substituto (ou complemento) ao gás natural, que é chamado de biometano ou gás natural renovável (GNR) - por atender à Resolução 16 (ANP, 2008); a eletricidade, gerada a partir da queima do biogás ou da incineração⁷; e o calor, utilizado nos próprios processos ou podendo ser exportado caso haja demanda, inclusive de frio.

Incineração e processamento biológico são as duas formas de aproveitamento energético dos RSU que reduzem drasticamente a área necessária para aterros sanitários mais utilizadas internacionalmente. No primeiro caso, há riscos ambientais, caracterizados nas emissões de dioxinas e furanos⁸. Por outro lado, ao nível do conhecimento atual, os processos biológicos agridem menos a natureza, mas é preciso conseguir escoar a produção de adubo ou composto orgânico.⁹

Mas, além dessas alternativas, há outros caminhos possíveis de serem seguidos com vistas ao aproveitamento energético dos RSU. Nesta seção, discutem-se os aspectos mais relevantes das quatro principais rotas tecnológicas hoje disponíveis para a geração de energia elétrica a partir dos RSU, assim como para o aproveitamento do biometano para motores ciclo diesel, a partir da tecnologia *dual-fuel* desenvolvida pela Robert Bosch GmbH, que permite utilizar até 90% gás e 10% diesel, ou seus sucedâneos¹⁰. Com isto, o biogás tratado passou a ser atraente para uso em transportes no próprio setor de saneamento. Em todos os casos elétricos é possível aplicar o conceito de cogeração, para o que é requerido identificar localizações adequadas para viabilizar o consumo térmico. Quando há aplicação do conceito de ciclo combinado, parte deste potencial já é utilizado no ganho de eficiência da conversão elétrica.

⁷ Existem ainda outras possibilidades de geração de energia elétrica como a gaseificação e ciclo combinado integrado, a queima através do plasma e através de energéticos derivados da pirólise.

⁸ Nos últimos anos, os avanços no desenvolvimento de sistemas de filtros capazes de reduzir substancialmente essas emissões recolocaram a alternativa na agenda das discussões. Evidência disso é o número crescente de licenciamentos que vêm sendo concedidos na Alemanha para usinas que utilizam a técnica da incineração.

⁹ Por esta rota tecnológica, a parcela orgânica do RSU é convertida, através da compostagem, em adubo orgânico, que requer, contudo, processamento adequado de modo a não agir como vetor de contaminações. Quando anaeróbico, o processo gera metano que, depois de separado dos outros componentes do biogás, pode ser utilizado para as mesmas aplicações do gás natural.

¹⁰ Os motores *dual fuel* diesel-gás natural, são motores diesel adaptados com um segundo sistema de injeção para gerenciar o GNV e o controle de ar, sem a necessidade de alteração nos motores diesel. Esse sistema pode vir de fábrica, mas existem kits fornecidos para veículos usados.

O equacionamento adequado do tratamento a ser dado ao lixo gerado em uma localidade ou região requer diversas informações, algumas delas fundamentais. Exemplos dessas informações são: (i) quantidade de lixo produzida em cada localidade, produção per capita; (ii) composição do lixo (e o que isto representa em termos de desenvolvimento); (iii) onde e como o lixo é disposto e qual a disponibilidade de novas áreas; (iv) quais os impactos ambientais e sociais que os resíduos causam; (v) quais as oportunidades que o (re) aproveitamento dos resíduos pode viabilizar.

Com estes elementos levantados é possível elaborar um Plano Diretor para a gestão dos resíduos com vistas a torná-los insumo para novos processos. E as diversas rotas existentes para destinação e disposição final dos RSU podem ser hierarquizadas. Quando baseada no critério de resíduo final mínimo, esta hierarquia é conhecida como Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos ou pela sigla SIGRS. Um SIGRS adequado permite que se identifique a melhor destinação para os resíduos sólidos. As alternativas de destinação são basicamente quatro, a saber:

- *Reciclagem*: aproveitamento dos restos de papéis, vidros, plásticos e metais que não estejam, contaminados para servir de insumo na fabricação de novos materiais;
- *Compostagem*: aproveitamento dos restos alimentares e outros componentes orgânicos (papéis, madeiras, poda de árvores e jardins) para produção de adubo natural;
- *Recuperação energética*: aproveitamento energético dos resíduos;
- *Aterro sanitário*: disposição final dos resíduos imprestáveis em local apropriado, com garantias sanitárias.

Conforme Serôa da Motta e Chermont (1996, apud Oliveira, 2004), essas rotas devem ser priorizadas na ordem acima enunciada, convindo, naturalmente, que haja precedência para procedimentos que resultem na redução da geração de lixo na fonte e na reutilização do material produzido. Contudo, esta não é ainda a realidade no tratamento dos RSU, como se pode concluir do exame da Tabela 2.

Tabela 2
Destino dos RSU em diversos países (valores arredondados)

| País | Reciclagem | Compostagem | Recuperação energética ⁽¹⁾ | Aterro sanitário |
|----------------|--------------------|-------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Holanda | 39% | 7% | 42% | 12% |
| Suíça | 31% | 11% | 45% | 13% |
| Dinamarca | 29% | 2% | 58% | 11% |
| Estados Unidos | 24% | 8% | 13% | 55% |
| Austrália | 20% | <<1% | <1% | 80% |
| Alemanha | 15% | 5% | 30% | 50% |
| Japão | 15% | - | 78% | 7% |
| Israel | 13% | - | - | 87% |
| França | 12% ⁽²⁾ | n.i. | 40% | 48% |
| BRASIL | <8% | 2% | - | >90%⁽³⁾ |
| Reino Unido | 8% | 1% | 8% | 83% |
| Grécia | 5% | - | - | 95% ⁽³⁾ |
| Itália | 3% | 10% | 7% | 80% |
| Suécia | 3% | 5% | 52% | 40% |
| México | 2% | - | - | 98% ⁽³⁾ |

(1) Basicamente incineração.

(2) As estatísticas incluem a compostagem.

(3) Incluem aterros controlados e lixões, como apresentado na tabela 2.

(4) n.i. = Não Informado.

Fontes: CEMPRE, TetraPak Américas, Nolan-ITU Pty (2002), EPA 2007.

Percebe-se que nos países onde a destinação em aterro é reduzida, as outras rotas convivem em função da composição dos resíduos.

Tabela 3
Destinação típica e quantidade dos RSU no Brasil

| ANO | | 1989 | 2000 | 2008 |
|--|--------------------------------|-------|-------|-------|
| Produção dos RSU (Mt/a) | | 20 | 45 | 67 |
| Unidade de destino final do lixo coletado (%) | Vazadouro a céu aberto (lixão) | 49,27 | 21,16 | 17,61 |
| | Vazadouro em áreas alagadas | 0,30 | 0,10 | 0,02 |
| | Aterro controlado | 21,90 | 37,03 | 15,68 |
| | Aterro sanitário | 23,33 | 36,18 | 64,59 |
| | Estação de compostagem | n.i. | 2,87 | 0,63 |
| | Estação de triagem | 3,00 | 0,99 | 1,20 |
| | Incineração | n.i. | 0,45 | 0,03 |
| | Locais não fixos | n.i. | 0,54 | n.i. |
| | Outra | 2,50 | 0,69 | 0,25 |

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE (1989, 2000, 2008). n.i. = Não Informado.

Tabela 4
Quantidade de Municípios por tipo de destinação em 2012

| | <i>Norte</i> | <i>Nordeste</i> | <i>Centro-Oeste</i> | <i>Sudeste</i> | <i>Sul</i> | <i>BRASIL</i> |
|--------------------------|--------------|-----------------|---------------------|----------------|------------|---------------|
| <i>Aterro Sanitário</i> | 90 | 450 | 157 | 814 | 702 | 2.213 |
| <i>Aterro Controlado</i> | 110 | 505 | 149 | 643 | 366 | 1.773 |
| <i>Lixão</i> | 249 | 839 | 160 | 211 | 120 | 1.579 |
| <i>BRASIL</i> | 449 | 1.794 | 466 | 1.668 | 1.188 | 5.565 |

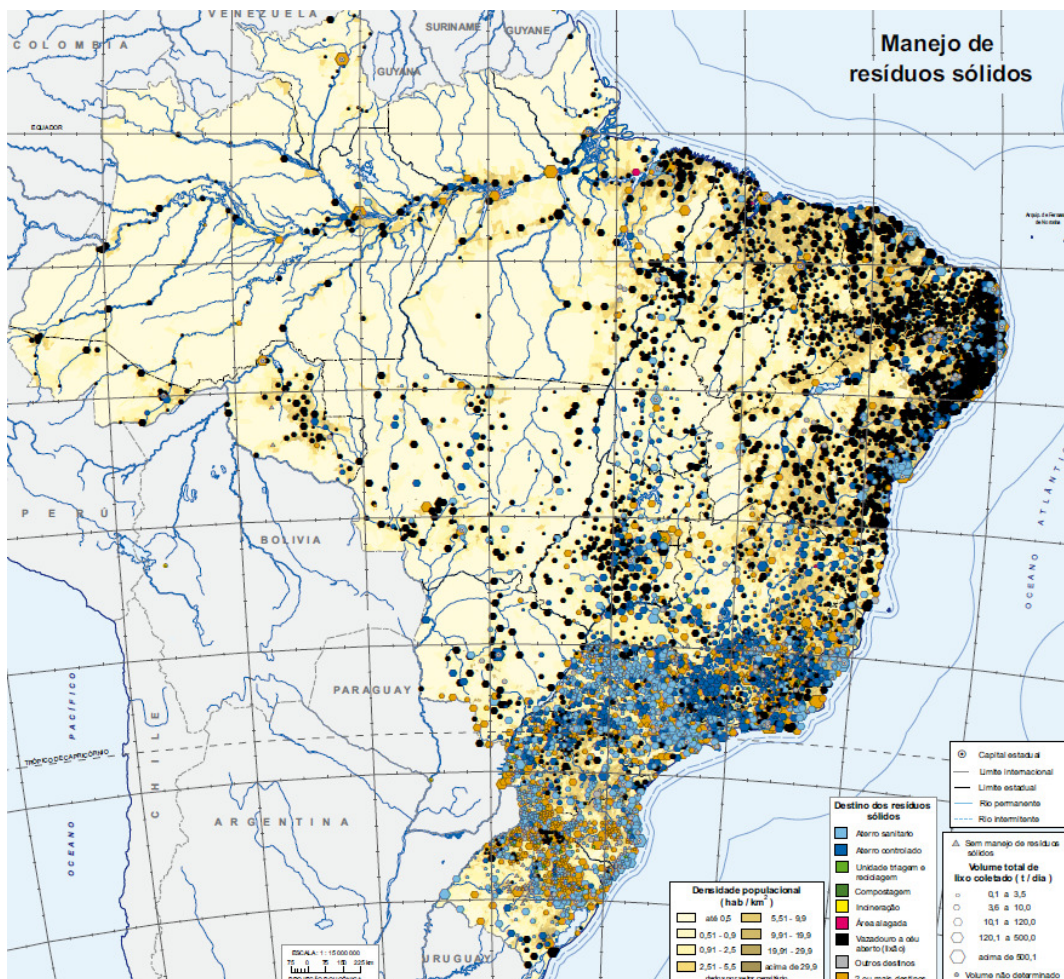
Fonte: ABRELPE (2012)

Tabela 5
Percentual de destinação de RSU por região em 2012

| <i>Destinação</i> | <i>Norte</i> | <i>Nordeste</i> | <i>Centro-Oeste</i> | <i>Sudeste</i> | <i>Sul</i> |
|-------------------|--------------|-----------------|---------------------|----------------|------------|
| <i>Aterro</i> | 35,1% | 35,4% | 29,4% | 72,2% | 70,3% |
| <i>Controlado</i> | 29,8% | 33,0% | 48,1% | 17,3% | 18,2% |
| <i>Lixão</i> | 35,1% | 31,6% | 22,5% | 10,5% | 11,5% |

Fonte: ABRELPE (2012)

Figura 2: Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos em 2008



Fonte: IBGE (2011)

3.1 Aterros Sanitários e Produção de Biogás

A maior parte dos empreendimentos realiza o aproveitamento do gás produzido espontaneamente pela decomposição nos vazadouros em motores ciclo Otto ou, após limpeza do biogás, em turbinas. Apesar de acoplada a um sistema sanitário existente, o que reduz custos, este tipo de usina convive com a incerteza quanto à disponibilidade do combustível - função das emissões fugitivas que naturalmente ocorrem nos vazadouros, visto que as grandes áreas utilizadas impossibilitam a vedação total e a curva típica de oferta de gás dificulta o dimensionamento do empreendimento elétrico.

