

SÉRIE
RECURSOS ENERGÉTICOS

NOTA TÉCNICA DEN 06/08
Avaliação Preliminar do

Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS

Rio de Janeiro
Novembro de 2008

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



SÉRIE
RECURSOS ENERGÉTICOS

Governo Federal

Ministério de Minas e Energia

Ministro
Édison Lobão

Secretário Executivo
Márcio Pereira Zimmermann

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento
Energético
Altino Ventura Filho

NOTA TÉCNICA DEN 06/08

Avaliação Preliminar do

**Aproveitamento Energético dos
Resíduos Sólidos Urbanos de
Campo Grande, MS**



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei n° 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Maurício Tiomno Tolmasquim

Diretor de Estudos Econômicos e Energéticos
Amílcar Guerreiro

Diretor de Estudos de Energia Elétrica
José Carlos de Miranda Farias

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível
Gelson Baptista Serva (Interino)

Diretor de Gestão Corporativa
Ibanês César Cássel

Coordenação Geral

Maurício Tiomno Tolmasquim
Amílcar Guerreiro

Coordenação Executiva

Amílcar Guerreiro
Juarez Castrillon Lopes

Equipe Técnica

Luciano Basto
José Manuel David

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

Sede

SAN - Quadra 1 - Bloco B - Sala 100-A
70041-903 - Brasília - DF

Escritório Central

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

Rio de Janeiro
Novembro de 2008

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

SÉRIE
RECURSOS ENERGÉTICOS

NOTA TÉCNICA DEN 06/08

Avaliação Preliminar do
**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE
CAMPO GRANDE, MS****SUMÁRIO**

AGRADECIMENTOS	5
1. INTRODUÇÃO	7
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO ESTUDO	7
1.2 VISÃO GERAL DO ESTUDO	9
2. O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU COMO PARTE DE UMA ESTRATÉGIA DE DEFESA AMBIENTAL	11
2.1 SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	11
2.2 A QUESTÃO AMBIENTAL	13
2.3 EMISSÕES DE RSU	13
2.4 CONVENÇÃO DO CLIMA E CRÉDITOS DE CARBONO	16
3. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RSU	21
3.1 INTRODUÇÃO	21
3.2 ATERROS SANITÁRIOS E PRODUÇÃO DE BIOGÁS	21
3.3 DIGESTÃO ANAERÓBICA (BIOGÁS, ADUBO ORGÂNICO)	25
3.4 INCINERAÇÃO (COGERAÇÃO)	27
3.5 CICLO COMBINADO OTIMIZADO	29
4. A RECICLAGEM DE RSU	31
4.1 INTRODUÇÃO	31
4.2 BENEFÍCIOS DA RECICLAGEM	32
4.3 RECICLAGEM NO BRASIL	33
4.4 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA PROVENIENTE DA RECICLAGEM	34

5. RSU EM CAMPO GRANDE	37
5.1 O MUNICÍPIO DE CAMPO GRANDE	37
5.2 OS RESÍDUOS URBANOS DE CAMPO GRANDE	38
5.3 CARACTERÍSTICAS DA COLETA DE LIXO EM CAMPO GRANDE	39
6. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA REALIZADA	43
6.1 ASPECTOS GERAIS	43
6.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS	44
6.3 PLANO AMOSTRAL E AMOSTRAGEM	45
7. RESULTADOS DA PESQUISA	49
7.1 QUANTIDADE DE RSU COLETADA	49
7.2 DISTRIBUIÇÃO SEMANAL DE RSU	49
7.3 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE RSU	51
7.4 ANÁLISE GRAVIMÉTRICA	52
8. ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
8.1 QUANTIDADE DE RSU COLETADA	55
8.2 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO RSU	55
9. POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RSU DE CAMPO GRANDE	59
9.1 ATERRO EXISTENTE	59
9.2 HIPÓTESES BÁSICAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO NOVO ATERRO	59
9.3 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO APROVEITAMENTO DO GÁS DO LIXO	60
9.4 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA	61
9.5 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA INCINERAÇÃO	62
9.6 RECICLAGEM	63
9.7 EMISSÕES EVITADAS	64
10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	65
11. BIBLIOGRAFIA	71

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1:</i>	Destino de RSU em diversos países	12
<i>Tabela 2:</i>	Estimativas de Emissão de Metano de Aterros Sanitários	16
<i>Tabela 3:</i>	Composição típica do biogás	27
<i>Tabela 4:</i>	Poder calorífico de materiais encontrados em RSU	28
<i>Tabela 5:</i>	Índices de reciclagem de embalagens PET e latas de alumínio (2006)	34
<i>Tabela 6:</i>	Potencial de conservação de energia elétrica a partir da reciclagem de embalagens	35
<i>Tabela 7:</i>	Potencial de conservação de energia elétrica a partir da reciclagem de embalagens no Brasil	36
<i>Tabela 8:</i>	Quantidade de RSU coletado em Campo Grande	38
<i>Tabela 9:</i>	Composição % de RSU de Campo Grande (2001)	39
<i>Tabela 10:</i>	Composição % de RSU de Campo Grande (2008)	52
<i>Tabela 11:</i>	Composição % de RSU de Campo Grande (2008), por estrato	53
<i>Tabela 12:</i>	Comparação internacional da composição gravimétrica de RSU	57
<i>Tabela 13:</i>	Composição gravimétrica (%) de RSU de capitais brasileiras	58
<i>Tabela 14:</i>	Índices operacionais do aproveitamento do GDL no aterro sanitário de Campo Grande	60
<i>Tabela 15:</i>	Índices operacionais do aproveitamento do GDL no aterro sanitário de Campo Grande	62
<i>Tabela 16:</i>	Índices operacionais da incineração no aterro sanitário de Campo Grande	63
<i>Tabela 17:</i>	Estimativa do benefício energético da reciclagem de material encontrado no lixo de Campo Grande	66
<i>Tabela 18:</i>	Caracterização das alternativas de aproveitamento energético do RSU de Campo Grande	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Estrutura da nota técnica	10
Figura 2:	Emissões de metano por tipo de resíduo	15
Figura 3:	Emissões de metano por tipo de disposição de RSU	15
Figura 4:	Evolução histórica de preço de créditos de carbono	18
Figura 5:	Evolução típica da produção de biogás em aterro sanitário	23
Figura 6:	Rotas para utilização de gás de lixo (GDL)	25
Figura 7:	Processo de digestão anaeróbica de RSU	26
Figura 8:	Maquete digital do ECOPOLO para o Aterro Sanitário do Caju - Rio de Janeiro	30
Figura 9:	Localização da Cidade de Campo Grande	37
Figura 10:	Setores de Coleta de Lixo em Campo Grande	40
Figura 11:	Caminhão de coleta de lixo de Campo Grande, na entrada do aterro	41
Figura 12:	Calendário dos ciclos de amostragem realizados	45
Figura 13:	Distribuição semanal do peso de RSU coletado na campanha (% do peso total coletado em uma semana)	50
Figura 14:	Distribuição semanal do peso de RSU coletado: histórico x campanha (% do peso total coletado em uma semana)	50
Figura 15:	Distribuição semanal do peso de RSU coletado na campanha, por estrato (% do peso total coletado em uma semana)	51
Figura 16:	Distribuição espacial do peso de RSU coletado na campanha, por estrato (% do peso médio total coletado em um dia)	52
Figura 17:	Quantidade de RSU coletado em cidades brasileiras. Amostra de cidades com população urbana entre 300 mil e 900 mil habitantes	56
Figura 18:	Quantidade de RSU coletado em cidades brasileiras. Amostra de cidades com população urbana superior a 1 milhão de habitantes	56
Figura 19:	Quantidade de RSU coletado na região Centro-Oeste	57
Figura 20:	Produção de gás e geração de energia elétrica no aterro sanitário de Campo Grande	61

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho contou com a contribuição e o apoio técnico e administrativo dos professores **Frederico Luiz de Freitas Júnior**, Secretário Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura de Campo Grande, e **Antonio Carlos Silva Sampaio**, da mesma secretaria. Igualmente relevantes foram as contribuições e atuações de **Ivan Garcia de Oliveira**, gerente da Financial Construtora Industrial Ltda., firma responsável pela coleta dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Campo Grande, e de **Marcus Vinicius Acceturi Szukala**, engenheiro da mesma firma.

Cumpre destacar especialmente a contribuição de **Donaldo Rodrigues da Costa**, que, como experiente e profundo conhecedor da cidade de Campo Grande, de suas características sócio-econômicas, inclusive e especialmente, da característica geral dos resíduos urbanos produzidos nos diferentes setores em que a cidade pode ser repartida, foi de fundamental importância para a correta seleção dos estratos da amostragem realizada, afinal elemento básico do trabalho realizado.

A todos é de justiça registrar o agradecimento da EPE. A despeito dessas contribuições, vale ressaltar que as premissas adotadas, conclusões e recomendações aqui apresentadas, ainda que enriquecidas pela discussão e troca de informações com os profissionais citados, são da única e exclusiva responsabilidade técnica da EPE cuja equipe, com base nos elementos recolhidos, elaborou uma análise crítica e construiu sua visão própria relativamente aos possíveis cenários para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos do município de Campo Grande.

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

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e motivação do estudo

De acordo com a 2ª Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada pelo IBGE no ano 2000, eram coletadas nesse ano no Brasil, diariamente, em torno de 125,2 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), correspondendo a 80% do total gerado¹. A principal destinação 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.

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.

Nas principais cidades brasileiras, os vazadouros utilizados estão em fase de encerramento de operação. Ao lado da 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 co-produtos gerados, como energia elétrica, adubos naturais ou cinzas para a construção civil.

O aproveitamento energético de RSU é, de fato, uma alternativa promissora. De imediato, se apresenta a alternativa de geração de energia elétrica. Neste caso, embora não se trate de potencial com dimensão suficiente para sustentar uma estratégia de expansão da oferta de energia elétrica do país no longo prazo, a geração de eletricidade a partir de RSU é, sem dúvida, elemento importante de uma estratégia regional ou local e, portanto, não deve ser desconsiderada.

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

¹ Conforme boletim sobre resíduos sólidos (Boletim 1) do Instituto Brasileiro de Administração Municipal - IBAM, 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 conta com serviços regulares de coleta”.

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.

Dentro de uma perspectiva de longo prazo, o Plano Nacional de Energia 2030 - PNE 2030 (EPE, 2007) considera a possibilidade de instalação de até 1.300 MW nos próximos 25 anos em termelétricas utilizando RSU, em uma indicação de que são esperados avanços importantes no aproveitamento energético do lixo urbano.

Ao lado dos evidentes benefícios ambientais, sanitários e sociais que proporciona, o aproveitamento energético de RSU já apresenta hoje alternativas tecnológicas maduras. Aliás, as tecnologias disponíveis nem são tão recentes assim. São dos anos 80 as primeiras termelétricas implantadas nos Estados Unidos, na Europa e no Japão acionadas por RSU.

Incineração e processamento biológico são, essencialmente, as duas formas adotadas para se produzir energia elétrica com a quase total eliminação da necessidade de aterros sanitários. No primeiro caso, os riscos ambientais associados (emissão de dioxinas e furanos) têm sido progressivamente minimizados com o desenvolvimento, nos últimos anos, de sistemas de filtros capazes de reduzir substancialmente essas emissões. A controvérsia, porém, ainda persiste. Na Alemanha, tem sido concedidos licenciamentos a um número crescente de usinas que utilizam a técnica da incineração. Em contraposição, em países como Suécia, Canadá, Bélgica e Holanda, alguns desses incineradores têm sido fechados.

Considera-se que os processos biológicos agridem menos a Natureza. 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. A energia elétrica é produzida a partir do metano gerado nesse processamento.

Dentro de uma visão mais abrangente, o aproveitamento energético de 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 de RSU.

Em qualquer caso, o que é certo é a necessidade de se dispor de informações sobre a composição do RSU a ser utilizado. E o conhecimento mais preciso da composição do RSU é, de fato, uma das restrições a serem superadas com vistas ao aproveitamento energético do lixo urbano. Assim, na busca de melhorar essas informações, a EPE realizou, no âmbito dos estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2008/2017, a ser publicado, levantamento de dados com vistas à formatação de pesquisa de campo sobre a disponibilidade de RSU nas capitais brasileiras.

Com relação ao município de Campo Grande, capital do Estado do Mato Grosso do Sul, as informações disponíveis sobre o RSU gerado e coletado referiam-se a uma análise gravimétrica realizada em 2001, para a qual não havia indicações de fontes ou de

metodologia de execução. Essa situação fática relativizava a qualidade das informações e sugeria que pesquisas adicionais fossem realizadas.

Contribuindo para a oportunidade dessas pesquisas, há a situação atual do tratamento do RSU coletado no município. Campo Grande tem uma população de cerca de 750 mil habitantes e produz uma quantidade de RSU de 180 mil toneladas por ano (cerca de 500 toneladas diárias). Atualmente, o material coletado é disposto em um aterro controlado que se encontra próximo do esgotamento. Em local próximo, está sendo finalizada a construção de um aterro sanitário. Assim, caracteriza-se uma janela de oportunidade para o desenvolvimento de um projeto que permita o aproveitamento energético do RSU de Campo Grande.

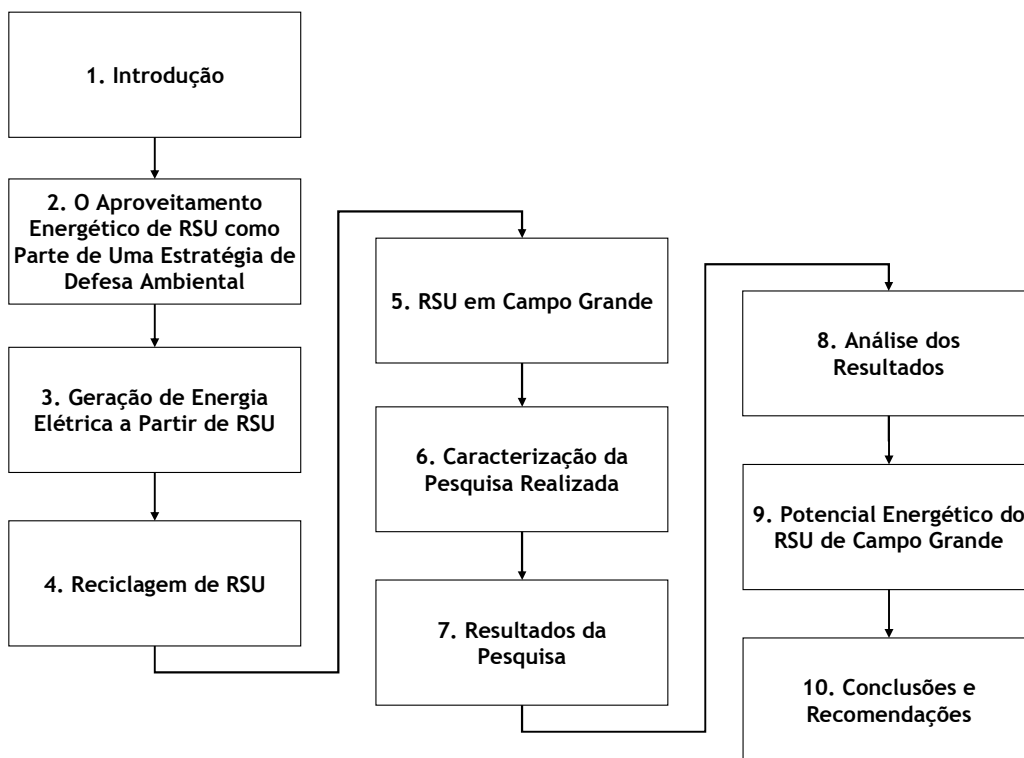
Neste contexto, a EPE e a Prefeitura Municipal de Campo Grande firmaram, no dia 5 de junho de 2007, acordo para intercâmbio e cooperação técnica com o objeto maior de avaliar o potencial de aproveitamento energético do RSU do município. Dentro das possibilidades oferecidas, foram realizadas, durante a vigência do acordo, as amostragens e a classificação do RSU coletado em Campo Grande. Esta nota técnica documenta e consolida os procedimentos realizados e as análises e os resultados alcançados.

1.2 Visão geral do estudo

Este estudo é o resultado de acordo estabelecido entre a Empresa de Pesquisa Energética - EPE - e a Prefeitura Municipal de Campo Grande, com o objetivo de estabelecer um intercâmbio de informações e de cooperação técnica relativas às atividades voltadas à elaboração, pela EPE, dos estudos para o planejamento do aproveitamento energético de RSU. Para tanto, foi elaborado um Plano Amostral e realizada a amostragem do RSU da cidade com base na qual se efetuou a análise gravimétrica, de modo a melhorar o conhecimento sobre o RSU coletado no município.

Esta nota técnica documenta o estudo realizado. Sua estrutura é apresentada esquematicamente na Figura 1. Após esta introdução, é apresentada, na seção 2, uma abordagem geral de como o aproveitamento energético de RSU se insere em uma estratégia de defesa ambiental. As duas seções que se seguem ainda se referem a uma abordagem geral, porém estão focadas às duas rotas do manejo de RSU relacionadas ao seu aproveitamento energético, quais sejam: geração de energia elétrica (seção 3) e reciclagem (seção 4). As informações básicas sobre o município de Campo Grande e sobre a produção e coleta de RSU nele produzido são apresentadas na seção 5. As seções subsequentes se reportam à pesquisa realizada, descrevendo-se as bases da campanha e a metodologia aplicada (seção 6) e apresentando os resultados apurados (seção 7). A seção 8 traz uma análise desses resultados e a seguinte a avaliação do potencial energético de RSU em Campo Grande. Por fim, na seção 10 resumem-se as principais conclusões e recomendações.

Figura 1: Estrutura da nota técnica



2. O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU COMO PARTE DE UMA ESTRATÉGIA DE DEFESA AMBIENTAL

2.1 Sobre Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Matéria-prima fora do lugar ou dinheiro jogado fora, o termo resíduo engloba os diversos artefatos utilizados pelo homem que tenham perdido sua utilidade para cumprir o fim a que foram destinados inicialmente. 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 semi-sólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se, também, resíduo sólido os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT, 1987).

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.

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 de RSU, como pode-se concluir do exame da Tabela 1.

Tabela 1: Destino de RSU em diversos países

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

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

Percebe-se que nos países onde a reciclagem e a compostagem são mais avançadas, é também alto o índice de incineração. Observa-se, além disso, que é ainda elevada a destinação de RSU para aterros.

2.2 A questão ambiental

Pode-se afirmar que a poluição local, relacionada à área de destinação final, é a principal questão ambiental dos RSU. Com efeito, as regiões vizinhas à área utilizadas como depósito final de RSU perdem atratividade, principalmente para o uso comercial e residencial. Como decorrência da conseqüente desvalorização das áreas no entorno dos depósitos de lixo, essa poluição local termina por afetar principalmente a população das classes menos favorecidas, de mais baixa renda.

Os principais elementos da poluição local são o mau cheiro, a presença de animais que funcionam como vetores de doenças, como urubus e ratos entre outros, e os riscos de explosão. Além disso, de uma forma geral, é elevado o potencial de poluição do solo e do lençol freático. Não por acaso, as manifestações contrárias à instalação de depósitos de lixo nas proximidades de áreas urbanas passaram a ser conhecidas, internacionalmente, pela sigla NIMBY, referente à expressão inglesa “*not in my back yard*”, que reflete o paradoxal interesse de todos em ter o problema resolvido, desde que longe “do meu quintal”.

