



VIA PÚBLICA



ClimateWorks

**ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.  
Incinerador *mass burn*  
e Biodigestor anaeróbio.**

Subsídios técnicos à elaboração dos Planos Locais de Gestão  
dos Resíduos Sólidos.



**N R G**

*Dezembro de 2012*

# **Estudo de alternativas de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos. Incinerador *mass burn* e Biodigestor anaeróbio.**

## **Subsídios técnicos à elaboração dos Planos Locais de Gestão dos Resíduos Sólidos.**

Relatório Final

ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Resumo Executivo</b>  | <b>2</b>  |
| <b>1. Introdução</b>   | <b>7</b>  |
| <b>2. Metodologia</b>  | <b>8</b>  |
| 2.1. Volume de RSU a ser Tratado   | 9         |
| 2.2. Poder Calorífico Inferior (PCI) do RSU  | 9         |
| 2.3. Custos de Investimento  | 9         |
| 2.4. Custos de Operação e Manutenção (O&M)   | 11        |
| 2.5. Taxas Financeiras e Valores Unitários   | 13        |
| <b>3. Avaliação econômica financeira</b>   | <b>14</b> |
| 3.1. Rota Tecnológica A: Baseada em Incineradores <i>Mass Burn</i>                         | 14        |
| 3.1.1. Resumo esquemático da Tecnologia  | 14        |
| 3.1.2. Implicações da Rota A no Gerenciamento do RSU                                       | 15        |
| 3.1.3. Resultados da Análise Econômico – Financeira  | 15        |
| 3.2. Rota Tecnológica B: Baseada em Biodigestores Anaeróbios                               | 16        |
| 3.2.1. Resumo esquemático da Tecnologia  | 17        |
| 3.2.2. Implicações da Rota B no Gerenciamento do RSU                                       | 18        |
| 3.2.3. Parâmetros e Variáveis Adotadas para a Análise Econômico – Financeira               | 18        |
| 3.2.4. Resultados da Análise Econômico – Financeira  | 19        |
| <b>4. Emissões antrópicas de GEE</b>   | <b>19</b> |
| <b>5. Impacto sobre emprego e renda</b>  | <b>22</b> |
| <b>6. Atendimento à legislação federal</b>   | <b>22</b> |
| <b>7. Conclusões</b>   | <b>23</b> |
| <b>8. Bibliografia</b>   | <b>26</b> |
| <br>   |           |
| Anexo 1 - Projeção do volume de RSU para os Cenários do Plano Nacional de Resíduos Sólidos | 28        |
| Anexo 2 – Detalhamento de investimento e custo de operação                                 | 34        |
| Anexo 3 – Relação entre composição gravimétrica do RSU e poder calorífico                  | 37        |
| Anexo 4 – Atendimento à legislação federal   | 39        |

## Resumo Executivo

### **Estudo de alternativas de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos. Incinerador *mass burn* e Biodigestor anaeróbio.**

Subsídios técnicos à elaboração dos Planos Locais de Gestão dos Resíduos Sólidos.

A gestão dos resíduos sólidos urbanos vem passando por transformação nas últimas décadas, com um avanço sensível na abrangência da coleta realizada nos ambientes urbanos. Ultimamente este avanço vem acontecendo na alteração da disposição final dos resíduos, com um progressivo abandono da prática dos lixões, que hoje só acontece na metade dos municípios, notadamente aqueles de menor porte.

Com a edição das recentes políticas nacionais para a gestão dos resíduos sólidos, para o saneamento básico e para o enfrentamento das mudanças climáticas, os avanços terão que ser mais profundos. A mera disposição final dos resíduos em aterros sanitários não é mais suficiente para o cumprimento das exigências legais. Faz-se necessário que – metas sejam traçadas para a redução, reutilização, reciclagem e, quando necessário, o tratamento dos resíduos.

Os gestores públicos, a quem compete o cumprimento do prazo legal para adequação da disposição final, prevista apenas aos rejeitos inaproveitáveis, deverão analisar as rotas tecnológicas disponíveis, das mais simples às mais complexas, e eleger a mais adequada às peculiaridades locais. Os processos de recuperação dos resíduos secos (plásticos, papel, metal, vidro e outros) terão que avançar e para os resíduos úmidos (restos de alimentos, resíduos verdes e outros) haverá a opção da compostagem simples ou acelerada e a biodigestão anaeróbia em diversas variantes. Também está em discussão o uso da incineração, bem como, de outros processos como pirólise, gaseificação e plasma, que ainda carecem de comprovação da viabilidade técnica, econômica e ambiental exigida na legislação.

Os objetivos e diretrizes expressos na legislação federal é que orientam a escolha das soluções técnicas para a gestão dos resíduos sólidos. Os processos técnicos não podem conflitar com as políticas nacionais.

Na Política Nacional de Resíduos Sólidos são claras as exigências para o exercício da responsabilidade compartilhada por todo o ciclo de vida dos materiais, implementação da logística reversa para uma série de produtos, inclusive embalagens, redução da periculosidade dos resíduos e a exigência do respeito à ordem de prioridade dos processos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final.

Na Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) é fundamental a exigência de comprovação da eficiência e viabilidade econômico financeira dos processos que envolvam prestação de serviço público, tema também tratado na legislação nacional de resíduos sólidos.

A Política Nacional sobre Mudanças do Clima explicita a obrigatoriedade de redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), dos quais os resíduos orgânicos são grandes geradores, a necessidade de estimular processos e tecnologias que propiciem maior economia de energia e conduz à necessidade de respeito ao compromisso internacional com a redução de emissões brasileiras.

Há por fim, a necessidade de que a rota tecnológica escolhida permita que os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos, no âmbito da responsabilidade compartilhada, cumpram a incumbência prevista na PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólido) de estabelecer o reaproveitamento de resíduos, o sistema de coleta seletiva e de compostagem.

No rol de alternativas possíveis, este documento expõe o resultado de uma análise comparativa entre duas alternativas de aproveitamento energético de resíduos sólidos: uma rota tecnológica baseada em **incineradores** (incineradores *mass burn* - queimam resíduos na forma como são recebidos, com segregação apenas de vidro e metal, ou com adição de outro combustível fóssil para alcançar poder calorífico adequado) e outra baseada em **digestores anaeróbios** ou **biodigestores** (biodigestores – tratam os resíduos úmidos controlando a presença de bactérias em ambiente fechado). Ele busca fornecer elementos objetivos de decisão para os gestores públicos, responsáveis pela implementação da PNRS e ampliar o conhecimento sobre tecnologias de tratamento de RSU ainda pouco empregadas no país. A análise abrange o desempenho econômico financeiro relativo à implantação e operação, o balanço energético (energia produzida e energia conservada), as emissões de gases de efeito estufa, o impacto sobre empregos e o atendimento aos marcos regulatórios federais.

Estas duas rotas tecnológicas foram analisadas segundo um cenário idealizado (1000 t/dia), compatível com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, incorporando as características médias do resíduo gerado nas cidades brasileiras (51% de resíduos úmidos, 32% de secos e 17% de rejeitos). Entre as características médias deste resíduo está a sua elevada umidade e o pequeno poder calorífico, devido à baixa presença relativa de materiais combustíveis (se na Europa os resíduos têm 60% de secos, no Brasil este percentual é em torno dos 32% citados). Com isto, em processos que se baseiam em combustão dos resíduos, qualquer retirada de resíduo seco (plásticos, papéis e madeira) pode dificultar a queima autossustentada, sem a adição de novo material combustível (óleo, gás ou outro). Diferentemente, os processos baseados na biodigestão necessitam exclusivamente dos resíduos úmidos, para ampliação de sua eficiência.

A análise de viabilidade econômico financeira (conforme a PNSB, Art. 11 II e PNRS, Art. 7º X) de cada uma das duas rotas tecnológicas utilizou procedimentos conhecidos (determinando o Fluxo de Caixa Descontado, a Taxa Interna de Retorno e o Valor Presente Líquido) na forma como se analisa qualquer empreendimento no mercado, nas atuais condições macroeconômicas brasileiras.

A análise na rota baseada em incinerador *mass burn* considerou o investimento de US\$ 200 mil por tonelada diária processada (o patamar mínimo dos maiores fabricantes é em torno de 1000 t/dia) e custo operacional na ordem de R\$ 100 por tonelada recebida. A rota considerando a biodigestão considerou investimento de US\$ 145 mil por tonelada diária processada (não há patamar mínimo para esta tecnologia) e custo operacional na ordem de R\$ 70 por tonelada de orgânicos processada.

Em ambas considerou-se a venda da eletricidade produzida ao preço atual de mercado (R\$ 140 por kWh em “ambiente de contratação livre”), a cobrança da recepção dos resíduos em R\$ 80 por tonelada, o custo do aterramento dos rejeitos em R\$ 80 por tonelada no caso de Aterro Sanitário e R\$ 380 no caso de Aterro Especial Classe I, para resíduos perigosos, todos estes últimos sendo valores praticados na região metropolitana de São Paulo.

A análise na rota baseada em incinerador *mass burn* demonstra que há dificuldade de viabilizar empreendimentos sem algum tipo de alteração nos parâmetros adotados. Em uma análise para 20 anos a Taxa Interna de Retorno (TIR) mostrou-se negativa em 8%, e o Valor Presente Líquido (VPL) acusou prejuízo de R\$ 220 milhões ao final do período. Mantidas as condições de investimento, de custo operacional e da receita oriunda da venda de energia no mercado, a viabilidade mínima do empreendimento pode ser alcançada com alteração da receita oriunda do valor cobrado pela recepção dos RSU (*gate fee*) para R\$ 244 por tonelada.

A mesma verificação aplicada à rota baseada em biodigestor anaeróbio revelou resultados diferenciados. A Taxa Interna de Retorno mostrou-se positiva em 12% e o Valor Presente Líquido revelou saldo de R\$ 12,8 milhões ao final do período. Estes resultados mostram ser possível planejar os avanços no gerenciamento dos resíduos exigidos pelas políticas nacionais, com custos de destinação semelhantes ou pouco superiores aos atualmente praticados em municípios de maior porte.

Tanto para uma rota como para a outra, os resultados podem ser alterados para melhor, com a inclusão da comercialização de novos produtos como a venda de vapor, aplicável tanto para a incineração como a biodigestão, ou a venda de composto orgânico e outros materiais, neste caso apenas para o caso da rota com biodigestão anaeróbia.

A análise das duas rotas tecnológicas quanto às emissões de gases de efeito estufa foi feita a partir de trabalho desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) vinculada ao Ministério das Minas e Energia. Esta análise é importante por ser muito significativa a geração de gás metano (CH<sub>4</sub>), um dos Gases de Efeito Estufa (GEE), pelos resíduos úmidos confinados nos aterros. A metodologia para esta análise é a estabelecida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC/ONU) onde a linha de comparação é determinada pelo nível de emissão resultante da disposição dos resíduos em aterros sanitários convencionais. O compromisso internacional dos diversos países, inclusive o Brasil (Lei 12.187/2009), é com a mudança de rotas para a redução destas emissões prejudiciais ao clima. No tocante à gestão dos resíduos isto implica que as novas rotas tecnológicas adotadas para o cumprimento da legislação deverão reduzir as emissões de GEE (conforme a PNMC, Art. 4º, inciso II, Art. 6º, inciso XII, Art.12).

Os resultados para as duas rotas tecnológicas são distintos, em decorrência das próprias características técnicas dos dois processos em que são baseadas.

**Quadro 1 – Comparação entre Rotas Tecnológicas em relação à emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE)**

| Rota Tecnológica  | Redução de emissões por tonelada de RSU tratada (t CO <sub>2</sub> eq) | Emissões evitadas pela reciclagem e geração térmica substituída (t CO <sub>2</sub> eq) | Materiais recuperados              | Total (t CO <sub>2</sub> eq evitada/t RSU) |
|---|--|--|------------------------------------|--|
| <b>Rota A</b> – baseada em incinerador <i>mass burn</i> | 0,209  | 0,034  | vidros e metais                    | 0,243                                      |
| <b>Rota B</b> – baseada em biodigestor anaeróbio        | 1,064  | 0,084  | papéis, plásticos, vidros e metais | 1,148                                      |

Fonte: EPE, 2008.

Ressalta-se que estas rotas permitem a redução de emissões em processos que duram horas ou dias, diferentemente da emissão que acontece em aterros, que pode se estender por até 50 anos.

Em relação à análise do balanço energético e à exigência legal de que as rotas tecnológicas estimulem uma maior economia de energia (conforme a PNMC, Art. 6º, inciso XII, Dec. nº 7217, Art. 3º, inciso V), os resultados não podem ser apenas os obtidos nas instalações de incineração e biodigestão. Devem ser considerados os quantitativos de energia envolvidos nas várias cadeias de atividades econômicas (coletores, triadores, aparistas, recicladores e agentes coligados) inerentes aos diversos componentes do RSU - o balanço de energias deve considerar a energia produzida e a energia conservada em cada uma das rotas tecnológicas.

Os resultados, produzidos em estudo da Empresa de Pesquisa Energética vinculada ao Ministério de Minas e Energia, são também distintos entre as duas rotas, refletindo a forma como tratam os resíduos.

**Quadro 2 – Comparação entre Rotas Tecnológicas em relação ao Balanço Energético**

| Rota Tecnológica  | Produção de energia (GWh/ano) | Conservação de energia pela reciclagem (GWh/ano) | Materiais recuperados              | Benefício energético (GWh/ano) |
|---|-------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Rota A</b> – baseada em incinerador <i>mass burn</i> | 100,2                         | 10,3   | vidros e metais                    | 110,2                          |
| <b>Rota B</b> – baseada em biodigestor anaeróbio        | 26,2                          | 248,0  | papéis, plásticos, vidros e metais | 274,3                          |

Fonte: EPE, 2008.

Estes resultados justificam, tal como adotada em países avançados e presente na lei brasileira, a correção da ordem de prioridade a ser seguida no gerenciamento dos resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos. Além das análises já apresentadas, incumbe aos gestores responsáveis pelo desenvolvimento dos planos locais de gestão dos resíduos sólidos a análise dos resultados em relação à geração de trabalho e renda, e a análise do comportamento das rotas tecnológicas perante as diretrizes das políticas nacionais.

Das características diferenciadas de cada um destes processos tecnológicos decorre o comportamento perante aspectos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Federal de Saneamento Básico e Política Nacional sobre Mudança do Clima.