A tecnologia de aproveitamento do gás de lixo (GDL), ou biogás produzido nos aterros (*landfill gas*), 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 da fração orgânica dos RSU, por ação de micro-organismos que transformam os resíduos em substâncias mais estáveis, como dióxido de carbono (CO_2), água, gás metano (CH_4), gás sulfídrico (H_2S), 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. Assim, sua simples queima representa um benefício ambiental perante sua emissão. Em adição, o aproveitamento energético também evita a emissão decorrente da queima de combustível fóssil que poderia ser utilizado para ofertar a mesma quantidade de energia que o biogás.

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

- *Fase aeróbica*: é produzido o gás CO_2 , porém é alto o conteúdo de N_2 , que sofre declínio nas passagens para as 2ª e 3ª fases.
- *Esgotamento de O_2* : resulta em um ambiente anaeróbico com grandes quantidades de CO_2 e um pouco de H_2 produzido.
- *Fase anaeróbica*: começa a produção de CH_4 , com redução na quantidade de CO_2 produzido.
- *Fase final*: produção quase estável de CH_4 , CO_2 e N_2 .

As condições do aterro, tais como a composição do resíduo, o material de cobertura, o projeto e o Estado anaeróbico, determinam a duração das fases e o tempo de geração do gás, que podem ainda variar com as condições climáticas locais. A simulação de produção de metano em um aterro pode ser realizada através do modelo do IPCC (2006), o *waste model*.

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, para coibir explosões e evitar a emissão de metano para a atmosfera, mitigando-se um maior impacto ambiental sobre as mudanças climáticas.

O objetivo de um projeto de aproveitamento energético de GDL é convertê-lo em alguma forma de energia útil, como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular, ou, ainda, para abastecer gasodutos com gás de qualidade. Existem várias tecnologias que podem ser usadas para maximizar o valor do GDL, através das diversas formas de utilização. As mais importantes são:

- Uso direto do gás de médio poder calorífico;
- Produção de energia/cogeração;
- Venda de gás - similar ao gás 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 casos, o gás é transportado por gasoduto diretamente para um consumidor próximo para ser usado em equipamentos de combustão novos ou já existentes, em substituição, ou como suplemento, do combustível tradicionalmente utilizado na operação. Observa-se que é necessária a remoção de condensado e um tratamento de filtragem, impondo-se eventual modificação no equipamento de combustão existente.

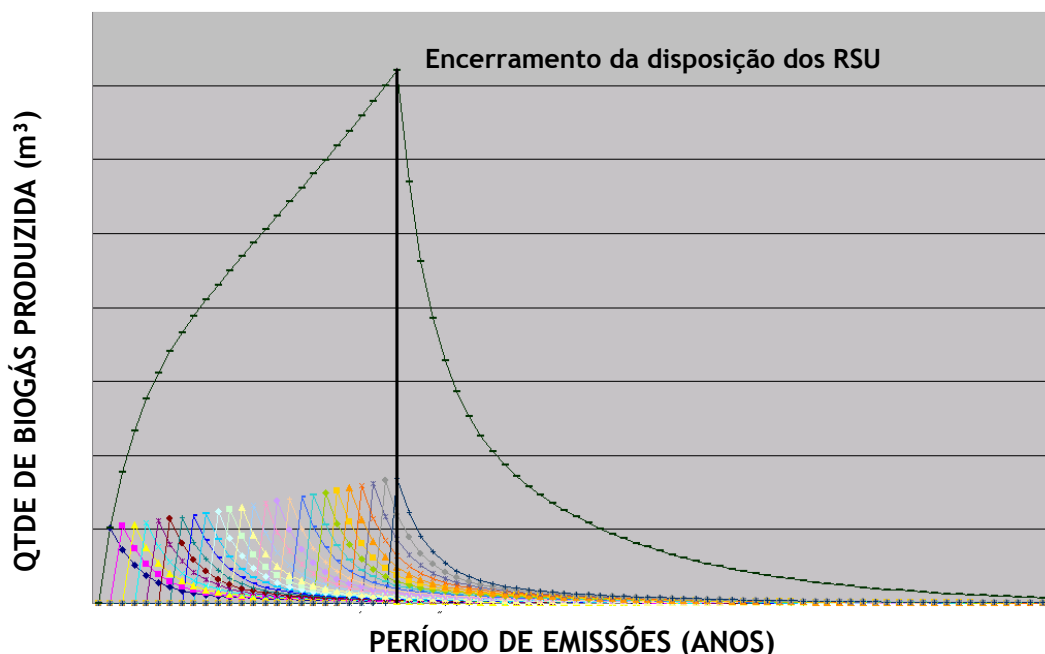
O biogás coletado e filtrado pode também ser utilizado para a geração de eletricidade, em geral alimentando grupos motor-gerador de combustão interna de pequena potência, adequados à queima de gás pobre. Mesmo alimentados com combustível de baixo poder calorífico, o rendimento desses geradores pode superar 35%.

O dimensionamento de usinas para o aproveitamento do gás coletado em aterro sanitário para geração de energia elétrica não é trivial e, mais do que outras fontes, encerra forte compromisso técnico-econômico em razão da curva declinante de oferta da energia primária.

Diferentemente dos processos de geração de energia através da digestão anaeróbica e da incineração, o aproveitamento do gás de aterro não traz redução significativa do volume de lixo acumulado, de modo que a deposição contínua de resíduos acaba por esgotar a capacidade de acumulação do aterro sanitário.

Ao longo do tempo de acumulação do lixo a produção de biogás é crescente, porém, uma vez cessada a deposição, a produção entra em declínio mais ou menos acentuado dependendo da composição do lixo depositado. Esse comportamento da oferta do combustível, que decorre da soma das ofertas de gás do material depositado a cada ano - cujas emissões ocorrem em tempos diferentes - é ilustrado na Figura 3, em que deve ser considerada a evolução natural da quantidade dos RSU disposto em função do crescimento vegetativo e do poder aquisitivo.

Figura 3: Evolução típica da produção de biogás em aterro sanitário



Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC (2006).

O aproveitamento econômico do gás para a geração de energia elétrica fica limitado a uma “janela de tempo” relativamente pequena (até 30 anos) em relação à duração das emissões. Mesmo durante essa “janela”, nem todo o gás produzido é aproveitável para a geração em razão de limitação econômica da potência das unidades geradoras. Necessário salientar que a queima do gás do lixo em grupos motor-gerador não elimina a necessidade de filtragem dos gases de exaustão para a redução da emissão de poluentes, nem a instalação de “flares” para queima simples do gás excedente.

Existe ainda a possibilidade de cogeração 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 e outras necessidades do processo industrial, além de poder ser transportada por tubulação para uma instalação industrial ou comercial próxima, obtendo-se eventualmente 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 táxis¹¹.

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 aproveitamento do GDL tem as seguintes vantagens:

- Redução dos gases de efeito estufa;

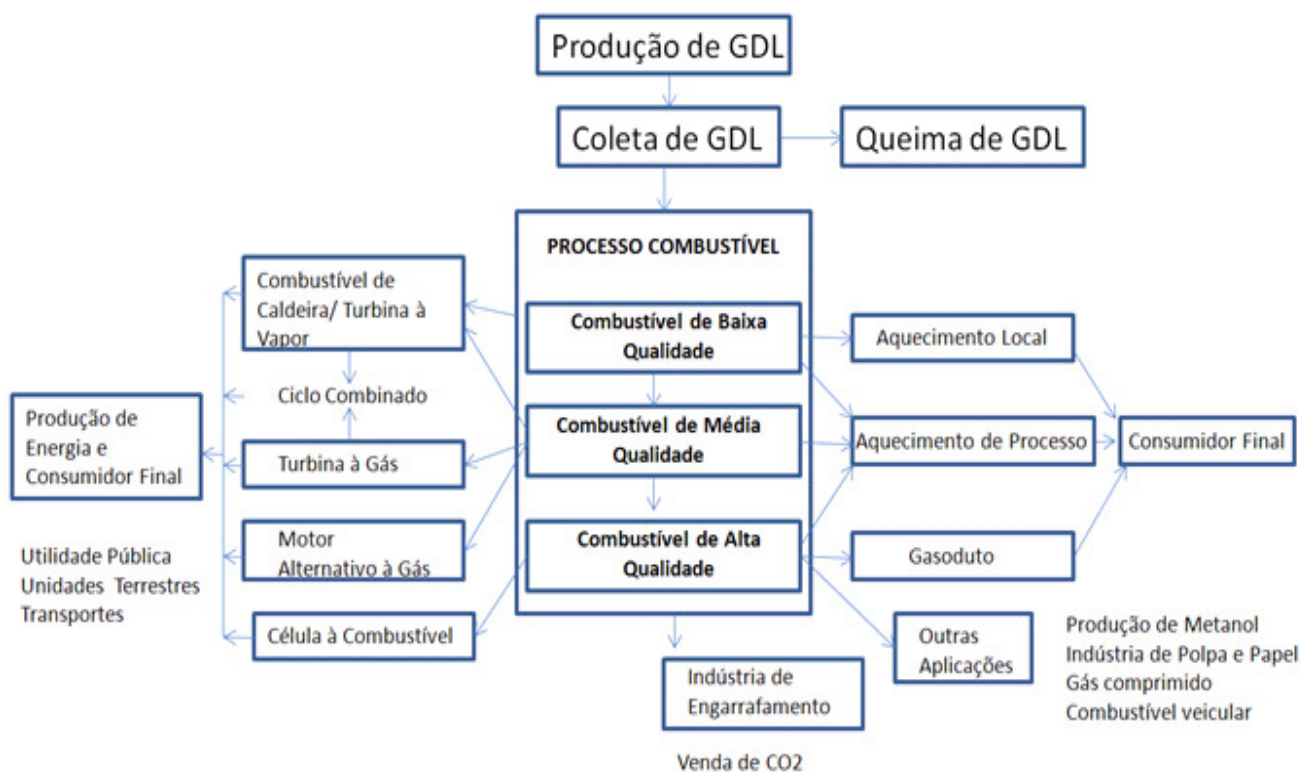
¹¹ Na década de 1980, a Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB) produziu GNV a partir de tratamento do biogás extraído do antigo aterro do Caju via lavagem, desenvolvido em parceria com a Companhia Estadual de Gás (CEG) e com financiamento da Financiadora de Estudos e Projetos (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.

- Receita adicional para aterros existentes (energia + créditos de carbono);
- Utilização para geração de energia ou como combustível;
- Redução da possibilidade (remota) de ocorrência de autoignição e/ou explosão pelas altas concentrações de metano.

E como desvantagens:

- Recuperação parcial do gás em aterros, sobretudo naqueles cuja construção não foi projetada para este fim, em que a recuperação máxima muitas vezes se limita a 50%;
- Alto custo da planta de aproveitamento do gás, decorrente do tratamento necessário;
- Decaimento da disponibilidade de combustível ao longo da vida útil do projeto.

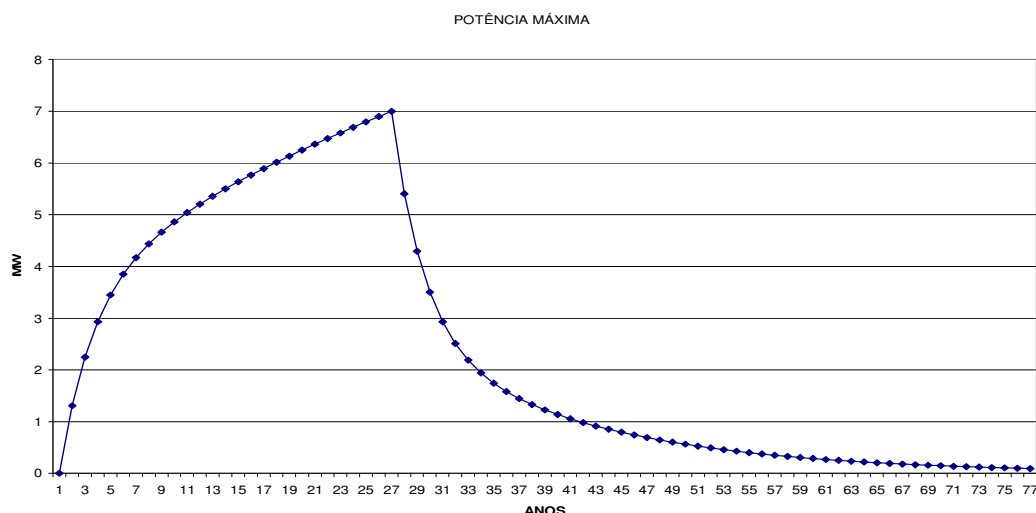
Figura 4: Rotas para utilização de gás de lixo (GDL)



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 5 é ilustrado um exemplo deste tipo de aproveitamento, onde foi considerada a produção inicial de 500 t/d - crescendo 1% ao ano durante os 25 anos de vida útil (IBGE, 2007) -, com composição fixa de 60% de matéria orgânica, 15% de papel e papelão, 5% de panos, 1% de madeira e 20% de outros materiais não geradores de metano (plásticos, vidros, metais etc.). A conversão foi realizada considerando recuperação de 80% do gás gerado, eficiência de 35% e fator de capacidade de 92%. A Figura 5 mostra o potencial.