Contudo, os locais de disposição de RSU são também fonte de emissão de gases de efeito estufa, considerados responsáveis pelo aquecimento global. Dessa forma, ampliou-se o interesse em conferir tratamento adequado à gestão de RSU. Atualmente, a utilização de tecnologias que evitem a decomposição anaeróbica dos resíduos, ou que recuperem e queimem esses gases, é incentivada com recursos a fundo perdido, conhecidos como créditos de carbono.

Em adição, o aproveitamento energético de RSU permite a substituição da geração de eletricidade a partir de fontes fósseis, com o que se logra também evitar a emissão de gases que seria feita por tais fontes. No Brasil, projetos submetidos à Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMA) consideram que cada MWh gerado no subsistema Sudeste/Centro-Oeste provoca emissões de 67,8 kg CO₂ equivalente, considerado o *mix* de fontes de geração existentes neste subsistema. Na região Sul, pela presença de termelétricas a carvão, esse índice chega a 173,7 kg CO₂/MWh.

2.3 Emissões de RSU

De acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 1998), são quatro as principais formas de relação entre RSU e o efeito estufa:

- **emissão de dióxido de carbono (CO₂)** decorrente do consumo de energia para extração e produção dos bens (incluindo a extração e processamento dos combustíveis a serem usados);

- **emissão de CO₂** oriunda do consumo não-energético de combustíveis no processo de produção dos bens;
- **emissão de metano (CH₄)** a partir dos aterros sanitários em que os materiais acima e os restos de alimentos são depositados² e se decompõem; e
- **fixação de carbono**³ das parcelas dos materiais que não se decompõem nos aterros sanitários.

Uma quinta relação é a emissão de CO₂ devida ao transporte dos resíduos, desde a coleta até a destinação final.

Mais especificamente, as emissões produzidas pela decomposição dos resíduos em aterros sanitários são compostas por metano (45% a 60%), dióxido de carbono (40% a 60%), nitrogênio (2% a 5%) e, em quantidades inferiores a 1%, de dezenas de contaminantes orgânicos e inorgânicos conhecidos pela sigla NMOCs (Non-Methane Organic Compounds), que incluem benzeno, tolueno, clorados, mercúrio, organometálicos, etc.

Embora relativamente constantes em termos de composição química, as emissões variam tanto em velocidade de produção quanto em quantidade produzida ao longo do tempo de deposição, em função de fatores climáticos, forma de disposição e da própria composição dos rejeitos.

Resíduos compostos predominantemente por carboidratos tendem a produzir igual percentual de metano e de dióxido de carbono, enquanto que resíduos compostos predominantemente por gordura e proteína tendem a apresentar 55% de metano e 45% de dióxido de carbono. Umidade e calor tendem a acelerar a decomposição da matéria orgânica e, portanto, a aumentar a velocidade de decaimento da produção de emissões. A quantidade de celulose no material em decomposição também afeta a taxa de decaimento da produção, menor quanto maior a presença de celulose.

A Figura 2 mostra a evolução da produção de metano de alguns componentes habitualmente presentes no lixo urbano, obtida a partir do modelo matemático do IPCC (*Waste Model*⁴). Para efeito de cálculo, admitiu-se igual quantidade de 1.000 toneladas de cada um dos materiais, depositadas uma única vez em aterro sanitário.

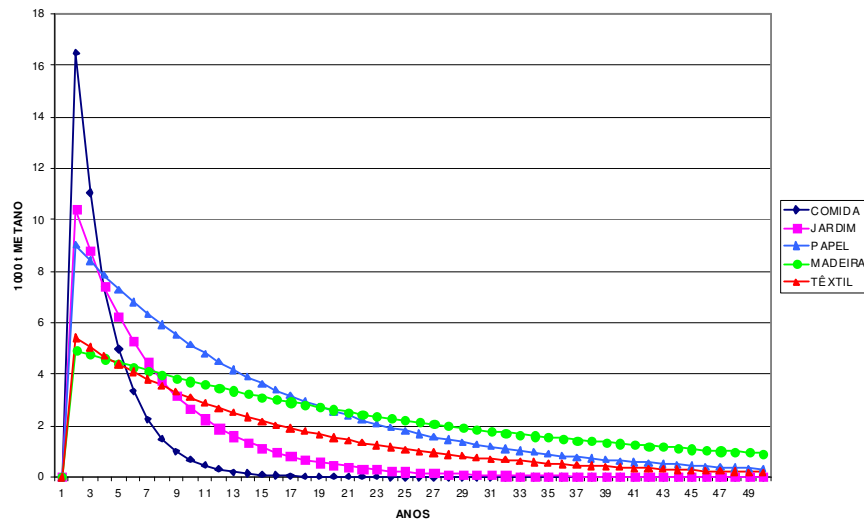
Observa-se que a produção máxima de metano é alcançada pouco tempo após a deposição do material, seguida de decaimento exponencial, mais lento ou mais rápido dependendo do material. A quantidade de metano produzida até a decomposição total corresponde, em peso, a cerca de 5% dos restos de alimentos depositados em aterro e a 13,5% da quantidade de madeira. Para os têxteis, a relação é de 8%.

² O CO₂ emitido pela fermentação do lixo não é contabilizado como gás de efeito estufa pelo IPCC, pois é oriundo de biomassa cultivada (alimentos e papel).

³ As metodologias para inventários propostas pelo IPCC não consideram este pleito de fixação. Nenhum projeto de carbono aprovado solicitou este benefício, até o momento.

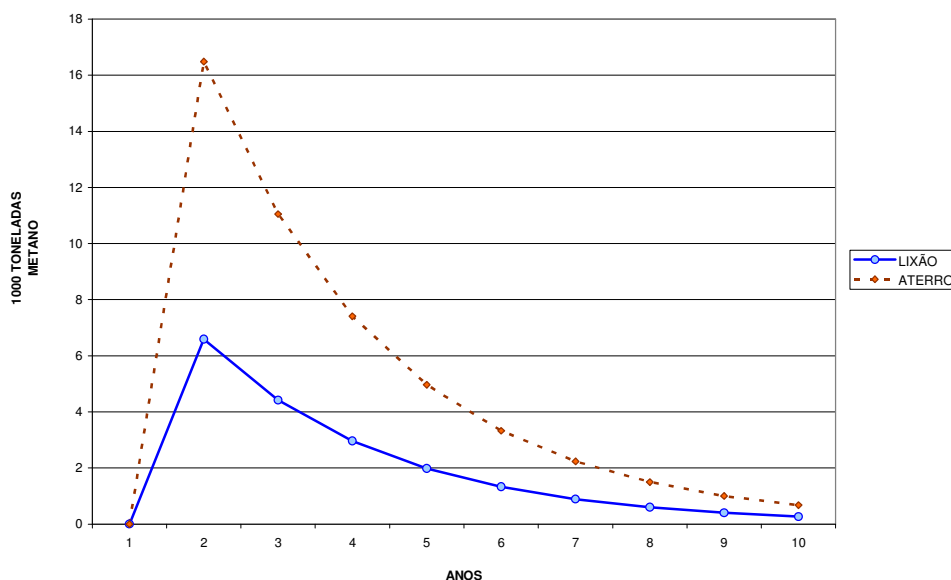
⁴ 2006 IPCC Guide Lines for National Greenhouse Gas Inventory

Figura 2: Emissões de metano por tipo de resíduo



A Figura 3 ilustra a influência da forma de deposição na evolução temporal das emissões para duas situações de depósito apenas de restos de alimentos (em ambos os casos foram consideradas condições ambientais tropicais e úmidas): “i” dispostos em vazadouro a céu aberto (lixão) e “ii” dispostos em aterro sanitário. As emissões acumuladas na situação “i” somam 0,4 t CO₂ eq. e na situação “ii”, atingem 0,9 t CO₂ eq. Esses cálculos sugerem que os resíduos de alimentos depositados em aterro sanitário emitem mais de o dobro do que aqueles depositados em lixões a céu aberto.

Figura 3: Emissões de metano por tipo de disposição de RSU



Esse mesmo raciocínio pode ser aplicado para estimar outras características dos resíduos, como o poder calorífico. Isso evidencia quão relevante é procurar dispor de informações qualificadas sobre a composição de RSU.

A preocupação com as emissões de RSU é procedente, ainda que, segundo Bogner (2007), as emissões do “setor resíduos” representem menos de 5% do total de emissões de gases causadores do efeito estufa. Em todo o mundo, aterros sanitários produzem entre 20 e 60 milhões de toneladas de CH₄ por ano (ver Tabela 2), resultado direto da decomposição orgânica dos componentes do lixo (Muylaert et alli, 2000). Ainda que cerca de dois terços destas emissões ocorram em países desenvolvidos, a contribuição relativa dos países em desenvolvimento está mudando rapidamente devido às tendências de crescimento populacional e urbanização, bem como às necessidades de crescimento econômico. Com certeza, estes países serão responsáveis por uma parcela cada vez maior das emissões de metano. Mesmo assim, não haverá alteração nas emissões per capita, pois as dos países em desenvolvimento permanecerão por muitas décadas menores do que aquelas dos países desenvolvidos (idem).

Tabela 2: Estimativas de Emissão de Metano de Aterros Sanitários

País	10 ⁶ t/ano ⁽ⁱ⁾
Europa ⁽ⁱⁱ⁾	8 - 12
Reino Unido	1 - 3
Brasil	0,7 - 2,2
Índia	0,2 - 0,8
Polônia	0,1 - 0,4
Outros	11 - 39
Mundo	21 - 57

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

(ii) Muylart et alli, 2000

Considerando que, conforme o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 1996), o metano (CH₄) tem potencial de aquecimento global⁵ para 100 anos 21 vezes maior que o dióxido de carbono (CO₂), a simples queima do metano, mesmo sem o aproveitamento do calor gerado, reduz o impacto em termos de aquecimento global. Além disso, se o metano for utilizado para a geração de energia, dependendo da rota tecnológica escolhida, cada MWh gerado a partir de RSU será capaz de compensar a emissão decorrente de 3 a 15 MWh gerados a partir do gás natural em ciclo combinado (Oliveira e Rosa, 2003).

2.4 Convenção do clima e créditos de carbono

Em 9 de maio de 1992, “reconhecendo que a mudança do clima da Terra e seus efeitos negativos são uma preocupação comum da humanidade”, foi criada no âmbito da ONU a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, na sigla em inglês: *United Nations Framework Convention on Climate Change*). A Convenção propõe uma estratégia global “para proteger o sistema climático para gerações presentes e

⁵ GWP na sigla em inglês de *Global Warming Potential*.

futuras" e para estabilizar "as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático" (ONU, 1992).

Inicialmente, ficou estabelecido o compromisso dos países desenvolvidos e das chamadas economias em transição (ex-União Soviética e países do leste europeu) em reduzir de 5%, a partir do ano 2000, o nível de emissões calculado para 1990 (idem).

Em dezembro de 1997 em Kyoto, no Japão, na Terceira Conferência das Partes (COP 3), órgão supremo da Convenção, foi apresentada a proposta brasileira de criação de um fundo para o desenvolvimento limpo. Foram sugeridos critérios para atribuição de responsabilidades históricas pelo aquecimento global e, a partir daí, mensurar as emissões máximas possíveis. O descumprimento desses limites resultaria em multas, gerando recursos para o fundo proposto, recursos estes que seriam aplicados em projetos mitigadores de emissões, apresentados pelos países que cumprissem suas metas.

Apesar de rejeitada, esta proposta deu origem ao conceito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL, ou CDM na sigla em inglês de *Clean Development Mechanism*), um dos instrumentos econômicos de flexibilização criados pelo Protocolo de Kyoto. Os países responsáveis pela maioria das emissões históricas passaram a integrar o Anexo I do Protocolo. Para estes países ficou convencionada a meta de redução, entre 2008 e 2012, de 5%, em média, das emissões antrópicas de gases em relação aos níveis registrados em 1990. Além disso, o atingimento da meta poderia ser obtido por meio de projetos implantados inclusive em países não-Anexo I, isto é, países em desenvolvimento. Esses projetos gerariam créditos de carbono que, através do MDL, poderiam ser adquiridos pelos países com meta de redução a cumprir. Desta forma, o MDL constituiu-se em elemento poderoso da estratégia de potencial reversão da tendência histórica de crescimento das emissões antrópicas de gases e o único mecanismo aplicável entre países integrantes e não integrantes do Anexo I.

Apenas em novembro de 2004, um mês antes da COP 10, em Buenos Aires, as condições de eficácia do Protocolo foram atendidas com sua ratificação pela Rússia. A data de 16 de fevereiro de 2005 marca o início da vigência do compromisso internacional.

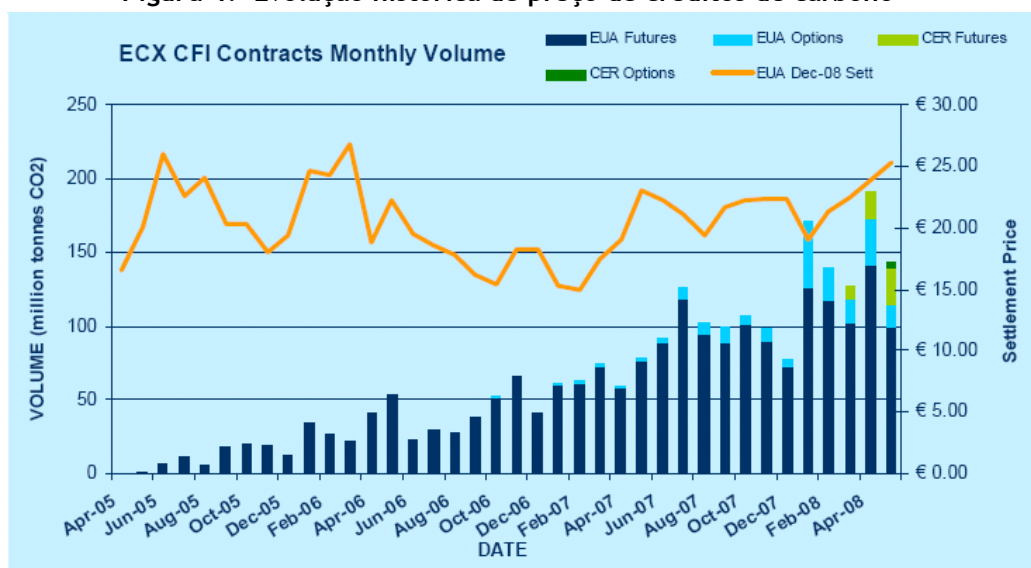
Essa nova situação foi o estímulo final para o surgimento de um vigoroso mercado que ensaiava seus primeiros passos desde a Conferência de Kyoto, mercado este que envolve inclusive empresas norte-americanas, apesar de os Estados Unidos ainda relutarem em ratificar o Protocolo.

Em adição, a União Européia estabeleceu protocolo próprio, que começou a vigorar em janeiro de 2005, o qual definiu multa de € 40/tCO₂ para os países membros que não cumprissem suas metas até 2007. Como este protocolo admite a aquisição de créditos gerados em projetos implantados em outros países, similarmente ao MDL, isto terminou por se constituir em mais um elemento impulsionador do mercado de carbono, exercendo, inclusive, pressão altista sobre os preços dos créditos de carbono no mercado internacional.

Em 2003, a Bolsa de Carbono de Chicago (CCX na sigla em inglês de *Chicago Climate Exchange*) lançou operações comerciais envolvendo 13 organizações⁶. Estava efetivamente criado o mercado de créditos de carbono. Na CCX têm sido comercializados créditos de projetos que reduzem emissões, desenvolvidos em diferentes países. Em 2005, CCX lançou a *European Climate Exchange* (ECX), hoje o principal mercado operando no *European Union Emissions Trading Scheme*⁷.

Antes do início da vigência do Protocolo de Kyoto, os preços pagos na CCX pela unidade convencionada para os créditos de carbono (tonelada de dióxido de carbono equivalente: tCO₂eq. ou simplesmente tCO₂) giravam em torno de US\$ 0.90. Eram os menores dentre as negociações então divulgadas. Embora se referissem a pequenas quantidades, a agência do Ministério da Economia da Holanda, Senter, que desenvolveu o programa CERUPT (Certified Emission Reduction Procurement Tender), lançado em novembro de 2001 (CTW, 2004) e ONGs internacionais pagavam até US\$ 5 e US\$ 10, respectivamente (Oliveira, 2004). Após fevereiro de 2005, o valor da tonelada de CO₂ pulou o patamar de € 16. Atualmente está acima de € 25, como mostrado na Figura 4, onde se apresenta um histórico de preços.

Figura 4: Evolução histórica de preço de créditos de carbono



Fonte: *European Climate Exchange Market Update*, in
 <<http://www.europeanclimateexchange.com>>, acesso em 25/06/2008.

No Brasil, o primeiro leilão internacional de créditos de carbono, realizado pela Bolsa Mercantil e de Futuros de São Paulo (BM&F) em setembro de 2007, comercializou certificados a € 16,20/tCO₂ com um banco holandês que, por não ter metas de redução estabelecidas, revenderá os certificados no mercado europeu.

⁶ American Electric Power; Baxter International Inc.; City of Chicago; Dupont; Ford Motor Co.; International Paper; Manitoba Hydro Corp.; MeadWestvaco Corp.; Motorola Inc.; STMicroelectronics; Stora Enso North America; Temple-Inland Inc.; Waste Management Inc.

⁷ CCX lançou também o Mercado Futuro de Carbono (*Chicago Climate Futures Exchange* - CCFE), de SO₂ (CFTC-regulated futures exchange for U.S. SO₂ allowances) e de NO_x (U.S. NO_x Ozone Season allowances). São os primeiros mercados mundiais de títulos derivativos ambientais. Desde 2006, CCX, ECX e CCFE são propriedades da Climate Exchange Plc, companhia aberta relacionada no AIM (*Alternative Investment Market*) da Bolsa de Londres (*London Stock Exchange*).

O aproveitamento energético de RSU constitui projeto que, classicamente, é gerador de créditos de carbono. Reduzem as emissões de metano (decorrente da fermentação do lixo disposto nos aterros) e ao mesmo tempo substituem a geração de energia a partir de fontes fósseis (isto é particularmente verdadeiro nos países desenvolvidos, onde a produção de eletricidade se faz predominantemente a partir do gás natural e do carvão mineral).

Assim, além da receita pela venda de eletricidade e dos benefícios ambientais e sociais, alguns dos quais já comentados aqui, o aproveitamento energético de RSU pode se apropriar das receitas dos créditos de carbono que gera. Ou, dito de outra forma: créditos de carbono podem constituir um benefício adicional na equação da viabilidade econômico-financeira do aproveitamento energético de RSU.

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

3. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RSU

3.1 Introdução

A geração de energia elétrica a partir de RSU já apresenta hoje alternativas tecnológicas maduras. Aliás, algumas das tecnologias disponíveis nem são tão recentes assim. Datam da década de 80 do século passado as primeiras termelétricas acionadas por RSU implantadas nos Estados Unidos, na Europa e no Japão.

Incineração e processamento biológico são basicamente as duas formas de produzir energia elétrica a partir de RSU com a quase total eliminação da necessidade de aterros sanitários. No primeiro caso, há riscos ambientais, caracterizados nas emissões de dioxinas e furanos. Nos últimos anos, os avanços no desenvolvimento de sistemas de filtros capazes de reduzir substancialmente essas emissões recolocaram essa 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. Por outro lado, ao nível do conhecimento atual, os processos biológicos agridem menos a Natureza. 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. A energia elétrica é produzida a partir do metano gerado nesse processamento.