Esta análise mostra que a rota tecnológica baseada na biodigestão anaeróbia responde positivamente a mais aspectos definidos pela legislação nacional. Deve ser observado, conforme as referências indicadas:

- O valor cobrado na recepção dos rejeitos (Gate Fee) é menor na biodigestão;

- A incineração *mass burn* gera resíduos perigosos que terão como destino Aterros Especiais Classe I ofertados em pequeno número no território nacional (PNRS, Art. 7º, inciso V);
- A digestão anaeróbia estabiliza os resíduos tratados, reduzindo seu volume que, mesmo se não valorizados como composto orgânico terão como destino Aterros Sanitários comuns (PNRS, Art. 7º, inciso V);
- Pelas características dos RSU brasileiros a incineração depende da queima do resíduo sem separação, para manutenção do PCI, ou da adição de combustíveis fósseis. Na primeira hipótese perde-se o potencial de reciclagem e logística reversa, conforme estabelecido pela PNRS. Já a adição de combustíveis fósseis implica em aumento dos custos operacionais e das emissões de GEE (PNRS, Art. 30) e (PNRS, Art. 33, inciso I a e VI, §1º);
- O número de empregos gerados nas atividades preservadas na rota baseada na digestão anaeróbia é superior aos empregos gerados na rota com Incineração (PNRS, Art. 6º, inciso VIII, Art. 36 §1º);

Neste contexto, o presente estudo comparativo demonstra que a rota tecnológica baseada no biodigestor anaeróbio atende a mais aspectos definidos pela legislação nacional, além de apresentar mais vantagens competitivas do ponto de vista econômico-financeiro (custo de investimento), social (geração de empregos) e ambiental (emissões reduzidas/evitadas e conservação de energia).

Deve haver, por final, a preocupação com o fato de que as características e o alto custo de ambos os empreendimentos induzem um modelo de negócios de longo prazo, com contratos próprios de financiamento ou contratos de concessão que se estenderão por várias décadas, nas quais o setor público precisará garantir ou a alimentação contínua com resíduos de maior poder combustível, ou uma intensa coleta seletiva prévia dos resíduos secos. Nestas condições estarão sendo definidas as formas como serão implementadas as políticas nacionais de referência.

## 1. Introdução

Este relatório expõe o resultado de uma análise comparativa entre duas rotas tecnológicas de tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Uma baseada em incineradores *mass burn* e outra em digestores anaeróbios. A análise abrange o desempenho econômico financeiro relativo à implantação e operação, balanço energético e emissões de gases de efeito estufa e impacto sobre empregos.

O trabalho busca fornecer elementos objetivos de decisão para os gestores públicos, responsáveis pela implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), e ampliar o conhecimento sobre tecnologias de tratamento de RSU ainda pouco empregadas no país. Desde a vigência da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Federal nº 12.305/ 2010, regulamentada pelo Decreto nº 7.404, do mesmo ano, os municípios brasileiros têm prazos legalmente definidos para apresentar, aprovar e implementar seus Planos Municipais de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, que devem equacionar e definir, em curto e médio prazo, um sistema integrado de coleta, manejo, tratamento e disposição final do RSU.

A etapa da coleta regular de RSU<sup>1</sup> foi foco de investimentos nas últimas décadas, alcançando uma taxa de cobertura de quase 87% do total de domicílios urbanos (IBGE, Censo 2010). Totaliza no país um montante superior a 180 mil toneladas de RSU ao dia<sup>2</sup>, que tende a aumentar com a melhoria dos serviços de coleta, e em taxas mais elevadas do que o incremento populacional, em função da elevação do nível de consumo nas cidades, e da atividade econômica, ao mesmo tempo em que surgem novos tipos de resíduos decorrentes dos avanços tecnológicos.

A gestão dos resíduos sólidos urbanos com a responsabilidade compartilhada entre setor público e privado tornou-se, portanto, uma das mais desafiadoras atividades do cenário urbano. A escolha fundamental no momento atual é a do tratamento e destino a ser dado aos resíduos sólidos urbanos, uma vez que estas etapas tendem a ocupar parte relevante dos recursos alocados para todo plano e, também, por representar o RSU, no conjunto dos resíduos, a parcela sob responsabilidade do poder público municipal.

O que se verifica no presente é que parte significativa da coleta diária é disposta, ainda, de forma indiferenciada. Metade dos municípios destina os resíduos para lixões, sem algum tratamento. Parte significativa dos resíduos secos, do que hoje é disposto em lixões ou em aterros sanitários, poderia ser reaproveitada – pela reutilização ou reciclagem – economizando recursos naturais e econômicos ao serem reintroduzidos no ciclo produtivo. Destes, apenas uma parcela muito pequena, menos de 2%, é reciclada<sup>3</sup>, indicando um

---

<sup>1</sup> A Lei 12.305 define os resíduos sólidos urbanos como os de origem em domicílios e ambientes assemelhados, e nas atividades de limpeza urbana.

<sup>2</sup> Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Versão Preliminar para Consulta Pública); Setembro de 2011.

<sup>3</sup> “Tanto na PNSB 2000 quanto na PNSB 2008 observa-se que, mais de 90%, em massa, dos resíduos são destinados para a disposição final em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, sendo (em 2008) os 10% restantes distribuídos entre unidades de compostagem (0,8%), unidades de triagem e reciclagem (1,4%), unidades de incineração (0,1%), vazadouros em áreas alagadas (0,1%) e outros destinos”. Brasil. Ministério do Meio Ambiente, op. cit. P. 31 e Tabela 6.

grande potencial a ser economicamente explorado e que geraria grandes benefícios ambientais.

Já a parte orgânica dos RSU (51,4%)<sup>4</sup> – cerca de 92mil toneladas ao dia – não encontra outro destino a não ser a disposição em solo, com exceção de algumas experiências de compostagem em pequena escala. Requer, portanto, especial atenção nos planos de gestão para o cumprimento de metas de redução na disposição final propostas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos para o país. Além do encerramento dos lixões, a mera disposição final dos resíduos em aterros sanitários não é suficiente para o cumprimento das exigências legais. Os gestores públicos deverão analisar as rotas tecnológicas disponíveis, das mais simples às mais complexas e eleger a mais adequada às peculiaridades locais. Este é o fator determinante da realização deste estudo, que pretende analisar as tecnologias disponíveis para o processamento da parcela orgânica produzida em grande escala.

Do ponto de vista ambiental os resíduos sólidos são atualmente, um dos principais problemas gerados nas cidades, onde são responsáveis pela segunda maior fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE) atrás apenas das emissões geradas pelo setor de transportes. O Brasil é signatário de acordos internacionais com metas de redução de GEE instituídas pela Política Nacional sobre Mudanças do Clima desde 2009. Este estudo mostra que a escolha da rota tecnológica pode representar reduções significativas na emissão de GEE. Além disso, a reciclagem de materiais presentes no RSU reduz significativamente a extração de matérias primas, reduzindo a pressão sobre os recursos naturais e o consumo da energia necessária à sua extração e processamento.

## 2. Metodologia

As duas rotas tecnológicas de tratamento do RSU – baseadas em incinerador *mass burn* e digestor anaeróbio – foram analisadas segundo um cenário idealizado, compatível com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Analisaram-se a performance econômico-financeira, as contribuições para a redução das emissões de GEE e o aumento da eficiência energética, os empregos diretos gerados e a conformidade às exigências legais. As rotas tecnológicas foram tratadas como conjugações de tecnologias, com processos que deverão ser aplicados anteriormente e posteriormente à incineração ou biodigestão, da recuperação prévia de materiais à disposição final de rejeitos.

A performance econômica financeira foi obtida para dois empreendimentos idealizados para atender a oferta de 1.000 (um mil) toneladas diárias de RSU, cada qual baseado em uma das tecnologias analisadas. Os empreendimentos foram avaliados por meio do cálculo de seu Fluxo de Caixa Descontado, segundo taxas de desconto de 8% ao ano, para 20 anos de operação<sup>5</sup>.

Para fins dessa análise, o ano zero consolida todo investimento. A rigor, os prazos para a implantação dos empreendimentos baseados em incineradores e biodigestores podem diferir de vários anos, dependendo do ambiente regulatório, da disponibilidade e das

---

<sup>4</sup> Brasil. Ministério do Meio Ambiente, 2011, idem. Tabela1

<sup>5</sup> Resultado do Fluxo de Caixa para 30 anos de operação não mostra diferença significativa o resultado obtido para 20 anos.

características das áreas para instalações de tratamento de RSU, da disponibilidade de recursos no sistema financeiro para empreendimentos desse segmento e outros fatores locais, como a saturação das bacias aéreas para determinados poluentes (por exemplo NOx, presente em todos os processos térmicos) ou restrições ao lançamento de efluentes líquidos e sólidos. Nesse estudo considerou-se que os prazos de implantação para os empreendimentos – incinerador *mass burn* e digestor anaeróbio – são os mesmos.

Os valores de investimento e de operação e manutenção foram obtidos a partir de orçamentos fornecidos por empresa de projeto e construção, no caso da rota baseada em biodigestão, ou de projetos similares e literatura com validação por consultores internacionais, no caso da rota baseada em incineração.

Os resultados dessa análise estão expostos nos itens 3.1.4 e 3.2.4 deste estudo.

## 2.1. Volume de RSU a ser tratado

Para este estudo, definiu-se como padrão o tratamento de 1.000 toneladas/dia de RSU, adequado à situação de máximo rendimento em operação de um incinerador *mass burn* sem adição de material combustível. Por essa razão, para ambas as rotas tecnológicas considerou-se a necessidade de tratamento de um volume total de 1.000 toneladas diárias de RSU<sup>6</sup> que, na composição gravimétrica brasileira média atual<sup>7</sup> significa estimativamente 510 toneladas diárias de parcela úmida, 320 toneladas diárias de parcela seca e 170 toneladas diárias de rejeitos.

## 2.2. Poder Calorífico Inferior (PCI) do RSU

A composição gravimétrica atual do RSU brasileiro, somada à perspectiva de aumento da reciclagem dos seus componentes, impõe cautela ao planejamento do seu uso como combustível em processos *mass burn*. Resumidamente, a composição gravimétrica adotada nesse estudo resulta em um RSU com PCI de 1.980 kcal/kg conforme detalhado no Anexo 2.

Uma redução de 27% na presença dos plásticos do RSU é suficiente para trazer o seu PCI ao patamar de 1.680 kcal/kg, considerado limite inferior para a queima auto-sustentada em incineradores *mass burn*.

## 2.3. Custos de Investimento

### **Incineradores *mass burn***

Existem várias tecnologias de incineração em desenvolvimento e destinadas ao tratamento, por via térmica, de resíduos sólidos: incinerador de leito fixo, leito fluidizado, pirolítico,

---

<sup>6</sup> Capacidade apontada por fabricantes europeus como patamar inferior para a viabilização da operação de incinerador *mass burn* com resultados financeiros positivos. Como pode ser visto no Anexo 2, essa capacidade média responde por um intervalo de 850 toneladas diárias a 1.150 toneladas diárias de RSU.

<sup>7</sup> Proporções da composição gravimétrica para o Brasil em 2008. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Op.cit.

tambor rotativo, entre outros. De todas elas, a que conta com a maior experiência de aplicação e está disponível comercialmente no Brasil e em outras partes do mundo, é o denominado *mass burn*, que foi objeto deste estudo.

Os custos de investimento em um incinerador *mass burn* foram retirados de valores declarados em projetos de tratamento de RSU para municípios brasileiros<sup>8</sup>. Esses valores foram submetidos a especialistas em tecnologia de tratamento de RSU<sup>9</sup>.

Alguns empreendimentos com incinerador *mass burn* têm sido projetados para a exportação de vapor, ao invés de eletricidade. Nesses projetos há a eliminação ou redução dos investimentos na turbina a vapor, no gerador, na cabine de força, na subestação e nas linhas de sub-transmissão de eletricidade. Por outro lado, há investimentos em linhas de vapor, com retorno de condensado dependendo das distâncias envolvidas e aumento dos custos operacionais com a captação e tratamento de água. Como resultado dessa mudança de configuração do sistema energético do incinerador, pode-se chegar a uma redução de até 30% no valor do investimento total<sup>10</sup>. Nesses casos, o empreendimento comporta-se não como um produtor independente ou autoprodutor de eletricidade, mas, mais adequadamente, como uma extensão (casa de caldeira) do consumidor de vapor, alimentado por RSU. Não se considerou esse desenho de empreendimento neste estudo.

Outra observação importante diz respeito à composição desse custo de investimento: até 65% do investimento ocorre a jusante da queima do gás na câmara de combustão, para um incinerador projetado para atender os padrões da União Européia, similares aos vigentes no Estado de São Paulo no tocante aos teores de dioxinas e furanos nas emissões aéreas do incinerador. O sistema de catálise do NO<sub>x</sub>, lavagem dos gases, retirada dos particulados leves (*flyash*) em filtros manga – que concentram a quase totalidade dos Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) – e o precipitador eletrostático são os responsáveis por esse custo.

Além do custo de capital, há que se considerar também o custo operacional acarretado pelos componentes antipoluição.

### **Digestores Anaeróbios**

Os digestores anaeróbios em disponibilidade no mercado mundial apresentam ampla variedade em termos de projeto (cilíndricos, retangulares), de regime de operação (contínuos ou de batelada), de temperatura de processo (mesofílico ou termofílico), de grau de umidade (via úmida ou via seca), entre outros parâmetros.

Todos eles, entretanto, têm em comum o fato de que seu produto é sempre um biogás composto por Dióxido de Carbono (33% a 42%) e Metano (55% a 65%), além de substâncias traço. O digerido apresenta composição apropriada para uso em agricultura, seja como

---

<sup>8</sup> FEAM. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientações para governos municipais de minas gerais, 2012; Banco Mundial. Municipal Solid Waste Incineration, WORLD BANK Technical Guidance Report, Washington DC, 1999.

<sup>9</sup> Entre eles, o Dr. Georg Ringhofer, da Ivenio GmbH ([www.ivenio.com](http://www.ivenio.com))

<sup>10</sup> Banco Mundial. Decision Makers' Guide to Municipal Solid Waste Incineration, Washington DC, 1999.

composto, seja como fertilizante<sup>11</sup>, dada a presença de altos teores de Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK). Tradicionalmente, as receitas com a digestão anaeróbia nos países da União Européia incluem a venda do digerido, após cura em ambiente aberto (coberto ou não), para uso agrícola. Nesse estudo optou-se por não considerar essa receita pela falta de referência de mercado que possa apoiar a adoção de um preço unitário para esse produto.

O orçamento para um equipamento do porte definido no Item 2.1, valor médio de US\$ 60.000 por tonelada nominal de RSU tratado, foi obtido junto ao Prof. David Stafford, sócio proprietário da empresa ECL Enviro – Control Ltd, baseada no Reino Unido, reconhecido como uma das principais referências em sistemas de tratamento biológico de resíduos de todas as origens. O Prof. Stafford dimensionou o sistema de forma a otimizar a produção de eletricidade a partir da parcela orgânica do RSU brasileiro (51,4%), observando que o alto grau de umidade, juntamente com a alta temperatura ambiente, conferem alta eficiência à biodigestão.