Figura 5: Potência máxima que um aterro recebendo 500 t/d poderia oferecer em 25 anos.



Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se que o potencial de oferta aumenta, praticamente na mesma velocidade, até o sexto ano - quando se aproxima de 4 MW. A partir deste ponto, o aumento da oferta diminui de velocidade até atingir o ponto máximo de 7 MW dois anos após o encerramento do aterro, quando se inicia uma queda vertiginosa - até 2 MW, sete anos depois. Estas condições requerem o esclarecimento sobre a dificuldade técnica de explorar todo o gás disponibilizado, visto que seria necessário instalar um sistema de armazenamento e, em seguida, definir a alternativa de consumo - entre geração elétrica, combustível veicular e fornecimento industrial - para definir o total do investimento e possibilitar a análise de viabilidade.

Ademais, ao encerrar um aterro, além da exigência de monitorá-lo por décadas, dada a emissão de gases combustíveis - mesmo que sua escala impeça o aproveitamento energético economicamente viável, requerendo o funcionamento de um “flare” - faz-se necessário identificar novas áreas para dispor o lixo.

Historicamente, em locais onde o custo de oportunidade da terra mostrou-se elevado e a população não concordou com a instalação de aterros em sua vizinhança, a solução foi buscar tecnologias que reduzissem a quantidade de lixo a ser disposta. O primeiro resultado obtido foi a incineração, que reduz em 92%, em média, a quantidade de material a ser disposto e, pelo aspecto energético, garante uma quantidade praticamente constante de energia térmica - que pode ser convertida em eletricidade. Por isto, atualmente, existem por volta de 650 usinas que utilizam os gases quentes em uma caldeira de recuperação acoplada à turbina a vapor.¹² Ressalta-se que, ao término da vida útil do empreendimento, que já é superior à do aterro, é possível promover uma reforma ou implantar sistema atual, sem demandar troca de local e mudança de logística, além de evitar novo custo de oportunidade de outras áreas. A título ilustrativo, as 500 toneladas

¹² Por necessitar de um poder calorífico mínimo, o que corresponde a teor mínimo de plásticos e similares - e está relacionado ao poder aquisitivo -, a incineração permite que, nos países mais ricos, sejam retirados recicláveis dos resíduos e, ainda assim, o material resultante mantenha condições de ser incinerado, o que é conhecido por “mass burning”. Já nos países de menor poder aquisitivo, a viabilidade desta tecnologia depende de segregação para retirada de restos alimentares e, assim, aumentar o teor dos combustíveis, reduzir o investimento e o custo operacional, o que é denominado “CDR - combustível derivado de resíduos”.

diárias consideradas para exemplificar o caso anterior permitiriam abastecer uma usina de incineração com 11,7 MW de potência.

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. A composição típica do biogás é dada na Tabela 6.

Tabela 6
Composição típica do biogás

| | <i>Conteúdo (% em volume)</i> |
|---------------------------|-------------------------------|
| <i>Metano</i> | 50% - 70% |
| <i>Dióxido de Carbono</i> | 25% - 45% |
| <i>Vapores d'água</i> | 2% (20°C) - 7% (40°C) |
| <i>Oxigênio</i> | <2% |
| <i>Nitrogênio</i> | <2% |
| <i>Amônia</i> | <1% |
| <i>Hidrogênio</i> | <1% |
| <i>Ácido Sulfídrico</i> | <1% |

Fonte: Al Seadi (2008).

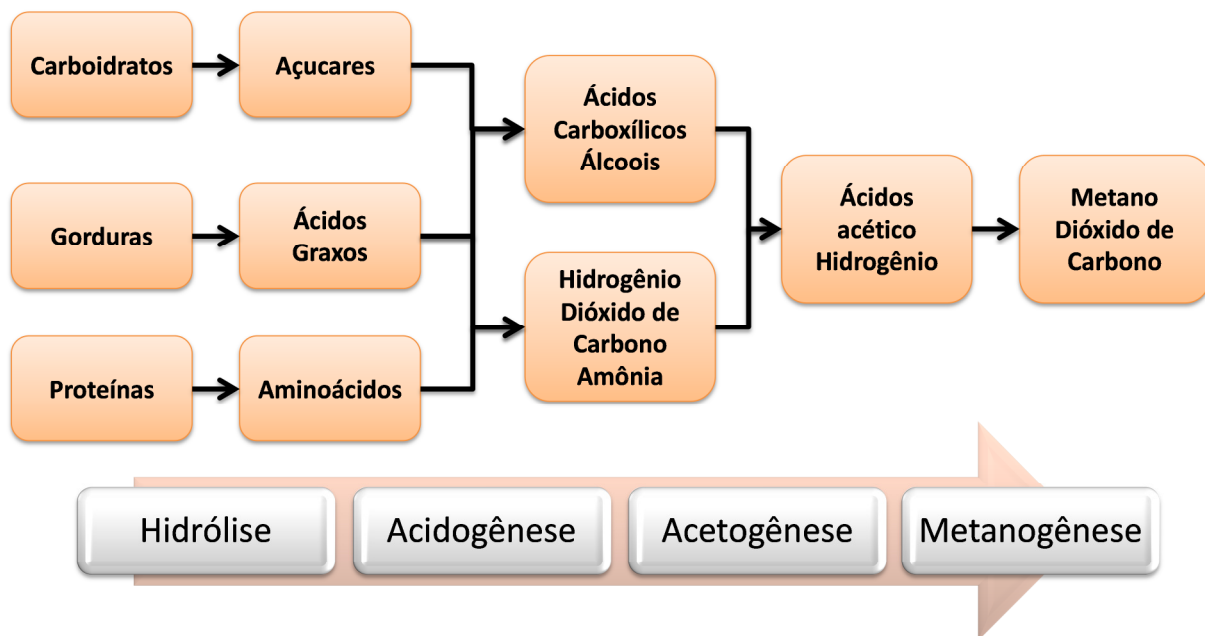
A composição do biogás é altamente sensível a composição das matérias prima, e das condições em que ocorre o processo da biodigestão anaeróbica.

O processo de biodigestão anaeróbica pode ser dividido em quatro fases: hidrólise, que é a primeira fase do processo onde a matéria orgânica complexa (polímeros) é quebrada em parte menores e mais simples; acidogênese, onde os produtos da hidrólise são convertidos em substratos para metanogênese; a acetogênese, que também converte os produtos da acidogênese que não sofrem metanogênese diretamente; e por último, a metanogênese é a produção de metano dos substratos por bactérias anaeróbicas (SEADI et al 2008).

A metanogênese é a fase mais crítica e mais lenta da biodigestão, é extremamente influenciada pelas condições de operação, como temperatura, composição do substrato, taxa de alimentação, tempo de retenção, PH, concentração de amônia entre outros (AL SEADI et al 2008)¹³.

¹³ A quantidade de biogás produzida depende, entre outros fatores, da tecnologia empregada na digestão. A usina de Tilburg, na Holanda, por exemplo, pode alcançar 106 metros cúbicos por tonelada de resíduos (m³/t), cuja composição é de 75% de restos de alimentos e de jardim e 25% de papel não reutilizável, com um teor de 56% de metano (http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/03-04/biomass//validation.html). A KOMPOGAS, fabricante de biodigestores, sugere, como média, o valor de 120 m³/t de material orgânico (www.evergreenenergy.com.au).

Figura 6: Fluxograma do Processo de Biodigestão Anaeróbica



Fonte: Al Seadi et al (2008)

Já o processo industrial de produção de biogás é dividido também em quatro fases: pré-tratamento, para adequação da biomassa; digestão do resíduo, produção bioquímica do biogás; recuperação de gás, processo de recuperação, tratamento e armazenamento do biogás e; tratamento de resíduos, disposição do lodo da digestão.

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. A figura 5 mostra um esquema simplificado de um processo de digestão anaeróbica - em particular, com digestor vertical de uma fase, ainda que existam verticais e de mais fases.

No pré-processamento ocorre a separação dos materiais não digeríveis¹⁴. 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 e pedras. 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 para o nível de qualidade mais elevado. Nestes casos, uma parcela da fração resultante é mais contaminada, conduzindo a compostos de menor qualidade e aplicações mais restritas¹⁵ (RISE-AT, 1998).

¹⁴ 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

¹⁵ Devendo ser processada em separado daquela.

Dentro do digestor a carga é diluída para atingir o teor de sólidos desejado e ali permanece durante o tempo de retenção designado. Para a diluição, uma ampla variedade de fontes de água pode ser utilizada, como água limpa, água de reuso (esgoto tratado), 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.

BOX 2 – COMPOSTAGEM:

A compostagem é um processo bioquímico de degradação de matéria orgânica que pode ocorrer na presença ou não de oxigênio (aeróbia ou anaeróbia), e tem como produtos adubo ou matéria orgânica estabilizada para posterior aterramento. O processo mais comum para resíduos urbanos é a compostagem aeróbia que tem início com a separação da matéria orgânica do lixo e posterior adequação da fração orgânica para disposição em locais arejados (podendo estes ser lareiras ou dutos areados mecanicamente) em condições ideais de temperatura e umidade até a maturidade do produto final. A compostagem se dá basicamente em duas fases a bioestabilização (45 a 60 dias) e maturação (30 dias).

O produto final, se material estabilizado, pode ser depositado em aterro, se adubo, é destinado à agricultura. Em ambos os casos o controle de qualidade para evitar contaminações com materiais inorgânicos, principalmente metais pesados, e bactérias, deve ser realizado. Para o caso de adubo este controle deve ser realizado de forma mais rigorosa de maneira a evitar a disseminação de qualquer vetor de contaminação. Estes controles na maioria das vezes torna a compostagem isolada inviável dada a relação do custo e preço pago pelos produtos finais.

Como já apresentado a compostagem pode ser uma etapa adjacente à digestão anaeróbia, para o tratamento adequado dos resíduos daquela tecnologia. Contudo a utilização da compostagem não fica restrita à utilização conjunta com a biodigestão, podendo ser integrada a diversos outros processos bioquímicos ou mesmo termoquímicos.

Assim como a reciclagem, a compostagem não pode ser considerada estritamente como tecnologia de aproveitamento energético dos RSU, pois ao contrário há um consumo energético para o processo.

Em termos elétricos, considerando eficiência de 35% na conversão de energia térmica para energia elétrica, são obtidos entre 120 e 290 kWh elétricos por tonelada (kWh/t) dos RSU, dependendo do conteúdo energético do lixo (proporção de metano no gás produzido pela DA).

Uma vantagem da digestão anaeróbica sobre o aproveitamento do gás de aterro é reduzir a quantidade de resíduos depositados em aterro sanitário. Com isso, estende-se a vida útil do aterro e a oferta de biogás se regulariza durante este horizonte. A maioria das tecnologias disponíveis e com plantas em funcionamento sugere como escala mínima 100 t/d de fração orgânica, o que representa cerca de 150 t/d dos RSU com as características brasileiras (EPE, 2007).

3.3 Incineração

Usinas de incineração dos RSU podem utilizar o calor para produzir

o vapor e, assim, abastecer um gerador de energia elétrica ou ser usado diretamente em processos industriais (ou para aquecimento).

O processo de geração de energia elétrica pela incineração dos RSU é semelhante ao de usinas térmicas convencionais, cuja capacidade de geração depende diretamente do poder calorífico do material incinerado. Este sistema pode ofertar entre 350 e 600 kWh/t dos RSU. A Tabela 7 apresenta o poder calorífico de materiais normalmente encontrados nos resíduos sólidos urbanos e permite inferir que resíduos sólidos nos quais predominam orgânicos tendem a ser mais pobres em poder calorífico.

Tabela 7
Poder calorífico de materiais encontrados em RSU (kcal/kg)

| | |
|------------------|-------|
| <i>Plásticos</i> | 6.301 |
| <i>Borracha</i> | 6.780 |
| <i>Couro</i> | 3.629 |
| <i>Têxteis</i> | 3.478 |
| <i>Madeira</i> | 2.520 |
| <i>Alimentos</i> | 1.311 |
| <i>Papel</i> | 4.033 |

Fonte: IVIG, 2005.