Mas, além dessas alternativas, há outros caminhos possíveis de serem seguidos com vistas ao aproveitamento energético de RSU. Nesta seção, discutem-se os aspectos mais relevantes das quatro principais rotas tecnológicas alternativas hoje disponíveis para a geração de energia elétrica a partir de RSU.

3.2 Aterros sanitários e produção de biogás

A tecnologia de aproveitamento do gás de lixo (GDL), ou biogás produzido nos aterros (*landfill gas*), é o uso energético mais simples dos RSU. 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 de RSU, por ação de microorganismos que transformam os resíduos em substâncias mais estáveis, como dióxido de carbono (CO_2), água, metano (CH_4), gás sulfídrico (H_2S), mercaptanas e outros componentes (NMOCs - *non methane organic compounds*).

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

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

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

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, 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.

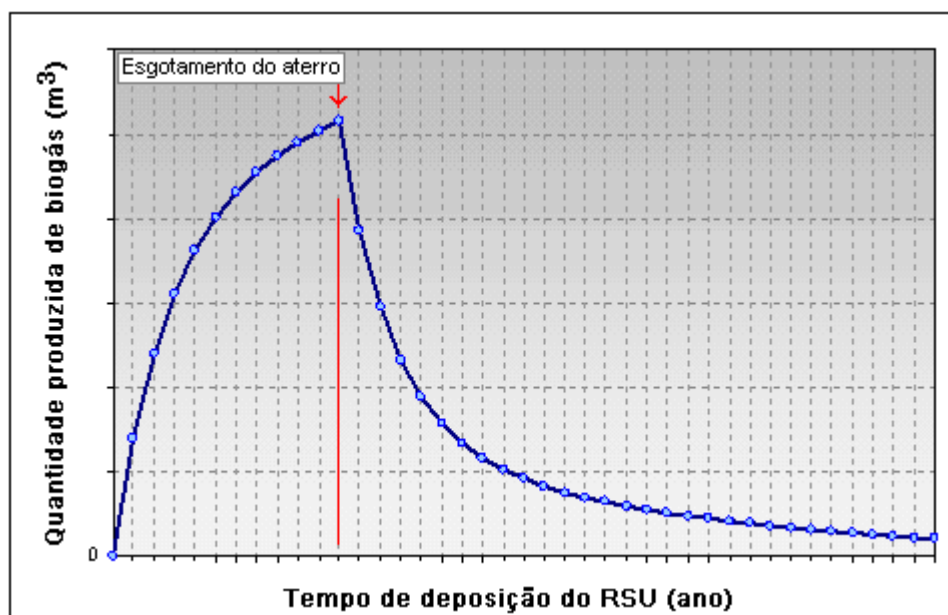
O biogás coletado e filtrado pode também ser utilizado para a geração de eletricidade, em geral alimentando grupos motor-gerador de combustão interna de pequena potência, adequados à queima de gás pobre. Mesmo alimentados com combustível de baixo poder calorífico, o rendimento desses geradores pode superar 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 é ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Evolução típica da produção de biogás em aterro sanitário



O aproveitamento econômico do gás para a geração de energia elétrica fica limitado a uma “janela” de tempo relativamente pequena (entre 12 e 18 anos) em relação ao tempo de 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. Pode, ainda, 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 táxis⁸.

A melhor configuração de um aterro sanitário 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;
- Receita adicional para aterros existentes (energia + créditos de carbono);
- Utilização para geração de energia ou como combustível;
- Redução da possibilidade (remota) de ocorrência de auto-ignição e/ou explosão pelas altas concentrações de metano.

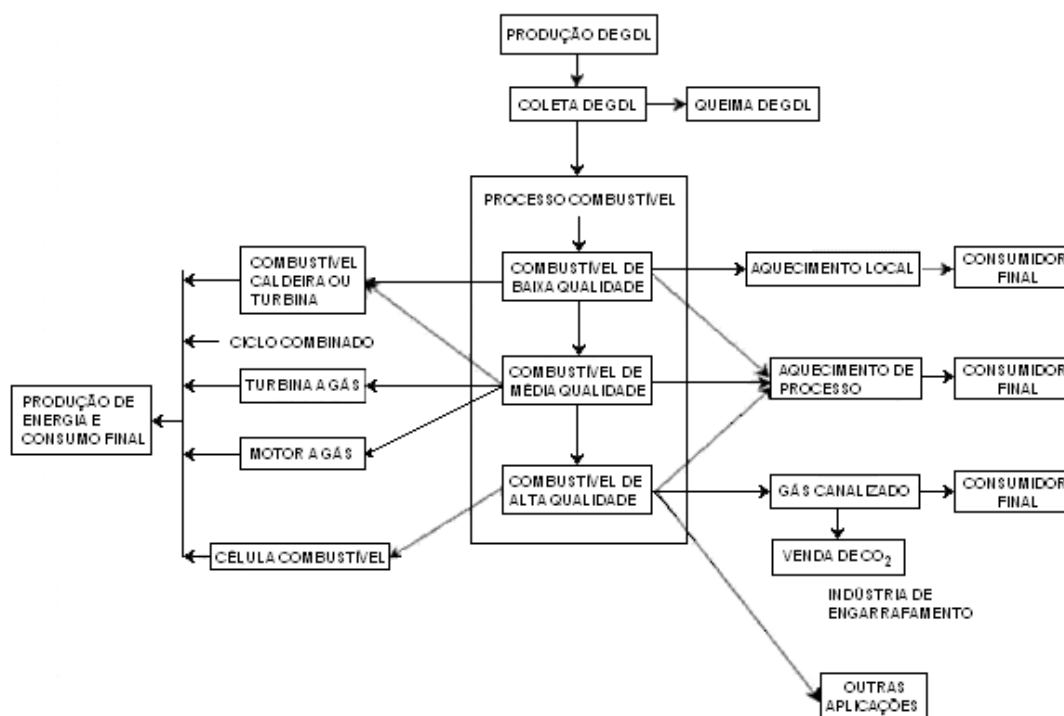
E como desvantagens:

- 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.

A Figura 6 ilustra as possíveis rotas de utilização do GDL.

⁸ Na década de 1980, a Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB) produziu GNV a partir de tratamento do biogás extraído do antigo aterro do Caju via lavagem, desenvolvido em parceria com a Companhia Estadual de Gás (CEG) e com financiamento da FINEP, o qual foi utilizado para abastecer parte da sua frota. O sistema permitia aumento do teor de metano de 50% para 86%, o que atende à resolução da ANP para o gás natural.

Figura 6: Rotas para utilização de gás de lixo (GDL)



Fonte: Willumsen (2001).

3.3 Digestão anaeróbica (biogás, adubo orgânico)

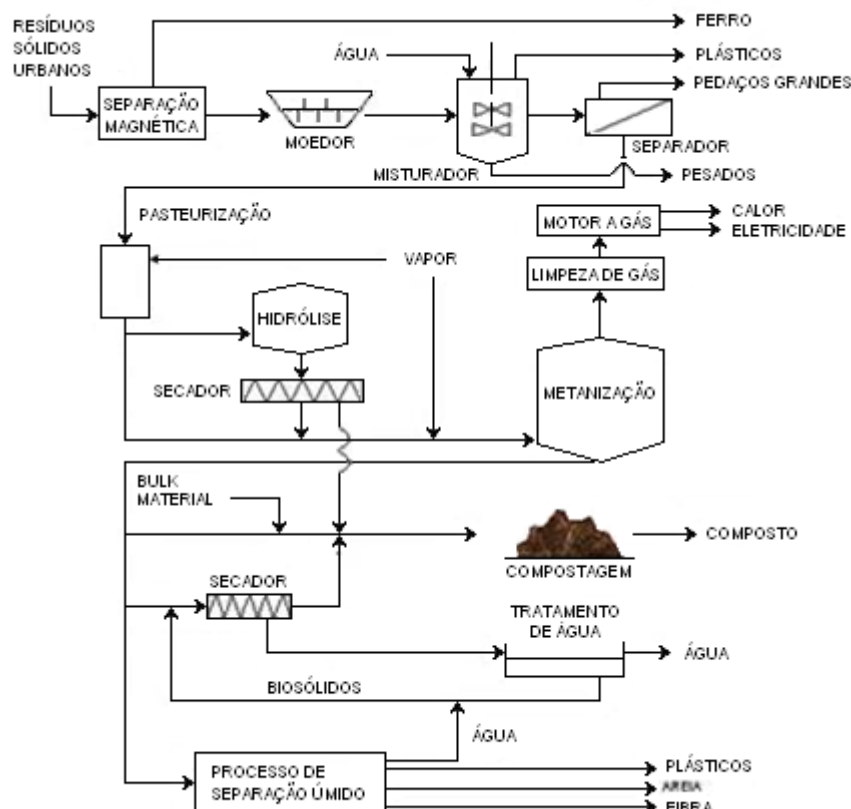
Digestão anaeróbica (DA) pode ser definida como a conversão de material orgânico em dióxido de carbono, metano e lodo através de bactérias, em um ambiente pobre em oxigênio. Este processo é uma das formas mais antigas de digestão e ocorre naturalmente na ausência de oxigênio, como em plantações de arroz,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

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

A Figura 7 mostra um esquema simplificado de um processo de DA o qual, de um modo geral, pode ser dividido em quatro fases:

- pré-tratamento;
- digestão do resíduo;
- recuperação de gás e
- tratamento de resíduos.

Figura 7: Processo de digestão anaeróbica de RSU



Fonte: Verstraete (2002).

A maioria dos sistemas de DA necessita de uma fase de pré-tratamento da carga de entrada na qual são separados os resíduos não digeríveis. A separação garante a remoção de materiais recicláveis, como vidros e metais e resíduos indesejáveis. Para a produção de adubos de alta qualidade, por exemplo, a segregação dos contaminantes deve ser muito mais apurada. Assim, os resíduos recebidos pelo digestor vêm normalmente da coleta seletiva ou de um pré-tratamento mecânico. No caso da coleta seletiva, os materiais recicláveis são separados dos resíduos orgânicos na fonte.

Dentro do digestor a carga é diluída para atingir o teor de sólidos desejado e aí permanece durante o tempo de retenção designado (em torno de 20 dias). Para a diluição, uma ampla variedade de fontes de água pode ser utilizada, como água limpa, água de esgoto ou líquido recirculante do efluente de digestor. Frequentemente necessita-se de um trocador de calor a fim de manter a temperatura no vaso de digestão. As impurezas do biogás são retiradas para que o produto esteja de acordo com a necessidade da sua aplicação. No caso de tratamento residual, o efluente do digestor é desidratado e o líquido é reciclado

para ser usado na diluição da carga de alimentação. Os bio-sólidos são aerobicamente tratados para a obtenção do produto composto, estabilizados para serem depositados em aterros ou usados como combustível para incineração.

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 m³/t de resíduos (75% de restos de alimentos e de jardim e 25% de papel não reutilizável), com um teor de 56% de metano⁹. A KOMPOGAS, fabricante de biodigestores, sugere, como média, o valor de 120 m³ por tonelada de material orgânico¹⁰. Considerando-se essas referências e a proporção de matéria orgânica na quantidade de RSU gerado por uma comunidade, pode-se afirmar que entre 60 a 75 m³ de biogás são produzidos por tonelada de RSU em um processo de DA. A composição típica do biogás assim produzido é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Composição típica do biogás

Gás	Composição
Metano	55 - 70% por volume
Dióxido de Carbono	30 - 45% por volume
Sulfeto de hidrogênio	200 - 4.000 ppm por volume
Teor de energia do gás de digestão anaeróbica	20 - 25 MJ/Nm ³ (4.780 a 6.000 kcal/ m ³)
Teor de CH ₄ por tonelada de RSU	167 - 373 MJ/ton RSU

Fonte: Verma (2002).

Da mesma forma que na recuperação de gás do aterro, o biogás pode ser consumido diretamente, situação em que apresenta poder calorífico entre 4.500 e 6.000 kcal/m³, ou tratado para separação e aproveitamento do metano, cujo poder calorífico é semelhante ao do gás natural.

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

Uma vantagem da DA sobre o aproveitamento do gás de aterro é reduzir a quantidade de resíduos depositados em aterro sanitário. Com isso, entende-se a vida útil do aterro e a oferta de biogás se regulariza ao longo desse tempo.

3.4 Incineração (cogeração)

Usinas WTE, da sigla em inglês de *waste-to-energy*, são aquelas que utilizam a incineração de RSU para produzir o vapor que irá gerar energia elétrica ou será 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 de ciclo

⁹ <http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/03-04/biomass//validation.html>.

¹⁰ <<http://www.evergreenenergy.com.au>>.

Rankine e a capacidade de geração depende diretamente da eficiência da transformação do calor em energia elétrica e do poder calorífico do material incinerado.

Devido à agressividade dos gases da combustão do lixo, a temperatura do vapor na caldeira deve ser baixa, em geral próxima a 200°C, de modo que o rendimento da geração de energia elétrica se limita, tipicamente, a valores ao redor de 20%.

O Poder Calorífico Inferior (PCI), normalmente 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:

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

onde as variáveis $Y_{\text{combustível}}$, $Y_{\text{H}_2\text{O}}$, Y_{vidros} e Y_{metais} representam a proporção de cada elemento em 1 kg de RSU.

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

A Tabela 4 apresenta o poder calorífico de materiais normalmente encontrados em RSU e permite inferir que resíduos sólidos em que predominam orgânicos tendem a apresentar menor poder calorífico.

Tabela 4: Poder calorífico de materiais encontrados em RSU

Material	kcal/kg
Plásticos	6.300
Borracha	6.780
Couro	3.630
Têxteis	3.480
Madeira	2.520
Alimentos	1.310
Papel	4.030

Embora a classificação segundo o PCI não deva ser considerada definitiva para estabelecer a destinação do RSU, considera-se que:

- para $\text{PCI} < 1.675$ kcal/kg, a incineração não é tecnicamente viável (além de dificuldades técnicas, exige ainda a adição de combustível auxiliar);
- para 1.675 kcal/kg $< \text{PCI} < 2.000$ kcal/kg, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico;
- para $\text{PCI} > 2.000$ kcal/kg, a queima bruta (“*mass burning*”) é tecnicamente viável.

Usinas a incineração podem gerar entre 450 e 700 kWh por tonelada de RSU.

Os principais componentes de uma moderna usina convencional de incineração de RSU são: poço de armazenamento do lixo, grelha móvel, câmara de combustão, sistema de descarga das cinzas, sistema de geração de vapor, depurador de gases, filtros de sacos, ventilador e chaminé. Ainda não existem usinas de incineração de RSU com recuperação de energia em escala comercial no Brasil.

Usinas WTE trabalham tipicamente na base, isto é, a geração de energia elétrica se dá de forma permanente ao longo do dia, de modo a evitar o acúmulo de RSU no local. Contudo, diferentemente de outras usinas térmicas, o rendimento na conversão para energia elétrica é relativamente baixo, entre 20 e 25%, refletindo a restrição de se operar em temperaturas muito elevadas. De fato, no atual estado da arte da tecnologia, a queima do material não deve ser feita a temperaturas superiores a 450°C, de modo a evitar corrosão nos equipamentos. Nessas condições, uma usina WTE pode ofertar entre 450 e 600 kWh por tonelada de RSU.

A redução do volume de resíduos depositados em aterro sanitário é uma das principais vantagens da incineração. De fato, a incineração reduz o volume de resíduos depositados entre 85 e 90% do volume original e não impede a recuperação dos metais recicláveis. Outra vantagem é que as cinzas produzidas na incineração podem 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 especiais no tratamento dos gases de exaustão;
- as cinzas produzidas na incineração também contém diversos poluentes;
- de acordo trabalho técnico publicado pelo Banco Mundial (RAND et alii, 2000), usinas de incineração apresentam elevados custos de investimento, operação e manutenção.

Assim, mesmo que o projeto de uma usina WTE possa atender aos padrões pré-estabelecidos de emissão de poluentes, a decisão por sua implantação deve levar em conta explicitamente estes aspectos.

3.5 Ciclo combinado otimizado

Uma forma de aumentar o rendimento do aproveitamento energético da incineração do lixo é pelo uso dos gases de exaustão de uma turbina a óleo ou gás natural para superaquecer o vapor de baixa temperatura oriundo da caldeira de incineração.

Essa configuração, por vezes denominada “ciclo combinado híbrido”, pode elevar a eficiência do ciclo Rankine a mais de 30%, ou seja, um ganho marginal da ordem de 50% sobre o rendimento da parcela de incineração do ciclo combinado, como exemplifica a usina de Gärstad, próxima à cidade de Linköping, Suécia, adaptada para ciclo combinado em 1994 e ampliada para 130 MW em 2005.

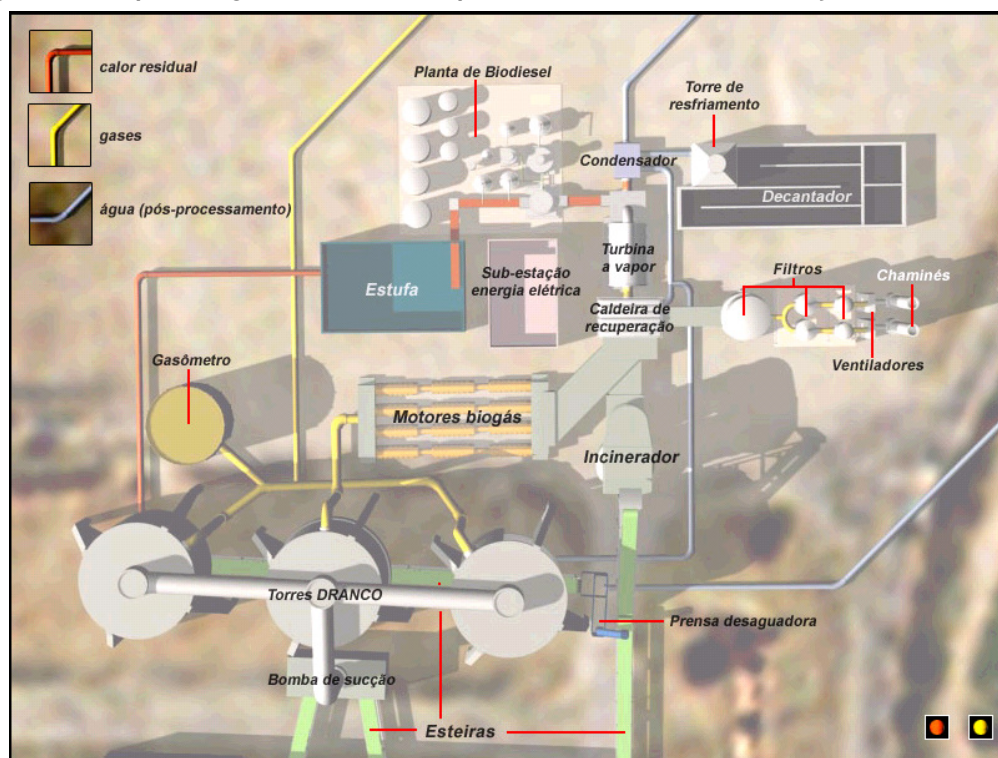
A usina de Zabalgardi, em Biscaia, Espanha, constituída de uma turbina aeroderivativa a gás natural de 43 MW e uma unidade a vapor de 56,5 MW, tem rendimento de 44,3%, consumindo resíduos urbanos com poder calorífico de 1.900 kcal/kg (LHV)¹¹.

No Japão, sob a denominação de “*Super Waste Power Plants*”, quatro usinas construídas entre 1996 e 2003 (Takahama, Sakai, Kitakyusho e Chiba) totalizam 95,8 MW e apresentam rendimento entre 21% e 34,3%¹².