Para fins de uma análise conservadora, o sistema de digestão anaeróbia proposto opera a temperatura mesofílica (ótimo entre 36°C a 40°C), em sistema contínuo e por via úmida, com pouca ou nenhuma adição de água, dado o alto grau de umidade do RSU brasileiro.

O equipamento para digestão anaeróbia, complementado por uma pequena central de geração de eletricidade, teve ainda adicionado um sistema de remoção de recicláveis secos na recepção do RSU. Esse complemento atende a duas razões. A primeira é que a digestão anaeróbia ocorre nos materiais degradáveis. Assim, a inserção de plásticos, metais, vidros, papel e papelão no biodigestor, apenas reduz espaço produtivo no seu interior, diminuindo a produção de biogás por volume processado. A segunda e principal razão é que a separação dos recicláveis secos é um dos pilares de sustentação da PNRS, pelos múltiplos benefícios que acarreta para ciclos econômicos na sociedade local, para a economia nacional pelo aumento da eficiência energética, para o meio ambiente local pela redução da extração de matérias primas e para o planeta pela redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

## 2.4. Custos de Operação e Manutenção (O&M)

### **Incinerador *mass burn***

Na ausência de incineradores em operação no Brasil os custos de O&M foram calculados a partir dos dados primários de recursos humanos, serviços de terceiros, materiais de consumo e insumos utilizados e consumidos por plantas de incineração de porte semelhante na União Européia. Os custos de mão de obra foram calculados a partir de valores médios locais (São Paulo) para as qualificações exigidas, praticados em empresas concessionárias de geração de eletricidade.

Os custos de manutenção foram calculados em dois grupos. Um primeiro, a partir de dados fornecidos pelos fabricantes de equipamentos e confrontados aos verificados em instalações termoelétricas, dado o fato de que os maiores custos de manutenção ocorrem

---

<sup>11</sup> Manual de Biodigestão – Winrock International -  
[http://www.neppa.uneb.br/textos/publicacoes/manuais/manual\\_biodigestor\\_winrock.pdf](http://www.neppa.uneb.br/textos/publicacoes/manuais/manual_biodigestor_winrock.pdf)

no sistema de geração de energia (vapor e eletricidade) e de tratamento antipoluição dos gases de exaustão<sup>12</sup>.

Em um segundo grupo, os custos de reinvestimento (*overhauling*) do equipamento foram alocados em uma distribuição linear ao longo de 20 anos de operação. O principal desses custos ocorre com as grades móveis<sup>13</sup> do *mass burn* que, por trabalharem em um ambiente extremamente hostil e corrosivo, têm de ser removidas e substituídas a cada 5 anos de operação contínua. Uma alternativa a essa alocação nos custos de manutenção é considerar essa substituição como um novo investimento, com implicações contábeis na análise do fluxo de caixa do empreendimento. Por razões de simplicidade optou-se por incluir esse custo entre os itens de manutenção do equipamento.

Entre os custos operacionais, diferentemente dos projetos de incinerador *mass burn* que têm sido apresentados em municípios<sup>14</sup> brasileiros, foi considerado o custo operacional acarretado pelos componentes antipoluição<sup>15</sup>. Enquanto nos equipamentos antigos a maior parte dos particulados leves (*flyash*) eram dispersados pelo meio ambiente através da pluma da chaminé, nos equipamentos mais recentes observa-se que, em média, 10%<sup>16</sup> da massa entrante no incinerador é convertida em material contaminado com POPs, poluentes orgânicos persistentes, o que obriga a sua disposição final em Aterros Especiais Classe I<sup>17</sup>.

Além desses rejeitos contaminados por POPs, há as cinzas da fornalha do incinerador cuja composição inclui metais pesados e inertes de diferentes origens. Essas cinzas totalizam em torno de 15% do RSU em peso, podendo ser dispostas – se manipuladas corretamente – em aterros sanitários classe IIA ou na produção de sub base asfáltica, caso estas alternativas de destinação sejam aceitas pelos órgãos ambientais responsáveis em cada local de implantação.

Não foram considerados os custos de transporte destes resíduos à disposição final.

---

<sup>12</sup> Os poluentes da queima de RSU apresentam o agravante de maior proporção de POPs, comparados aos oriundos da queima de combustíveis fósseis tradicionais.

<sup>13</sup> A queima do RSU nesses incineradores ocorre sobre uma plataforma móvel, que empurra o RSU em direção ao interior do equipamento e cuja função é múltipla: homogeneiza tanto quanto possível o material combustível, aumenta o contato dos seus componentes com a atmosfera da câmara de combustão, permite a troca de calor do material em combustão com o material entrante.

<sup>14</sup> No Estado de São Paulo, os municípios de Barueri, Mauá, São Bernardo do Campo e Osasco, entre outros, têm projetos de incineradores *mass burn* em algum estágio de implementação.

<sup>15</sup> Os custos de investimento e O&M adotados aqui para o incinerador correspondem aos limites de emissão de poluentes aéreos vigentes no Estado de São Paulo, que são mais rígidos que os vigentes para o restante do país definidos na Resolução Conama 316/2002, particularmente para os teores de Dioxinas e Furanos. Isso significa, na prática, um custo de investimento da ordem de 25% a 30% maior no Estado de São Paulo comparado com os demais Estados brasileiros.

<sup>16</sup> Essa fração inclui materiais adicionais ao RSU que são usados para conter o material poluente (filtros mangas contaminados e seus recipientes) ou que entram em contato com ele no processo fabril – máscaras, uniformes, botas etc

<sup>17</sup> Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE – existem 16 Aterros Classe I licenciados no Brasil, situados, na quase totalidade, na faixa territorial mais próxima ao litoral brasileiro. São 3 no estado Rio Grande do Sul, 4 em Santa Catarina, 1 no Paraná, 3 em São Paulo, 1 no Rio de Janeiro, 1 em Minas Gerais, 2 no Espírito Santo e 1 em Alagoas.

## Digestor Anaeróbio

Os custos de operação do digestor anaeróbio foram calculados a partir do quadro de recursos humanos necessário, dos materiais de consumo e insumos observados em instalações semelhantes na União Européia. Na medida em que foi desprezada neste estudo a possibilidade de uso do composto produzido na digestão, foram considerados os custos da disposição final em aterros sanitários classe IIA, de 40% dos resíduos levados ao digestor (20,5% do total, em peso), agregados aos rejeitos presentes no RSU original. Tal como para os incineradores, não foram considerados os custos de transporte destes resíduos à disposição final.

Os custos de manutenção do equipamento foram amplamente dominados pelos equipamentos de geração elétrica<sup>18</sup>, uma vez que os digestores são construções relativamente simples com equipamentos periféricos baratos e disponíveis “em prateleira” no mercado brasileiro e internacional.

## 2.5. Taxas Financeiras e Valores Unitários

A análise de fluxo de caixa de empreendimentos baseados nas Rotas Tecnológicas A e B, foi feita com a adoção de taxas financeiras e valores unitários compatíveis com o ambiente macroeconômico do país. Os principais desses valores:

- Taxa de Desconto: o valor de referência adotado foi de 8% a.a. Análise de sensibilidade foi feita para taxas de 10% a.a. e 12% a.a. Os resultados mostraram que o valor referencial adotado é representativo para os diferentes cenários.
- Taxa de Alavancagem: adotou-se um modelo em que 30% do investimento é feito com capital próprio.
- O financiamento foi calculado para as taxas do BNDES, bem como seus prazos e carências, sem incluir *spreads* de eventuais agentes operacionais. Também não foram considerados os custos financeiros com os empréstimos ponte, ou de capital de giro, comuns em empreendimentos dessa escala.
- A receita com a comercialização da energia elétrica foi calculada para o ambiente de contratação livre (ACL), justificada esta opção por se tratar de instalação de pequeno porte – em torno de 25 MW instalados – e operando próxima a centros de carga.
- A receita com o tratamento do RSU advinda do valor cobrado na recepção do rejeito (*Gate fee* ou *Tipping fee*) a ser pago pelos municípios gestores desse material, foi buscada no topo da distribuição desses valores conforme praticado nas principais regiões metropolitanas do Brasil. O valor de R\$ 80 por tonelada, embora bastante alto se comparado à média brasileira (entre R\$ 54 e R\$ 33 por tonelada, MMA 2011) é praticado em aterros sanitários da Região Metropolitana de São Paulo<sup>19</sup>.

---

<sup>18</sup> A geração elétrica, nesse caso, ocorre em motores a gás cujos preços foram obtidos junto à MWM, subsidiária da Caterpillar.

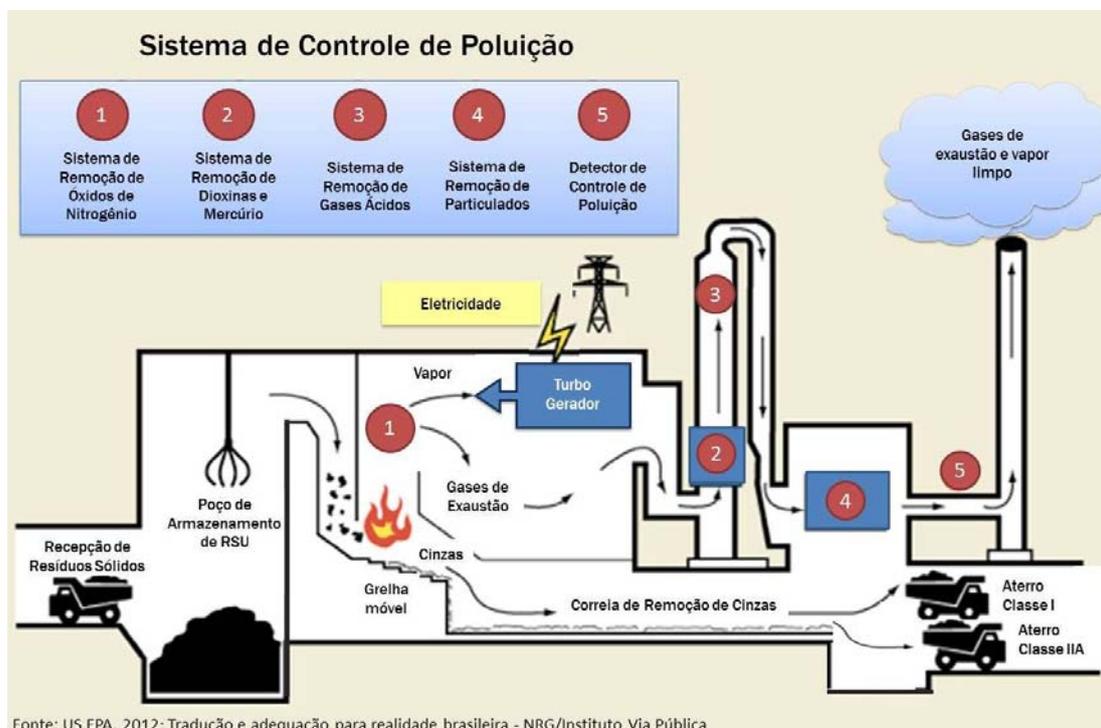
<sup>19</sup> Os custos típicos para a disposição de resíduos classe I e classe IIA na Região Metropolitana de São Paulo são, respectivamente R\$ 380 e R\$ 80 por tonelada, desconsiderados os custos de transporte.

### 3. Avaliação econômica financeira

#### 3.1. Rota Tecnológica A: baseada em incineradores *mass burn*

Este item expõe os resultados obtidos com a análise do Fluxo de Caixa Descontado de um empreendimento virtual baseado em incinerador *mass burn*, com capacidade nominal de 1.000 (um mil) toneladas diárias de RSU.

##### 3.1.1. Resumo Esquemático da tecnologia



A figura anterior representa um desenho típico de incinerador *mass burn*. A câmara de combustão é a parte mais antiga da tecnologia mais antiga, cujas características construtivas não mudaram significativamente nos últimos trinta anos. Um detalhe que diferencia os fabricantes é a grade móvel (próxima ao termo “cinzas” na figura) onde ocorre a combustão.

A figura ressalta, propositalmente, o sistema de controle da poluição atmosférica que, nos últimos trinta anos foi o que mais avançou, com o advento, inclusive, de novas tecnologias para a retenção das partículas poluentes. Os poluentes orgânicos persistentes (POPs), dos quais se destacam as dioxinas e furanos, viajam a grandes distâncias quando eliminadas pela chaminé, por aderirem facilmente a partículas de pequeno diâmetro<sup>20</sup> por

<sup>20</sup> A esse propósito ver “ONU. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. PNUMA, 2005 in [http://www.pops.int/documents/guidance/toolkit/sp/Toolkit\\_2005es.pdf](http://www.pops.int/documents/guidance/toolkit/sp/Toolkit_2005es.pdf)

adstringência. Como já foi ressaltado no item 2.3, até dois terços do custo de investimento no incinerador estão nesse sistema de controle da poluição atmosférica.

### 3.1.2. Parâmetros e Variáveis Adotadas para a Análise Econômico Financeira

O RSU *in natura* brasileiro apresenta, nas condições atuais anteriores à implantação da PNRS, um poder calorífico (PCI) aceitável para ser usado como combustível em incineradores *mass burn*. Entretanto, como mostrado no Anexo 3, o cálculo desse PCI é altamente dependente da contribuição dos plásticos e dos deferentes tipos de papel: 57% e 22% do PCI total, respectivamente. Isto significa que a remoção de materiais recicláveis de RSU, nas proporções preconizadas na PNRS, dificultará o seu uso como combustível em incineradores *mass burn*, tornando provável o uso de combustíveis fósseis (como gás natural ou GLP) para assegurar a manutenção da queima do RSU. Essa eventual queima não foi considerada neste estudo e implica, obviamente, em aumento dos custos operacionais, além de afetar as emissões de gases de efeito estufa.

A tabela a seguir resume os valores adotados para a análise econômico financeira do incinerador *mass burn*.