De fato, a incineração dos RSU com poder calorífico inferior a 1.675 kcal/kg apresenta dificuldades técnicas e exige a adição de combustível auxiliar. Embora a classificação segundo o PCI não deva ser considerada definitiva para estabelecer a destinação do RSU, considera-se que:

- para PCI < 1.675 kcal/kg, a incineração não é tecnicamente viável;
- para 1.675 kcal/kg < PCI < 2.000 kcal/kg, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico;
- para PCI > 2.000 kcal/kg, a queima bruta (“*mass burning*”) é tecnicamente viável.

O poder calorífico inferior dos resíduos sólidos, expresso em kcal/kg, pode ser calculado a partir da expressão matemática formulada por Themelis (2003) com base em estatísticas levantadas em pesquisas de campo:

$$PCI = [18.500 * Y_{\text{combustível}} - 2.636 * Y_{\text{H}_2\text{O}} - 628 * Y_{\text{vidros}} - 544 * Y_{\text{metais}}] / 4,185$$

onde as variáveis $Y_{\text{combustível}}$, $Y_{\text{H}_2\text{O}}$, Y_{vidros} e Y_{metais} representam a proporção de cada elemento em uma unidade de massa dos RSU.

Necessário esclarecer que do peso da fração orgânica combustível (putrescíveis, folhas e madeira) deve ser descontado o percentual de água. O peso do percentual de água desses orgânicos corresponde à variável $Y_{\text{H}_2\text{O}}$. Na ausência de dados específicos, utiliza-se o valor típico de 60% como estimativa do teor de água nesses componentes do RSU.

Usinas de incineração para geração elétrica trabalham tipicamente na base, isto é, a geração de energia elétrica se dá de forma permanente ao longo do dia. Isto decorre da tecnologia produzir calor, utilizado para gerar vapor e, este, mover a turbina. Para

otimizar este processo, as usinas contam com sistemas de armazenamento dos RSU para até uma semana, com vistas a adequar a mistura caso haja variação do poder calorífico.

Os principais componentes de uma moderna usina convencional de incineração dos RSU são: poço de armazenamento do lixo, câmara de combustão, sistema de movimentação do lixo na câmara de combustão (grelha móvel, jateamento de ar comprimido, etc.), sistema de descarga das cinzas, sistema de geração de vapor, depurador de gases, filtros de sacos, ventilador e chaminé.

A redução entre 85% e 90% do volume original de resíduos depositados em aterro sanitário é uma das principais vantagens da incineração, além de não impedir a recuperação dos metais recicláveis e suas cinzas poderem servir como matéria-prima para a produção de cimento do tipo Portland. Embora produza mais energia elétrica que as duas alternativas anteriormente apresentadas, é preciso ressaltar que:

- a incineração é um processo emissor de dioxinas e exige cuidados específicos no tratamento dos gases de exaustão, relacionados à própria usina e à capacidade de suporte da bacia aérea; as cinzas produzidas na incineração também contém diversos poluentes;
- de acordo com trabalho técnico publicado pelo Banco Mundial¹⁶, usinas de incineração apresentam elevados custos de investimento, operação e manutenção.

As principais tecnologias disponíveis com plantas em funcionamento sugerem a escala de 150 t/d (EPE, 2007). Cabe destacar que, ainda não existem usinas de incineração dos RSU com recuperação de energia em escala comercial em funcionamento no Brasil.

3.4 Ciclo Combinado Otimizado

É caracterizado pela existência de uma turbina à vapor abastecida de forma consorciada pela exaustão de um grupo-gerador (ou turbina) tradicional e de um sistema de incineração, de maneira a ampliar a capacidade de processamento da caldeira de recuperação - do denominado ciclo combinado - mas cuja integração permite obter mais energia elétrica que os 25% normalmente esperados, podendo atingir 900 kWh por tonelada dos RSU.

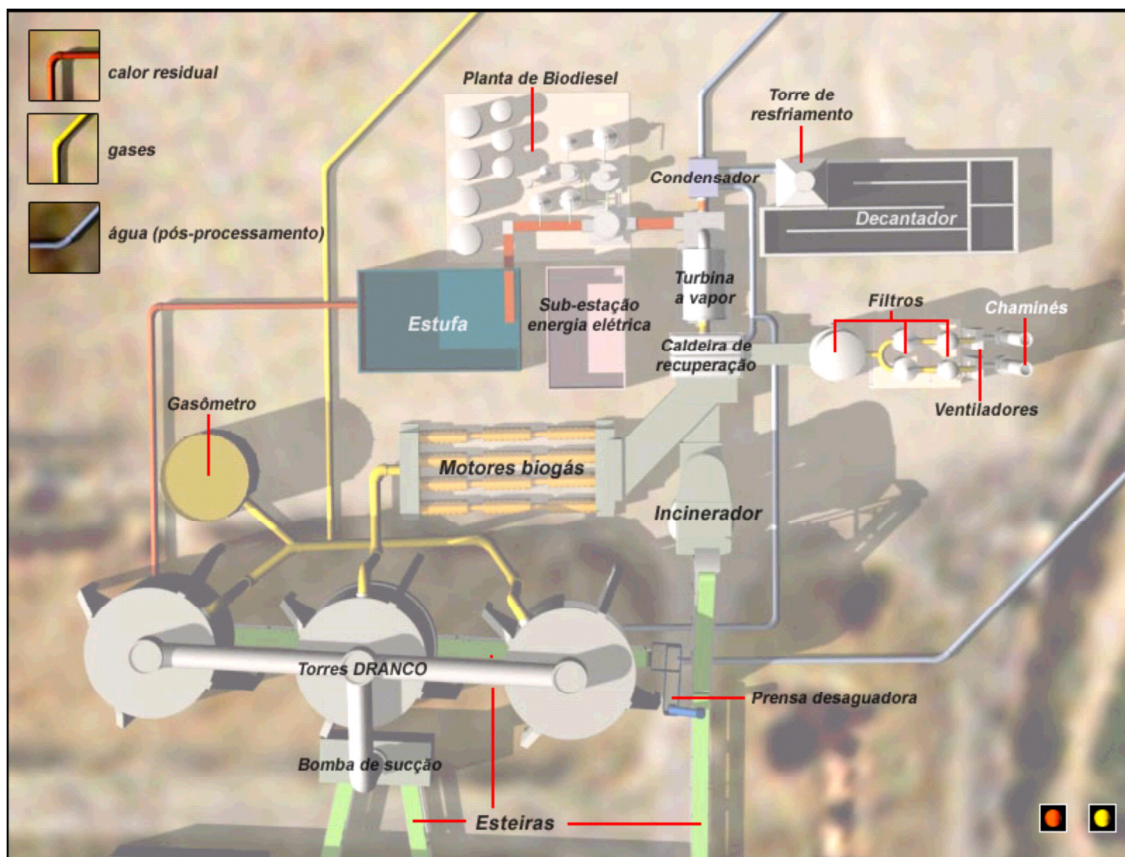
Existem duas usinas funcionando com este conceito, uma na Holanda¹⁷ e outra na Espanha¹⁸. Em ambas, o gás natural é utilizado em um módulo de geração tradicional e sua exaustão é consorciada à do incinerador. Há um pedido de patente brasileiro de processo que se apresenta mais eficiente que estes exemplos europeus. Em substituição ao gás natural, usa-se gás de lixo, drenado de um aterro ou de um biodigestor em que a parte da fração orgânica do lixo não incinerável no CDR seja tratada. Assim, toda a energia seria proveniente do lixo. A esse processo denominou-se de ECOPOLO, cuja representação é reproduzida na Figura 7.

¹⁶ Rand, T., Houkohl, J. e Marxen, U. "Municipal Solid Waste Incineration - A Decision Maker's Guide", junho de 2000.

¹⁷ Usina AZN em Amsterdã.

¹⁸ Usina de Zabalgardi, em Bilbao.

Figura 7: Maquete digital do ECOPOLO para o Caju - Rio de Janeiro



Fonte: IVIG, 2005.

Apesar do menor consumo específico, a tecnologia CCO requer disponibilidade de gás natural - o que pode representar um obstáculo a sua evolução, por conta da ainda restrita malha de gasodutos do país e das aplicações previstas para viabilizar sua distribuição.

3.5 Purificação (*Upgrade*) do Biogás a Biometano

Além da utilização do biogás para a geração elétrica ou calor, este energético pode ser utilizado também como biocombustível automotivo desde que atenda certas condições em sua especificação, após as quais passa ser denominado de biometano.

Estas condições são basicamente a purificação deste energético em metano, em condições semelhantes às do gás natural. Esta purificação tem como objetivo evitar danos à rede de gás natural, bem como a equipamentos, e ajuste do índice de Wobbe que depende do seu poder calorífico e densidade relativa. O biogás purificado utilizado como biometano em geral apresenta a composição típica de 95%-97% de CH_4 e 1%-3% de CO_2 (RYCKEBOSCH, DROUILLOM & VERVAEREN, 2011).

Os principais contaminantes que devem ser removidos são o enxofre, em geral na forma de H₂S e mercaptanas, o CO₂¹⁹ e a água, entretanto outros compostos também devem ser observados e removidos para uma correta adequação da especificação, como os halogenados, ar e oxigênio, siloxanos e amônia (RYCKEBOSCH, DROUILLOM & VERVAEREN, 2011 E MESCA ET AL., 2011). O biogás dos RSU, sendo este de aterro (GDL) ou de biodigestão, devido à diversa composição do RSU, apresenta grande diversidade de contaminantes que devem ser removidos, caso o uso seja a substituição do Gás Natural. A seguir, a Tabela 8 apresenta os principais contaminantes do biogás e possíveis danos aos equipamentos.

Tabela 8
Contaminantes e Impactos

| <i>Compostos</i> | <i>Impacto</i> |
|-----------------------|--|
| <i>Água</i> | -Corrosão em equipamentos, rede e tanques -Acumulação e condensação |
| <i>CO₂</i> | -Diminuição do poder calorífico -Corrosão em equipamentos, rede e tanques |
| <i>Enxofre</i> | -Emissão de óxidos na combustão -Toxicidade |
| <i>Siloxanos</i> | - Formação de SiO ₂ e micro cristais |
| <i>Halógenos</i> | -Corrosão |
| <i>Amônia</i> | -Corrosão |
| <i>O₂</i> | -Aumento da explosividade |

Fonte: Adaptado de Ryckebosch, Drouillom & Vervaeren, 2011.

Dentre os compostos citados, o principal a ser removido é o dióxido de carbono, dada sua alta participação na composição do biogás, de 30% a 45%, e a especificação do biometano para uso automotivo ou injeção na rede de gás natural ser de 1% a 6% de CO₂. As principais técnicas de separação são a absorção química e física do CO₂, a absorção com água ou polietileno-glicol ou absorção com aminas. Há ainda outros métodos como a adsorção sob pressão e à vácuo, a utilização de membranas, a separação criogênica e o enriquecimento biológico. Excluindo os dois últimos, todos são utilizados em grande escala e a escolha pelo tipo mais adequado do método depende de uma série de variáveis que devem ser analisadas de acordo com cada projeto. Estas variáveis abrangem desde aspectos econômicos, como os custos de investimentos e operação e manutenção, estes últimos altamente dependentes do consumo de químicos e energia, até questões técnicas como a possibilidade de separação conjunta do dióxido de carbono e compostos de enxofre, eficiência de purificação e perdas de metano.

¹⁹ Vale destacar que o dióxido de carbono não é um contaminante e sim um gás inerte que dilui o metano e reduz o poder calorífico do biogás.

Os segundos compostos em importância na remoção são os de enxofre, principalmente na forma de H_2S , e a água, pois ambos podem causar corrosão tanto na malha de distribuição como em motores e equipamentos de uso final - sendo que para o caso do enxofre ainda há o problema de emissão de óxidos durante a combustão. A separação da água do biogás se dá basicamente por uma composição de métodos, primeiro uma etapa de condensação, de maneira a evitar a corrosão de equipamentos à jusante e, depois, métodos de absorção ou adsorção para atingir a especificação necessária de injeção na rede ou do uso veicular. A separação dos compostos de enxofre pode ser feita em duas fases diferentes, durante a digestão ou após a digestão. As técnicas de separação durante a digestão são de baixo investimento, mas de alto custo de operação e manutenção, enquanto as técnicas de separação após a digestão devem ser decididas após a seleção da técnica de remoção do dióxido de carbono, pois em muitos casos a remoção ocorre conjuntamente. Caso haja alta concentração de enxofre ou a técnica escolhida para a remoção do CO_2 não seja eficiente para os compostos de enxofre, outros métodos posteriores também devem ser adotados e, novamente, os métodos de absorção e adsorção são os mais utilizados. Na tabela seguinte são apresentados os tipos de tratamento para cada contaminantes e inerte.