A relação entre a quantidade de energia obtida do ciclo Brayton e a quantidade de energia obtida do ciclo Rankine que otimiza o rendimento do ciclo combinado híbrido varia entre 55% e 67%. O consumo unitário do ciclo combinado híbrido, dependente do poder calorífico dos resíduos incinerados, é da ordem de 1,2 toneladas de RSU por MWh.

Há um pedido de patente brasileiro de processo onde o gás natural é substituído pelo gás de aterro ou de biodigestor, de modo que toda a energia de entrada na usina é proveniente do lixo. A esse processo denominou-se de ECOPOLO, cujo *lay-out* é reproduzido na Figura 8. Estima-se que o rendimento do processo supere 36% e consumo específico se situe entre 1,9 e 2,6 ton/MWh com a utilização de RSU com poder calorífico de 1.850 kcal/kg.

Figura 8: Maquete digital do ECOPOLO para o Aterro Sanitário do Caju - Rio de Janeiro



Fonte: IVIG, 2005

¹¹ Bizkaia Waste to Energy Plant Project, Summary Report, Feb 2005, em http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/bioenergy/incineration/bm_80_96.pdf

¹² “Alternatives to landfill: Na overview of Japan’s Incineration Policies and Technologies for Handling Municipal Solid Waste”, Ryozyo Tanaka e Paul Johnson, 2005.

4. A RECICLAGEM DE RSU

4.1 Introdução

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 conseqüências, 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 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 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 de 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 e Kaufman, 2004). Nesses casos, não se operou a reciclagem nem se atendeu o 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 de RSU. Isto é, embora afete o dimensionamento de projetos de outros usos dos resíduos, como a compostagem e a recuperação energética (geração de energia elétrica), ou mesmo a disposição final, a reciclagem não se constitui, necessariamente, em rota excludente a essas outras aplicações.

4.2 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 envolve 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 usado 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 e, 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, redução do corte de árvores), o resultado é a redução das agressões ao solo, ao ar e a água que a exploração desses recursos produz. Já uma menor acumulação progressiva de lixo reduz as emissões de metano e gás carbônico gerados nos aterros.

Mas os benefícios se estendem também aos campos econômico e social. No campo econômico, 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, e, assim, pode ser, na prática, 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 demanda na produção a partir do material reciclado¹³¹⁴, 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 freqüentemente como atividade geradora de emprego e renda, em especial para a população de renda mais baixa.

¹³ Cf. 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 (...).”

¹⁴ Jefferson Villa Nova, em trabalho orientado pelo prof. Roque Mendes, da UNIVAP (Universidade do Vale do Paraíba), escreve: “o alumínio secundário é produzido através da reciclagem dos produtos compostos pelo alumínio em geral tais como: janelas, painéis, peças automotivas e principalmente as latas de alumínio. A produção de alumínio secundário (reciclagem) evita a extração de bauxita, pois para cada 1 tonelada de alumínio reaproveitado, deixa-se de retirar do solo 5 toneladas do minério. Outra grande vantagem é que para produzir 1 tonelada de latas de alumínio secundário é gasto (sic) apenas 750 kWh, enquanto que a mesma quantidade produzida com o uso do alumínio primário, gasta 17.600 kWh, o que representa uma economia de 95% de energia, seu principal insumo para produção”. In: “A Reciclagem das Latas de Alumínio e o seu Efeito na Economia Informal”, 13p, [s.l.: UNIVAP, s.d.]

4.3 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” 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 deitados para o lixo. De acordo com a 2ª Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE havia, no ano 2000, 24.340 catadores distribuídos em 1.548 municípios de todo o país.

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 onde a preocupação com a reciclagem e com os impactos ambientais, em geral, parecem 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 ano¹⁵.

De acordo com a Associação Brasileira de Alumínio (ABAL), o Brasil reciclou, em 2006, 138,1 mil toneladas de sucata de latas, o que corresponde a 10,3 bilhões de unidades. Pelo sexto ano consecutivo, o país liderou a reciclagem de latas de alumínio para bebidas, com índice de 94,4%, superior ao do Japão (90,9%), da Argentina (89,6%) e de outros países. Nesse mesmo ano, conforme dados da organização Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), 51,3% das embalagens PET pós-consumo foram efetivamente recicladas no país, totalizando 194 mil toneladas. O índice brasileiro de reciclagem de embalagens PET é bastante superior ao de países como a Alemanha, que é de 32%. A Tabela 5 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.

¹⁵ Cf. matéria de Flávia Furlan Nunes, intitulada “Consumo consciente: Brasil é líder na reciclagem de latas de alumínio”, publicada em 15 de agosto de 2007 no site InfoMoney (<<http://www.web.infomoney.com.br>>), acesso em maio de 2008: “no ano passado [2006], somente na etapa da coleta [de latas de alumínio], a reciclagem injetou R\$ 540 milhões na economia”.

Tabela 5: Índices de reciclagem de embalagens PET e latas de alumínio (2006)

País/região	Latas	PET
BRASIL	94,4%	51,3%
Japão	90,9%	62,0%
Argentina	89,6%	27,1%
Europa	57,7%	38,6%
Estados Unidos	51,6%	23,5%

Fontes: ABAL e CEMPRE.

O rápido crescimento da reciclagem de embalagens PET e de latas de alumínio, assim como de sucata do metal em geral¹⁶, sugere que o mercado de reciclagem destes materiais está praticamente consolidado, ainda que o potencial de crescimento não tenha, todavia, se esgotado. Essa situação reforça a idéia de que o RSU coletado, se amostrado no destino (aterros) não deverá apresentar proporções de plásticos e metais, sobretudo estes, elevadas. Pelo valor de mercado que possuem, estes materiais recicláveis não devem mesmo chegar ao destino final dos RSU em virtude da ação tempestiva dos catadores e de outros agentes de coleta para reciclagem.

4.4 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 destinados ao uso final. De uma forma geral, a transformação de material reciclado consome menos energia que a transformação da matéria-prima na sua forma primária. Dessa forma, pode-se dizer que a reciclagem é elemento da estratégia de conservação da energia.

A estimativa da energia elétrica conservada a partir do uso de material reciclável como matéria-prima requer a definição de fatores de conversão, geralmente expressos em MWh/t ou kWh/kg, em cuja determinação podem ser utilizadas diferentes critérios e abordagens metodológicas. No Brasil, uma referência importante para esta estimativa é encontrada em Calderoni (1996.). Nos Estados Unidos, duas referências clássicas são Morris (1996) e a EPA (2007). É digno de registro também o recente trabalho de Warnken ISE (2007), elaborado para a SITA Environmental Solutions, do Grupo Suez, uma das principais empresas australianas na área de reciclagem e manejo de RSU, sobre o potencial de abatimento de gases de efeito estufa a partir de RSU na Austrália.

¹⁶ Cf. 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, 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%).

As quatro referências citadas permitem estimar índices de economia de energia no caso do uso, como matéria-prima, dos principais materiais recicláveis. A Tabela 6 resume apresenta estes índices. Pela variação entre os indicadores, pode-se perceber como essas estimativas são sensíveis aos critérios e à metodologia empregada, especialmente no que se refere ao padrão estabelecido como referência para o material reciclável.

Tabela 6: Potencial de conservação de energia elétrica a partir da reciclagem de embalagens
Unidade: kWh/kg

Material	Ref.:	BRASIL	Estados Unidos		Austrália
		Calderoni	Morris	EPA	Warnken ISE
Papel e papelão		3,51	1,75	2,95	1,37
Plástico (inclusive PET)		5,06	5,55	15,39	5,91
Vidro		0,64	0,08	0,62	1,25
Embalagem longa vida		3,51	1,75	4,96	1,37
Metais (alumínio, aço)		5,30	3,25	5,85	2,67

Elaboração própria a partir de Calderoni (1996), Morris (1996), EPA (2007) e Warnken ISE (2007)

Considerando, por exemplo, o indicador de Calderoni para a reciclagem de alumínio no Brasil (5,30 kWh/kg) e, ainda, que, no país:

- conforme pesquisa da ABRELPE (2007), a massa de RSU coletada diariamente em 2007 foi de 140,9 mil toneladas, em média;
- pela mesma pesquisa, a taxa de coleta é de 83,3% (RSU gerado de 168,7 mil toneladas por dia);
- a proporção de metal no total de RSU coletado em 2007 foi de 2,3% (IBGE, 2000 apud Polzin, 2004)

calcula-se que o potencial de energia elétrica conservada com a reciclagem do alumínio (isto é, se todo o alumínio contido no RSU gerado no país fosse destinado à reciclagem) é de 20.500 MWh/dia, ou o equivalente à geração média de uma usina hidrelétrica de 1.400 MW de potência instalada ou de uma usina termelétrica convencional com 1.050 MW, operando com 80% de fator de capacidade. A mesma conta reproduzida com o indicador apurado no relatório do Warnken ISE, leva à potência hidrelétrica equivalente de 720 MW e termelétrica de 540 MW.

Ressalte-se, entretanto, que boa parte desse potencial de conservação de energia elétrica, decorrente da reciclagem do alumínio, já é hoje realizado na medida em que, conforme se mencionou, o índice de reciclagem do alumínio no país é muito elevado.

O mesmo raciocínio aplicado para a proporção de cada material reciclável no RSU produzido no país leva à estimativa de que o potencial [teórico] de conservação de energia elétrica no Brasil situa-se entre 0,66 e 1,45 MWh por tonelada de RSU, se adotada a composição revelada por pesquisa do IPT (1998), ou entre 1,19 e 2,97 MWh por tonelada de RSU, se considerada a composição que emerge da pesquisada ABRELPE (2004). A Tabela 7 resume os resultados obtidos em cada situação.

Tabela 7: Potencial de conservação de energia elétrica a partir da reciclagem de embalagens no Brasil

Unidade: kWh/kg RSU

Material	Fração no RSU	Referências de cálculo			
		Calderoni	Morris	EPA	Warnken ISE
▪ Base: Composição de RSU segundo pesquisa do IPT (1998)					
Papel e papelão	25%	0,88	0,44	0,74	0,34
Plástico (inclusive PET)	3%	0,15	0,17	0,46	0,18
Vidro	3%	0,02	0,00	0,02	0,04
Metais (alumínio, aço)	4%	0,21	0,13	0,23	0,11
TOTAL	35%	1,26	0,74	1,45	0,66
▪ Base: Composição de RSU segundo pesquisa da ABRELPE (2004)					
Papel e papelão	13%	0,46	0,23	0,38	0,18
Plástico (inclusive PET)	16%	0,81	0,89	2,46	0,95
Vidro	2%	0,01	0,00	0,01	0,03
Metais (alumínio, aço)	2%	0,11	0,07	0,12	0,05
TOTAL	33%	1,39	1,19	2,97	1,21

São valores expressivos, mesmo que se abstraiam os índices extremos (o maior, de 2,97 kWh/kg de RSU, calculado a partir dos parâmetros da EPA aplicados sobre a composição de RSU da pesquisa da ABRELPE e o menor, de 0,66 kWh/kg, calculado a partir dos parâmetros do relatório Warnken ISE aplicados sobre a composição de RSU da pesquisa do IPT).

Para um índice médio de 1,1 kWh/kg RSU, considerando que a quantidade de RSU gerada no país em 2007, foi de 168,7 mil toneladas por dia, estima-se que o potencial de conservação de energia elétrica contido na reciclagem de RSU seja, hoje, de 185 mil MWh por dia, ou 7.700 MWmed, o que é equivalente à potência instalada de 14.000 MW em usinas hidrelétricas ou de 9.600 MW em termelétricas convencionais, operando com 80% de fator de capacidade). Considerando o crescimento demográfico, a evolução da taxa de urbanização e índice de coleta cenarizado no PNE 2030 (EPE, 2007), esse mesmo cálculo reproduzido para o ano de 2030 indica um potencial equivalente a uma potência hidrelétrica de cerca de 21.200 MW.

Por óbvio, estes números são valores teóricos, que, na prática, e por diferentes razões, não deverão ser atingidos. Entre essas razões encontram-se as perdas naturais no processo de coleta e seleção e a pequena escala da geração de RSU em determinadas localidades, o que tende a reduzir a justificativa econômica da coleta seletiva, dificultando sua execução.

De qualquer modo, esses números indicam que não se deve afastar a alternativa de reciclagem. E, não por acaso, a despeito de outros fatores de natureza socioeconômica, o índice de reciclagem no Brasil já é bastante alto para os materiais em que o índice de conservação por peso do material é mais elevado (metais, especialmente alumínio - latas de alumínio, e plásticos - embalagens PET).

5. RSU EM CAMPO GRANDE

5.1 O Município de Campo Grande

A cidade de Campo Grande, capital do estado do Mato Grosso do Sul, está localizada no Planalto Maracaju-Campo Grande, aproximadamente nas coordenadas 21° S e 55° W, praticamente no centro geográfico do estado, conforme indicado na Figura 9.

Figura 9: Localização da Cidade de Campo Grande



A posição de média latitude, a altitude, que varia entre 500 e 650m, e a proximidade (cerca de 150 km) do início da maior planície alagável do mundo, o Pantanal Matogrossense, são elementos determinantes das condições climáticas do município. O clima é o tropical. Conforme Souza et alii (1991), a temperatura média anual em Campo Grande é de 22°C e a precipitação média é de 1.643 mm/ano, com o período chuvoso estendendo-se tipicamente entre outubro e março.

Conforme a contagem da população pelo IBGE, Campo Grande tinha, em 1º de abril de 2007, uma população residente estimada em 724.524 habitantes, quase toda (98,7%) classificada como população urbana (a população rural é de apenas 9.734 pessoas).

Campo Grande ocupa uma área superior a 8.100 km² o que explica ser relativamente baixa a densidade populacional (pouco mais de 88 habitantes por km²). Seus logradouros são fartamente arborizados, o que sugere a geração de resíduos orgânicos. Não há favelas na

cidade e tampouco nichos de pobreza em meio a bairros populadados por famílias de maior poder aquisitivo, o que facilita a estratificação da cidade para efeito da composição de amostras de resíduos relativamente homogêneas.

5.2 Os Resíduos Urbanos de Campo Grande

A quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados em Campo Grande vem crescendo a taxas elevadas nos últimos 20 anos. A massa total coletada em 2005, superior a 172 mil toneladas, é mais de quatro vezes maior do que a coletada em 1985, quando não chegava a 44 mil toneladas. A Tabela 8 resume a série da massa de RSU coletada em Campo Grande entre 1985 e 2005, recuperada por Oliveira e Peixoto Filho (2007).

Tabela 8: Quantidade de RSU coletado em Campo Grande

Ano	ton.	Ano	ton.	Ano	ton.
1985	43.925,7	1992	88.201,2	1999	140.771,7
1986	53.560,5	1993	90.388,2	2000	147.124,6
1987	57.911,3	1994	95.495,4	2001	157.684,2
1988	57.498,1	1995	111.573,8	2002	160.693,8
1989	64.947,9	1996	122.806,1	2003	160.692,9
1990	77.816,0	1997	127.376,3	2004	171.249,3
1991	88.952,4	1998	134.295,9	2005	172.370,0

Fonte: PLANURB (2006) apud Oliveira e Peixoto Filho. (2007)

Obs.: Valores arredondados

Os resíduos a que se referem essas estatísticas compreendem o lixo domiciliar urbano (domicílios residenciais e comerciais). São coletados regularmente e dispostos em um aterro controlado, de responsabilidade da Prefeitura Municipal. Esse aterro localiza-se na região sul da cidade, a cerca de 500m do córrego Anhanduizinho, no anel viário BR-060 (saída para São Paulo), no bairro Dom Antonio Barbosa. Encontra-se próximo do esgotamento de sua capacidade. Após seu fechamento, um aterro sanitário, em fase final de implantação, será aberto em terreno adjacente, ocupando uma área de 11,5 hectares. Resíduos hospitalares assim como resíduos de construções e demolições são destinados a outros locais. Da mesma forma, o material orgânico proveniente da poda de árvores e da varredura dos logradouros tem destinação específica.

Os dados apresentados revelam que vem crescendo ao longo dos anos a abrangência do serviço municipal de coleta de lixo. Com efeito, considerando a população urbana apurada pelo IBGE nos censos de 1991 e 2000 e na contagem de 1996¹⁷, pode-se calcular que a massa diária de RSU per capita evoluiu de 0,470 kg em 1991, para 0,568 kg em 1996,

¹⁷ Pelo censo de 1991, a população residente urbana de Campo Grande nesse ano era de 518.867 habitantes. O censo de 2000 indicou 655.914 habitantes. A taxa de crescimento demográfico entre os dois censos foi, portanto, de 2,6% ao ano, em média, indicando que a cidade é um pólo de atração regional. A contagem de 1996 apontou 592.007 habitantes. Nas três oportunidades a taxa de urbanização (razão entre a população residente urbana e a população residente total do município) oscilou entre 98,6 e 98,8%.

crescendo para 0,615 kg no ano 2000. Mesmo que se tenha em conta melhoria das condições de vida da população, a dinâmica de evolução desse indicador no período é uma evidência da ampliação da abrangência do serviço de coleta.

Conforme Sartori (2002), os serviços atendem 97% dos domicílios urbanos. Considerando a evolução da massa coletada nos últimos anos, é possível que essa taxa de atendimento seja hoje mais elevada.

Além das informações sobre a quantidade de RSU coletado em Campo Grande, dispunha-se também dos resultados de uma análise gravimétrica realizada em 2001. O valor desta informação é muito questionável uma vez que não se tem sobre a análise gravimétrica que a suporta nenhuma indicação das fontes utilizadas ou mesmo uma descrição sumária da metodologia e das bases em que foi executada. Os dados desta análise foram cedidos pela Prefeitura Municipal de Campo Grande e são reproduzidos na Tabela 9.