**Tabela 1 – Parâmetros para análise econômico financeira do incinerador *mass burn***

| Item  | Unidade     | Valor                  |
|---|-------------|------------------------|
| Volume diário processado                                      | t/dia       | 1.000                  |
| Dias de operação por ano                                      | dia/ano     | 330                    |
| Poder Calorífico Inferior (PCI)                               | kCal/kg     | 1.980                  |
| Geração de Eletricidade                                       | MWh/t       | 0,5                    |
| Investimento Total  | R\$ milhões | 400                    |
| Custo de O&M  | R\$/t       | 100                    |
| Valor Cobrado na Recepção do RSU ( <i>Gate fee</i> )          | R\$/t       | 80                     |
| Preço de Venda da Eletricidade                                | R\$/MWh     | 140                    |
| Taxa de Desconto  | % a.a.      | 8                      |
| Taxa de Alavancagem   | %           | 30/70                  |
| Condições de financiamento (Taxa de juros, carências, prazos) | Referência  | BNDES - Infraestrutura |

### 3.1.3. Resultados da Análise Econômico - Financeira

A projeção dos resultados anuais em Fluxo de Caixa de 20 anos, segundo os parâmetros anteriormente expostos, levou ao seguinte resultado:

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| Taxa Interna de Retorno (TIR) | Abaixo de 8% negativos    |
| Valor Presente Líquido (VPL)  | R\$ 220 milhões negativos |

Na medida em que esses resultados implicam em um prejuízo acumulado de R\$ 220 milhões ao final de 20 anos de operação, calcularam-se quais valores de receita ou redução de investimento produziram um resultado líquido NULO ao final de 20 anos. Nessa situação,

correspondente ao ponto de equilíbrio, a Taxa Interna de Retorno (TIR) iguala-se à Taxa de Desconto (TD) e o Valor Presente Líquido (VPL) é zero.

| Parâmetros para Obtenção do Ponto de Equilíbrio ( VPL igual a zero) |                |
|---|----------------|
| Investimento máximo   | R\$ 60 milhões |
| ou Venda de energia elétrica  | R\$ 485 / MWh  |
| ou Valor Cobrado na Recepção do RSU ( <i>Gate fee</i> )             | R\$ 244 / t    |

Assim, o ponto de equilíbrio dessa tecnologia para as condições do RSU brasileiro implicaria em um valor cobrado na recepção do RSU (*gate fee*) de R\$ 244 por tonelada. Tal valor, apesar de elevado para os padrões brasileiros, corresponde ao valor médio praticado na Europa<sup>21</sup>. O preço da energia elétrica que tornaria viável a operação do incinerador é inviável por ser muito superior ao preço praticado no mercado<sup>22</sup>. O investimento total para a viabilização do incinerador poderá ser parcialmente reduzido caso se utilize menor rigor no controle de poluentes e ou com o desenho já exposto para uso de vapor. No entanto, mesmo essas reduções por si só não seriam suficientes, isoladamente, para atingir o ponto de equilíbrio.

Uma observação adicional precisa ser feita sobre o fator de escala desse tipo de equipamento. Nos países de origem de seu desenvolvimento – Europa, Japão – a crescente indisponibilidade de áreas para aterros sanitários e os altos custos da eletricidade criaram as condições favoráveis para sua instalação e operação, de tal forma que a partir de 1.000 toneladas diárias há resultados econômico-financeiros positivos. No Brasil, essa escala não é suficiente para produzir resultados positivos e, tampouco, há indicações de que o simples aumento no tamanho do equipamento seja suficiente para produzir tais resultados.

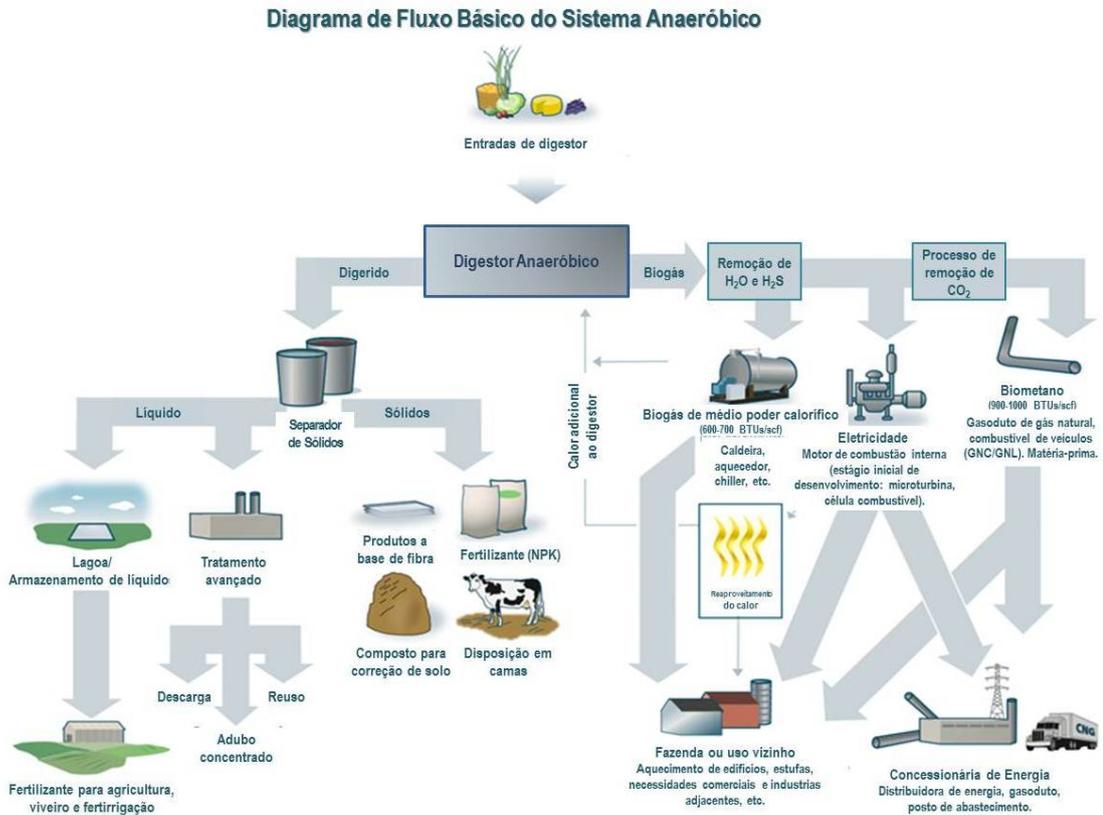
### 3.2. Rota Tecnológica B: Baseada em Biodigestores Anaeróbios

Este item expõe os resultados da avaliação econômico financeira obtida para um sistema de digestores anaeróbios de grande porte para o tratamento de RSU.

<sup>21</sup> 105 euros por tonelada, de acordo com “Costs for Municipal Waste Management in the EU Final Report to Directorate General Environment, European Commission”, Dr Dominic Hogg, Eunomia Research & Consulting, 2001.

<sup>22</sup> Por exemplo, o último Leilão de energia A-5 realizado em 20 de dezembro de 2011, com o objetivo de suprir a demanda projetada das empresas distribuidoras para o ano de 2016, resultou em preço médio de R\$102,18 MWh.

### 3.2.1. Resumo Esquemático da Tecnologia



Fonte: EPA – United States Environmental Protection Agency. Tradução e adequação para realidade brasileira: NRG/Instituto Via Pública

A figura acima representa todas as possibilidades abertas com a digestão anaeróbia de materiais orgânicos – parcela de orgânicos do RSU, restos da produção agrícola, resíduos da indústria de alimentos etc. – que vai da produção de energia à de fertilizantes para a agricultura. Normalmente, os componentes do desenho final do projeto são escolhidos e desenvolvidos em função do ambiente econômico e financeiro do local em que o biodigestor é implantado.

Do ponto de vista técnico, não há nenhuma restrição para que todas as atividades representadas sejam desenvolvidas simultaneamente. Apenas a análise local pode fornecer parâmetros para a escolha das atividades de interesse.

Nesta análise considerou-se um investimento de R\$ 120 milhões no sistema de biodigestão para o tratamento de 510 t/d de orgânicos do RSU, provenientes de 1.000 toneladas diárias. Esse investimento inclui a instalação de uma área para a recuperação de materiais recicláveis (Material Recovery Facility – MRF) capaz de processar 320 toneladas diárias entre plásticos, papel, papelão, metais ferrosos, materiais não ferrosos, vidros e outros. O custo de investimento dessa MRF foi avaliado em R\$ 32 milhões e é composto por mesas com correias transportadoras, caçambas e containers de armazenamento, tanques secos, prensas e – principalmente – sistema anti-incêndio, além de instalações para os trabalhadores, uma vez que essa atividade é essencialmente intensiva em mão de obra.

### 3.2.2. Implicações da Rota B no Gerenciamento do RSU

Na composição do investimento adotado para a Rota B, em que há a adoção de um sistema de tratamento baseado em digestores anaeróbios, é necessária a presença de um forte programa de coleta seletiva e reciclagem do RSU no Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos.

O projeto de sistema de biodigestão adotado neste estudo inclui uma área de recuperação de recicláveis (MRF), cujo investimento é parte integrante do custo de capital do sistema proposto. Esse investimento está dimensionado para que todo material reciclável seco presente no RSU possa ser separado na planta de biodigestão, a montante dos biodigestores. Dado o peso desse investimento no total (R\$ 32 milhões em R\$ 120 milhões), um forte programa de coleta seletiva e reciclagem no município deverá reduzir significativamente esse investimento.

### 3.2.3. Parâmetros e Variáveis Adotados para a Análise Econômico Financeira

A tabela abaixo resume os parâmetros e variáveis adotados na avaliação da performance econômico financeira do sistema de biodigestão no tratamento do RSU. Os parâmetros referentes ao modelo de negócio (alavancagem) e de financiamento foram mantidos iguais aos adotados para o incinerador *mass burn* para facilitar a comparação entre as performances econômico financeiras.

**Tabela 2 – Parâmetros para análise econômico financeira para o sistema de biodigestão**

| Item   | Unidade     | Valor                  |
|--|-------------|------------------------|
| Volume diário processado                                     | t/dia       | 1.000                  |
| Volume diário digerido                                       | t/dia       | 510                    |
| Material recuperado para reciclagem                          | t/dia       | 320                    |
| Dias de operação por ano                                     | dia/ano     | 330                    |
| Geração de eletricidade                                      | MWh/t       | 0,28                   |
| Investimento   | R\$ milhões | 120                    |
| Custo de O&M   | R\$/t       | 70                     |
| Valor Cobrado na Recepção do RSU ( <i>Gate Fee</i> )         | R\$/t       | 80                     |
| Preço de Venda de Recicláveis <sup>23</sup>                  | R\$/t       | 506,20                 |
| Preço de Venda da Eletricidade                               | R\$/MWh     | 140                    |
| Taxa de Desconto   | % a.a.      | 8                      |
| Taxa de Alavancagem  | %           | 30/70                  |
| Condições de Financiamento (Taxa de juros, carência, prazos) | Referência  | BNDES - Infraestrutura |
| Participação na Receita de Venda dos Recicláveis             | %           | 30                     |

<sup>23</sup> Corresponde ao valor obtido pela simples multiplicação das quantidades previstas pela PNRS, pelos preços médios dos recicláveis divulgados pelo CEMPRE ([www.cempre.org.br](http://www.cempre.org.br)) para São Paulo. Observe-se que o empreendimento contabiliza um terço desse valor como receita própria: os dois terços restantes poderiam ser apropriados pelas cooperativas locais de catadores

### 3.2.4. Resultados da Análise Econômico - Financeira

A projeção dos resultados líquidos anuais para uma taxa de desconto de 8% a.a. produziram os seguintes resultados.

|                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| Taxa Interna de Retorno (TIR) | 12%              |
| Valor Presente Líquido (VPL)  | R\$ 12,8 milhões |

A análise de Fluxo de Caixa Descontado de empreendimento baseado na rota tecnológica com digestor anaeróbio revela viabilidade econômico financeira significativa no cenário macroeconômico atual do País para uma *gate fee* de R\$ 80, produzindo uma TIR de 12%, compatível com investimentos atrativos para o capital privado nas atuais condições macroeconômicas.

## 4. Emissão de gases de efeito estufa e balanço energético nas rotas de tratamento do RSU

A emissão de gases nos processos de tratamento de resíduos sólidos está relatada nos inventários brasileiros de emissões antrópicas de gases de efeito estufa<sup>24</sup> e aponta para um crescimento significativo no próximo período. Isto se dará por uma série de fatores, mas principalmente pela ampliação do número de aterros sanitários no território nacional, em substituição aos lixões que predominam como solução em metade dos municípios brasileiros. Os aterros sanitários resolvem muitos dos problemas ambientais gerados pelos lixões, mas, confinando os resíduos, criam as condições para a geração e emissão de biogás, com forte presença de gás metano (CH<sub>4</sub>).

Como a Política Nacional de Resíduos Sólidos estipula que após 2014 os aterros sanitários só operem com rejeitos, valorizando as frações seca e úmida do RSU, os gestores públicos ficam desafiados a analisar as rotas tecnológicas disponíveis, inclusive no tocante às suas características de emissão de gases de efeito estufa.

O Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa<sup>25</sup> mostra que, nas estimativas para 2005, as emissões provenientes da disposição de resíduos sólidos estiveram na ordem de 1.1 milhão de toneladas de CH<sub>4</sub>, o equivalente a 23,1 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub><sup>26</sup>

---

<sup>24</sup> Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima, Brasília, 2010

<sup>25</sup> Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010, op.cit.

<sup>26</sup> Considerando-se o potencial de aquecimento global (GWP) do CH<sub>4</sub> como 21

A Empresa de Pesquisa Energética, vinculada ao Ministério das Minas e Energia (MME/EPE), desenvolveu em 2008 estimativas<sup>27</sup> centradas nas condições dos resíduos sólidos da capital do Mato Grosso do Sul, Campo Grande. As características dos resíduos locais são muito próximas das consideradas neste estudo, em conformidade com as adotadas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

A tabela a seguir apresenta as estimativas de redução de GEE traçadas no estudo da MME/ EPE, cujos parâmetros de análise são as emissões resultantes de aterros convencionais de RSU.

**Quadro 1 – Comparação entre Rotas Tecnológicas em relação à emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE)**

| Rota Tecnológica  | Redução de emissões por tonelada de RSU tratada (t CO <sub>2</sub> eq) | Emissões evitadas pela reciclagem e geração térmica substituída (t CO <sub>2</sub> eq) | Materiais recuperados              | Total (t CO <sub>2</sub> eq) |
|---|--|--|------------------------------------|------------------------------|
| <b>Rota A</b> – baseada em incinerador <i>mass burn</i> | 0,209  | 0,034  | vidros e metais                    | 0,243                        |
| <b>Rota B</b> – baseada em biodigestor anaeróbio        | 1,064  | 0,084  | papéis, plásticos, vidros e metais | 1,148                        |

Fonte: EPE, 2008.

No mesmo estudo a EPE estimou a redução de emissões pela recuperação do biogás no próprio aterro sanitário, apontando-a no patamar de 0,501 (t<sub>CO<sub>2</sub>e</sub>), incluída a recuperação dos resíduos secos, com exceção do papel e papelão, para que não se inviabilizasse tecnicamente a operação.

A ressaltar que o tempo em que acontece a estabilização dos resíduos é diferenciado nestes processos – a redução das emissões em um aterro com captura do biogás pode se estender em até 50 anos, na rota tecnológica baseada em incinerador *mass burn* é imediata, com a queima do material, e na rota tecnológica baseada em biodigestor anaeróbio acontece em um período de 21 dias. Outro diferencial entre os processos é o fato de que as rotas tecnológicas baseadas em biodigestão anaeróbia e em incineração provocam redução significativa no volume de materiais dispostos em aterro, alongando em várias vezes a vida útil deste empreendimento.

O estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE-MME) desenvolvido para Campo Grande também analisou esta questão, conforme os dados apresentados na próxima tabela, referenciados todos no resultado final da Rota A, baseada em incinerador *mass burn*.

<sup>27</sup> Brasil. Ministério das Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. NOTA TÉCNICA DEN 06/08 Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS, Rio de Janeiro, novembro de 2008;

**Quadro 2 – Comparação entre Rotas Tecnológicas em relação ao Balanço Energético**

| Rota Tecnológica  | Produção de energia (GWh/ano) | Conservação de energia pela reciclagem (GWh/ano) | Materiais recuperados              | Benefício energético (GWh/ano) |
|---|-------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Rota A</b> – baseada em incinerador <i>mass burn</i> | 100,2                         | 10,3   | vidros e metais                    | 110,2                          |
| <b>Rota B</b> – baseada em biodigestor anaeróbio        | 26,2                          | 248,0  | papéis, plásticos, vidros e metais | 274,3                          |

Fonte: EPE, 2008.

Estudos desenvolvidos pela Agencia de Proteção Ambiental dos EUA confirmam estas informações<sup>28</sup>, analisando comparativamente a economia de energia decorrente da adoção de uma ou outra opção de gerenciamento de resíduos. A análise é feita com consideração de todo o conjunto de energias aplicadas aos produtos, da extração da matéria prima aos diversos momentos de transporte, do consumo de combustível fóssil à eletricidade e à própria energia inerente aos materiais. Ressalvado que os melhores resultados são sempre obtidos com a opção de redução da geração dos resíduos na fonte, a EPA demonstra que a rota da reciclagem, comparativamente à rota da incineração, permite uma maior conservação de energia líquida para a maioria dos materiais: plásticos em geral (8 vezes maior), plástico PET (15 vezes maior), papelão (7 vezes maior), jornais (6 vezes maior), carpetes (22 vezes maior).

A reciclagem do conjunto dos materiais, além de contribuir para a extensão da vida útil do aterro, evita a geração de energia elétrica consumida na produção do material reciclável. O potencial de conservação de energia elétrica estimado pela EPE-MME a partir da reciclagem de embalagens é bastante expressivo, podendo situar-se entre 0,66 kWh/kg e 2,97 kWh/kg de RSU<sup>29</sup>.

Estudo conduzido no Reino Unido<sup>30</sup>, a partir da análise do ciclo de vida dos materiais, chega também ao mesmo entendimento, caracterizando para a ampla análise efetivada (comparação da análise do ciclo de vida em 55 estudos específicos) que, tal como reconhecido pela hierarquia de resíduos da Diretiva de Resíduos na União Europeia, a reciclagem de resíduos demanda maior energia que a prevenção, porém segue sendo melhor para o meio ambiente que a incineração com recuperação de energia.

<sup>28</sup> WASTE MANAGEMENT AND ENERGY SAVINGS: BENEFITS BY THE NUMBERS. Anne Choate, Lauren Pederson, Jeremy Scharfenberg, ICF Consulting, Washington DC. Henry Ferland, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC

<sup>29</sup> NOTA TÉCNICA DEN 06/08 Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS; Ministério das Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, novembro de 2008;

<sup>30</sup> Environmental benefits of recycling – an international review of life cycle comparisons for key materials in the UK recycling sector."WRAP 2010

## 5. Impacto sobre emprego e renda

As rotas tecnológicas em estudo, inseridas em um sistema de gerenciamento de RSU, são conjugações de processos que oferecem oportunidades de empregos diferenciadas, tanto na prestação do serviço quanto em outras etapas, anteriores ou posteriores ao tratamento dos resíduos.

Estudo norte americano aponta a relação de 1 emprego para cada 10 mil toneladas anuais de RSU processadas em usinas de incineração e, na rota tecnológica da biodigestão, 10 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU em operações na área de recuperação de recicláveis (MRF) e outros 25 em indústrias ligadas à reciclagem dos diversos materiais recuperados<sup>31</sup>.

No Brasil, a coleta seletiva é grande empregadora de mão de obra pouco qualificada, composta por catadores, organizados ou não, e por empregados em empresas de coleta porta a porta. Do total dos Municípios 58% têm iniciativas de coleta seletiva (ABRELPE, 2011)<sup>32</sup> mesmo que atingindo, ainda, patamares muito baixos em relação ao volume total coletado (cerca de 10%).

## 6. Atendimento à legislação federal

Os objetivos e diretrizes expressos na legislação federal orientam a implantação e escolha de soluções técnicas para o tratamento de RSU. Para a continuidade da análise do desempenho das duas rotas tecnológicas foram selecionados aspectos diretamente relacionados à etapa de tratamento de RSU nas Políticas Nacionais, explicitados a seguir:

i) A Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) - Lei nº 11.445/2007 determina a escolha de soluções eficientes, graduais e progressivas, com sustentabilidade econômica, adequadas à saúde pública e proteção do ambiente, e que visem a continuidade e segurança na prestação dos serviços e a universalização do atendimento, considerando a capacidade de pagamento dos usuários.

ii) A Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC) - Lei nº 12.187/2009 direciona para a implantação de alternativas que busquem a redução de emissões de GEE, interfiram positivamente no cumprimento das metas compromissadas em âmbito internacional e sejam favoráveis à preservação e recuperação de recursos naturais, evitando emissões.

iii) Na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei nº 12.305/2010 as alternativas tecnológicas estão orientadas a considerar:

- Os resíduos como um bem com valor econômico, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania;

---

<sup>31</sup> Institute for Local Self-Reliance, Washington, DC, 1997. <http://www.ilsr.org/recycling-means-business/>

<sup>32</sup> ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2011

- Uma ordem de prioridade no gerenciamento dos resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos;
- O conceito de responsabilidade compartilhada no ciclo de vida dos produtos, com a reintrodução de materiais na cadeia produtiva; esta se desdobra estrategicamente, na geração de empregos com a inclusão social dos catadores como agentes do processo e na logística reversa, com planos privados de solução para os resíduos gerados.
- Prazos para o término da disposição final não adequada, e o atrelamento da liberação de recursos aos Municípios à elaboração de planejamento do setor.

O quadro apresentado no anexo 4, analisa o comportamento das duas rotas tecnológicas perante os aspectos das políticas federais nomeadas. Mostra que a rota tecnológica baseada no biodigestor responde positivamente a mais aspectos definidos pela legislação.

## 7. Conclusões

Este documento expõe o resultado de uma análise comparativa entre duas alternativas de aproveitamento energético de resíduos sólidos: uma rota tecnológica baseada em incineradores (incineradores *mass burn*) e outra baseada em digestores anaeróbios (biodigestores). Ele busca fornecer elementos objetivos de decisão para os gestores públicos, responsáveis pela implementação da PNRS e ampliar o conhecimento sobre tecnologias de tratamento de RSU ainda pouco empregadas no país. A análise abrange o desempenho econômico financeiro relativo à implantação e operação, o balanço energético (energia produzida e energia conservada), emissões de gases de efeito estufa, o impacto sobre empregos e o atendimento aos marcos regulatórios federais.

Há sensíveis diferenças entre as rotas tecnológicas analisadas, oriundas intrinsecamente de suas próprias características técnicas.

Em Municípios de grande porte ou em áreas metropolitanas ou municípios consorciados, quando existem grandes volumes e dependendo das características dos resíduos a serem tratados, ambas as rotas podem ser analisadas. Incineradores necessitam de coleta diária por volta de 1.000 toneladas ao dia. Biodigestores podem ser dimensionados a partir de volumes menores.

Seguem as principais conclusões quanto à análise econômico-financeira, abatimento de emissões de GEE e aproveitamento energético:

### **Análise econômico-financeira:**

Os biodigestores são viáveis com valor cobrado na recepção do RSU (*Gate Fee*) de R\$ 80,00 usado como referência no estudo e valores de mercado para a venda de eletricidade. Os

empreendimentos baseados nessa rota tecnológica são viáveis nas condições econômicas vigentes no contexto brasileiro, incluindo as de financiamento ditadas pelo BNDES.

A rota com os biodigestores tem grande complementaridade com a coleta seletiva. A recuperação de materiais secos nas etapas anteriores à destinação e, se necessário, na própria instalação, constitui atividade desejável uma vez que a biodigestão se aplica apenas à parcela úmida do RSU.

A análise da rota baseada em incinerador *mass burn* demonstra que há dificuldade de viabilizar empreendimentos baseados nessa tecnologia. Mantidas as condições de investimento, de custo operacional e da receita oriunda da venda de energia no mercado, a viabilidade do empreendimento só pode ser alcançada com uma *gate fee* bem mais elevada que a prática usual no Brasil. Ao se analisar empreendimentos semelhantes na Europa, os incineradores se viabilizam pelas restrições legais impostas à construção de novos aterros sanitários, que resultam em um alto valor de recepção do RSU (*gate fee*); pelo preço de venda de energia, também maior que aquele praticado no Brasil, e pelo uso do vapor em calefação e aquecimento distrital.

Tanto numa rota como em outra as áreas ocupadas são menores que as requeridas por aterros sanitários, o que favorece situações em que haja indisponibilidade de sítios para a construção de aterros, tal como ocorre nos países europeus.

#### **Abatimento de Emissões de GEE:**

Ao se adotar como linha de base um aterro sanitário sem aproveitamento energético, ambas as rotas abatem emissões de GEE. Como a biodigestão aplica-se aos resíduos orgânicos, a recuperação da parcela seca do RSU potencializa a redução das emissões de GEE. Por outro lado, para a incineração, a recuperação dessa parcela seca do RSU implica no uso suplementar de combustíveis fósseis, com o consequente aumento de emissões de GEE.

Nos parâmetros adotados neste estudo, para cada tonelada de RSU tratada em biodigestores e incineradores *mass burn*, se abateria, respectivamente, 1,148 t<sub>CO2e</sub> e 0,24343 t<sub>CO2e</sub>.

#### **Aproveitamento energético e outros aspectos analisados:**

As duas rotas tecnológicas permitem aproveitamento energético superior ao conseguido em aterros sanitários preparados para o aproveitamento do biogás. Partindo-se do mesmo volume de RSU, a produção de eletricidade por incineradores *mass burn* é maior que aquela correspondente à biodigestão. No entanto, ao se adicionar os ganhos decorrentes da reciclagem, mais pronunciados na rota da biodigestão a economia de energia possibilitada por essa rota se torna superior.

As características diferenciadas de cada um destes processos tecnológicos conduzem também a análise de seu comportamento perante aspectos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Federal de Saneamento Básico e Política Nacional sobre Mudança do Clima. São estas características que determinam a resultante em termos de capacidade de geração de emprego e renda, convivência com as diretrizes de responsabilidade compartilhada, logística reversa e outras. Esta análise mostra que a rota tecnológica baseada na biodigestão anaeróbia responde positivamente a mais aspectos definidos pela legislação nacional.

Deve haver, por final, a preocupação com o fato de que as características e o alto custo de ambos os tipos de empreendimentos induzem um modelo de negócios de longo prazo, com contratos próprios de financiamento ou contratos de concessão que se estenderão por várias décadas, nas quais o setor público precisará garantir ou a alimentação contínua com resíduos de maior poder calorífico, ou uma intensa coleta seletiva prévia dos resíduos secos. Nestas condições estarão sendo definidas as formas como serão implementadas as políticas nacionais de referência.

## 8. Bibliografia citada

- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011**. ABRELPE; São Paulo, 2011.
- Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais**. FEAM, 2012;
- BANCO MUNDIAL. **Decision Makers' Guide to Municipal Solid Waste Incineration**. The World Bank; Washington DC, 1999.
- BANCO MUNDIAL. **Municipal Solid Waste Incineration**. World Bank Technical Guidance Report. Washington DC, 1999.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **NOTA TÉCNICA DEN 06/08 Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande**, MS. EPE, Rio de Janeiro, 2008.
- BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. MPOG/ IBGE, Rio de Janeiro, 2008 e 2010.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima**. MCT, Brasília, 2010
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos** (Versão Preliminar para Consulta Pública). MMA, Brasília, 2011.
- HOGG Dominic. **Costs for Municipal Waste Management in the EU** Final Report to Directorate General Environment, European Commission. Eunomia Research & Consulting, 2001.
- ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade e Ministério do Meio Ambiente. **Planos de Gestão de Resíduos Sólidos: Manual de Orientação**. Brasília, 2012.
- INSTITUTE FOR LOCAL SELF-RELIANCE. Washington, DC, 1997.  
<http://www.ilsr.org/recycling-means-business/>
- ONU. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). **Instrumental Normalizado para la Identificación y Cuantificación de Liberaciones de Dioxinas y Furanos**. Productos Químicos; Ginebra, Suiza, febrero, 2005. ([http://www.pops.int/documents/guidance/toolkit/sp/Toolkit\\_2005es.pdf](http://www.pops.int/documents/guidance/toolkit/sp/Toolkit_2005es.pdf))
- WINROCK INTERNATIONAL BRASIL. **Manual de Biodigestão**.  
([http://www.neppa.uneb.br/textos/publicacoes/manuais/manual\\_biodigestor\\_winrock.pdf](http://www.neppa.uneb.br/textos/publicacoes/manuais/manual_biodigestor_winrock.pdf))
- WASTE MANAGEMENT AND ENERGY SAVINGS: BENEFITS BY THE NUMBERS. Choate Anne, Pederson Lauren, Scharfenberg Jeremy, ICF Consulting, Washington DC. Henry Ferland U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC
- WRAP. **Environmental benefits of recycling – an international review of life cycle comparisons for key materials in the UK recycling sector**, 2010.

## Legislação

BRASIL. Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007. Institui a Política Nacional de Saneamento Básico;

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a **Política Nacional sobre Mudança do Clima** - PNMC;

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a **Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998;

BRASIL. Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece **Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico**.

BRASIL. **Resolução Conama 316/2002**. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

## Créditos

### ClimateWorks Foundation (CWF)/Iniciativa Clima América Latina (ICAL)

Joseph Ryan – Diretor para América Latina  
Geórgia Pessoa – Representante Nacional  
Ruy de Goes Leite de Barros - Consultor

### Instituto Via Pública

Pedro Paulo Martoni Branco - Diretor Executivo  
Annez Andraus Troyano - Diretora de Pesquisas e Metodologias  
Ernesto Vega Senise - Diretor Administrativo e Financeiro  
Luiz Henrique Proença Soares - Diretor de Planejamento e Projetos

### Equipe Técnica

Coordenação Geral: Pedro Paulo Martoni Branco  
Coordenação Institucional: Luiz Henrique Proença Soares  
Coordenação Executiva: Rossella Rossetto  
Alexandre Guerra - Economista  
Ana Cristina Gentile Ferreira - Arquiteta

### Consultores

Roberto Kishinami (NRG) com a colaboração de Clauber Leite, Georg Ringhofer (IVENIO GmbH) e David Stafford (ECL Enviro – Control Ltd)  
Tarcísio de Paula Pinto (I&T Gestão de Resíduos)

### Redação do Relatório Final

Roberto Kishinami, Tarcísio de Paula Pinto, Rossella Rossetto e Alexandre Guerra (anexo1)  
Revisão  
Ruy de Goes Leite de Barros e Geórgia Pessoa

### Diagramação

Ana Cristina Gentile Ferreira

## **Anexo 1 - Projeção do volume de RSU para os cenários do Plano Nacional de Resíduos Sólidos**

### **1. Apresentação**

A finalidade desse exercício é apresentar projeções sobre Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em cidades brasileiras selecionadas para o período de 2011-2031<sup>1</sup> com o objetivo de subsidiar a análise comparativa entre duas rotas tecnológicas de tratamento dos resíduos sólidos urbanos, isto é, incineradores *mass burn* e digestores anaeróbios.