Tabela 9
Contaminantes e Tratamento

| Contaminante | Tipo de Tratamento |
|---------------------------|---|
| Enxofre | <i>Tratamento Biológico</i> |
| | <i>Dosagem de Cloreto de Ferro</i> |
| | <i>Water Scrubbing</i> |
| | <i>Carvão ativado</i> |
| | <i>Óxido ou Hidróxido de Ferro</i> <i>Hidróxido de Sódio</i> |
| Umidade | <i>Resfriamento</i> |
| | <i>Absorção</i> |
| | <i>Adsorção</i> |
| Amônia | <i>Water Scrubbing</i> |
| Particulado | <i>Filtros</i> |
| Siloxanos | <i>Resfriamento</i> |
| | <i>Carvão ativado</i> |
| | <i>Absorção</i> |
| Oxigênio | <i>PSA</i> |
| | <i>Membrana</i> |
| Dióxido de Carbono | <i>Water Scrubbing</i> |
| | <i>Absorção físico-química</i> |
| | <i>PSA</i> |
| | <i>Membrana</i> |

Fonte: *Electrigaz (2008)*.

3.6 Outras Tecnologias

Existem ainda outras tecnologias para o aproveitamento energético do RSU, que mesmo não sendo o “*mainstream*” de tecnologias aplicadas ao aproveitamento dos RSU devem ser citadas, como: a pirólise, a gaseificação e as tecnologias com plasma, como alternativas principalmente à incineração. Diversas linhas de aproveitamento termoquímico de resíduos urbanos estão sendo desenvolvidas através da adequação, ou combinação, dos processos ou tecnologias para as especificações dos resíduos urbanos. Processos que combinam pirólise e gasificação, adaptação de queimadores e reatores, utilização de novos materiais possibilitaram novas tecnologias para o aproveitamento energético dos resíduos urbano em escalas comerciais²⁰.

Há ainda, a possibilidade do aproveitamento de recicláveis em outras cadeias energéticas que não a da própria produção, como a utilização de plásticos como redutores do minério de ferro. Esta possibilidade abre diversas frentes para valoração energética dos recicláveis.

Por último, é possível a combinação de diferentes rotas de aproveitamento energético do lixo, dependendo basicamente da composição do RSU, distância e custos de transporte, custos de investimentos, custos de operação e manutenção, além obviamente da viabilidade técnica deste aproveitamento. Um exemplo deste tipo de arranjo foi exposto no item do ciclo combinado. Essa possibilidade de diferentes arranjos tem como consequência uma gama bastante diversa de possibilidade de aproveitamento energético dos RSU evidenciando a necessidade de avaliação de caso a caso, dadas as características locais.

²⁰ Hoje existem cerca de duas mil plantas com aproveitamento energético de resíduos urbanos, sendo mil aterros, seiscentos incineradores, duzentos biodigestores e cerca de duzentas outras unidades com cem diferentes tecnologias.

4. A RECICLAGEM DOS RSU

Genericamente, denomina-se reciclagem ao retorno da matéria-prima ao ciclo de produção. Assim, reciclagem é o vocábulo adequado para designar o reaproveitamento de materiais beneficiados e já utilizados como matéria-prima para um novo produto.

Do inglês *recycle* (re = repetir e cycle = ciclo), a palavra reciclagem assume esse significado a partir da década de 1970, quando os choques nos preços do petróleo, entre outras consequências, catalisaram a pauta da agenda mundial do setor energético, nela incluindo, definitivamente, as preocupações ambientais e, especialmente, as relacionadas à conservação em especial da energia.

Modernamente, o termo ganhou um significado mais amplo e vem sendo utilizado para designar não só o retorno em si da matéria-prima ao ciclo de produção, mas sim a todo um conjunto de operações e técnicas que tem por finalidade aproveitar detritos e materiais tidos como inservíveis e reutilizá-los como matéria-prima na manufatura de novos produtos.

Alguns materiais que compõem os RSU são de especial interesse para reciclagem. Em alguns casos, como o alumínio, o reaproveitamento do material usado como matéria-prima é praticamente total. Outros materiais de grande interesse para reciclagem são vidros, papéis, plásticos, metais e borrachas. Em maior ou menor grau, a reciclagem permite acumular uma conservação de energia por vezes expressiva e, neste sentido, deve ser considerada como parte de uma estratégia de aproveitamento energético dos RSU.

Contudo, é certo que a reciclagem, vis-à-vis a geração de energia elétrica envolve a discussão sobre a viabilidade de cada uma dessas rotas de aproveitamento energético do RSU. Essa viabilidade compreende aspectos técnicos, econômicos e de mercado. Por exemplo, nos Estados Unidos, onde, de uma forma geral, a reciclagem está em estágio mais avançado do que no Brasil, muitos plásticos inicialmente separados para reciclagem terminam em aterros sanitários por falta de mercado (Themelis & Kaufman, 2004). Nesses casos, não se operou a reciclagem nem se atendeu ao interesse das usinas de produção de energia elétrica, apesar do elevado conteúdo energético do material.

Por fim, deve-se observar que a reciclagem não é incompatível com outros usos ou destinos dos RSU. Isto é, embora afete o dimensionamento de projetos de outros usos dos resíduos, como a compostagem e a recuperação energética, ou mesmo a disposição final, a reciclagem não se constitui, necessariamente, em rota excludente a essas outras aplicações.

4.1 Reciclagem no Brasil

Há mais de meio século existe, no Brasil, um mercado regular de coleta de material reciclável. Praticada pelos “papeleiros” e “garrafeiros”, os populares “burros sem rabo”(Eigenheer, 2009) que foram figuras tradicionais dos maiores centros urbanos do país entre 1950 e 1980, a coleta de papel e papelão e de vidro, principalmente, resistiu com

alguma intensidade até o surgimento de novos produtos recicláveis, como as latas de alumínio e as garrafas PET. De qualquer modo, há no país um contingente apreciável de carroceiros e catadores que vivem da renda gerada pela venda de sucatas e outros materiais recicláveis presentes no lixo. De acordo com a 3ª Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE havia, no ano 2008, 70.449 catadores distribuídos em 2.730 Municípios de todo o país - que declararam ter conhecimento de sua existência.

O trabalho de seleção e catação de material para reciclagem é, em geral, penoso, pesado e, não raro, realizado sob condições impróprias. Assim, o pessoal envolvido neste serviço é, normalmente, de baixíssima qualificação e oriundo dos estratos sociais de mais baixa renda. A isso, inclusive, tem-se atribuído o elevado índice nacional de reciclagem de latas de alumínio e garrafas PET, superior a vários países em que a preocupação com a reciclagem e com os impactos ambientais, em geral, parece estar em estágio muito mais avançado do que no Brasil.

Garrafas PET e as latas de alumínio são, hoje, de fato as grandes estrelas da reciclagem no Brasil. Ambos os materiais são recuperados principalmente através de catadores, além de fábricas e da coleta seletiva operada em diversos Municípios, movimentando um mercado de algumas centenas de milhões de reais por ano²¹.

De acordo com a Associação Brasileira de Alumínio (ABAL), o Brasil reciclou, em 2010, 392,4 mil toneladas de alumínio e 221 mil toneladas de latas de alumínio, ou 16,4 bilhões de unidades. Pelo oitavo ano consecutivo, o país liderou a reciclagem de latas de alumínio para bebidas, com índice de 91,5%, superior ao do Japão (87,3%), da Argentina (90,8%) e de outros países. No ano de 2010, conforme dados da organização Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), 56% das embalagens PET pós-consumo foram efetivamente recicladas no país, totalizando 505 mil toneladas. O índice brasileiro de reciclagem de embalagens PET é bastante superior ao de países como os EUA, que é de 29,1%. A Tabela 10 apresenta alguns dados que evidenciam a posição de destaque que o Brasil ocupa no mundo quando se trata de reciclagem de PET e de latas de alumínio.

Tabela 10
Índices de reciclagem de embalagens PET e latas de alumínio

| <i>País/região</i> | <i>Latas (2010)</i> | <i>PET (2010)</i> |
|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| <i>BRASIL</i> | 98,0% | 56,0% |
| <i>Japão</i> | 92,6% | 72,1% |
| <i>Argentina</i> | 91,1% | 34,0% |
| <i>Europa</i> | 64,3% | 55,0% |
| <i>Estados Unidos</i> | 58,1% | 29,1% |

Fontes: ABAL, 2009 e CEMPRE, 2008.

O rápido crescimento da reciclagem de embalagens PET e de latas de alumínio, assim como de sucata do metal em geral²², sugere que o mercado de reciclagem destes materiais está

²¹ A reciclagem somente de latinhas de alumínio movimentou 1,3 bilhões de reais em 2009, segundo a ABAL.

²² Conforme cálculos da ABAL, com base em informações da "The Aluminum Association", a relação entre sucata recuperada e o consumo doméstico no Brasil é de 36,7% [2005], superior à média mundial, de 29,3%, e à de países como França, Espanha,

praticamente consolidado, ainda que o potencial de crescimento não tenha, todavia, se esgotado. Segundo o Instituto Socio-Ambiental dos Plásticos (Plastivida), a reciclagem mecânica trabalha com cerca de 30% de ociosidade (Plastivida, 2008).

4.2 Conservação de Energia Proveniente da Reciclagem

Conforme já salientado, a reciclagem contribui para reduzir a demanda por fontes naturais de matéria-prima, muitas vezes não renováveis, e também a demanda por energia, necessária para a transformação dessa matéria-prima em produtos. É comum que a transformação de material reciclado consuma menos energia que a transformação do insumo primário, o que faz da reciclagem um elemento da estratégia de conservação da energia.

Como toda a energia demandada pode ser convertida em eletricidade equivalente, utiliza-se, para tal, o fator de eficiência típico das máquinas térmicas aplicadas a cada energético, os quais variam entre 20 e 35%.

Com essa visão, é interessante mapear o potencial de conservação de energia através da reciclagem expondo assim, os benefícios energéticos da reciclagem. A metodologia utilizada para o cálculo deste potencial é exposta nos itens subsequentes.

4.2.1 Indicadores

O cálculo do potencial de conservação de energia através da reciclagem baseia-se em indicadores de conservação de energia por quantidade e tipo de material reciclável. Calderoni (1996), ao realizar análise para o caso brasileiro, inovou ao introduzir pesquisa sobre indicadores existentes, de modo a abarcar diferentes cadeias produtivas e seguir a metodologia da análise do ciclo de vida do produto.

Faz-se necessário evidenciar, que as diferentes metodologias de construção dos indicadores devem ser verificadas para posterior compatibilização e comparação. Dentro do levantamento realizado foram utilizados os indicadores das seguintes fontes para os cálculos dos potenciais: Calderoni (1996), Morris (1996), Warken ISE (2007) e EPA (2008), representando respectivamente a realidade do Brasil, Canadá, Austrália e Estados Unidos. Antes da apresentação dos indicadores é essencial apresentar a metodologia de construção de cada um, identificando fronteiras e limites.

- **Calderoni (1996)**

Quantifica a energia para produzir determinado material desde a extração do recurso natural até a produção final deste material. O indicador de energia economizada desta referência subtrai da energia para produzir determinado produto, a partir de matérias primas virgens, a demandada quando o processo parte dos materiais recicláveis. Não identifica nem contabiliza as diferentes etapas logísticas.

- **Morris (1996)**

Estados Unidos e Alemanha (todos no intervalo entre 30 e 35%), ou China e Austrália (em torno de 20%), embora bastante inferior à relação encontrada em países como Áustria, Reino Unido e África do Sul (acima de 50%).

Calcula o indicador da mesma maneira que Calderoni (1996). Não contabiliza as diferentes etapas logísticas, apesar de indicar valores para tal.

- **Warnken ISE (2007)**

Calcula o indicador da mesma maneira que Calderoni (1996), também sem contabilizar os gastos energéticos da logística. A única diferença é a apresentação deste cálculo através do conceito de energia incorporada.

- **EPA (2002 atualizado em 2008)**

Considera metodologia similar a dos dois anteriores, contudo o foco do estudo é a redução dos gases de efeito estufa.