Tabela 9: Composição % de RSU de Campo Grande (2001)

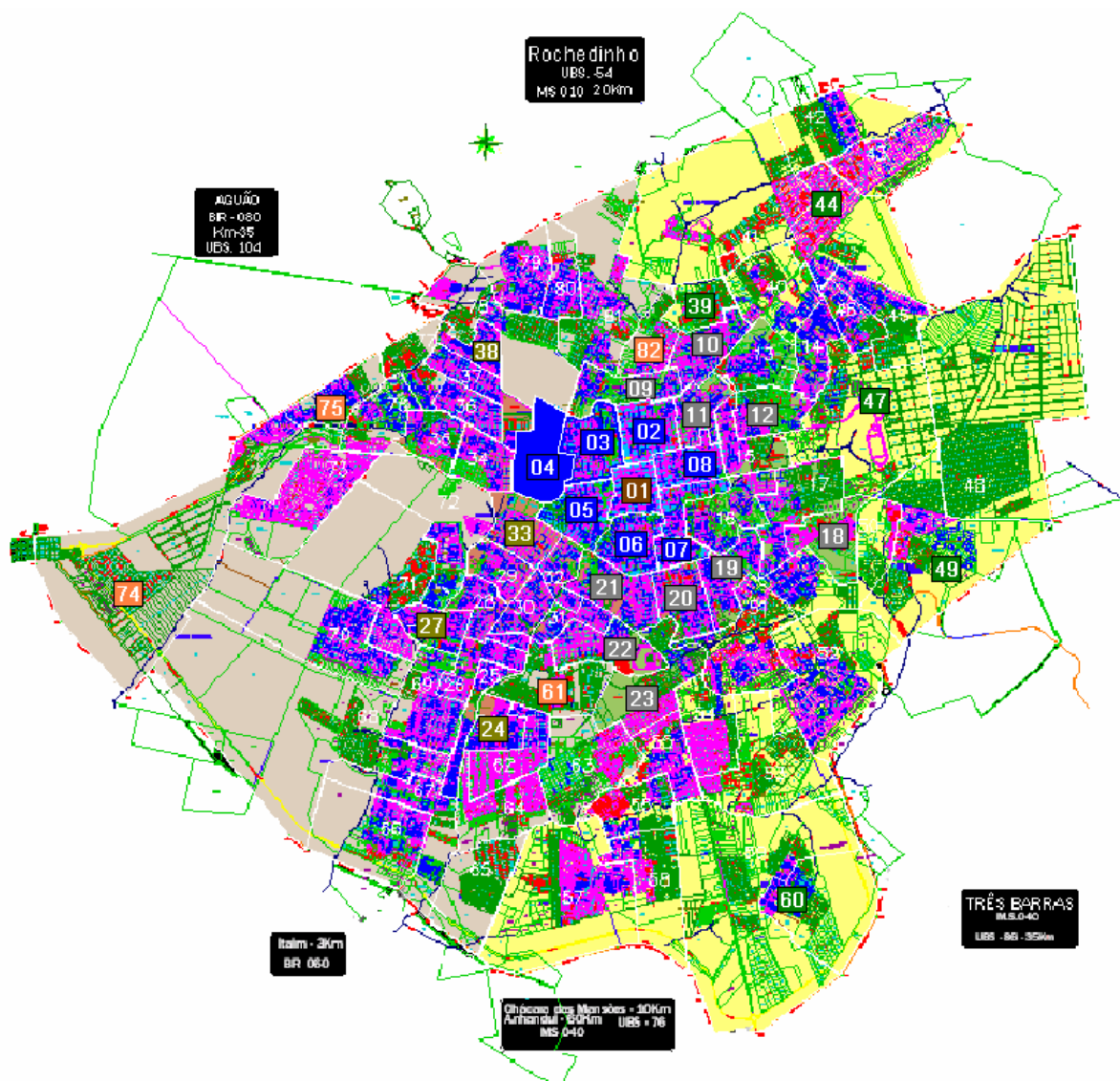
Material	%
▪ Matéria orgânica putrescível	66,4
▪ Papel e papelão	12,4
▪ Plásticos	11,1
▪ Metais	3,9
▪ Vidros	2,2
▪ Panos e trapos	1,9
▪ Folhas	0,9
▪ Madeira	0,7
▪ Borrachas e couros	0,5
▪ Materiais inertes	n.i.

Obs.: valores arredondados na primeira casa decimal.

5.3 Características da Coleta de Lixo em Campo Grande

A coleta domiciliar urbana de Campo Grande é realizada por uma firma privada, a Financial Construtora Industrial Ltda., contratada da Prefeitura Municipal. A coleta se faz de acordo com um roteiro otimizado que subdivide a cidade em 82 (oitenta e dois) setores distintos e bem definidos, conforme indicado na Figura 10.

Figura 10: Setores de Coleta de Lixo em Campo Grande



Cada um desses setores é atendido por um único grupo de limpeza constituído por coletores de lixo e um caminhão transportador, com capacidade variando de 8 a 12 toneladas (ver Figura 11). O caminhão realiza tantas viagens entre o setor e o destino final dos resíduos (aterro) quantas forem necessárias para a remoção completa do volume de resíduos sólidos do setor. Importante observar que em nenhuma situação o caminhão transporta o lixo de setores diferentes numa mesma viagem.

Figura 11: Caminhão de coleta de lixo de Campo Grande, na entrada do aterro.

foto cedida pela Finacial Construtora Industrial Ltda.



Campo Grande tem três áreas distintas de geração de RSU: o centro, os grandes eixos de circulação e as regiões urbanas periféricas. A região central da cidade é subdividida em 8 (oito) setores que têm coleta noturna diária. Os setores 9 a 38 constituem a segunda área e têm coleta noturna em dias alternados. Os setores 39 a 82, que abrangem os bairros periféricos, têm coleta diurna também em dias alternados. Aos domingos não há coleta. O ciclo de coleta da cidade se completa, portanto, em dois dias, com repetição dos setores 1 a 8, da região central.

De acordo com técnicos experientes da empresa responsável pela coleta do lixo no município de Campo Grande, os resíduos provenientes dos setores 2 a 8 da região central são relativamente homogêneos. O setor 1, da mesma área, difere qualitativamente dos demais quanto à composição em razão da concentração de escritórios, bares e restaurantes. Na segunda área, que compreende os grandes eixos de circulação, os setores podem ser reunidos em dois grandes grupos relativamente homogêneos: o primeiro compreende os setores 9 a 23 e o outro os setores 24 a 38. Da mesma forma, os resíduos coletados nas regiões urbanas periféricas são relativamente homogêneos nos setores 39 a 60 e nos setores 61 a 82.

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

6. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA REALIZADA

6.1 Aspectos gerais

A pesquisa e as medições efetuadas com vistas à análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos, domiciliares e comerciais, da cidade de Campo Grande, foram realizadas entre os dias 16 e 30 de maio de 2008. O objetivo foi obter estimativas melhores da composição desses resíduos e avaliar a possibilidade de sua utilização como insumo para a geração de energia elétrica a partir do aterro sanitário atualmente em construção.

Em razão do volume relativamente elevado de resíduos coletados diariamente (cerca de 500 kg) e da natural diversidade sócio-econômica dos moradores de diferentes bairros de uma cidade com mais de 700 mil habitantes, a análise foi realizada através de amostragem aleatória estratificada no local de destino final (aterro em operação).

A opção pela amostragem no destino, ao invés da amostragem na origem, se deveu à atividade, estimulada e disseminada por diversos bairros, de catadores que retiram do lixo gerado, antes da coleta, parte dos resíduos recicláveis.

A estratificação objetivou agrupar em partes relativamente homogêneas um todo sabidamente heterogêneo, de modo que a variabilidade das partes seja inferior à variabilidade do todo. Esse procedimento foi facilitado pelas características sócio-ambientais da cidade comentadas na seção 5.1.

A estratificação foi realizada com base na experiência de profissionais da empresa Financial Construtora Industrial Ltda., responsável pela coleta do lixo urbano de Campo Grande¹⁸, tendo como critério a semelhança qualitativa do lixo produzido.

Para avaliação da representatividade do processo de inferência, foram realizados dois ciclos de amostragem em semanas consecutivas, cada ciclo correspondendo a um período de dois dias necessários para o recolhimento do lixo da totalidade de bairros que compõe a cidade.

Naturalmente, a pesquisa realizada apresenta algumas limitações, em razão, principalmente, de restrições materiais e de tempo. Não permitiu avaliar, por exemplo, a componente sazonal na composição dos resíduos. De qualquer modo, traz elementos relevantes novos e de interesse e, sobretudo, melhora bastante a qualidade das informações existentes, representada no único estudo anterior disponível que se preocupou com a análise gravimétrica do RSU de Campo Grande.

¹⁸ Esse procedimento é sugerido pela EPA - *United States Environmental Protection Agency*, no documento “*RCRA Waste Sampling Draft Technical Guidance, Planning, Implementation and Assessment*”, de agosto de 2002.

6.2 Classificação dos resíduos

Com vistas à análise gravimétrica do RSU de Campo Grande, as amostras coletadas nesta pesquisa foram identificadas de acordo com a seguinte classificação:

Materiais não recicláveis

- Matéria orgânica putrescível (exemplos: restos de alimentos, frutas, etc.)
- Folhas
- Madeira (galhos de árvores, caixotes, estruturas de sofás, camas, etc.)
- Panos e trapos (roupas, toalhas, etc.)
- Couros

Materiais recicláveis

- Papel e papelão (embalagens, jornais, livros, cadernos, caixas, etc.)
- Plásticos (embalagens, garrafas pet, copos descartáveis, etc.)
- Vidros (garrafas, cacos de copos, etc.)
- Borrachas (pneus, solas de sapato, etc.)
- Metais (latas de bebidas, peças de automóveis)

Materiais inertes

- Não degradáveis (isopor, pilhas, baterias, areia, etc.)

Essa classificação permite a identificação dos resíduos de acordo com a proposição do IPCC de composição por percentual de papéis e têxteis, resíduos de parques, jardins e outros orgânicos putrescíveis não alimentícios, restos de alimentos e madeira e palha.

Cabe, contudo, esclarecer que a análise gravimétrica realizada não apresenta quantificação precisa dos resíduos de madeira, palha e folhas produzidos em Campo Grande. De fato, parte importante da produção de restos de madeira e folhas se deve à poda periódica das árvores, realizada, no caso de Campo Grande, pela empresa concessionária de distribuição de energia elétrica com autorização prévia da Prefeitura, ou de modo irregular pela população. Em nenhuma dessas situações os restos são depositados no aterro. Em razão das condições em que se realizou a pesquisa, não se encontrou um modo prático de contabilizar a quantidade gerada deste tipo de material. Pelas características da cidade - baixa densidade populacional e significativa arborização de ruas e avenidas -, não se deve descartar, *a priori*, a importância desses resíduos não quantificados.

6.3 Plano Amostral e Amostragem

Tendo em conta as características da cidade de Campo Grande e da coleta de seus resíduos urbanos, foram considerados seis estratos constituídos pelos agrupamentos de setores apresentados na seção 5.3. Frise-se que este procedimento se baseou no conhecimento heurístico da composição do lixo nas diferentes áreas da cidade, que indica composição razoavelmente homogênea dos resíduos coletados dentro de um mesmo estrato e composições diferenciadas de estrato para estrato. Vale dizer, o conhecimento empírico sugere menor variabilidade das características do lixo dentro de cada estrato e maior variabilidade entre os diferentes estratos.

Como representativos da composição dos resíduos de cada um desses estratos, foram selecionados para amostragem os setores 1 e 2 da zona central, os setores 10 e 24 da área que compreende os grandes eixos de circulação e os setores 60 e 66 das regiões periféricas.

Diante da possibilidade de haver mais de uma retirada de lixo num mesmo setor em um mesmo dia, estabeleceu-se que seria amostrado o conteúdo do primeiro caminhão retirado dos setores selecionados.

A partir da coleta e da pesagem de cada caminhão de transporte no local de destino dos resíduos, se conhece o peso total do lixo coletado em cada setor da cidade e, conseqüentemente, em cada um dos seis estratos considerados.

Foi estabelecido o cronograma das amostragens apresentado na Figura 12. Houve dois ciclos de amostragem para cada estrato. Em razão do feriado do dia 22 de maio e diante da dificuldade de realizar a amostragem de mais de dois setores em um mesmo dia, o primeiro ciclo de amostragem teve início na sexta-feira, dia 16 de maio, quando foram amostrados os setores 1 e 10. No segundo ciclo, as amostragens foram realizadas em dias da semana diferentes do primeiro ciclo. A única exceção foi o setor 60, amostrado em duas quartas-feiras consecutivas.

Figura 12: Calendário dos ciclos de amostragem realizados
 MAIO 2008

D	S	T	Q	Q	S	S
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16 setor 01 setor 10	17
18	19 setor 02	20 setor 24 setor 66	21 setor 60	22	23	24
25	26	27 setor 01	28 setor 02 setor 60	29 setor 24 setor 66	30 setor 10	31

Em razão da inexistência de coleta aos domingos é natural que sejam observadas diferenças quantitativas decorrentes da data de amostragem. Em geral, a primeira coleta da semana, realizada nas segundas-feiras nos setores 1, 2, 10 e 60 e nas terças-feiras nos setores 24 e 66, apresenta maior quantidade de lixo que nas coletas seguintes. Esse fato foi considerado na composição final dos resíduos através da ponderação das amostras pelo histórico de coleta.

Os resíduos de feiras-livres não foram computados na análise gravimétrica por terem recolhimento em separado do lixo domiciliar e por serem pouco significativos, em termos de peso. Estima-se que as feiras-livres gerem, em média, 350 kg de resíduos diários enquanto que a geração total de RSU na cidade é de cerca de 500 t por dia.

A amostragem foi realizada pelo processo de quarteamento, de acordo com a norma brasileira NBR 10.007 (ABNT, 2004). Foi feita em local plano e limpo, no pátio da Secretaria Municipal de Serviços e Obras Públicas (SESOP), onde se procederam a abertura dos sacos plásticos, a pré-homogeneização do material, os quarteamentos e, por fim, a coleta das amostras. As amostras colhidas nos turnos da noite foram acondicionadas em sacos plásticos para separação e pesagem na manhã seguinte.

Para cada amostra foram anotados dia, hora, setor de coleta, condição meteorológica da coleta (seco ou com chuva), peso total do conteúdo a ser amostrado, peso da amostra e peso dos componentes selecionados, indicados na seção precedente (seção 6.2). Vale registrar que em todo o período de amostragem ocorreu tempo seco. A única exceção foi a noite do dia 29 de maio, quando houve a coleta do setor 24. Por esta razão, **a amostra do setor 24 colhida no dia 29 de maio foi descartada.**

Para a inferência sobre a composição do lixo a partir das amostras atribuiu-se uma ponderação W_i aos estratos, com “i” variando de 1 a 6, onde W_i representa a relação entre o peso do lixo coletado no estrato “i” ou, equivalentemente, o peso total do lixo coletado no conjunto dos setores que compõem o estrato “i”, e o peso total do lixo coletado na cidade.

Por vezes, nos planos de amostragem estratificada, considera-se a estratificação da amostra por alocação proporcional nos estratos, isto é, de modo que a dimensão da amostra a coletar em cada estrato seja aproximadamente proporcional ao peso desse estrato, $n_i \cong n * W_i$. No entanto, quando se consideram estratos de pesos muito diferenciados, como é o caso aqui, em que alguns estratos têm peso superior em mais de 7 vezes o peso de outros, isso faz com que seja necessário coletar um número de amostras bastante grande. Nesta pesquisa, isso inviabilizaria o processo de amostragem, em função das restrições de prazo e dos condicionantes físicos para obtenção das amostras e, possivelmente, implicaria em pequeno ganho no que se refere à precisão das estimativas. Por essa razão, optou-se pela metodologia de amostragem aplicada neste trabalho e por considerar amostras de dimensão $n = 2$ para todos os estratos.

Com dois ciclos de amostragem, foram obtidas, portanto, duas amostras de cada estrato “i”, a partir das quais se calculam estimativas da média e da variância de uma determinada característica Y (percentual de certo componente ou resíduo na composição

do lixo) por estrato: \hat{Y}_i e S_i^2 , respectivamente ($i = 1, 2, \dots, 6$). A única exceção refere-se ao setor 24, para o qual, pela razão já exposta, trabalhou-se com apenas uma amostra.

Nessas condições, para calcular uma estimativa da média e da variância da mesma característica Y na população constituída pela totalidade do lixo da cidade de Campo Grande, a partir da amostra estratificada, foram utilizadas as seguintes expressões:

$$\hat{Y} = \sum_i W_i * \hat{Y}_i \quad [1]$$

$$S^2 = \sum_i W_i^2 * (S_i^2/n_i) \quad [2]$$

onde n_i é o número de amostras coletadas em cada estrato (no nosso caso, $n_i = 2$ em todos os estratos, com exceção do setor 24).

Apesar de suas limitações, o plano amostral aplicado tem condições de fornecer informações importantes relativas à composição do lixo de Campo Grande e que podem ser muito relevantes no planejamento e na formulação de futuros planos de amostragem.

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

7. RESULTADOS DA PESQUISA

7.1 Quantidade de RSU coletada

O primeiro resultado da pesquisa realizada refere-se ao peso diário de RSU coletado. Foram realizadas medições ao longo de seis semanas, incluindo as duas semanas em que se realizou a campanha de amostragem descrita na seção precedente. Este histórico de curto prazo produziu as seguintes estatísticas:

- recolhimento médio diário de 513,3 toneladas de resíduos sólidos (média de 7 dias);
- desvio-padrão relativamente pequeno, de 27,4 toneladas (coeficiente de variação em torno de 5%).

A partir destas estatísticas e considerando, ainda, a população urbana do município (ver seção 5.1) e um índice de cobertura de 97,5%, equivalente à média nacional (SNIS, 2005) e compatível com as referências disponíveis para o município (Sartori, 2002), pode-se calcular:

- produção média per capita de RSU em Campo Grande: 0,737 kg/dia
- desvio padrão: 0,039 kg/hab/dia

Admitido um índice de cobertura unitário, a geração média per capita se reduz a 0,709 kg/hab/dia (quantidade coletada), com desvio padrão de 0,0378 kg/hab/dia.

Em adição, pode-se projetar entre 190 e 200 mil toneladas a quantidade de RSU coletada em Campo Grande em 2008.

7.2 Distribuição semanal de RSU

Outro resultado de interesse refere-se à distribuição do peso de RSU coletado ao longo da semana. A inexistência de coleta aos domingos justifica que essa distribuição não seja uniforme, esperando-se maior peso nos dois primeiros dias úteis (segunda e terça-feira).

Essa expectativa foi confirmada pela campanha realizada. De fato, nos dois primeiros dias úteis da semana são recolhidos 42% de todo o peso coletado em toda a semana, conforme indicado na Figura 13.

Considerando que a campanha compreendeu um período muito curto (apenas duas semanas), houve a preocupação de se comparar dos dados compilados com os registros históricos, disponíveis na empresa prestadora de serviço e na Prefeitura Municipal. Verificou-se que a mesma distribuição histórica de pesos coletados ao longo de uma semana típica foi praticamente reproduzida na campanha de amostragem realizada. Conforme pode ser verificado na Figura 14, a máxima discrepância observada entre o histórico e o apurado na campanha é inferior a 0,9%. Este resultado evidencia que, em termos de peso, a produção de RSU em Campo Grande apresenta elevada regularidade.