Os estudos foram direcionados para cidades com população a partir de 500 mil habitantes, recorte que corresponderia à geração de massa de RSU suficiente para viabilizar a rota baseada em incinerador.

Os municípios com série histórica de dados e com a apresentação da composição gravimétrica dos resíduos, neste recorte correspondem a 17,3% da população brasileira, a saber: Aracajú/SE, Belém/PA, Campinas/SP, Campo Grande/MS, Fortaleza/CE, João Pessoa/PB, Maceió/AL, Manaus/AM, Natal/RN, Porto Alegre/RS, Rio de Janeiro/RJ, Salvador/BA, São Paulo/SP, Teresina/PI e Uberlândia/MG.

Como será descrito adiante, as projeções foram elaboradas por meio de tratamento estatístico baseado em técnicas de correlações de Person e regressão linear simples baseada na evolução histórica do RSU e da população residente para o período 2002-2010.

### **2. Metodologia de análise**

#### **2.1 Resíduos Sólidos Urbanos e população residente 2002-2010**

O primeiro passo foi coletar informações sobre a quantidade de resíduos sólidos domiciliares e públicos coletados por meio da fonte Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Entre 2002 e 2010, a quantidade de RSU coletada passou de 9,9 para 12,5 milhões de toneladas no conjunto dos 15 municípios analisados - ver *tabela 1*.

O levantamento dos dados sobre a evolução da população residente também se mostrou necessário, e foi baseado no Censo Demográfico e para os anos intercensitários em estimativas populacionais, ambas as fontes elaboradas pelo IBGE. Entre 2002 e 2010, a população residente passou de 31,1 para 33,6 milhões de habitantes no total das cidades abordadas - ver *tabela 2*.

---

<sup>1</sup> Prazo das metas da lei 12.305/10. Lei dos Resíduos Sólidos.

**Tabela 1**  
**Quantidade de RSU domiciliares e públicos coletados: municípios selecionados, 2002-2010\***

| Municípios       | 2002             | 2003              | 2004              | 2005              | 2006              | 2007              | 2008              | 2009              | 2010              |
|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Aracaju          | 200.889          | 137.655           | 300.456           | 164.556           | 161.398           | 180.039           | 191.673           | 193.040           | 211.527           |
| Belém            | 282.785          | 275.278           | 275.810           | 297.267           | 293.827           | 337.214           | 408.840           | 387.275           | 415.769           |
| Campinas         | 248.522          | 233.677           | 235.317           | 240.696           | 270.090           | 306.509           | 313.600           | 366.347           | 417.614           |
| Campo Grande     | 160.694          | 178.184           | 178.184           | 176.992           | 178.184           | 196.866           | 203.353           | 217.332           | 242.612           |
| Fortaleza        | 825.720          | 1.005.325         | 502.417           | 969.417           | 787.661           | 1.329.163         | 1.202.853         | 1.169.078         | 1.280.874         |
| João Pessoa      | 188.236          | 323.823           | 278.025           | 319.741           | 380.775           | 486.164           | 357.891           | 409.773           | 385.263           |
| Maceió           | 199.764          | 231.115           | 234.243           | 468.806           | 565.033           | 513.170           | 521.492           | 537.768           | 504.728           |
| Manaus           | 759.034          | 946.300           | 647.776           | 709.708           | 788.905           | 765.282           | 841.809           | 945.025           | 1.055.035         |
| Natal            | 257.147          | 546.113           | 325.294           | 514.041           | 374.006           | 393.557           | 496.190           | 557.124           | 269.831           |
| Porto Alegre     | 296.140          | 394.452           | 394.167           | 417.841           | 428.598           | 463.221           | 434.763           | 502.144           | 474.382           |
| Rio de Janeiro   | 1.831.553        | 3.042.230         | 3.182.220         | 3.056.580         | 3.202.613         | 3.159.623         | 3.530.783         | 2.015.731         | 2.187.026         |
| Salvador         | 810.060          | 740.030           | 751.052           | 703.066           | 730.984           | 767.462           | 807.595           | 804.387           | 830.231           |
| São Paulo        | 3.548.934        | 3.162.798         | 3.422.553         | 3.492.667         | 3.648.153         | 3.822.547         | 4.076.218         | 3.758.981         | 3.629.144         |
| Teresina         | 156.200          | 175.479           | 175.479           | 192.400           | 177.838           | 409.858           | 158.122           | 277.098           | 435.767           |
| Uberlândia       | 115.951          | 117.777           | 187.769           | 125.994           | 123.279           | 123.638           | 131.616           | 142.519           | 166.382           |
| <b>Total RSU</b> | <b>9.881.628</b> | <b>11.510.235</b> | <b>11.090.763</b> | <b>11.849.773</b> | <b>12.111.341</b> | <b>13.254.313</b> | <b>13.676.798</b> | <b>12.283.621</b> | <b>12.506.185</b> |

\*Foram utilizadas técnicas de interpolação para suprir a inexistência de dados para 11 episódios da série histórica.

Fonte: Elaboração Instituto Via Pública a partir de dados Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)

**Tabela 2**  
**População residente: municípios selecionados, 2002-2010**

| Municípios             | 2002              | 2003              | 2004              | 2005              | 2006              | 2007              | 2008              | 2009              | 2010              |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Aracaju                | 473.990           | 479.767           | 485.531           | 498.618           | 505.287           | 511.891           | 536.785           | 544.039           | 571.149           |
| Belém                  | 1.322.682         | 1.342.201         | 1.361.672         | 1.405.873         | 1.428.368         | 1.450.697         | 1.424.124         | 1.437.604         | 1.393.399         |
| Campinas               | 995.024           | 1.006.919         | 1.018.781         | 1.045.707         | 1.059.421         | 1.073.021         | 1.056.644         | 1.064.669         | 1.080.113         |
| Campo Grande           | 692.546           | 705.973           | 719.362           | 749.770           | 765.245           | 780.593           | 747.189           | 755.104           | 786.797           |
| Fortaleza              | 2.219.836         | 2.256.235         | 2.292.539         | 2.374.944         | 2.416.919         | 2.458.545         | 2.473.614         | 2.505.554         | 2.452.185         |
| João Pessoa            | 619.051           | 628.837           | 638.614           | 660.797           | 672.080           | 683.278           | 693.082           | 702.234           | 723.515           |
| Maceió                 | 833.260           | 849.734           | 866.165           | 903.464           | 922.455           | 941.294           | 924.143           | 936.313           | 932.748           |
| Manaus                 | 1.488.805         | 1.527.314         | 1.565.709         | 1.644.688         | 1.688.524         | 1.731.993         | 1.709.010         | 1.738.641         | 1.802.014         |
| Natal                  | 734.503           | 744.794           | 755.068           | 778.038           | 789.895           | 801.665           | 798.065           | 806.203           | 803.739           |
| Porto Alegre           | 1.383.454         | 1.394.087         | 1.404.670         | 1.428.694         | 1.440.940         | 1.453.075         | 1.430.220         | 1.436.124         | 1.409.351         |
| Rio de Janeiro         | 5.937.251         | 5.974.082         | 6.010.814         | 6.094.182         | 6.136.656         | 6.178.762         | 6.161.047         | 6.186.713         | 6.320.446         |
| Salvador               | 2.520.505         | 2.556.430         | 2.592.239         | 2.673.557         | 2.714.977         | 2.754.946         | 2.948.733         | 2.998.058         | 2.675.656         |
| São Paulo              | 10.600.059        | 10.677.017        | 10.753.768        | 10.927.985        | 11.016.708        | 11.104.715        | 10.990.249        | 11.037.590        | 11.253.503        |
| Teresina               | 740.016           | 751.463           | 762.874           | 788.770           | 801.972           | 815.061           | 802.416           | 802.565           | 814.230           |
| Uberlândia             | 529.439           | 542.540           | 555.606           | 585.260           | 600.367           | 615.343           | 622.441           | 634.349           | 604.013           |
| <b>Total população</b> | <b>31.090.421</b> | <b>31.437.393</b> | <b>31.783.412</b> | <b>32.560.347</b> | <b>32.959.814</b> | <b>33.354.879</b> | <b>33.317.762</b> | <b>33.585.760</b> | <b>33.622.858</b> |

Fonte: Elaboração Instituto Via Pública a partir de dados do Censo Demográfico/IBGE e Estimativas Populacionais do Brasil/IBGE.

## 2.2 O uso de técnicas de correlação e de regressão linear para as variáveis RSU e população residente

O segundo passo para elaboração da projeção foi verificar a existência de associação entre as variáveis RSU e população residente objetivando utilizar posteriormente técnicas de regressão linear para estimativas futuras de RSU.

A correlação entre essas duas variáveis foi mensurada por meio da técnica estatística conhecida como correlação de Pearson. O coeficiente de Person mede o grau da correlação entre duas variáveis lineares e os valores sempre serão entre +1 e -1, onde a partir de 0,70 indica uma forte correlação entre as variáveis.

Ao aplicar a técnica para as variáveis RSU e população residente, observou-se significância estatística de 95% e um coeficiente de correlação de 0,852, indicando uma forte correlação entre as variáveis abordadas – ver tabela 3.

**Tabela 3**  
**Coeficiente de Pearson de RSU e População residente: municípios selecionados, 2002-2010**

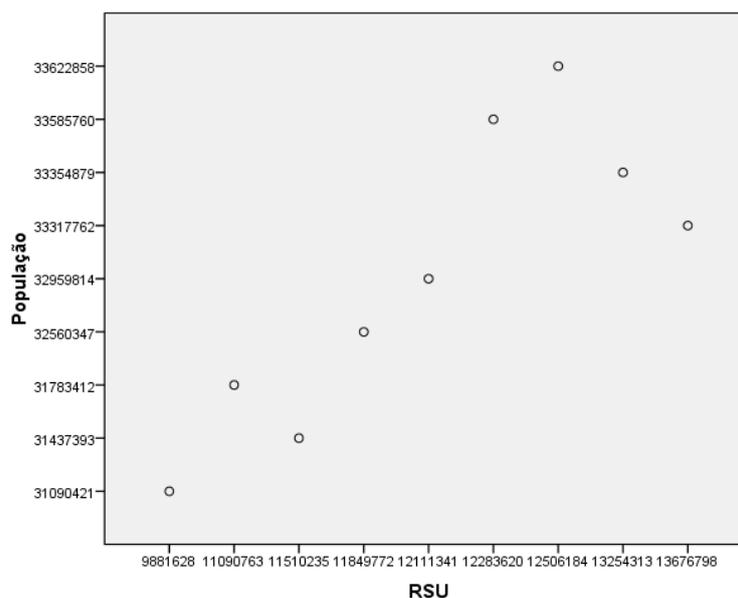
|           |                     | População | RSU    |
|-----------|---------------------|-----------|--------|
| População | Pearson Correlation | 1         | ,852** |
|           | Sig. (2-tailed)     |           | ,004   |
|           | N                   | 9         | 9      |
| RSU       | Pearson Correlation | ,852**    | 1      |
|           | Sig. (2-tailed)     | ,004      |        |
|           | N                   | 9         | 9      |

Fonte: Elaboração Instituto Via Pública a partir de dados do Censo Demográfico/IBGE, Estimativas Populacionais do Brasil/IBGE e Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)

Uma vez constatado a existência de forte associação entre as variáveis, buscou-se avançar no exercício de projeção por meio de técnicas de regressão linear simples. A regressão linear constitui uma tentativa de estabelecer uma equação matemática linear que descreva o relacionamento entre duas variáveis pelo método dos mínimos quadrados.

Ao aplicar a Equação Linear  $\hat{Y} = a + bX$  estimou-se os coeficientes angulares da reta onde  $RSU = (0,997 * (População/1000) - 20517) * 1000$ , o que possibilitou projetar a quantidade de RSU em relação às projeções populacionais estaduais elaboradas pelo IBGE para o período 2011-2030. Devido à inexistência de projeções populacionais municipais, estimou-se a evolução da população das cidades selecionadas pela aplicação das variações anuais da Unidade Federativa cuja qual o município pertence.

**Gráfico 1**  
**Distribuição de RSU coletada e população: municípios selecionados, 2002-2010**



Fonte: Instituto Via Pública

Por fim, para estimar a quantidade de RSU segundo tipo, aplicou-se os percentuais divulgados no Plano Nacional de Resíduos<sup>2</sup> para 2008, onde os resíduos secos correspondem a 31,9%, os resíduos úmidos a 51,4% e os outros equivalente a 16,7%.

### 3. Resultados

Os dados apresentados na tabela 4 sintetizam os resultados obtidos no caso de uma evolução futura de RSU para 2011-2031 respeitar o mesmo comportamento em relação à população observado entre 2002-2010, ou seja, se nada for feito do ponto de vista das políticas públicas e das ações dos demais atores envolvidos.