Outra consideração feita em todas as referências é a comparação entre a produção com 100% de matéria prima virgem e a produção com 100% de reciclável. Por último foi retirado, do indicador de energia conservada, o montante referente à coleta e destinação dos recicláveis a 55 km de distância por caminhão, conforme Morris (1996), 400kJ/kg²³, como pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11
Indicadores de Energia Total Economizada por reciclável
(MJ/kg)

| Energia Total Conservada [MJ/kg] | Brasil | Canadá | | Austrália | Estados Unidos | |
|---|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | <i>Calderoni (1996)</i> | <i>Morris min (1996)</i> | <i>Morris max (1996)</i> | <i>Warnken ISE (2007)</i> | <i>EPA min (2008)</i> | <i>EPA max (2008)</i> |
| <i>Papeis</i> | 35,70 | 18,46 | 29,86 | 13,70 | 9,32 | 21,08 |
| <i>Plástico</i> | 51,65 | 59,53 | 87,48 | 60,20 | 55,78 | 55,78 |
| <i>Vidro</i> | 6,18 | 0,51 | 3,81 | 12,40 | 1,84 | 1,84 |
| <i>Metais (alumínio e ferrosos)</i> | 54,11 | 13,45 | 37,80 | 35,23 | 30,51 | 30,51 |

Fonte: Elaboração própria

Vale destacar que em algumas etapas do ciclo de vida do material a reciclagem pode aumentar o consumo energético, como o caso do papel que tem em seu processo a utilização de um resíduo, a lixívia, como energético. A partir dos indicadores acima foram também construídos indicadores de conservação de energia elétrica, a partir da identificação da energia elétrica na matriz do ciclo de vida de cada material e de uma determinada eficiência de conversão elétrica. Para comparação foram utilizadas duas matrizes distintas, a divulgada pela EPA (2008) sobre o tema e uma elaborada para o caso brasileiro²⁴, cujos resultados são mostrados na Tabela 12 e na Tabela 13, abaixo.

²³ Apesar do trabalho da EPA fornecer os valores por tipo de material foram utilizados os valores de Morris (1996), por representarem uma média e para equalizar a comparação.

²⁴ A matriz energética brasileira foi calculada baseada no Balanço Energético Nacional ponderando pela cadeia de produção de cada produto.

Tabela 12
Indicadores de Energia Elétrica Economizada por reciclável
(kWh/kg) - Matriz EPA

| Eletricidade Economizada [kWh/kg] - 35% de eficiência | Brasil | Canadá | | Austrália | Estados Unidos | |
|--|-------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | <i>Calderoni (1996)</i> | <i>Morris min (1996)</i> | <i>Morris max(1996)</i> | <i>Warnken ISE (2007)</i> | <i>EPA min (2008)</i> | <i>EPA max (2008)</i> |
| <i>Papeis</i> | 0,521 | 0,269 | 0,436 | 0,200 | 0,136 | 0,308 |
| <i>Plástico</i> | 0,142 | 0,164 | 0,241 | 0,166 | 0,153 | 0,153 |
| <i>Vidro</i> | 0,121 | 0,010 | 0,075 | 0,242 | 0,036 | 0,036 |
| <i>Metais (alumínio e ferrosos)</i> | 1,052 | -0,157 | 1,194 | 0,447 | 0,626 | 0,626 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13
Indicadores de Energia Elétrica Economizada por reciclável
(kWh/kg) - Matriz Brasil

| Eletricidade Economizada [kWh/kg] - 35% de eficiência | Brasil | Canadá | | Austrália | Estados Unidos | |
|--|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | <i>Calderoni (1991)</i> | <i>Morris min (1996)</i> | <i>Morris max (1996)</i> | <i>Warnken ISE (2007)</i> | <i>EPA min (2008)</i> | <i>EPA max (2008)</i> |
| <i>Papeis</i> | 0,715 | 0,370 | 0,598 | 0,274 | 0,187 | 0,422 |
| <i>Plástico</i> | 0,969 | 1,117 | 1,641 | 1,130 | 1,047 | 1,047 |
| <i>Vidro</i> | 0,111 | 0,009 | 0,069 | 0,223 | 0,033 | 0,033 |
| <i>Metais (alumínio e ferrosos)</i> | 1,052 | 0,264 | 1,611 | 0,657 | 1,122 | 1,122 |

Fonte: Elaboração própria

As diferenças entre os valores EPA e Brasil se devem basicamente ao peso da eletricidade em cada cadeia de produção, mostrando que a eletricidade tem um peso maior para o caso brasileiro. Importa destacar também, como já mencionado, que a matriz não é somente do processo produtivo de cada determinado produto, e sim uma ponderação entre as diversas fases da cadeia produtiva até a finalização do produto.

Para o caso do indicador mínimo de Morris (1996) na matriz EPA, um valor negativo, a explicação é dada através da especificidade das diferenças entre as cadeias produtivas utilizando insumo novo e material reciclável. Para o caso dos ferrosos, ao consumir recicláveis o processo é mais intensivo em energia elétrica, além da não produção de gases de coqueria e alto forno, que são utilizados em unidades de cogeração. Sendo assim, o balanço da energia elétrica para este caso específico se torna negativo.

4.2.2 Limites, Premissas e Considerações

Antes do cálculo dos potenciais de conservação de energia é necessário apresentar as limitações e premissas que foram utilizadas para tal. Uma das primeiras premissas utilizadas foi da composição média do RSU, utilizando a seguinte: 60% de orgânicos, 12% de papéis, 18% de plásticos, 3% de vidro, 2% de metais e 5% de inertes (IPT, 1998). Dentro desta premissa ainda foi estabelecido que o grupo dos metais tem 5% de alumínio e 95% de ferrosos, como participação típica. Esta composição foi adotada como média, o que pode não representar a realidade de todas as cidades brasileiras.

Duas premissas têm extrema importância para o cálculo do potencial de conservação e para o do custo da energia conservada: as matrizes energéticas de cada cadeia por material e a eficiência de conversão para energia elétrica. Para as matrizes, foram assumidas duas alternativas, a primeira foi considerar a matriz da EPA (2008) e a segunda uma matriz brasileira calculada internamente. Quanto à eficiência de conversão para energia elétrica, foi adotada como 35%, considerando como média para o caso brasileiro.

Por último, algumas premissas já expostas na apresentação dos indicadores devem ser incluídas também nesta lista, como: a comparação que os indicadores fazem é em relação à produção com 100% de material novo e 100% de material reciclável na entrada e que estes indicadores realmente representam o caso brasileiro.

4.3 Benefícios da Reciclagem

A reciclagem de qualquer material compreende quatro fases, a saber: coleta, seleção, revalorização e transformação. As duas primeiras etapas representam o grande desafio da reciclagem, na medida em que envolvem processo de conscientização da população na direção da prática da coleta seletiva e, ainda, investimentos em logística e distribuição do material selecionado para os destinos adequados. Na fase de revalorização realiza-se a descontaminação e adequação do material coletado, para que possa ser utilizado como matéria-prima na manufatura de novos produtos. A última fase, de transformação, é aquela em que se completa o ciclo, com o efetivo uso do material revalorizado como insumo na indústria de transformação.

A reciclagem minimiza, por um lado, a utilização de fontes naturais de matéria-prima, muitas vezes não renováveis, e de recursos energéticos enquanto, por outro, a quantidade de resíduos que necessitaria de tratamento final, como aterramento ou incineração. Assim, os benefícios da reciclagem estão primeiramente no campo ambiental. A partir do uso mais racional dos recursos naturais (por exemplo, no caso do papel, a diminuição do corte de árvores), o resultado é a redução das agressões ao solo, ao ar e à água que a exploração desses recursos produz.

No campo econômico, onde um exemplo emblemático é o alumínio. O metal das latas utilizadas como embalagem de sucos, refrigerantes e cervejas não perde suas propriedades físicas quando reprocessado, podendo reprocessado continuamente. Considerando que 1 kg de alumínio reciclado evita a extração de 5 kg de bauxita e que a mineração e a transformação do mineral requerem, para produção do alumínio primário, eletricidade em quantidade 20 vezes maior que a demandada na produção a partir do material reciclável²⁵ (VILLA NOVA, 2001), pode-se compreender porque a reciclagem tornou-se uma atividade economicamente importante para esta indústria. Por fim, no campo social a reciclagem tem sido apontada frequentemente como atividade geradora de postos de trabalho e renda, em especial para a população de renda mais baixa.

²⁵ Conforme ABAL (<<http://www.abal.org.br/reciclagem/introducao.asp>>), “a reciclagem do alumínio (...) economiza recursos naturais, energia elétrica - no processo, consome-se apenas 5% da energia necessária para produção do alumínio primário (...)”.

5. POTENCIAL ENERGÉTICO DO LIXO BRASILEIRO

O aproveitamento energético dos RSU depende da escala de oferta de insumo. À exceção do aterro, todas as demais tecnologias de aproveitamento demandam escalas superiores a 150 t/d. A estimativa sobre o potencial energético é realizada, então, através da aplicação dos fatores de escala à disponibilidade dos RSU. Apesar da assunção desta premissa é sabido que há diferentes realidades para a questão dos resíduos sólidos nos municípios brasileiro, e na maioria dos municípios a escala de produção é menor do que a escala adotada.

Por este motivo, é necessário também se que sejam realizadas pesquisas para redução das escalas e adequação das tecnologias às realidades brasileiras. Um bom exemplo disto é o programa de P&D estratégico 14 da ANEEL que em diversos projetos estão estudando diferentes escalas de aproveitamento elétrico para os resíduos urbanos.

5.1 Potencial Técnico do RSU para Geração de Eletricidade

O potencial de geração de energia elétrica a partir do RSU foi calculado somente para as tecnologias de aproveitamento de GDL, do biogás de digestão anaeróbica e da incineração expostas nos subitens que seguem. O cálculo foi realizado considerando o potencial técnico e todo o RSU destinado à determinada opção.

- **Potencial a partir da Recuperação do Gás do Lixo (GDL)**

A maior parcela do RSU brasileiro é depositada em vazadouros, sejam lixões, aterros controlados ou sanitários. Segundo as PNSB (IBGE, 1989 e 2000), estas soluções recebem mais de 90% do lixo.

O aproveitamento energético do gás é função de sua produção e recuperação. Ambas dependem do confinamento dos resíduos, sendo que para a primeira isto reflete na ausência de oxigênio e para a segunda em emissão fugitiva. Assim, além dos lixões produzirem menos gás que os aterros, sendo que os controlados produzem menos que os sanitários (IPCC, 2006), a taxa de recuperação dos lixões é menor que a dos aterros controlados que, por sua vez, é menor que a dos aterros sanitários. Esta, apesar de ser a melhor, não consegue ser total.

A produção esperada de metano caso este material fosse depositado em aterro sanitário é obtida a partir da aplicação dos dados de disponibilização de RSU no modelo de resíduos do IPCC, que assume um fator de recuperação de 20% de GDL.

Contudo, o modelo citado apresenta produção de GDL somente a partir do segundo ano de depósito, dado o necessário tempo de residência do RSU para a produção do biogás. Assim, como o ano base de depósito do RSU foi considerado 2010, o potencial técnico calculado a partir deste modelo será somente apresentado na NT de projeção do potencial.

Para este trabalho o potencial técnico apresentado será o mesmo calculado pelo estudo contratado pelo Ministério de Meio Ambiente (MMA, 2010). Todavia este potencial é bastante limitado, pois foi resultado de uma pesquisa de 56 locais e de respectiva modelagem econômica, assim, entende-se que esse potencial não é o potencial técnico e sim mais próximo de um potencial econômico.

- **Potencial de geração elétrica através da digestão anaeróbica acelerada (DAA)**

A tecnologia de digestão anaeróbica acelerada requer o aproveitamento apenas do lixo orgânico, que deve ser separado dos demais componentes²⁶ e processado. Esta solução apresenta como coproduto um composto orgânico que pode ser utilizado como biofertilizante. O potencial é calculado com base na relação de 5.500 m³ de metano para cada 100 toneladas diárias de lixo orgânico, ou 55 m³/t (OWS, 2008) - conservador perante o fator de 120 m³/t proposto pela KOMPOGAS (2008), com tempo de residência de dezoito dias. A eficiência de conversão elétrica considerada foi de 33%.

Com esses valores, e com o poder calorífico do metano de 36 MJ/m³, a produção específica de energia por tonelada de RSU é de 0,109MWh/t. No entanto esse valor desconsidera a energia conservada com os recicláveis segregados, levando em consideração que somente a matéria orgânica é biodigerida.

- **Potencial de geração elétrica através da incineração**

A tecnologia de incineração, por requerer insumos com poder calorífico inferior (PCI) de, ao menos, 2.000 kcal/kg (MARTIN, 2008), consome parte dos recicláveis (aqueles com poder calorífico, como papel e plástico) juntamente à fração orgânica do lixo, para geração elétrica. Considerou-se que os vidros e metais seriam retirados na íntegra e, então, estimou-se qual o percentual de papel e plástico²⁷ necessário para que o PCI destes misturados à totalidade da fração orgânica seja de 2.000 kcal/kg. Para tanto, foi utilizada a fórmula para cálculo do PCI do RSU elaborada por Themelis (2003), abaixo, adaptada - ou seja, sem considerar vidros e metais:

$$PCI = \{18.500[(\%FO(1-\%H_2O))+\%P+\%PL]-2.636(\%H_2O)(\%FO)-628(\%V)-544(\%M)]\}/4,18$$

Onde:

%FO = participação da fração orgânica

%H₂O = teor de umidade

%P = participação de papel

%PL = participação de plástico

%V = participação de vidro

%M = participação de metal

²⁶ Esta ação disponibiliza recicláveis, cujo aproveitamento como insumo industrial representa conservação de energia, como será visto mais adiante, no item 5.