Figura 13: Distribuição semanal do peso de RSU coletado na campanha (% do peso total coletado em uma semana)

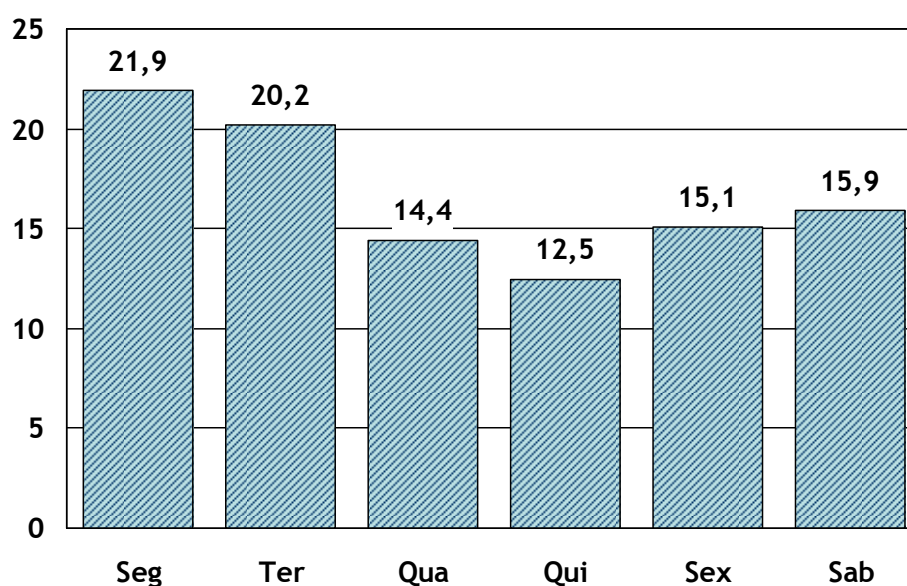
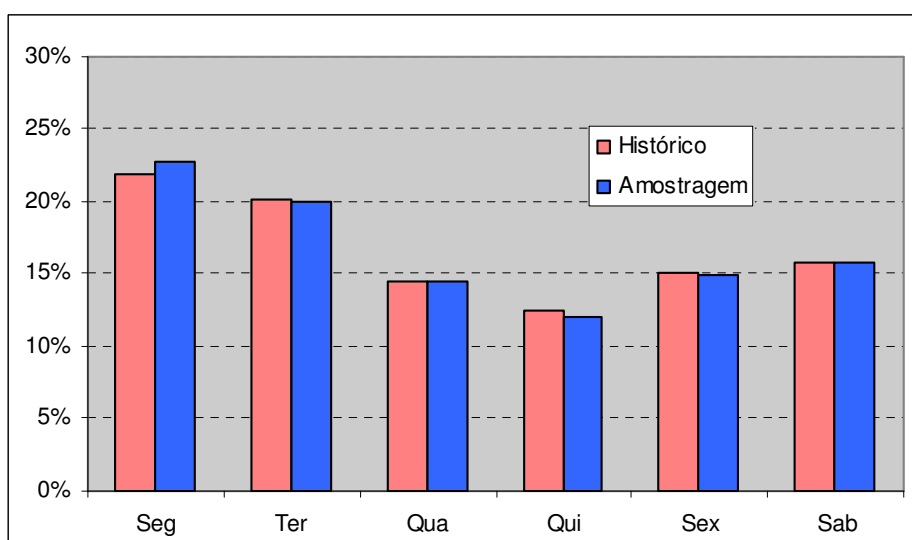


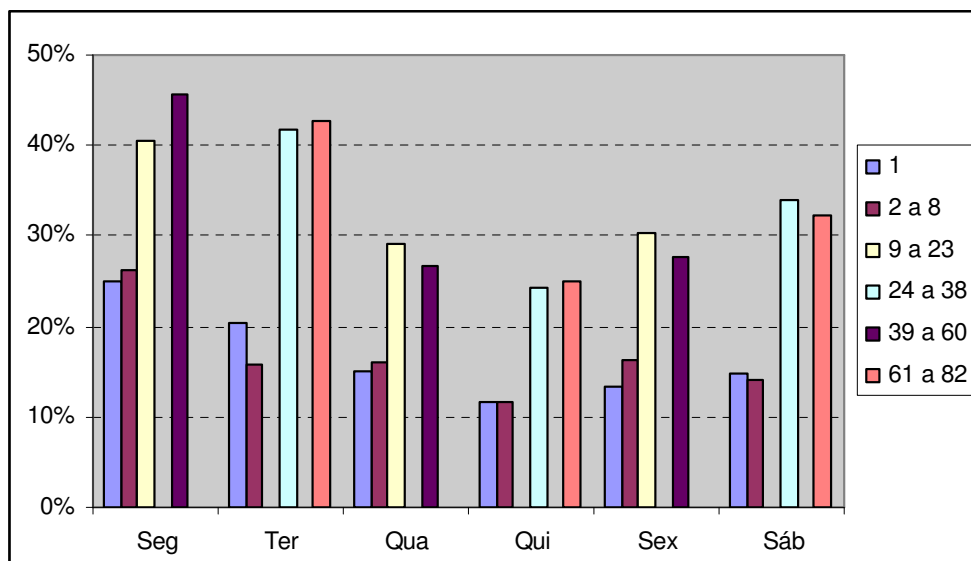
Figura 14: Distribuição semanal do peso de RSU coletado: histórico x campanha (% do peso total coletado em uma semana)



Essa regularidade também é observada ao longo do mês: o histórico dos pesos coletados ao longo das quatro semanas de um mesmo mês apresenta desvio-padrão pouco superior a 2,6%.

A distribuição temporal se reproduz por todos os setores da cidade. A mesma proporção de 42% também se verifica nos setores cuja coleta é realizada em dias alternados: cerca de 42% do peso médio semanal é coletado na primeira coleta da semana, 26% na segunda e 32% na última coleta. Nos setores onde a coleta é diária, na segunda-feira são coletados cerca de 25% do lixo recolhido durante a semana e o menor peso, próximo a 12%, se verifica nas quintas-feiras (Figura 15).

Figura 15: Distribuição semanal do peso de RSU coletado na campanha, por estrato (% do peso total coletado em uma semana)



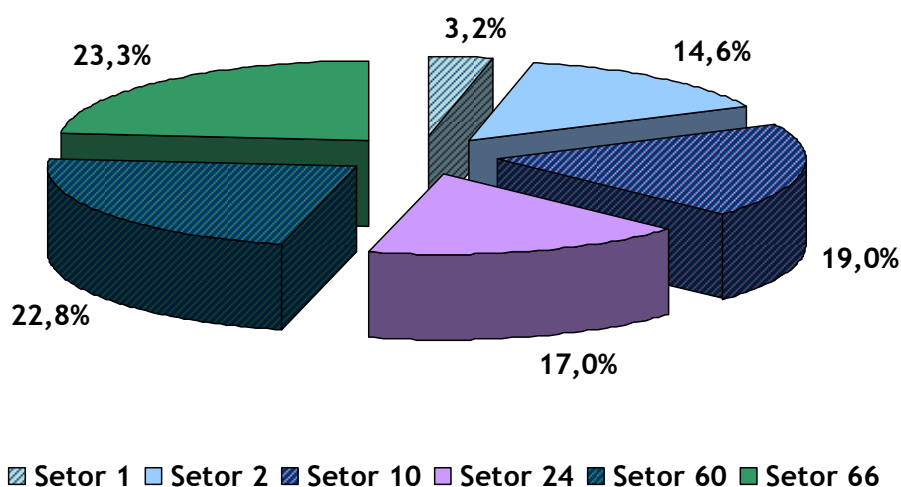
7.3 Distribuição espacial de RSU

Conforme já salientado, a cidade de Campo Grande pode ser dividida em três áreas distintas de geração de RSU: o centro, cujos estratos representativos na campanha foram os setores 1 e 2; os grandes eixos de circulação, cujos estratos representativos na campanha foram os setores 10 e 24; e as regiões urbanas periféricas, cujos estratos representativos na campanha foram os setores 60 e 66.

Pelas dimensões de cada uma dessas áreas e por suas características socioeconômicas e demográficas era de se esperar que a distribuição do peso do RSU coletado na cidade se tornasse concentrada na medida do afastamento do centro. Essa expectativa foi confirmada pela campanha. Nela, o setor 1 respondeu por apenas 3,2% do peso médio diário enquanto os estratos 60 e 66 responderam, cada um, por cerca de 23%. Conforme apresentado na Figura 16, pode-se inferir que:

- a zona central produz, em peso, 18% do lixo de Campo Grande;
- os grandes eixos de circulação produzem 36% do RSU municipal; e
- as regiões periféricas produzem 46% do lixo da cidade.

Figura 16: Distribuição espacial do peso de RSU coletado na campanha, por estrato (% do peso médio total coletado em um dia)



7.4 Análise gravimétrica

Como base na amostragem realizada pôde-se efetuar a análise gravimétrica do RSU coletado na cidade de Campo Grande tendo sido obtida a estimativa da composição indicada na Tabela 10.

Tabela 10: Composição % de RSU de Campo Grande (2008)

Materiais não-recicláveis	62,6
▪ Matéria orgânica putrescível (exemplos: restos de alimentos, frutas, etc.)	57,2
▪ Folhas	0,0
▪ Madeira (galhos de árvores, caixotes, estruturas de sofás, camas, etc.)	0,6
▪ Panos e trapos (roupas, toalhas, etc.)	4,7
▪ Couros	0,1
Materiais recicláveis	35,8
▪ Papel e papelão (embalagens, jornais, livros, cadernos, caixas, etc.)	13,2
▪ Plásticos (embalagens, garrafas pet, copos descartáveis, etc.)	18,4
▪ Vidros (garrafas, cacos de copos, etc.)	1,6
▪ Borrachas (pneus, solas de sapato, etc.)	0,9
▪ Metais (latas de bebidas, peças de automóveis)	1,7
Materiais inertes	1,6
▪ Não degradáveis (isopor, pilhas, baterias, areia, etc.)	1,6

Cumpra assinalar que a partir dos dados apurados em cada amostra e aplicando-se as expressões [1] e [2] apresentadas na seção 6.3 foram estimadas a média e a variância das proporções dos diferentes elementos que compõem o lixo da cidade e, assim, se obteve a composição indicada na Tabela 10.

Na estrutura do RSU de Campo Grande destaca-se:

- há predominância de matéria orgânica putrescível (MOP);
- os três principais componentes de RSU de Campo Grande (MOP, plásticos e papel) respondem, juntos, por 88,8% do peso diário coletado (isto é, cerca de 460 t/dia);
- os componentes não-recicláveis somam 62,6% do peso e os recicláveis 35,8%.

Em adição, cumpre registrar as observações com relação a dois elementos não explicitados na Tabela 4 e que se mostraram particularmente significativos, estando presentes em todos os estratos amostrados (embora em menor proporção no estrato 1): embalagens do tipo “longa vida” e fraldas descartáveis. Com relação a esses materiais:

- embalagens, compostas de camadas de papel, plástico e alumínio, foram classificadas como papel, em razão da preponderância deste elemento no material;
- embalagens responderam por 1,9% do peso total do RSU coletado;
- pela mesma razão, fraldas descartáveis, compostas de plástico e algodão (pano), foram classificadas como pano;
- fraldas responderam por 2,2% do peso total de RSU coletado.

Observe-se ainda que o peso de folhas de árvores, flores e resíduos de jardinagem é desprezível. Isso não significa que não haja produção desse tipo de resíduo em Campo Grande, uma cidade bastante arborizada. Ocorre que parte importante da produção destes resíduos é decorrente da poda periódica das árvores, realizada pela concessionária de distribuição de energia elétrica, a Enersul, com autorização prévia da Prefeitura, ou de modo irregular pela população. Não houve poda no período em que se realizou a pesquisa. De qualquer modo, esses resíduos são dispostos em lugar diferente do RSU regularmente coletado, ou seja, não têm como destino o aterro da cidade. Como consequência, a pequena parte que compõe o lixo coletado tem sua identificação e separação dificultada em razão do processo de compressão, mistura e quarteamento por que passa o RSU amostrado.

Em razão das características da coleta que se realiza em Campo Grande, a análise gravimétrica dos resíduos dos diversos setores da cidade não restou prejudicada. Assim, a Tabela 11 apresenta a composição dos RSU de Campo Grande por estrato amostrado e, por conseguinte, pelos grupamentos de setores da cidade em que se consideram os resíduos homogêneos.

Tabela 11: Composição % de RSU de Campo Grande (2008), por estrato

Material	Estratos e Setores					
	1	2	10	24	60	66
	1	2 a 8	9 a 23	24 a 38	39 a 60	61 a 82
Matéria orgânica	51,8	47,0	53,9	58,4	61,3	62,1
Folhas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Madeiras	0,6	0,1	0,7	1,4	0,2	0,7
Panos e trapos	2,1	3,4	3,4	6,9	4,8	5,1
Couros	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0
Papéis e papelão	20,2	23,0	15,5	9,1	18,2	17,8
Plásticos	19,2	19,7	19,6	16,8	18,3	17,8
Vidros	2,1	2,7	2,4	0,4	1,7	1,2
Borrachas	0,3	0,3	1,8	0,8	0,5	0,9
Metais	2,2	2,4	1,9	2,8	0,8	1,3
Material inerte	1,5	1,4	0,9	3,4	1,1	1,3

Pode-se observar que, entre os estratos, a composição de RSU tende a se diferenciar principalmente pelo percentual de matéria orgânica, que se acentua nos setores que compreendem os bairros mais periféricos. Inversamente, a presença de papel é maior nos bairros centrais (Tabela 11). O percentual de plásticos é praticamente uniforme em todos os estratos, ainda que ligeiramente maior nos bairros centrais e nos de população com maior poder aquisitivo.

Vale salientar que para outras finalidades que não apenas a determinação do potencial energético dos resíduos sólidos se justificaria ampliar o número de amostras para quantificação mais precisa desses compostos de pequena participação na composição do lixo da cidade.

8. Análise dos Resultados

8.1 Quantidade de RSU coletada

A produção de RSU é função do tamanho, da renda das famílias e das características sócio-culturais de uma cidade. Contudo, não são claras ou evidentes as relações entre a quantidade de RSU produzida e estes parâmetros.

A ABRELPE, por exemplo, na edição de 2007 de seu *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil* tenta estabelecer uma correlação (linear) entre a quantidade de RSU per capita coletada e a população das cidades que compõem a amostragem representativa dos municípios de uma macro-região com dados de coleta considerada na pesquisa. O fato de obter coeficientes de correlação (R^2) entre 66 e 86% não evidencia que se possa estabelecer com segurança tal relação. Outras abordagens pretendem relacionar quantidade de RSU produzida com o consumo privado¹⁹.

De qualquer modo, pode-se concluir que a produção média diária per capita de RSU em Campo Grande, de cerca de 0,71 kg, está bastante próxima da média de várias cidades brasileiras com população urbana entre 300 mil e 900 mil habitantes (0,76 kg/hab/dia) e da região Centro-Oeste, quando se exclui Brasília (0,79 kg/hab/dia). É, porém, cerca de 40% menor que a média de lixo produzida diariamente nas grandes capitais brasileiras e em cidades com 1 milhão de habitantes ou mais (1,16 kg/hab/dia). Essas comparações são mostradas nas Figuras 17 a 19.

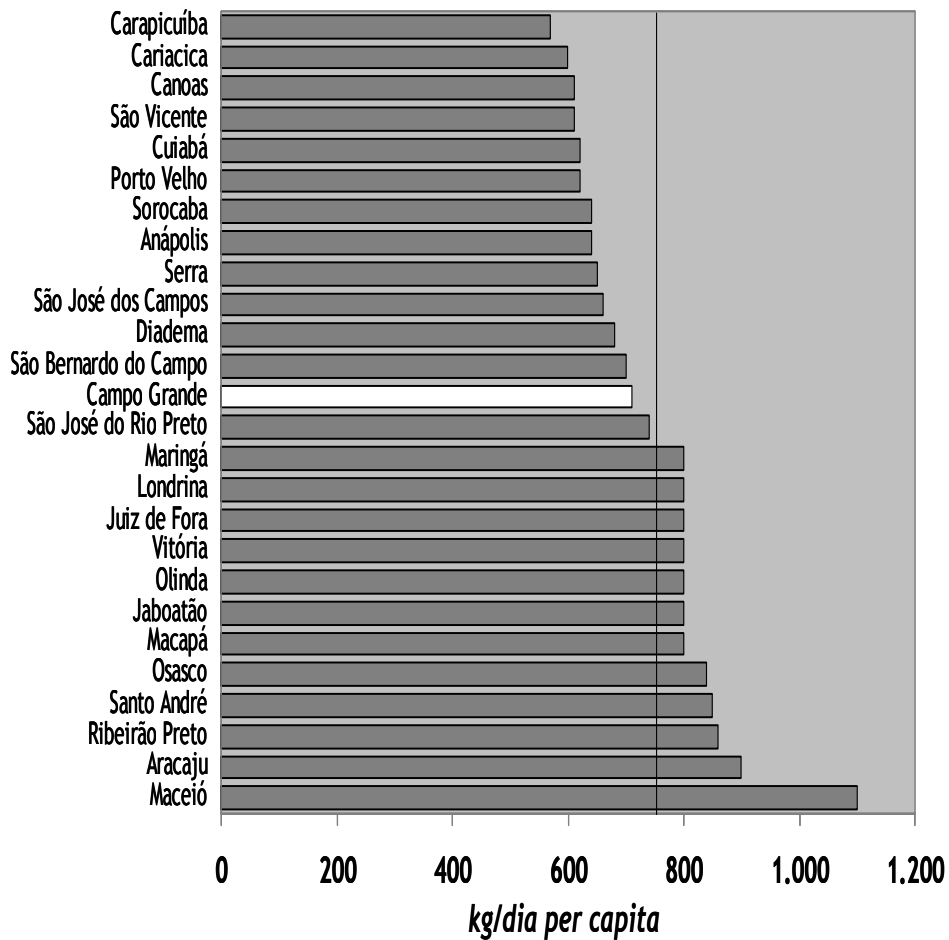
8.2 Composição gravimétrica do RSU

Talvez mais claramente do que a produção, a composição [média] do RSU produzido guarda maior relação com o nível de vida ou a renda média da população. De uma forma geral, a proporção de matéria orgânica é tanto maior quanto menor o nível de renda. A prof. Dra. Selene de Oliveira (1999) registra que Gomes²⁰ (1989) verificou “que a produção de resíduos de um município não varia *significadamente* (sic) em função das estações do ano, mas verificou que onde residem comunidades de baixa renda a produção de material orgânico é maior, e nas de poder aquisitivo elevado as proporções de papel são maiores; concluindo que a quantidade de matéria orgânica contida nos resíduos é inversamente proporcional ao desenvolvimento e evolução das cidades”.

¹⁹ A publicação *Key Environmental Indicators* da OECD associa, por exemplo, que a produção de lixo nos Estados Unidos, em 2005, de 2,1 kg/hab/ano, ao índice de 28,1 kg para US\$ 1.000 de consumo privado. Já na Alemanha, a mesma publicação registra, respectivamente, 1,8 kg/hab/ano e 39,9 kg para cada US\$ 1.000 de consumo.

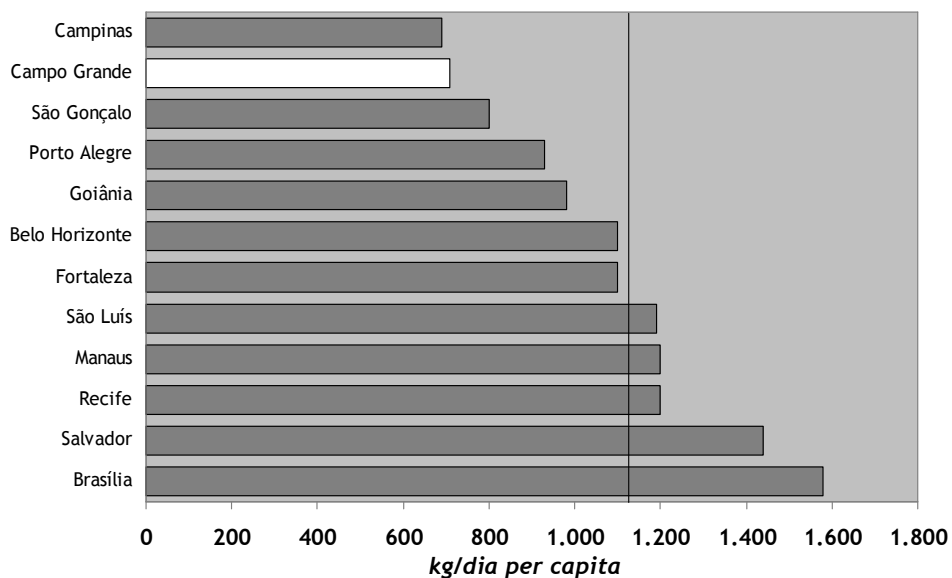
²⁰ GOMES, L.P. *Estudo da Caracterização Física e da Biodegradabilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Saneamento. São Carlos: Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, 1989.