**Tabela 4**  
**Projeção RSU baseada em técnicas de regressão linear: cidades selecionadas, 2011-2031**

| Ano  | População  | Resíduos sólidos total | Resíduos sólidos secos | Resíduos sólidos úmidos | Outros resíduos sólidos | Metais  | Papel, Papelão e Tetrapak | Plástico Filme | Plástico Rígido | Vidro   |
|------|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|---------------------------|----------------|-----------------|---------|
| 2011 | 33.909.464 | 13.290.735             | 4.239.745              | 6.831.438               | 2.219.553               | 385.431 | 1.741.086                 | 1.182.875      | 611.374         | 318.978 |
| 2012 | 34.181.317 | 13.561.774             | 4.326.206              | 6.970.752               | 2.264.816               | 393.291 | 1.776.592                 | 1.206.998      | 623.842         | 325.483 |
| 2013 | 34.440.108 | 13.819.787             | 4.408.512              | 7.103.371               | 2.307.904               | 400.774 | 1.810.392                 | 1.229.961      | 635.710         | 331.675 |
| 2014 | 34.687.313 | 14.066.251             | 4.487.134              | 7.230.053               | 2.349.064               | 407.921 | 1.842.679                 | 1.251.896      | 647.048         | 337.590 |
| 2015 | 34.924.306 | 14.302.533             | 4.562.508              | 7.351.502               | 2.388.523               | 414.773 | 1.873.632                 | 1.272.925      | 657.917         | 343.261 |
| 2016 | 35.152.449 | 14.529.992             | 4.635.067              | 7.468.416               | 2.426.509               | 421.370 | 1.903.429                 | 1.293.169      | 668.380         | 348.720 |
| 2017 | 35.372.743 | 14.749.625             | 4.705.130              | 7.581.307               | 2.463.187               | 427.739 | 1.932.201                 | 1.312.717      | 678.483         | 353.991 |
| 2018 | 35.585.909 | 14.962.151             | 4.772.926              | 7.690.546               | 2.498.679               | 433.902 | 1.960.042                 | 1.331.631      | 688.259         | 359.092 |
| 2019 | 35.792.355 | 15.167.978             | 4.838.585              | 7.796.341               | 2.533.052               | 439.871 | 1.987.005                 | 1.349.950      | 697.727         | 364.031 |
| 2020 | 35.992.469 | 15.367.491             | 4.902.230              | 7.898.891               | 2.566.371               | 445.657 | 2.013.141                 | 1.367.707      | 706.905         | 368.820 |
| 2021 | 36.186.429 | 15.560.870             | 4.963.918              | 7.998.287               | 2.598.665               | 451.265 | 2.038.474                 | 1.384.917      | 715.800         | 373.461 |
| 2022 | 36.374.094 | 15.747.972             | 5.023.603              | 8.094.457               | 2.629.911               | 456.691 | 2.062.984                 | 1.401.569      | 724.407         | 377.951 |
| 2023 | 36.555.096 | 15.928.431             | 5.081.169              | 8.187.213               | 2.660.048               | 461.924 | 2.086.624                 | 1.417.630      | 732.708         | 382.282 |
| 2024 | 36.728.755 | 16.101.569             | 5.136.400              | 8.276.206               | 2.688.962               | 466.945 | 2.109.306                 | 1.433.040      | 740.672         | 386.438 |
| 2025 | 36.894.346 | 16.266.663             | 5.189.066              | 8.361.065               | 2.716.533               | 471.733 | 2.130.933                 | 1.447.733      | 748.267         | 390.400 |
| 2026 | 37.051.022 | 16.422.869             | 5.238.895              | 8.441.355               | 2.742.619               | 476.263 | 2.151.396                 | 1.461.635      | 755.452         | 394.149 |
| 2027 | 37.197.890 | 16.569.296             | 5.285.605              | 8.516.618               | 2.767.072               | 480.510 | 2.170.578                 | 1.474.667      | 762.188         | 397.663 |
| 2028 | 37.334.288 | 16.705.286             | 5.328.986              | 8.586.517               | 2.789.783               | 484.453 | 2.188.392                 | 1.486.770      | 768.443         | 400.927 |
| 2029 | 37.459.604 | 16.830.225             | 5.368.842              | 8.650.736               | 2.810.648               | 488.077 | 2.204.760                 | 1.497.890      | 774.190         | 403.925 |
| 2030 | 37.573.293 | 16.943.573             | 5.405.000              | 8.708.997               | 2.829.577               | 491.364 | 2.219.608                 | 1.507.978      | 779.404         | 406.646 |
| 2031 | 37.674.789 | 17.044.765             | 5.437.280              | 8.761.009               | 2.846.476               | 494.298 | 2.232.864                 | 1.516.984      | 784.059         | 409.074 |

Fonte: Instituto Via Pública a partir de técnicas de regressão linear aplicadas à Projeção da População do Brasil/IBGE.

<sup>2</sup> Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Versão Preliminar para Consulta Pública), Setembro de 2011.

### 3.1 Cenários para resíduos secos

A partir da projeção exposta (nomeado cenário Ceteris Paribus), calculou-se mais três cenários levando em conta as metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos<sup>3</sup> – ver tabela 5.

**Tabela 5**  
**Projeção RSU secos segundo cenários: cidades selecionadas, 2011-2031**

| Cenário Ceteris Paribus: tudo mais constante |                             |            |            |            |            |            |            |
|--|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Meta   | Variável                    | 2008       | 2015       | 2019       | 2023       | 2027       | 2031       |
| Cenário Ceteris Paribus                      | RSU Secos (t/ano)           | 4.362.899  | 4.562.508  | 4.838.585  | 5.081.169  | 5.285.605  | 5.437.280  |
|  | RSU Secos por hab. (Kg/ano) | 130,9      | 130,6      | 135,2      | 139,0      | 142,1      | 144,3      |
|  | RSU Secos por hab. (Kg/dia) | 0,36       | 0,36       | 0,37       | 0,38       | 0,39       | 0,40       |
|  | População                   | 33.317.762 | 34.924.306 | 35.792.355 | 36.555.096 | 37.197.890 | 37.674.789 |
| Cenário Desfavorável                         |                             |            |            |            |            |            |            |
| Meta   | Variável                    | 2008       | 2015       | 2019       | 2023       | 2027       | 2031       |
| Cenário Desfavorável                         | Redução prevista (em %)     |            | 22%        | 26%        | 29%        | 32%        | 36%        |
|  | RSU Secos (t/ano)           | 4.362.899  | 3.558.756  | 3.580.553  | 3.607.630  | 3.594.212  | 3.479.859  |
|  | RSU Secos por hab. (Kg/ano) | 130,9      | 101,9      | 100,0      | 98,7       | 96,6       | 92,4       |
|  | RSU Secos por hab. (Kg/dia) | 0,36       | 0,28       | 0,27       | 0,27       | 0,26       | 0,25       |
| População                                    | 33.317.762                  | 34.924.306 | 35.792.355 | 36.555.096 | 37.197.890 | 37.674.789 |            |
| Cenário Intermediário                        |                             |            |            |            |            |            |            |
| Meta   | Variável                    | 2008       | 2015       | 2019       | 2023       | 2027       | 2031       |
| Cenário Intermediário                        | Redução prevista (em %)     |            | 31%        | 44%        | 54%        | 63%        | 67%        |
|  | RSU Secos (t/ano)           | 4.362.899  | 3.148.131  | 2.709.608  | 2.337.338  | 1.955.674  | 1.794.302  |
|  | RSU Secos por hab. (Kg/ano) | 130,9      | 90,1       | 75,7       | 63,9       | 52,6       | 47,6       |
|  | RSU Secos por hab. (Kg/dia) | 0,36       | 0,25       | 0,21       | 0,18       | 0,14       | 0,13       |
| População                                    | 33.317.762                  | 34.924.306 | 35.792.355 | 36.555.096 | 37.197.890 | 37.674.789 |            |
| Cenário Favorável                            |                             |            |            |            |            |            |            |
| Meta   | Variável                    | 2008       | 2015       | 2019       | 2023       | 2027       | 2031       |
| Cenário Favorável                            | Redução prevista (em %)     |            | 70%        | 70%        | 70%        | 70%        | 70%        |
|  | RSU Secos (t/ano)           | 4.362.899  | 1.368.752  | 1.451.576  | 1.524.351  | 1.585.682  | 1.631.184  |
|  | RSU Secos por hab. (Kg/ano) | 130,9      | 39,2       | 40,6       | 41,7       | 42,6       | 43,3       |
|  | RSU Secos por hab. (Kg/dia) | 0,36       | 0,11       | 0,11       | 0,11       | 0,12       | 0,12       |
| População                                    | 33.317.762                  | 34.924.306 | 35.792.355 | 36.555.096 | 37.197.890 | 37.674.789 |            |

Fonte: Instituto Via Pública a partir de técnicas de regressão linear aplicadas a Projeção da População do Brasil 1880-2050/IBGE e metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil. MMA, 2011.

<sup>3</sup> Brasil. Ministério do Meio Ambiente, 2011, op.cit. p.117

### 3.2 Cenários para resíduos úmidos

A projeção exibida (nomeado cenário Ceteris Paribus) também permitiu projetar mais três cenários relativos aos resíduos úmidos, segundo as metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos<sup>4</sup> – ver tabela 6.

**Tabela 6**  
**Projeção RSU úmidos segundo cenários: cidades selecionadas, 2011-2031**

| Cenário Ceteris Paribus: tudo mais constante |                            |            |            |            |            |            |            |
|--|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Meta   | Variável                   | 2008       | 2015       | 2019       | 2023       | 2027       | 2031       |
| Cenário Ceteris Paribus                      | Redução prevista (em %)    |            |            |            |            |            |            |
|  | RSU (t/ano)                | 7.029.874  | 7.351.502  | 7.796.341  | 8.187.213  | 8.516.618  | 8.761.009  |
| Redução dos resíduos úmidos                  | RSU por habitante (Kg/ano) | 211,0      | 210,5      | 217,8      | 224,0      | 229,0      | 232,5      |
|  | RSU por habitante (Kg/dia) | 0,58       | 0,58       | 0,60       | 0,61       | 0,63       | 0,64       |
|  | População                  | 33.317.762 | 34.924.306 | 35.792.355 | 36.555.096 | 37.197.890 | 37.674.789 |
| Cenário Desfavorável                         |                            |            |            |            |            |            |            |
| Meta   | Variável                   | 2008       | 2015       | 2019       | 2023       | 2027       | 2031       |
| Cenário Desfavorável                         | Redução prevista (em %)    |            | 22%        | 26%        | 29%        | 32%        | 36%        |
|  | RSU (t/ano)                | 7.029.874  | 5.954.717  | 5.613.365  | 5.076.072  | 4.598.974  | 4.117.674  |
| Redução dos resíduos úmidos                  | RSU por habitante (Kg/ano) | 211,0      | 170,5      | 156,8      | 138,9      | 123,6      | 109,3      |
|  | RSU por habitante (Kg/dia) | 0,58       | 0,47       | 0,43       | 0,38       | 0,34       | 0,30       |
|  | População                  | 33.317.762 | 34.924.306 | 35.792.355 | 36.555.096 | 37.197.890 | 37.674.789 |
| Cenário Intermediário                        |                            |            |            |            |            |            |            |
| Meta   | Variável                   | 2008       | 2015       | 2019       | 2023       | 2027       | 2031       |
| Cenário Intermediário                        | Redução prevista (em %)    |            | 31%        | 44%        | 54%        | 63%        | 67%        |
|  | RSU (t/ano)                | 7.029.874  | 5.513.627  | 5.067.622  | 4.502.967  | 3.747.312  | 3.329.183  |
| Redução dos resíduos úmidos                  | RSU por habitante (Kg/ano) | 211,0      | 157,9      | 141,6      | 123,2      | 100,7      | 88,4       |
|  | RSU por habitante (Kg/dia) | 0,58       | 0,43       | 0,39       | 0,34       | 0,28       | 0,24       |
|  | População                  | 33.317.762 | 34.924.306 | 35.792.355 | 36.555.096 | 37.197.890 | 37.674.789 |
| Cenário Favorável                            |                            |            |            |            |            |            |            |
| Meta   | Variável                   | 2008       | 2015       | 2019       | 2023       | 2027       | 2031       |
| Cenário favorável                            | Redução prevista (em %)    |            | 70%        | 70%        | 70%        | 70%        | 70%        |
|  | RSU (t/ano)                | 7.029.874  | 2.205.451  | 2.338.902  | 2.456.164  | 2.554.985  | 2.628.303  |
| Redução dos resíduos úmidos                  | RSU por habitante (Kg/ano) | 211,0      | 63,1       | 65,3       | 67,2       | 68,7       | 69,8       |
|  | RSU por habitante (Kg/dia) | 0,58       | 0,17       | 0,18       | 0,18       | 0,19       | 0,19       |
|  | População                  | 33.317.762 | 34.924.306 | 35.792.355 | 36.555.096 | 37.197.890 | 37.674.789 |

Fonte: Instituto Via Pública a partir de técnicas de regressão linear aplicadas a Projeção da População do Brasil 1880-2050/IBGE e metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil, MMA, 2011

<sup>4</sup> Brasil. Ministério do Meio Ambiente, 2011, op.cit. p.119

## Anexo 2 - Itens de Investimento e de Operação e Manutenção de Incineradores “Mass Burn”

Os incineradores tipo “mass burn” – cujo significado é “queima qualquer coisa e no estado em que se encontra” – são equipamentos de tecnologia bem antiga e estabelecida. Para cada projeto construtivo, a capacidade de queima varia em função da “qualidade” do RSU local em termos de queima em ambiente aberto (ver Anexo III).

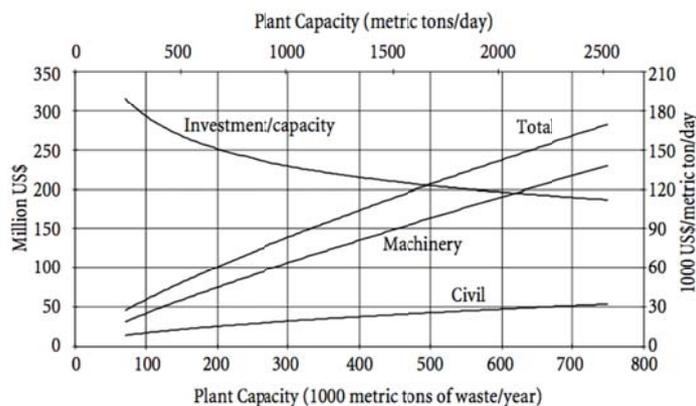
De modo geral, a capacidade nominal de um incinerador refere-se à capacidade média do equipamento. O volume diário que pode ser processado é uma função direta do poder calorífico médio do RSU: quanto maior o seu PCI, maior o volume diário que pode ser tratado por um dado incinerador. Assim, um incinerador de 1.000 toneladas diárias de RSU de projeto construtivo é, na prática, igual ao apresentado como de 850 toneladas diárias ou 1.150 toneladas diárias de RSU.

Em situações em que o RSU apresenta grande variação – de composição ou umidade – ao longo do ano, é parte da boa prática de engenharia prever que esse equipamento seja projetado para operar um sistema de combustível complementar ao RSU, ou outro sistema que possa compensar essa variação como ocorre, por exemplo, com incineradores que armazenam RSU seco – através de fardos envoltos em filme plástico – para serem misturados ao RSU úmido.

### INVESTIMENTO

Os custos de investimento dos incineradores “mass burn” podem ser vistos nos dois quadros seguintes. O primeiro é um levantamento do Banco Mundial<sup>1</sup>, feito nos mercados americano e europeu em 1998. Os fabricantes da época são os mesmos existentes hoje, embora o contexto econômico tenha mudado: a inflação acumulada do dólar americano desde aquele ano até hoje é de 42,1% (FED, CIP Jul 1998 – Jul 2012).

Figure 4.1 Investment Costs



Fonte: World Bank “Technical Guidance Report: Municipal Solid Waste Incineration”, Washington, D.C., 1999

<sup>1</sup> World Bank “Technical Guidance Report: Municipal Solid Waste Incineration”, Washington, D.C., 1999; Word Bank “Municipal Solid Waste Incineration – Technical Guidancer for Decision Makers”, Washington, D.C., 1999.