²⁷ Considerados como de mesmo poder calorífico inferior.

Assim, para a produção do combustível derivado de resíduos (CDR) seria necessário 86,5% de plásticos e papéis para atender a especificação do PCI consumindo toda a matéria orgânica, resultando em 48,99 milhões de toneladas de CDR, no ano base. Na tabela a seguir são apresentados os valores de destinação dos materiais.

Tabela 14
Produção de CDR e disponibilidade de materiais - (Mt)

| <i>Disponibilidade de Material para CDR</i> | | <i>Material Restante após Produção de CDR</i> | |
|---|-------|---|------|
| <i>Matéria Orgânica</i> | 37,09 | <i>Matéria Orgânica</i> | 0,00 |
| <i>Papel</i> | 10,06 | <i>Papel</i> | 1,57 |
| <i>Plástico</i> | 6,71 | <i>Plástico</i> | 1,05 |
| <i>Vidro</i> | - | <i>Vidro</i> | 1,94 |
| <i>Metal</i> | - | <i>Metal</i> | 1,32 |
| <i>Outros</i> | - | <i>Outros</i> | 3,14 |
| <i>CDR</i> | 53,86 | | 9,02 |

Elaboração própria

A eficiência de conversão elétrica considerada foi de 20% e assim, há uma produção específica de 0,398 MWh/t de RSU, novamente sem contabilizar a reciclagem dos materiais restantes.

Tabela 15
Características Técnicas Consideradas

| | <i>Incineração</i> | <i>Rota 2 - Biodigestão Elétrica</i> |
|--|--------------------|--------------------------------------|
| <i>Capacidade [MW]</i> | 30 | 1 |
| <i>Fator de Capacidade [%]</i> | 90% | 90% |
| <i>O&M [% do investimento/ano]</i> | 3% | 3% |
| <i>Eficiência elétrica [%]</i> | 20% | 33% |
| <i>PCI do CDR [GJ/t]</i> | 8,37 | - |
| <i>PCI do biogás [MJ/m³]</i> | - | 21,60 |
| <i>Participação de CH₄ [%]</i> | - | 60% |
| <i>Eficiência de Purificação do biogás [%]</i> | - | 0,7 |

Elaboração própria

Tabela 16
Potencial de Geração Elétrica

| | <i>Eletricidade (GWh)</i> | <i>Capacidade (MW)</i> | <i>Unidades</i> |
|--------------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------|
| <i>GDL</i> | - | 311 | - |
| <i>Incineração</i> | 236.520 | 3.176 | 106 |
| <i>Digestão Anaeróbica Acelerada</i> | 6.701 | 868 | 1.021 |

Elaboração própria.

É certo que nenhuma tecnologia dominará o mercado, mas a insuficiência de dados não permitiu estimar um “mix” tecnológico neste momento.

5.2 Potencial Técnico do RSU para a Produção de Biometano

Este potencial será quantificado através de duas destinações para o RSU, o aterro e a digestão anaeróbica. A metodologia adotada para o cálculo do potencial de produção de biometano foi similar à utilizada para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica, considerando a produção de biogás e GDL sendo as mesmas dos casos de geração elétrica. Contudo, recuperação máxima do aterro só atinge 80%, contra 100% no biogás. Na etapa de purificação, foi considerado que as tecnologias disponíveis conseguem atender à especificação do Gás Natural exigida pela ANP para injeção na malha de gasodutos, para o que a eficiência média é de 70% (JANUS E PERGHER, 2012), ou seja, há uma perda do metano na purificação do biogás e do GDL.

- **Potencial de produção de biometano através da recuperação de GDL**

A consideração de GDL para a produção de biometano é a mesma realizada para a geração de eletricidade de aterros. Optou-se, para o ano base considerar o potencial apresentado em MMA (2010), mesmo entendendo que este é mais próximo do potencial econômico. Foram considerados 60% de participação de metano no biogás e 70% de eficiência purificação do biogás (JANUS e PERGHER, 2012).

- **Potencial de oferta de biometano através da digestão anaeróbica acelerada (DAA)**

Assim como para o potencial de produção de biometano a partir de GDL, para o caso da digestão anaeróbica foi também utilizada a produção de biogás potencial e aplicada uma eficiência média de 70% (JANUS e PERGHER, 2012) para os processos de “upgrade” do biogás, e 60% de participação de metano no biogás.

O potencial de produção de biometano a partir da digestão anaeróbica da fração orgânica, como já citado anteriormente, tem sua curva de produção variando menos que a do potencial a partir de aterros - o que é melhor para planejar o aproveitamento, mesmo que o limite superior seja menor que o daquele.

Tabela 17
Potencial de Produção de Biometano

| | <i>Biometano (Mm³)</i> | <i>Biometano (Mm³/dia)</i> | <i>Unidades</i> |
|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| <i>GDL</i> | 678 | 1,86 | - |
| <i>Digestão Anaeróbica Acelerada</i> | 1.530 | 4,19 | 1.021 |

Elaboração própria.

Na comparação com o ano de 2010, o potencial da digestão anaeróbica acelerada é um pouco menor que o consumo do setor residencial, comercial e cogeração juntos, que ficou em 4,3 Mm³/dia.

5.3 Potencial de conservação de energia através da reciclagem

Nunca é demais reforçar a importância do baixo custo das soluções obtidas através da conservação de energia. Segundo dados do PROCEL, no período entre 1986 e 2011 foram conservados 51,2 TWh (PROCEL 2010 e 2012) ao custo médio de R\$ 53/MWh, sendo este valor inferior ao custo marginal de expansão obtido nos leilões de energia “nova” realizados.

Entretanto, alcançar o nível de seleção elevado é bastante difícil, visto que historicamente os resíduos são misturados. Uma das principais alternativas adotadas é a segregação de recicláveis por catadores de lixo, mas que atinge apenas o equivalente a 10% do potencial de recicláveis (COOPECAJU, 2006). Desta forma, é possível que a incineração seja aplicada no período em que o aumento de segregação vá ocorrendo, até que seja inviável dispor de material adequado à incineração.

É importante realçar que a eficiência energética específica (traduzida nos indicadores expostos) atualmente possível pela reciclagem deve diminuir no decorrer do tempo, uma vez que o Plano Nacional de Energia (PNE 2030) estabeleceu como meta de eficiência a redução do consumo, na indústria, de 5% no período.

O potencial de conservação de energia através da reciclagem, apresentado na tabela abaixo, foi calculado para os indicadores apresentados no capítulo 4 tanto para energia total como para somente a eletricidade com a matriz brasileira.

Tabela 18
Potencial de Conservação de Energia através da Reciclagem

| | <i>Calderoni (1991)</i> | <i>Morris min (1996)</i> | <i>Morris max (1996)</i> | <i>Warnken ISE (2007)</i> | <i>EPA min (2008)</i> | <i>EPA max (2008)</i> | <i>Médio</i> |
|--|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| Incineração - Energia Total (ktep) | 4.623 | 2.629 | 4.677 | 3.705 | 2.792 | 3.233 | 3.610 |
| Incineração - Eletricidade (GWh) | 3.742 | 2.117 | 4.918 | 2.914 | 2.935 | 3.304 | 3.322 |
| Digestão Anaeróbica Acelerada - Energia Total (ktep) | 21.481 | 16.608 | 25.875 | 16.648 | 13.974 | 17.240 | 18.638 |
| Digestão Anaeróbica Acelerada - Eletricidade (GWh) | 17.439 | 13.337 | 21.949 | 13.255 | 11.845 | 14.578 | 15.400 |

Fonte: Elaboração própria.

Esses potenciais foram calculados para cada rota tecnológica em que foi apresentada uma estimativa de potencial técnico, pois deveria entende-se que a reciclagem faz parte da cadeia de aproveitamento energético dos RSU, com respectiva disponibilização de materiais recicláveis.

Para incineração há necessidade de consumo de papéis e plásticos para atingir um determinado PCI, como mencionando anteriormente, já para a digestão anaeróbica é o inverso, há necessidade de uma segregação completa dos materiais recicláveis para a destinação da matéria orgânica ao biodigestor. Assim, é possível verificar que os potenciais de conservação para opção em que é considerada a biodigestão é bem superior à opção em que a incineração é considerada.

O potencial de conservação de energia de relevante importância, representando de 2% a 11% do consumo final de energia secundária no Brasil no ano de 2010, respectivamente para incineração e biodigestão. Esse potencial se viabiliza somente no caso da implantação de um sistema de coleta seletiva efetiva que seja capaz de segregar todos os recicláveis da fração orgânica. Já para conservação da energia elétrica esse potencial varia de 0,7% a 3,3% do consumo final de eletricidade no Brasil, para incineração e biodigestão no ano de 2010.

5.4 Consolidação do Potencial Técnico do Aproveitamento Energético dos RSU

A consolidação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, calculado considerando as premissas descritas nos itens anteriores é apresentado na tabela seguinte.

Tabela 19
Consolidação do Potencial Técnico do Aproveitamento Energético dos RSU
 ktep

| | <i>Cenário de Geração de Eletricidade</i> | <i>Energia Conservada com Reciclagem</i> | <i>Total</i> |
|--------------------------------------|---|--|--------------|
| <i>GDL</i> | 211 | - | |
| <i>Incineração</i> | 2.153 | 3.610 | 5.763 |
| <i>Digestão Anaeróbica Acelerada</i> | 589 | 18.638 | 19.226 |
| | <i>Produção de Biometano</i> | <i>Energia Conservada com Reciclagem</i> | <i>Total</i> |
| <i>GDL</i> | 583 | - | |
| <i>Digestão Anaeróbica Acelerada</i> | 1.315 | 18.638 | 19.953 |

Fonte: Elaboração própria.

É possível verificar que a conservação de energia apresenta potencial substancialmente maior que as conversões através da incineração ou biodigestão. E por esse motivo o binômio biodigestão-reciclagem mostra-se energeticamente mais vantajoso.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento do potencial de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos converge com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, visto que esta limita aos rejeitos - resíduos para os quais não haja viabilidade técnica, ambiental e econômica para reaproveitamento - a destinação a aterros sanitários a partir de 2014 e, conseqüentemente, exige a análise de viabilidade das destinações de resíduos. Este trabalho busca, no primeiro momento verificar se o potencial técnico é relevante, para posterior análise de sua viabilidade econômica e competitividade.

Os resultados mostram-se bastante interessantes. Para a geração de eletricidade as opções analisadas, biodigestão e incineração, apresentam potencial de atendimento de 1,5% e 5,4% do consumo de eletricidade nacional, com potencial de 6,9 TWh e 25 TWh, respectivamente. Para o caso da produção de biometano foi verificado que há potencial de atendimento dos setores residencial, comercial e de cogeração através da biodigestão, com potencial de 4,2 Mm³/dia.

É importante ressaltar que a conservação de energia decorrente da reciclagem de materiais presentes no lixo é responsável por importante parcela do aproveitamento energético decorrente dos resíduos sólidos, de 3,6 a 18,6 milhões de tep, incineração e biodigestão, respectivamente.

Isso indica que o binômico biodigestão-reciclagem é o que disponibiliza o maior potencial energético²⁸. Assim, uma ação de estímulo à conservação de energia via reciclagem de materiais contida nos RSU estimulada tem como consequência a disponibilização como coproduto da fração orgânica praticamente pura para a biodigestão. Ainda poderá haver uma pequena parcela em CDR encaminhada para tecnologias de incineração²⁹.

O estudo também avaliou a questão do levantamento periódico e consistente de dados para o setor de resíduos sólidos urbanos. Isto pode ser observado na opção de análise do aproveitamento energético através de aterros sanitários e recuperação de biogás de aterro (GDL). Como os modelos indicam uma produção de GDL consistente somente a partir do segundo haveria necessidade de um acompanhamento detalhado da disponibilização dos resíduos sólidos, que abordagem de análise agregada para o ano base acarretaria em um erro considerável na comparação com outras opções. Por este motivo, foram apresentadas as estimativas realizadas em MMA (2010), mesmo entendendo que estas não representam somente o potencial técnico.