Figura 17: Quantidade de RSU coletado em cidades brasileiras.
 Amostra de cidades com população urbana entre 300 mil e 900 mil habitantes



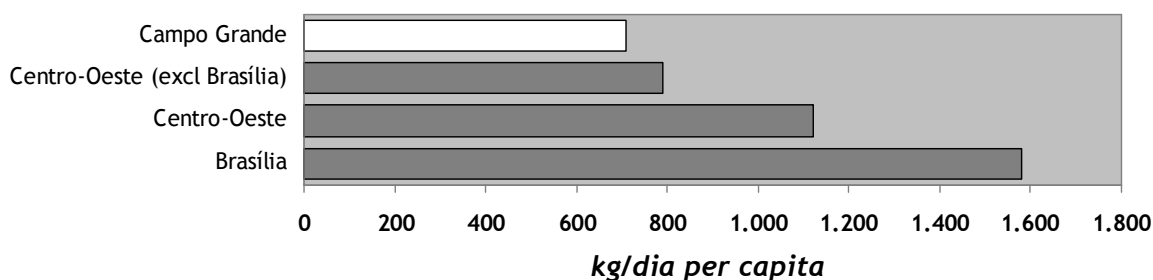
Fonte: ABRELPE, 2007

Figura 18: Quantidade de RSU coletado em cidades brasileiras.
 Amostra de cidades com população urbana superior a 1 milhão de habitantes



Fonte: ABRELPE, 2007

Figura 19: Quantidade de RSU coletado na região Centro-Oeste



Fonte: ABRELPE, 2007

De fato, nos Estados Unidos e nos 27 países que compõem a União Européia a proporção de recicláveis é maior que a média das principais capitais brasileiras, inclusive Campo Grande, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12: Comparação internacional da composição gravimétrica de RSU

Classificação dos materiais	Estados Unidos (1)	União Européia (2)	Capitais Brasileiras (3)	Campo Grande
	2006	2005	2002-06	2008
Não recicláveis	38,2%	38,0%	61,8%	62,6%
Recicláveis	58,5%	54,0%	32,3%	35,8%
Outros	3,3%	8,0%	5,9%	1,6%

(1) antes da reciclagem; Fonte: US EPA

(2) média dos 27 países membros; recicláveis compreendem 10% de “other combustible” e 1% de “white goods”; Fonte: Okopal, 2008

(3) média calculada com base em informações prestadas pelas prefeituras municipais de Rio de Janeiro, São Paulo, Porto Alegre, Belo Horizonte, Salvador, Manaus e Curitiba à EPE.

Apesar das limitações que se impõem à comparação de resultados de pesquisas realizadas segundo critérios técnicos próprios e metodologias nem sempre homogêneas, é possível tirar algumas conclusões a partir da análise comparada entre os dados obtidos para Campo Grande e o de outras sete capitais brasileiras²¹. A Tabela 13 apresenta a composição média de RSU das sete capitais analisadas e, inclusive, de Campo Grande. A análise gravimétrica comparada revela que o material coletado na capital do Mato Grosso do Sul apresenta uma composição que se aproxima da média dessas capitais²².

Do exame destas estatísticas destaca-se, em particular, a similaridade da composição dos RSU de Campo Grande com os da cidade de São Paulo, cuja população, em média, tem um poder aquisitivo mais alto, comparativamente às demais capitais. Essa similaridade vai além da proporção de material orgânico presente. É observada também nos percentuais de material reciclável (papel, plásticos, vidros e metais).

²¹ Trata-se das capitais que responderam a uma consulta direta feita pela EPE. São elas: São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Porto Alegre, Salvador, Manaus e Curitiba. A análise das informações colhidas junto a estas prefeituras está documentada na Nota Técnica nº EPE.DPG.RE.019/2007-r0, preparada no âmbito dos estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2008/2017.

²² Média ponderada pela população e pela quantidade de RSU gerada. Foram atribuídos a cada capital os seguintes pesos: São Paulo, 8; Rio de Janeiro, 4; Belo Horizonte, 2; demais capitais consideradas, 1.

Tabela 13: Composição gravimétrica (%) de RSU de capitais brasileiras

Material	CGR	MED	SAO	RIO	BHZ	POA	SSA	MAO	CWB
	Campo Grande	Média	São Paulo	Rio de Janeiro	Belo Horizonte	Porto Alegre	Salvador	Manaus	Curitiba
	2008		2003	2006	2004	2002	2003	2001	2005/06
Não recicláveis	62,6	61,8	64,0	65,1	64,6	48,7	54,1	51,2	54,5
<i>Matéria orgânica</i>	57,2	56,7	57,5	61,8	61,6	43,9	54,1	45,2	47,5
<i>Folhas</i>	-	0,7	1,0	-	-	-	-	-	-
<i>Madeiras</i>	0,6	1,2	1,6	0,3	1,0	0,7	0,6	3,6	1,3
<i>Panos e trapos</i>	4,7	2,8	3,9	1,6	1,0	3,5	0,9	1,2	5,1
<i>Couros</i>	0,1	0,3	-	0,1	1,0	0,6	0,9	1,2	0,6
Recicláveis	35,8	32,3	32,1	34,1	26,6	30,4	21,7	44,4	37,9
<i>Papel e papelão</i>	13,2	12,3	11,1	14,8	9,5	10,9	5,3	18,9	19,8
<i>Plásticos</i>	18,4	14,9	16,8	14,7	10,9	11,8	12,8	18,5	9,9
<i>Vidros</i>	1,6	2,4	1,8	2,7	2,9	3,4	1,9	2,2	4,2
<i>Borrachas</i>	0,9	0,4	0,2	0,3	1,0	0,3	-	1,2	1,1
<i>Metais</i>	1,7	2,3	2,2	1,6	2,3	4,0	1,7	3,6	2,9
Inertes	1,6	5,9	3,9	0,8	8,8	20,9	21,9	4,4	7,6

Nota: Material orgânico no Rio de Janeiro inclui 0,4% de côco.

A parcela de recicláveis nos resíduos de Campo Grande soma 35,8% do peso total, percentual superior em 3,5 pontos percentuais à média das capitais consideradas. Outra observação é que, mesmo nas cidades onde foi apurada (Rio de Janeiro e São Paulo), a proporção de folhas [de árvores] é muito pequena, indicando que, a exemplo de Campo Grande, a coleta destes resíduos é feita separadamente da coleta de RSU.

9. Potencial Energético dos RSU de Campo Grande

9.1 Aterro existente

Ao longo de sua vida operacional, o aterro controlado que hoje recebe os RSU coletados em Campo Grande terá acumulado uma quantidade de resíduos que ultrapassa 2,6 milhões de toneladas e, nessas condições, está próximo do esgotamento de sua capacidade. Em breve estará fora de operação e será substituído por um aterro sanitário, que se encontra em fase final de construção.

Conforme visto anteriormente (Seção 3.2), o aproveitamento energético dos gases produzidos em um aterro se faz em uma “janela” de tempo que já é naturalmente pequena, entre 12 e 18 anos. Isto ocorre porque a quantidade de gás produzida é crescente até o esgotamento do aterro, decaindo rapidamente a partir deste momento.

No caso de Campo Grande, em particular, considerando a idade do aterro existente, a “janela” disponível seria significativamente menor caso fosse iniciado agora o aproveitamento dos gases nele produzidos, talvez algo como entre 5 e 6 anos, se considerado, ainda, o prazo para instalação dos equipamentos).

Além disso, o aterro existente sofreu os efeitos de alguns incêndios. Do ponto de vista energético, a principal consequência desses eventos é reduzir ainda mais a “janela” disponível para geração a partir do gás do lixo, como resultado da queima fortuita de resíduos inflamáveis de maior poder calorífico e formadores de metano, ocorrida naqueles sinistros.

Assim, a avaliação apriorística é de que não se fará o aproveitamento energético do aterro existente, tendo sido esta a hipótese tomada como base neste trabalho.

9.2 Hipóteses básicas para o aproveitamento energético do novo aterro

O potencial energético dos RSU de Campo Grande foi avaliado segundo duas possibilidades gerais: geração de energia elétrica e reciclagem. No primeiro caso, a avaliação considerou três alternativas: aproveitamento direto do gás de lixo, digestão anaeróbica e incineração.

Tendo em vista o exposto no subitem precedente, a avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir dos RSU de Campo Grande aqui apresentada se refere apenas ao novo aterro sanitário, que se encontra em construção. Para efeito desta avaliação, levou-se em conta:

Capacidade total de acumulação do aterro: estimada em pouco mais de 2 milhões de toneladas, o que significa, considerando a quantidade (e respectiva projeção) de RSU coletada, uma vida de 11 anos;

Início do aproveitamento energético do aterro: imediato, a partir das condições mínimas exigidas em cada alternativa;

Composição do gás produzido no aterro: metano, 55%; CO₂ e outros gases, 45%;

Disponibilidade dos equipamentos de geração de energia elétrica [média, para operação]: 88% do tempo, já contemplados os períodos (estimativas) de parada por manutenção programada e de indisponibilidade forçada (defeitos).

9.3 Geração de energia a partir do aproveitamento do gás do lixo

Para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário foram assumidas, em adição, as seguintes premissas específicas:

- recuperação do biogás para a utilização energética: 50% do volume total produzido e
- rendimento da transformação da energia térmica em energia elétrica: 35%.

A quantidade de gás disponível para a geração é variável ao longo do tempo. De acordo com o *Waste Model* (IPCC, 2006), a produção anual de biogás calculada para o aterro sanitário de Campo Grande alcança seu valor máximo, de 19 milhões de m³, no 11º ano de acumulação de RSU, decrescendo exponencialmente a partir daí, uma vez cessada a deposição do lixo no aterro. Nessas condições, nesse ano, a disponibilidade de biogás “in natura” (poder calorífico de cerca de 5.000 kcal/m³) seria de 9,5 milhões de m³ (recuperação de 50%). Isto é praticamente equivalente, em termos energéticos, à utilização [apenas] do metano contido no biogás (poder calorífico de 9.250 kcal/m³), cujo volume é estimado em 5,2 milhões de m³ (55%) Em qualquer caso, isto é, tomando-se o volume de metano produzido ou o volume de biogás “in natura”, pode-se calcular que, desconsiderados os aspectos econômicos que possam determinar a viabilidade da geração, **a máxima potência instalável para geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do gás de lixo é de 2.500 kW (2,5 MW).**

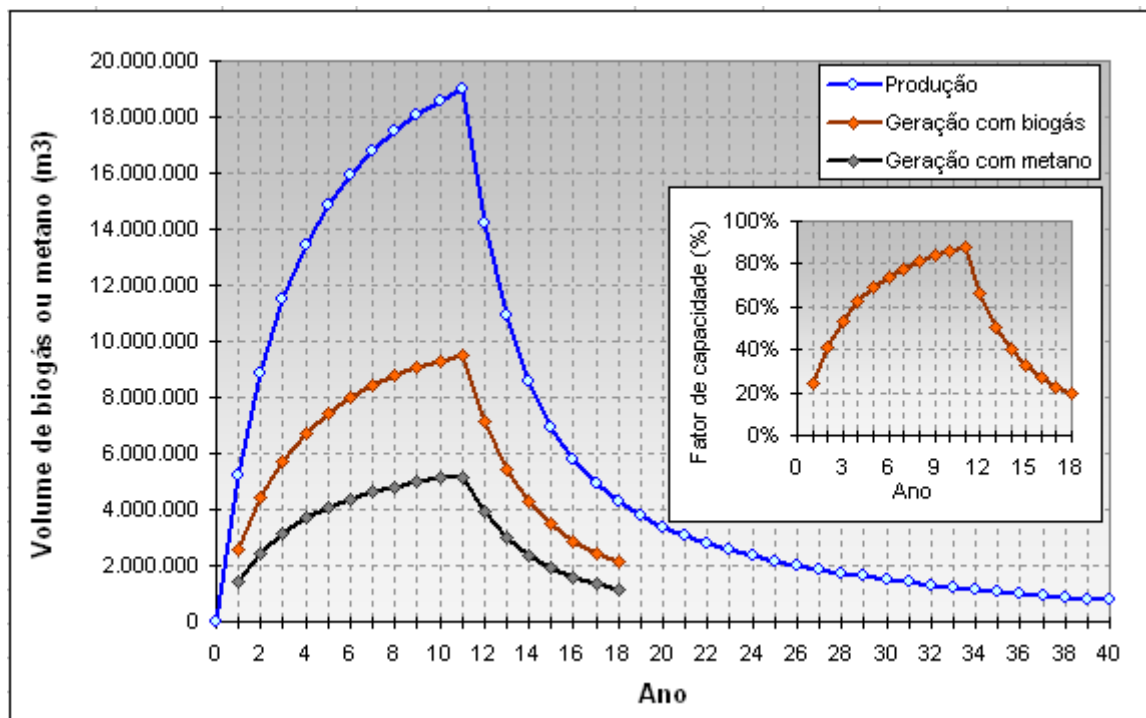
Assumindo, por hipótese, que a geração de energia elétrica com o gás de lixo se justifica tecnicamente a partir de um fator de capacidade médio anual de pelo menos 20%, calcula-se que a vida útil do projeto de geração seria de 18 anos. Durante esse período, a produção de biogás (ou de metano) obedeceria à curva indicada na Figura 20, em que se observa também o fator de capacidade de geração de energia elétrica médio em cada ano. Os valores operacionais médios estimados para os 18 anos de vida do projeto são resumidos na Tabela 14.

Tabela 14: Índices operacionais do aproveitamento do GDL no aterro sanitário de Campo Grande

ÍNDICE	BIOGÁS	METANO
Geração média (MWmed)	1,39	1,41
Fator de capacidade (%)	69	71
Aproveitamento do RSU (kWh/ton)	64,9	66,0
Produção de gás utilizada (%) ^(*)	40,6	40,6

^(*) Em relação à produção total de biogás pelo aterro durante 80 anos

Figura 20: Produção de gás e geração de energia elétrica no aterro sanitário de Campo Grande



9.4 Geração de energia a partir da digestão anaeróbica

Diferentemente do aproveitamento do biogás de aterro sanitário, o processo de digestão anaeróbica resulta em produção constante do combustível ao longo da vida útil das instalações. Além disso, a própria vida útil do aterro é consideravelmente estendida uma vez que, em adição à necessária separação prévia dos recicláveis não digeríveis, a quantidade de resíduos retornados ao aterro não ultrapassa 35% da quantidade original, o que reduz o volume do material acumulado no aterro. Este é um benefício ponderável na medida em que praticamente triplica a vida do aterro, que, no caso de Campo Grande, poderá alcançar até 32 anos.

Embora dependente das características do material em decomposição e da tecnologia de digestão, pode-se afirmar que a produção de biogás se situa entre 100 e 140 m³ por tonelada de matéria orgânica²³, com teor de metano entre 50% e 60% do volume.

Isto posto, para o cálculo do potencial de geração a partir do aproveitamento do biogás gerado em processo de digestão anaeróbica foram assumidas as seguintes premissas adicionais:

- produção média de 120 m³ por tonelada de matéria orgânica e
- rendimento da transformação da energia térmica em energia elétrica de 35%.

Admitiu-se ainda que a totalidade do biogás produzido nos biodigestores seria utilizada para a geração de energia elétrica.

²³ “KOMPOGAS Process Description and Costing”, Hyder Consulting Pty, Janeiro de 2007.

Considerados os resultados da análise gravimétrica dos RSU coletados em Campo Grande (cerca de 57% de matéria orgânica), pode-se estimar uma produção média anual de 12,8 milhões de m³ de biogás. Nestas condições, desconsiderados aspectos econômicos que determinem a viabilidade da geração, a máxima potência instalável para a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela digestão anaeróbica é calculada em 3.400 kW (3,4 MW), tanto para o aproveitamento direto do biogás “in natura” quanto para o aproveitamento exclusivo do metano produzido. Os valores operacionais médios estimados para o projeto são resumidos na Tabela 15.

Tabela 15: Índices operacionais do aproveitamento do GDL no aterro sanitário de Campo Grande

ITEM	ÍNDICE
Geração média (MW _{med})	2,99
Fator de capacidade (%)	88
Aproveitamento do RSU (kWh/ton)	139,9

9.5 Geração de energia a partir da incineração

O potencial de geração de energia elétrica pelo processo de incineração depende do poder calorífico do combustível, elemento que determina, inclusive, a viabilidade técnica do aproveitamento.

A partir da análise gravimétrica realizada e com base na formulação de Themelis (2003) estima-se o poder calorífico inferior do RSU coletado em Campo Grande em 2.350 kcal/kg, considerando-se um índice de umidade típico de 60%. Esse poder calorífico é superior ao limite mínimo de viabilidade técnica (2.000 kcal/kg), o que permite a queima bruta (“*mass burning*”) sem necessidade de adição de material combustível (por exemplo, óleo) de modo a elevar o poder calorífico ao mínimo tecnicamente requerido.

As características do RSU como combustível, além de impor especificações técnicas especiais ao equipamento, determinam o rendimento da transformação da energia térmica em energia elétrica, que tende a ser menor do que em transformações convencionais. Nessas condições, esse rendimento é avaliado em cerca de 20%, o que conduz à estimativa de que o potencial de geração de energia elétrica a partir da incineração do RSU de Campo Grande é de 11,4 MW_{med}. Admitindo-se um fator de capacidade de 88%, a máxima potência instalável é de 13 MW.

A incineração reduz a quantidade de resíduos depositados no aterro a cerca de 10% do volume original e a 25% do peso. No caso de Campo Grande, isto significa estender a vida útil do aterro sanitário para mais de 100 anos. Além disso, a incineração não impede a recuperação, mesmo posterior, do vidro e dos metais recicláveis presentes no lixo. Os valores operacionais médios estimados para o projeto são resumidos na Tabela 16.

Tabela 16: Índices operacionais da incineração no aterro sanitário de Campo Grande

ITEM	ÍNDICE
Geração média (MWmed)	11,4
Fator de capacidade (%)	88
Aproveitamento do RSU (kWh/ton)	546,2

9.6 Reciclagem

A análise gravimétrica realizada revela que plásticos, vidros, metais e papéis constituem quase 98% do material reciclável presente no lixo de Campo Grande. Considerada a possibilidade de geração de energia elétrica a partir do RSU coletado, a recuperação deste material com vistas à reciclagem dependerá, contudo, da alternativa escolhida. Assim é que, na hipótese de geração a partir do gás de lixo, exclui-se a recuperação do papel, sob pena de reduzir significativamente a quantidade de gás produzido no aterro. Na hipótese da digestão anaeróbica, todo o material reciclável poderá ser recuperado. Na rota da incineração, a recuperação para reciclagem exclui plásticos e papéis, sob pena de reduzir o poder calorífico para abaixo do limite técnico mínimo.

No caso do aproveitamento do gás de lixo, a separação e a coleta prévia dos elementos recicláveis selecionados (plásticos, metais e vidros) não altera significativamente a vida útil do aterro sanitário e, portanto, não se amplia o tempo estimado de exploração do gás para a geração de energia elétrica. A reciclagem desses materiais, porém, pode proporcionar uma economia de energia adicional que se estima, com base nos índices mais baixos dentre os sugeridos por EPA (2006) e Warnken ISE (2007), em até 24,4 MWmédios.

Também no caso da digestão anaeróbica, a separação e a coleta prévia dos elementos recicláveis não degradáveis selecionados (plásticos, metais e vidros) não altera significativamente a vida útil do aterro sanitário, que é, contudo, ampliada pela redução de volume provocada pela digestão do material orgânico. A exemplo do caso anterior, a reciclagem dos materiais não degradáveis pode proporcionar uma economia de energia adicional que se estima, no caso de Campo Grande e com base nos menores índices dentre os sugeridos por EPA(2006) e Warnken ISE (2007), em até 24,4 MWmédios. Esse valor pode ser ainda mais alto se considerada a separação prévia e reciclagem do papel (+ 3,9 MWmédios). Se, por um lado, o papel pode ser digerido no biodigestor, por outro sua separação não altera a produção do biodigestor. Contudo, deve-se considerar que a separação do papel é uma operação mais complexa e cara do que a separação dos outros elementos recicláveis.