Esses custos de investimento em incineradores “mass burn”, pesquisados pelo Banco Mundial em 1998, foram recentemente corroborados por um trabalho similar realizado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) do Governo de Minas Gerais<sup>2</sup>, com o objetivo de orientar os municípios mineiros em direção ao cumprimento do PNRS:

Tabela - Resumo dos dados das usinas hipotéticas de incineração de RSU – estudo ENGEBIO.

| Item                                 | CNIM            | Cenário UAER    | Areva Koblitz   | Unidade            |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Investimento total                   | 332.000.000     | 232.400.000     | 192.991.080     | R\$                |
| Capacidade mínima                    | 300             | 350             | 350             | t/d                |
| Capacidade máxima                    | 600             | 640             | 640             | t/d                |
| Eficiência Líquida da Planta Térmica | 25              | 26              | 22/24           | %                  |
| Investimento Específico              | 33.200          | 17.877          | 12.866          | R\$/kWe            |
| Poder Calorífico do RSU              | 6155<br>(1.233) | 6900<br>(1.651) | 7745<br>(1.853) | kJ/kg<br>(kcal/kg) |
| Potência instalada (Módulo I)        | 5               | 6,5             | 8               | MWe                |
| Potência instalada (Módulo II)       | 5               | 6,5             | 7               | MWe                |
| Potência instalada total             | 10              | 13              | 15              | MWe                |
| Disponibilidade da Planta            | 8000            | 8000            | 7800/8200       | horas/ano          |

Fonte: ENGEBIO (2010a).

A capacidade **média** do incinerador adotado pela FEAM do Governo de Minas Gerais, nesse estudo (ENGEBIO), é de 500 toneladas diárias, correspondente a um custo de US\$ 216 mil para mil toneladas diárias de RSU, compatível com o valor adotado nesse estudo de US\$ 200 mil para mil toneladas diárias de RSU, se considerado fator de escala<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> “Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos – Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais”, FEAM/Governo Estadual de Minas Gerais, 2012.

<sup>3</sup> O equipamento adotado pela FEAM/MG está denominado “Cenário UAER” e é baseado no orçamento oferecido pela empresa europeia CNIM ([www.cnim.com](http://www.cnim.com)), de um equipamento capaz de atender às normas da União Europeia (e do Estado de São Paulo). A empresa Areva – Koblitz também ofereceu orçamento para um equipamento de capacidade similar, mas que foi desconsiderado por não apresentar especificações que deixassem inequivocamente claro ser capaz de atender mesmo à mesma norma.

### Operação & Manutenção

Os custos de O&M de um incinerador “mass burn” variam numa faixa de US\$ 50/t a US\$ 100/t, nos países com maior tradição no uso desse equipamento<sup>4</sup>. Os custos adotados nesse estudo (R\$ 100/t) correspondem aos menores valores dessa faixa e incluem, tanto os itens de custo tradicionais, como os de reinvestimento (overhauling) que são, conhecidamente, importantes no caso das grades ou grelhas móveis dos incineradores “mass burn”. A tabela abaixo resume esses custos:

**Custo de Operação e Manutenção**  
**Incinerador "Mass Burn" - 1.000 toneladas RSU / dia**

| Item                          | Tipo     | % do Custo Anual Total | Custo Anual Total como % Investimento Total |
|-------------------------------|----------|------------------------|---|
| <b>Recursos Humanos (1)</b>   | Fixo     | 34,0.                  | 3,1.  |
| <b>Materiais de Consumo</b>   | Variável | 10,0.                  | 0,9.  |
| <b>Serviços de Terceiros</b>  | Fixo     | 17,0.                  | 1,5.  |
| <b>Manut / Assist Tec (2)</b> | Fixo     | 19,0.                  | 1,8.  |
| <b>Overhauling (3)</b>        | Fixo     | 20,0.                  | 1,8.  |
| <b>Total</b>                  |          | 100,0.                 | 9,2.  |

(1) Estrutura "Technical Guideline for Incinerators", World Bank, 2008

(2) Serviços desde o exterior, em moeda estrangeira, por falta de escala no país.

(3) Reforma periódica das grelhas móveis, turbogerador e sistema de controle da poluição do ar.

A estrutura de custos de um incinerador é similar à de equipamentos térmicos de grande porte – refinarias, termoelétricas, fornos siderúrgicos etc – onde predominam custos de mão de obra especializada, que pode ser um fator limitante no contexto brasileiro a curto prazo. Os custos de manutenção e reinvestimento são, previsivelmente, relativamente altos, dado o alto desgaste provocado ao equipamento pela operação em situações de stress térmico: aquecimento, resfriamento e reaquecimento, correspondente aos ciclos de carregamento das grades ou grelhas com RSU e, eventualmente, chamas de combustível suplementar. Essa estrutura está estimada para custos totais de O&M de US\$ 50 por tonelada de RSU, que corresponde à faixa mais baixa nos custos praticados na União Européia e Estados Unidos<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> A esse propósito ver “Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos – Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais”, FEAM/Governo Estadual de Minas Gerais, 2012., por conter relato de visitas de campo a incineradores em operação.

### Anexo 3 - Relação entre a Composição Gravimétrica do RSU e seu Poder Calorífico

O chamado Resíduo Sólido Urbano (RSU) é uma mistura de materiais de diferentes origens – predominantemente restos de alimentos, carnes e vegetais, embalagens, papel, papelão, madeira, borracha etc – que tem, cada qual, maior ou menor facilidade para a queima ao ar livre.

É parte da nossa experiência cotidiana que, com exceção dos materiais inertes – vidro, metais, cerâmica etc – todos os demais queimam desde que estejam secos. O grau de umidade e o estado físico – químico desses materiais influem decisivamente na possibilidade de queimá-los em fornalhas de incineradores.

O Poder Calorífico Inferior do RSU é o resultados das contribuições dos poderes caloríficos específicos de cada material<sup>1</sup>. Calcular o chamado Poder Calorífico Inferior (PCI) do RSU significa somar essas contribuições individuais, através de uma operação simples, como exemplificado a seguir:

#### 1. Composição Gravimétrica do RSU Adotado nesse Estudo (\*):

| Componente       | %            |
|------------------|--------------|
| Matéria Orgânica | 51,4         |
| Plásticos        | 13,7         |
| Papel e Papelão  | 13,1         |
| Têxteis e Couro  | 2,8          |
| Madeira          | 1,2          |
| Borracha         | 0,5          |
| Inertes          | 17,3         |
| <b>Soma</b>      | <b>100,0</b> |

(\*) Extraído do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, MMA, 2012.

#### 2. Valores de PCI dos Componentes do RSU, de acordo com a sua umidade:

| Material         | Umidade % | PCI (base úmida sem cinzas)<br>kcal/kg |
|------------------|-----------|--|
| Matéria Orgânica | 66        | 712                                    |
| Plásticos        | 17        | 8.193                                  |
| Papel e Papelão  | 21        | 2.729                                  |
| Têxteis e Couro  | 36        | 1.921                                  |
| Madeira          | 25        | 2.490                                  |
| Borracha         | 5         | 8.633                                  |

Fonte: CODESC 2003, CEMIG/FEAM 2011.

<sup>1</sup> Os valores de poder calorífico são obtidos em análises laboratoriais, pela queima completa dos materiais previamente secos em equipamentos denominados calorímetros.

De posse da composição gravimétrica e dos poderes caloríficos individuais, a determinação do Poder Calorífico Inferior do RSU é uma operação simples. É preciso ter em mente, entretanto, que esse valor representa uma média: a experiência mostra que o RSU apresenta grandes variações entre localidades e ao longo do ano.

### 3. Cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) do RSU:

| Componente      | Composição Gravimétrica (%) | PCI Individual (kcal/kg) | Contribuição ao PCI Total (kcal/kg) | % do PCI Total |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Mat. Orgânica   | 51,4                        | 712                      | 366                                 | 19             |
| Plásticos       | 13,7                        | 8.193                    | 1.122                               | 57             |
| Papel e Papelão | 13,1                        | 2.729                    | 434                                 | 22             |
| Têxteis e Couro | 2,8                         | 1.921                    | 23                                  | 1              |
| Madeira         | 1,2                         | 2.490                    | 30                                  | 1              |
| Borracha        | 0,5                         | 8.633                    | 5                                   | 0              |
| Inertes         | 17,3                        | 0                        | 0                                   | 0              |
| <b>Soma</b>     | <b>100,0</b>                |                          | <b>1.980</b>                        | <b>100,0</b>   |

Assim, observa-se que o RSU adotado nesse estudo, cuja composição é retirada de estatísticas nacionais, apresenta um PCI de **1.980 kcal/kg**. Esse PCI é formado, majoritariamente, pelos plásticos (57%), complementado pelo papel e papelão (22%) mais a matéria orgânica (19%).

A consequência prática dessas proporções é que será cada vez mais difícil incinerar a matéria orgânica com a redução dos recicláveis, principalmente dos plásticos, como resultado da implantação da PNRS. Basta ver que uma redução de 27% dos plásticos<sup>2</sup> na composição atual do RSU é suficiente para diminuir o PCI para 1.680 kcal/kg, insuficiente para a queima auto-sustentada nos incineradores “*mass burn*”.

<sup>2</sup> Reduzindo a 10% a participação dos plásticos na composição gravimétrica do RSU.

## Anexo 4 - Atendimento à legislação federal. Análise comparativa entre as duas rotas

| Análise comparativa do atendimento à legislação federal. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Política Nacional sobre Mudanças do Clima e Política Nacional de Saneamento Básico |   | Rota A - Incinerador tipo <i>mass burn</i>  | Rota B - Biodigestor Anaeróbio (DA)  |
|--|---|---|--|
| Aspecto 1  | Redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos (PNRS, Art. 7º V)  | Aumento da necessidade de Aterros Classe I devido à geração de rejeitos perigosos (100t/dia para cada 1000t/dia de RSU)   | Não gera resíduos perigosos, apenas rejeitos para aterros classe IIA, se inviável comercialização do composto  |
| Aspecto 2  | Incentivo à indústria da reciclagem e das metas numéricas fixadas no Plano Nacional sobre Mudança do Clima e Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Art. 7º VI, Art. 30 II e V)                    | Reciclagem de metal e vidro. Plásticos, papel e madeira são necessários para obtenção de potencial calorífico mínimo.   | Reciclagem de resíduos secos é condição necessária para processo eficiente.  |
| Aspecto 3  | Reconhecimento dos resíduos como bem econômico gerador de trabalho e renda, com priorização de cooperativas e outras formas de associação de catadores de materiais (PNRS, Art. 6º VIII, Art. 36 §1º) | 1 emprego a cada 10 mil toneladas processadas ao ano (1)  | 35 empregos a cada 10 mil toneladas processadas ao ano (1)   |
| Aspecto 4  | Respeito à ordem de prioridade dos processos na gestão e gerenciamento (PNRS, Art.9º)   | Políticas de incentivo à redução, reutilização e reciclagem alteram o volume e podem inviabilizar a escala operacional mínima do incinerador. Não acompanha a ordem de prioridade | Acompanha a ordem de prioridade por necessitar da separação de resíduos secos para o bom desempenho  |
| Aspecto 5  | Comprovação da viabilidade econômica financeira da prestação do serviço público (PNSB, Art. 11 II, PNRS, Art. 7º X)   | A viabilidade pode depender de subsídio ao investimento inicial ou subsídio nas receitas de venda de energia ou da taxa de destinação   | A viabilidade e o retorno financeiro acontece nos parâmetros atuais de custo, sem necessidade de subsídios   |
| Aspecto 6  | Uso de tecnologias visando recuperação energética com viabilidade técnica e ambiental (PNRS, Art.9º § 1)  | Maior recuperação energética na instalação, balanço energético inferior, viabilidade técnica e ambiental questionável por inibir reciclagem e gerar produtos perigosos            | Menor recuperação energética na instalação, balanço energético superior. Há viabilidade técnica e ambiental pela reciclagem integral dos secos e estabilização dos resíduos úmidos |
| Aspecto 7  | Redução de emissões antrópicas de gases de efeito estufa – GEE e (PNMC, Art. 4º II, Art. 6º XII, Art.12)  | Menor redução de emissões de Gases de Efeito Estufa se comparada às emissões em aterros convencionais(2).   | Maior redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (em torno de 4 vezes maior) se comparada à emissão em aterros convencionais (2).   |

|                   |   |  |  |
|-------------------|---|--|--|
| <b>Aspecto 8</b>  | Contribuição ao compromisso internacional para corte de emissões brasileiras (PNMC art 30 II e V)   | Menor contribuição ao compromisso internacional de redução de emissões por gerar mais GEE se comparada às emissões em aterros convencionais                    | Maior contribuição ao compromisso internacional de redução de emissões por gerar menos GEE se comparada às emissões em aterros convencionais |
| <b>Aspecto 9</b>  | Estímulo a processos e tecnologias que propiciem maior economia de energia (PNMC, Art. 6º XII, Dec. 7217, Art. 3º V)  | Menor economia de energia por necessitar da combustão de produtos recicláveis. Pode necessitar do aporte de energia externa.                                   | Maior economia de energia (em torno de 2,5 vezes superior) por recuperar o biogás e conservar a energia dos recicláveis secos.               |
| <b>Aspecto 10</b> | Respeito ao compartilhamento de responsabilidades, individualizadas e encadeadas, pelo ciclo de vida dos produtos (PNRS, Art. 30)   | Não gera compartilhamento de responsabilidades em parte dos resíduos secos. Interrompe o ciclo de vida destes materiais.                                       | Beneficia-se do compartilhamento de responsabilidades e do desvio de resíduos secos  |
| <b>Aspecto 11</b> | Viabilização da obrigatoriedade da logística reversa e seus acordos setoriais, regulamentos e termos de compromissos (PNRS, Art. 33 I a VI, §1º)  | Não estimula a logística reversa de parte das embalagens e outros produtos. Pode inviabilizar a implementação de acordos, regulamentos e termos de compromisso | Estimula a logística reversa por utilizar apenas resíduos úmidos e ter a reciclagem ampla de resíduos secos como condição                    |
| <b>Aspecto 12</b> | Viabilização da incumbência dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos, de estabelecer o reaproveitamento de resíduos, o sistema de coleta seletiva e de compostagem (PNRS, Art.36) | Não favorece a realização da incumbência dos gestores públicos   | Favorece a realização da incumbência dos gestores públicos   |

(1) INSTITUTE FOR LOCAL SELF-RELIANCE in <http://www.ilsr.org/recycling/recyclingmeansbusiness.html>, 1997

(2) NOTA TÉCNICA DEN 06/08 Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS; MME, EPE, Rio de Janeiro, nov. 2008;