²⁸ Essa afirmação corresponde a análise realizada em nível nacional. É importante compreender que as condições locais são variáveis e afetam as decisões de investimento, podendo haver diferentes esquemas de aproveitamento energéticos de resíduos sólidos urbanos.

²⁹ Ainda que, em ambos os casos, seja possível utilizar o composto orgânico que será obtido para a produção de energéticos decorrentes do aproveitamento do adubo produzido, como oleaginosas, reflorestamento, etc.

Todavia, entende-se também que, como a PNRS estabelece que a opção pela destinação de resíduos aos aterros deve ser feita somente após a inviabilização de outras opções de destinação, a análise realizada está totalmente contextualizada.

Devem ser consideradas como fragilidades deste trabalho a inexistência de série históricas sobre a produção dos RSU no país; a falta de dados sobre análise gravimétrica do lixo de populações de diferentes condições sociais, de forma a permitir verificar a existência de correlação expressiva, bem como para analisar o potencial energético específico dos resíduos de cada um destes grupos.

Por fim, o aproveitamento energético dos resíduos requer análise multidimensional, abrangendo o tratamento adequado do lixo e do esgoto, a energia potencial disponível, a mitigação de emissões de poluentes e o benefício social, caracterizando-se como uma solução de transformação socioambiental da realidade de tratamento de resíduos no Brasil.

Os próximos estudos apresentaram as análises de viabilidade econômica e competitividade destes potenciais, bem como os principais condicionantes. Também serão apresentadas análises sobre os resíduos líquidos urbanos (esgoto), que como mencionado faz parte da análise multidimensional dos resíduos urbanos.

Além desses estudos, este Inventário será continuamente atualizado, tanto em termos de potencial como metodologicamente. Contudo, a atualização é extremamente dependente da disponibilidade de dados, na maioria das vezes locais, como produção e composição dos resíduos urbanos municipais.

A gigantesca demanda por serviços de saneamento pode ser atendida por soluções que maximizem o potencial de oferta de energia renovável, renda e serviços ambientais para a sociedade. Para tanto, são necessárias ações coordenadas entre as diversas esferas políticas (federal, estadual e municipal) e sociedade civil, entendendo que há diferentes realidades no tocante às características dos resíduos, da infraestrutura e de instituições vinculados ao tema por todo o país e, com isso, as soluções são múltiplas e diversas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAL [Associação Brasileira do Alumínio]. Anuário estatístico 2009. ABAL 2009.
- ABNT [Associação Brasileira de Normas Técnicas]. Resíduos Sólidos: Classificação. NBR 10.004. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- _____. Amostragem de Resíduos - Procedimentos. NBR 10.007. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABRELPE [Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais]. Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2012. Disponível em <http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm>. Acesso em outubro de 2013. São Paulo: ABRELPE, 2012.
- AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. Biogas Handbook. 2008.
- ANP [Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis]. Resolução 16 (que estabelece no Regulamento Técnico da ANP parte integrante desta Resolução, a especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado em todo território nacional). 2008.
- BOGNER, J.E. & OLIVEIRA, L.B. . Reduction of global landfill methane emissions and using energy for waste. In: Ribeiro, S.K. & Araújo, M.S.M.. (Org.). IPCC outreach in Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Rio 360 Comunicação, 2007, p. 26-33.
- CALDERONI, Sabetai. Os Bilhões Perdidos no Lixo. São Paulo: Ed. USP (3ª Ed.), 1996.
- CEMPRE [Compromisso Empresarial para Reciclagem]. Fichas Técnicas. PET - O mercado para Reciclagem. Disponível em <<http://www.cempre.org.br>>. Acesso em maio de 2008.
- CEWEP [Confederation of European Waste-to-Energy Plants]. Waste to energy and the revision of the Waste Framework Directive. Disponível em http://www.cewep.eu/information/publicationsandstudies/studies/climate-protection/309.February_FFact_study_Waste-to-Energys_contribution_to_climate_protection.html. 2008. 27 p. Acessado em 22 de agosto de 2009.
- _____. Recycling and Waste-to-Energy in combination for sustainable waste management. Disponível em http://www.cewep.eu/m_1038.2012. 2 p. Acessado em novembro de 2012.
- COELCE [Companhia de Eletricidade do Ceará]. Projeto ECOELCE enviado para a ANEEL. Comunicação pessoal. 2008.
- COOPECAJU. Disponível em <http://clovisakira.blogspot.com.br/2012/03/ineficientes-usinas-de-reciclagem-de.html>. 2006

- EIGENHEER, E.M. Lixo: A limpeza urbana através dos tempos. Ed. Campus. 144p. Porto Alegre. 2009.
- ELECTRIGAZ. Feasibility Study - Biogas Upgrading and grid injection in the Fraser Valey, British Columbia. 2008
- EPA [U. S. Environmental Protection Agency]. 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. Washington, DC: EPA, 1998.
- _____. Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2006. Washington, DC: EPA, 2007a. (Disponível em <<http://www.epa.gov>>). Acesso em junho de 2008.
- _____. Waste Reduction Model. Washington, DC: EPA, 2007b. (Disponível em <<http://www.epa.gov>>). Acesso em dezembro de 2007.
- _____. Opportunities for and benefits of combined heat and Power at wastewater treatment facilities. 48 p. Disponível em www.epa.gov/chp. 2007c. Acessado em 22/11/2007.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Balanço Energético Nacional. 2011a.
- _____. Resultados do Leilão A-5. 2011b.
- _____. Levantamento das principais tecnologias e sistemas de utilização no mundo e tendências tecnológicas. Potencial de aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos. 219 p. 2007b.
- ETC/RWM [European Topic Centre on Resources and Waste Management]. Municipal waste management and greenhouse gases. ETC/RWM working paper 2008/1. 61 p. 2008.
- IBAM [Instituto Brasileiro de Administração Municipal]. O Cenário dos Resíduos Sólidos no Brasil. Boletim Sobre Resíduos Sólidos. Boletim 1. Disponível em <<http://www.ibam.org.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm>>. 2004. Acesso em maio de 2008.
- IBGE [Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística]. II Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Rio de Janeiro: IBGE, 2000.
- _____. Atlas do Saneamento 2011. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.
- IEA [International Energy Agency]. Clean energy. Progress report. IEA input to the Clean Energy Ministerial. 72 p. 2011.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. Waste Model. 2006.
- _____. Climate Change 2007: The Physical Science basis Summary for Policymakers. Geneva: IPCC, 2007.
- IPT [Instituto de Pesquisas Tecnológicas]/CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. (2a reimpressão). São Paulo: IPT/CEMPRE, 1998.

- ISWA [International Solid Waste Association]. Waste-to-Energy State-of-the-Art Report. 2012. Disponível em http://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUId=3119 . Acessado em dezembro de 2012.
- IVIG/COPPE [Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais da Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da UFRJ]. Rotas Tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU. 237 p. 2005.
- JANUS & PERGHER, 2012. Orçamento para fornecimento de sistemas PSA para tratamento de biogás e obtenção de biometano. Comunicação pessoal.
- JORDÃO, E. P. & PESSÔA, C. A. (1995), Tratamento de Esgotos Domésticos, 3a edição, ABES, 681p., Rio de Janeiro, RJ.
- KOMPOGAS. 2008. Fator de produção de biogás. Disponível em www.evergreenenergy.com.au. Acessado em abril de 2011.
- MARTIN GmbH. Tecnologias de incineração de resíduos urbanos. Disponível em http://www.martingmbh.de/index_en.php?level=0&CatID=2&inhalt_id=1. Acessado em abril de 2008.
- MESCA, D.; HERNÁNDEZ, S. P.; CONOCI, A.; RUSSO, A. MSW landfill desulfurization. International Journal of Hydrogen Energy, n. 36, 7884-7890. 2011.
- MMA [Ministério do Meio Ambiente]. Estudo sobre o potencial de geração de energia a partir dos resíduos de saneamento (lixo e esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável. 2010.
- _____. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Versão após Audiências e Consultas Públicas para Conselhos Nacionais. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/E99F974D/Doc_PNRS_consultaspublicas1.pdf>. Acessado em: outubro de 2013.
- MORRIS, J. Recycling Versus Incineration: An Energy Conservation Analysis. In: Journal of Hazardous Materials, vol. 47, pp. 277-293. Amsterdam: Elsevier, 1996.
- MUYLAERT, M. S. et alii. Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta. Rio de Janeiro: Ed. COPPE/UFRJ, 2000.
- NUNES, F. F. Consumo consciente: Brasil é Líder na Reciclagem de Latas de Alumínio. Disponível em <<http://www.web.infomoney.com.br>>. Acesso em maio de 2008.
- OLIVEIRA, L. B. Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil. Tese de doutorado (Ph.D) em Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- OLIVEIRA, L. B. e ROSA, L. P. Brazilian Waste Potential: Energy, Environmental, Social and Economic Benefits. In: Energy Policy, v. 31, pp. Amsterdam: Elsevier, 2003.

- OLIVEIRA, P. T. S. e PEIXOTO FILHO, G. E. C. Levantamento da Situação Atual da Reciclagem de Materiais Plásticos no Município de Campo Grande - MS. In: IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2007, Campo Grande. Anais... Campo Grande: ANTAC, 2007.
- ONU [Organização das Nações Unidas]. Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima. Nova York: PNUMA, 1992.
- _____. Protocolo de Kyoto à Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima. Brasília: MCT, [s.d].
- OWS [Organic Waste System]. Digestão Anaeróbica Seca. Disponível em www.ows.be. Acessado em 2008.
- PLANSAB [Plano Nacional de Saneamento Básico (proposta)]. Ministério das Cidades. 153 p. Abril de 2011. Disponível em www.cidades.gov.br. Acessado em 20 de maio de 2011.
- PLASTIVIDA [Instituto Sócio-Ambiental dos Plásticos]. Alternativas Sócio Ambientais para o Plástico Pós-Consumo. 2008. Disponível em www.plastivida.org.br. Acessado em 22 de dezembro de 2008.
- PROCEL. Resultados do PROCEL 2009. Disponível em: <
<http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={67469FA5-276E-431F-B9C0-6F40630498EE}>>. Acessado em abril de 2013.
- PROCEL. Resultados Procel 2012 - Ano base 2011. Disponível em: <
<http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={67469FA5-276E-431F-B9C0-6F40630498EE}>> Acessado em abril de 2013.
- RAND, T., HAUKOHL, J. e MARXEN, U. Municipal Solid Waste Incineration - A Decision Maker's Guide. Washington: IBRD, 2000.
- RISE-AT [Regional Information Service Center for South East Asia on Appropriate Technology]. Review of Current Status of Anærobic Digestion Technology for Treatment of Municipal Solid Waste. Chiang Mai: Chiang Mai University, 1998.
- RYCKEBOSCH, E.; DROUILLOM, M.; VERVAEREN, H.. Techniques for transformation of biogas to biomethane. Biomass and Bioenergy, n. 35, p. 1633-1645. 2011.
- ROBRA, S. Uso da glicerina bruta em biodigestão anaeróbica: aspectos tecnológicos, ambientais e ecológicos. Dissertação (de Mestrado). Universidade Estadual de Santa Cruz - Ilhéus, BA. 2008.
- SERÔA DA MOTTA, R. et CHERMONT, L. Aspectos econômicos da gestão integrada de resíduos sólidos. Texto para discussão nº 416. Rio de Janeiro: IPEA, 1996.
- SNIS [Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento]. Disponível em www.snis.gov.br. Acessado em 16/09/2009.
- THEMELIS, N. J. An Overview OF the Global Waste-to-Energy Industry. In: Waste Management World, Jul-Aug 2003, pp. 40-47. Tulsa, OK: Pennwell Publishing, 2003.

- THEMELIS, N. J. et KAUFMAN S. M. Waste in a Land of Plenty - Solid Waste Generation and Management in the US. In: Waste Management World, Sep-Oct 2004, pp. 23-28. Tulsa, OK: Pennwell Publishing, 2003.
- VERNA, Shegali. Anærobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. Tese de Mestrado (M.Sc) em Earth Resources Engineering. New York: Columbia University, 2002.
- VILLA NOVA, J, 2001. A Reciclagem das Latas de Alumínio e o seu Efeito na Economia Informal. Disponível em <http://www.abralatas.org.br/downloads/reciclagem_na_economia_informal.pdf>. (13p.) Acesso em maio de 2008. [s.l.]: UNIVAP, [s.d.].
- WARNKEN ISE. Potential for Greenhouse Gas Abatement From Waste Management and Resource Recovery Activities in Australia. Final Report, 54p. Sydney, NSW: Warnken ISE/SITA, 2007.
- WORLD BANK. What a waste - A global review of solid waste management. Urban development series. Knowledge papers. 116 p. 2012. Disponível em www.worldbank.org/urban. Acessado em 22 de agosto de 2012.