Na rota da incineração, a reciclagem dos elementos selecionados (metais e vidros), cuja seleção e coleta pode ocorrer previamente ou após a incineração do lixo, pode proporcionar uma economia de energia adicional que se estima, considerada a recuperação da totalidade do vidro e dos metais presentes nos resíduos urbanos de Campo Grande, em 1,2 MWmédios.

9.7 Emissões evitadas

De acordo com as metodologias aprovadas pelo IPCC para quantificar as emissões decorrentes da disposição final de resíduos, da geração elétrica - com diversos insumos, dentre os quais resíduos sólidos urbanos, fósseis e biomassa - e da substituição de energia tradicionalmente fornecida pela rede elétrica - seja da geração a partir dos RSU ou da conservação proporcionada pela reciclagem de papéis, plásticos, vidros e metais - é possível estimar os fatores de emissão evitada das tecnologias de aproveitamento energético dos RSU.

Considerando o aproveitamento energético do biogás²⁴ apenas no período de vida útil do projeto de geração de energia elétrica (18 anos), pode-se estimar que a usina de 2,5 MW em Campo Grande evita, em relação à deposição dos resíduos em aterro sanitário, a emissão de 6,65 t CO₂/MWh - ou 0,432 toneladas equivalentes de CO₂ por tonelada de RSU. Ressalta-se que este valor decorre do aproveitamento da metade do gás produzido pelo aterro em 18 anos.

Se adicionadas as emissões evitadas pela reciclagem de plásticos, vidros e metais e pela geração térmica substituída, cálculo fundamentado na composição da matriz energética nacional, o total de emissões evitadas eleva-se em 16% e pode alcançar 0,501 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de RSU.

Considerando o aproveitamento energético a partir da digestão anaeróbica, calcula-se que a usina de 3,4 MW, com fator de capacidade de 88%, operando com o biogás gerado pelo RSU coletado em Campo Grande, pode evitar, em relação à deposição dos resíduos em aterro sanitário, 7,61 t CO₂/MWh - ou 1,064 toneladas equivalentes de CO₂ por tonelada de RSU.

Se adicionadas as emissões evitadas pela reciclagem de papéis, plásticos, vidro e metais e pela geração térmica substituída, o total de emissões evitadas é ampliado em torno de 8%, podendo alcançar 1,148 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de RSU.

Na hipótese da incineração, considerada a composição gravimétrica dos RSU coletados em Campo Grande, calcula-se que a usina de 13 MW, com fator de capacidade de 88%, emita 1,13 toneladas de CO₂ por MWh gerado. Ao considerar a produção de metano evitada no aterro, estima-se que, em termos líquidos, poderão ser evitadas emissões de 0,39 t CO₂/MWh - ou 0,209 toneladas equivalentes de CO₂ por tonelada de RSU depositada.

Se adicionadas as emissões evitadas pela reciclagem do vidro e metais e pela geração térmica substituída, o total de emissões evitadas pode ser ampliado em 16% e alcançar 0,243 toneladas de CO₂ equivalentes por tonelada de RSU.

²⁴ Por ser proveniente da decomposição de biomassa cultivada (alimentos e papel), as emissões de dióxido de carbono equivalem a parte deste gás fitossintetizado no crescimento da safra. Assim, as emissões deste gás são consideradas nulas.

10. Conclusões e Recomendações

A estimação das características físicas dos RSU coletados na cidade de Campo Grande foi realizada com base em amostragem estratificada. Esse procedimento apresenta vantagens conhecidas que, quando corretamente selecionados os estratos, resulta em maior precisão na estimação de características físicas de populações heterogêneas. Em certos casos, é mesmo a única forma economicamente viável de se proceder tal estimação. Neste trabalho, a correta seleção dos estratos foi evidenciada pela dispersão dos resultados entre os seis estratos selecionados para a amostragem.

A influência do clima sobre a produção e composição dos resíduos sólidos em Campo Grande não pôde, naturalmente, ser avaliada em uma única campanha de amostragem. A característica tropical do clima local, com duas estações bem definidas pelo regime pluviométrico, sugere que duas campanhas anuais são suficientes para a caracterização da sazonalidade dos resíduos da cidade. Caso haja interesse em aprimorar os resultados aqui apresentados, recomenda-se uma segunda campanha de amostragem, a ser realizada entre meados de outubro e meados de dezembro.

Outro aspecto a considerar em uma avaliação mais precisa das possibilidades de aproveitamento energético dos RSU gerados em Campo Grande é a quantidade de madeira e de folhas resultante da poda das árvores, materiais de maior poder calorífico e de maior capacidade de produção de metano ao longo do ciclo de decomposição.

Com relação à quantidade de RSU de Campo Grande, pode-se afirmar que a produção média diária per capita, de cerca de 0,71 kg, é bastante próxima da média de várias cidades brasileiras com população urbana entre 300 mil e 900 mil habitantes (0,76 kg/hab/dia) e da região Centro-Oeste, excluído o Distrito Federal (0,79 kg/hab/dia). É, porém, cerca de 40% menor que a média de lixo produzida diariamente nas grandes capitais brasileiras e em cidades com 1 milhão de habitantes ou mais (1,16 kg/hab/dia).

Apesar das limitações que se impõem à comparação de resultados de pesquisas realizadas segundo critérios técnicos próprios e metodologias nem sempre homogêneas, é possível tirar algumas conclusões a partir da análise comparada entre os dados obtidos neste trabalho para Campo Grande e o de outras capitais brasileiras. A análise gravimétrica comparada revela que o material coletado na capital do Mato Grosso do Sul apresenta uma composição, com 57,2% de matéria orgânica, que se aproxima da média de sete das mais importantes capitais. Destaque-se, em particular, a similaridade da composição dos RSU de Campo Grande com os da cidade de São Paulo, cuja população, em média, tem um poder aquisitivo mais alto, comparativamente às demais capitais. A parcela de recicláveis nos resíduos de Campo Grande soma 35,8% do peso total, percentual superior em 3,5 pontos percentuais à média das capitais consideradas.

Com relação ao aproveitamento energético dos resíduos, a primeira consideração é que, com base em uma avaliação apriorística, não se admitiu o uso do aterro existente. Nessa avaliação teve-se em conta a idade do aterro existente, a qual determina ser muito

pequena a “janela” disponível para o aproveitamento energético, talvez algo como entre 5 e 6 anos. Em adição, teve-se em conta que o aterro existente sofreu os efeitos de alguns incêndios, o que reduz ainda mais a “janela” disponível para geração de energia.

Para o aterro sanitário em construção, nenhuma das três alternativas de aproveitamento energético apresentadas neste trabalho (incineração, digestão anaeróbica e gás de lixo) deve ser descartada sem uma avaliação detalhada dos aspectos econômicos e ambientais envolvidos.

Estritamente sob a ótica da produção de energia elétrica, a incineração é a alternativa que proporciona o maior potencial de geração. De fato, a usina de 13 MW poderá gerar um total de 100 GWh/ano ao longo de sua vida útil (100 anos, admitida a reposição dos equipamentos a cada 20 anos), enquanto a usina a gás do biodigestor geraria 26 GWh/ano, com uma vida com 1/3 de duração (admitida também a reposição dos equipamentos), e a de gás de lixo apenas 12,3 GWh/ano durante uma vida útil ainda menor (18 anos). Isto porque apenas as alternativas de incineração e de digestão anaeróbica estendem a vida útil do aterro.

Deve-se observar, contudo, que a incineração praticamente exclui a alternativa da reciclagem, ou reduz bastante seus benefícios energéticos, assim como a reciclagem pode afetar bastante a produção de gás no biodigestor. Essas considerações ganham importância na medida em que a reciclagem tem potencial para produzir o maior benefício energético global. Com efeito, além de contribuir para a extensão da vida útil do aterro, a reciclagem evita a geração de energia elétrica consumida na produção do material reciclável e isto, dependendo do material reciclado, pode chegar a quase 29 MW médios ou 250 GWh/ano, conforme indicado na Tabela 17.

Tabela 17: Estimativa do benefício energético da reciclagem de material encontrado no lixo de Campo Grande

ITEM	Participação % no RSU coletado	Quantidade kg/dia	Consumo específico kWh/kg	Benefício energético MWmed
Papel	13,2	67.755,6	1,37	3,9
Plástico	18,4	94.447,2	5,91	23,3
Metal	1,7	8.726,1	2,67	1,0
Vidro	1,6	8.212,8	0,62	0,2
TOTAL	34,9	179.141,7	11,20	28,4

Note-se que papel e plástico são os componentes que proporcionam o maior benefício na reciclagem. Por outro lado, são também os elementos de maior contribuição para o poder calorífico do RSU de Campo Grande. Se separados para a reciclagem, reduzem o poder calorífico do RSU o que poderá inviabilizar tecnicamente a incineração, ou exigir a adição de elemento combustível. O papel é, ainda, um componente que apresenta elevada contribuição para a produção de gás no aterro sanitário. Portanto, sua separação para reciclagem afeta negativamente a alternativa de geração de energia a partir do gás de lixo. Mas, a geração com base no gás produzido em biodigestores, que exige a separação

prévia dos elementos sólidos não degradáveis, não é afetada. Assim, a reciclagem do lixo é uma alternativa que se compõe muito bem com a geração de energia elétrica a partir da digestão anaeróbica dos resíduos.

Em resumo, pode-se sintetizar as alternativas examinadas para o aproveitamento energético do RSU de Campo Grande como apresentado na Tabela 18.

Tabela 18: Caracterização das alternativas de aproveitamento energético do RSU de Campo Grande

Alternativa	Vida útil anos	Potência MW	Benefício energético GWh/ano
Rota 1			110,2
Incineração	100 (1)	13,0	99,9
Reciclagem (2)	100	...	10,3
Rota 2			274,3
Digestão anaeróbica (DA)	32 (1)	3,4	26,3
Reciclagem (3)	32	...	248,0
Rota 3			226,4
Gás de lixo (GDL)	18	2,5	12,3
Reciclagem (4)	11	...	214,1

(1) admitida a reposição dos investimentos ao final da vida útil dos equipamentos (20 anos)

(2) reciclagem apenas do metal e do vidro contidos no lixo

(3) reciclagem de todo o material reciclável (papel, plástico, metal e vidro) contido no lixo

(4) reciclagem apenas do plástico, do metal e do vidro contidos no lixo.

Feita esta decomposição, é possível calcular o limite de investimento em cada alternativa de geração de energia elétrica além do qual a recuperação econômica demandaria a consideração de subsídios ou outras formas de compensação exógenas ao projeto.

Importa salientar que, para efeito deste cálculo, considera-se somente o benefício energético associado à geração de energia elétrica. Além disso, este cálculo pressupõe, por óbvio, o estabelecimento de parâmetros econômicos cuja definição muitas vezes é cercada de polêmica. Trata-se da taxa de desconto e do custo da energia. Em adição, deve-se estabelecer hipótese quanto à proporção entre os custos de operação e manutenção e o custo de investimento do projeto (a consideração deste aspecto é relevante em face de ser diferente a vida útil de cada alternativa). Neste trabalho, assumiu-se, para efeito de cálculo:

Taxa de desconto. Considerou-se, a exemplo do Plano Nacional de Energia 2030 - PNE 2030 (EPE, 2007), a taxa de 8% ao ano. Essa taxa é “aderente aos cenários macroeconômicos formulados [no PNE 2030], é compatível com uma análise de investimento de longo prazo e conciliável com custo de capital próprio (taxa mínima de atratividade do investidor) na faixa de 11 a 13% ao ano” (p. 217).

Custo de referência da energia. Ainda com base nos estudos do PNE 2030 pode-se demonstrar que o custo de referência para o dimensionamento da expansão da oferta de energia elétrica (apenas projetos de geração) está, entre 2010 e 2030, entre R\$ 90 e R\$ 125 por MWh (preços de 2006), para a taxa de desconto de 8% ao ano. Considerou-se o valor de R\$ 110 por MWh.

Proporção do custo de operação e manutenção e o custo de investimento do projeto.

São poucas as referências disponíveis que permitem estabelecer uma relação entre os custos operacionais e o custo de investimento de projetos de aproveitamento energético de RSU. Uma delas encontra-se em Tolmasquim (2003), que apresenta informações a partir das quais se pode inferir que os custos operacionais (anuais) correspondem a algo entre 3,5 e 5% do custo de investimento (valor presente), sendo as proporções mais elevadas encontradas no caso da digestão anaeróbica e do gás de lixo e a mais baixa no caso da incineração. Em termos numéricos, a proporção 5% significa que, para um custo unitário de investimento de US\$ 100 por kW, que o custo anual de operação e manutenção seria de US\$ 5 por kW.

Em complemento, são ainda relevantes considerações quanto à reposição do investimento inicial e quanto a “vida” do aterro sanitário. Note-se que as vidas úteis de cada alternativa são diferentes entre si assim como cada uma apresenta impactos significativamente diferentes quanto ao volume dos dejetos.

O tratamento a ser dado à questão da reposição do investimento inicial deve permitir tornar economicamente comparáveis as alternativas. Admitiu-se, neste caso, a reposição dos investimentos na usina de geração de energia ao final de períodos de 20 anos, assumido como sendo a duração da vida das instalações e dos equipamentos de geração.

Os critérios sobre como tratar a aquisição de novas áreas de deposição de lixo serão especialmente importante no caso da “Rota 3” (gás de lixo), em que o aterro sanitário tem vida útil consideravelmente menor, de apenas 11 anos no caso de Campo Grande. O terreno talvez não seja o elemento de custo importante. Mesmo que se considere o custo da terra a R\$ 20 mil o hectare, este item de custo não ultrapassaria R\$ 230 mil, considerando as dimensões do aterro de Campo Grande (11,5 ha). É, de fato, um valor sem expressão econômica em quaisquer das alternativas, em que a expectativa de vida do aterro nunca é inferior a 11 anos. Contudo, quando se tem em conta os custos de preparação do terreno (impermeabilização, drenagem, contenção e outras benfeitorias) o panorama se altera. Uma referência recente para tais custos são as obras do aterro sanitário do município de Votorantim, no Estado de São Paulo. Contrato firmado em maio deste ano para as obras de construção de um novo aterro sanitário para a cidade, com 9 ha de área, considerava uma estimativa de custo de R\$ 2,3 milhões (Folha de Votorantim, 2008). Assumindo este custo como referência, um aterro sanitário com as dimensões do de Campo Grande (11,5 ha) pode ser estimado em cerca de R\$ 3 milhões.

Nestas condições, podem ser calculados os valores limites para o investimento associado a cada alternativa de geração de energia elétrica, isto é, o valor além do qual a recuperação econômica demandaria a consideração de subsídios ou outras formas de compensação exógenas ao projeto. Foram obtidos os seguintes valores:

<i>Incineração</i>	<i>R\$ 6.780 por kW</i>
<i>Digestão anaeróbica</i>	<i>R\$ 6.740 por kW</i>
<i>Gás de lixo</i>	<i>R\$ 3.430 por kW</i>

Esse resultado indica, por exemplo, que o limite de investimento que o projeto de incineração do lixo de Campo Grande suporta sem subsídios, à taxa de desconto de 8% ao ano e admitida as reposições de investimento ao longo da vida do aterro, é de R\$ 6.780 por kW. O que exceder a este valor deve ser suportado por outras fontes de recursos exógenas ao projeto. Esse limite será menor para taxas de desconto mais altas e para custos operacionais mais elevados (superiores a 4% do valor do investimento).

Conforme já salientado, no caso da alternativa de gás de lixo o custo de aquisição de novas áreas para o despejo futuro de RSU é muito relevante. O valor calculado será maior na medida em que o custo considerado para a construção de novos aterros for menor. Para se ter uma idéia do impacto deste aspecto nesta alternativa, observe-se que, caso não fosse considerada a aquisição de novas áreas para deposição final do lixo, o valor limite para esta alternativa seria de R\$ 4.330 por kW. Ou seja, no caso, o impacto econômico foi de R\$ 900 por kW.

Os limites aqui calculados podem parecer baixos, e de fato o são, para o montante de investimento requerido para projetos desta natureza. Isso apenas ratifica que o aproveitamento energético do lixo não deve ser considerado como um projeto finalístico, isto é, como um projeto convencional de geração de energia, em que se busca maximizar o retorno econômico e financeiro do investidor. Aqui, o benefício principal é de outra natureza, e está relacionado a questões sócio-ambientais. O aproveitamento energético do lixo deve ser visto apenas como mais um elemento que poderá, sim, contribuir para o enfrentamento de um impacto ambiental importante gerado pela ação do homem. É nessa dimensão que deve ser analisado.

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

11. Bibliografia

- ABAL [Associação Brasileira do Alumínio]. **Reciclagem: Infinitamente Reciclável**. Disponível em <<http://www.abal.org.br/reciclagem/introducao.asp>>. Acesso em maio de 2008.
- ABNT [Associação Brasileiro 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 2007**. Disponível em <http://www.abrelpe.org.br/panorama_2007.php>. Acesso em maio de 2008. São Paulo: ABRELPE, 2007.
- BOGNER, J. M. et alii. **Waste Management**. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- 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.
- CTW [Carbon Trade Watch]. **CERUPT: The Netherlands' CDM Programme**. Draft. Disponível em <<http://www.carbontradewatch.org/pubs/CERUPT.doc>>. Acesso em maio de 2008. [s.l.]: CTW/TNI, 2004.
- 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, 2007. (Disponível em <<http://www.epa.gov>>). Acesso em junho de 2008.
- _____. **Waste Reduction Model**. Washington, DC: EPA, 2007. (Disponível em <<http://www.epa.gov>>). Acesso em dezembro de 2007.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007 (disponível em <<http://www.epe.gov.br>>).

- FOLHA DE VOTORANTIM. **Obras do novo aterro sanitário começam ainda este mês.** In: Folha de Votorantim, Ano 31, n. 3396, ed. de 8 de maio de 2008. Disponível em <<http://www.folhadevotorantim.com.br>>. Acesso em novembro de 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>>. Acesso em maio de 2008.
- IBGE [Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística]. **II Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.** Rio de Janeiro: IBGE, 2000.
- _____. **Contagem da População 2007.** Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/default.shtm>>. Acesso em maio de 2008.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. **Waste Model.** 2006. Disponível em <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/IPCC_Waste_Model.xls>. Acesso em agosto de 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.
- KELLEHER, M. **Anaerobic Digestion Outlook for MSW Streams.** In: *BioCycle*, v. 58, p 51. [local]: [Editor], 2007.
- 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.
- OECD [Organization for Economic and Cooperation Development]. **OECD Key Environmental Indicators.** Bruxelas: OECD, 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.
- OLIVEIRA, S. **Caracterização Física dos Resíduos Sólidos Domésticos (RSD) da Cidade de Botucatu, SP.** In: *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 4, n. 4. São Paulo: ABES, 1999.
- 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].
- POLZIN, D. A. **Gestão dos Resíduos Sólidos urbanos: Análise Comparativa entre Portugal e Brasil.** Dissertação de Mestrado (M.Sc.) em Ciência Ambiental. Niterói: UFF [Universidade Federal Fluminense], 2004.
- 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 Anaerobic Digestion Technology for Treatment of Municipal Solid Waste.** Chiang Mai: Chiang Mai University, 1998.
- 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.
- 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.
- TOLMASQUIM, M.T. et alii. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil.** Rio de Janeiro: Livraria Interciência Editora, 2003.
- VERNA, Shegali. **Anaerobic 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. **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.