



ESTUDO COMPARATIVO PARA O TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ATERROS SANITÁRIOS X INCINERAÇÃO

André de Carvalho Paro¹

Fernando Cörner da Costa²

Suani Teixeira Coelho³

RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo comparativo da geração de energia elétrica e emissões de gases do efeito estufa a partir de aterros sanitários e usinas de incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU). É apresentado um panorama do tratamento e disposição de lixo no Brasil e no município de São Paulo, local escolhido como cenário para a elaboração do estudo. São apresentadas as duas tecnologias a serem estudadas e suas premissas básicas para geração de energia elétrica e emissões de gás carbônico. O estudo de caso mostra as vantagens e desvantagens técnicas da aplicação de cada tecnologia. A geração de energia elétrica e conseqüentes emissões de CO₂ são maiores na opção de incineração. No entanto, esta tecnologia apresenta maiores vantagens econômicas com relação ao custo de administração pública dos RSU, devendo-se aprofundar os estudos em torno desta tecnologia no que diz respeito aos seus impactos ambientais. Por fim, são apontados caminhos para a continuidade do desenvolvimento deste tema.

PALAVRAS -CHAVE: resíduos sólidos urbanos, aterro sanitário, incineração, energia elétrica

1 Engº Eletricista pela Poli-USP, M.Sc. em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP.

2 Engº Mecânico pela PUC-RJ, Engº de Segurança pela UERJ, M.Sc. em Processos Químicos e Bioquímicos pelo Instituto Mauá de Tecnologia.

3 Engª Química pela FAAP, M.Sc. e Ph.D. pelo PIPGE do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP e Secretária Executiva do CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa



ABSTRACT

This paper intends to present a comparative study on electricity generation and carbon emissions by landfills and solid waste incineration plants. An overview on the treatment and disposal of solid waste in Brazil as a whole and in São Paulo municipality are presented. The electric generation and consequent gas emissions of the incineration option are superior. On the other hand, this technology presents better economic advantages related to the public waste administration cost than landfill option, so the studies about its environmental impacts should be improved. Other ways to keep continued the study around this theme are presented at last.

KEYWORDS: solid waste, landfill, incineration, electric energy

1. INTRODUÇÃO

Dentre os intrínsecos problemas gerados pela sociedade moderna, que vive em cidades que se agigantam, encontram-se a grande variedade de resíduos produzidos, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos. A disposição desses resíduos apresenta-se diretamente envolvida com os problemas da saúde pública, do meio ambiente e da questão social.

A geração de resíduos sólidos domiciliares no Brasil, segundo Monteiro et al. (2001), pode atingir valores de até 1,3 kg/habitante/dia nas grandes cidades como São Paulo, Rio de Janeiro e Curitiba.

A deficiência da reciclagem acarreta na majoração desnecessária do volume de RSU nos aterros sanitários, cuja capacidade de deposição já se encontra próxima do limite. Além da problemática dos RSU, existem fortes perspectivas de problemas na disponibilidade de energia elétrica no curto prazo, basicamente aquela proveniente das termelétricas a gás.

Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo efetuar um estudo comparativo entre a disposição do lixo urbano em aterros sanitários com aproveitamento do biogás e sua queima em usinas de incineração, sendo ambas as hipóteses com o objetivo da geração de energia elétrica. Serão também abordados os impactos ambientais e os custos envolvidos, considerando o universo de pesquisa o município de São Paulo que, segundo a Limpurb, produz cerca de 16.000 ton lixo/dia, sendo 9.000 ton de resíduos domiciliares.



2. A COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A composição dos resíduos sólidos domiciliares tem variado ao longo do tempo, em virtude do desenvolvimento da sociedade e de seus hábitos, como por exemplo a maior utilização de embalagens para produtos e alimentos, onde a participação dos plásticos e dos papelões revestidos com plásticos tem aumentado, substituindo vidro e latas metálicas. Até o início da década de 1960, na cidade de São Paulo, a presença de plásticos no lixo domiciliar era praticamente nula, tendo atingido valores superiores a 20% nos últimos anos do século passado, segundo D'ALMEIDA e VILHENA, 2000.

Analisando diversas fontes bibliográficas, verifica-se que ocorrem variações na composição dos RSU, o que torna difícil o estabelecimento de valores de poder calorífico inferior (PCI), tanto para o resíduo sólido urbano como o biogás dele decorrente. A composição de lixo urbano adotada foi a da Tabela 1, conforme Governo do Estado de São Paulo (2006).

Neste estudo, a fim de simplificar os cálculos da geração de energia elétrica a partir do biogás, será considerado o fator de 1,43 kWh/m³ de biogás, conforme CENBIO (2006), que já considera valores médios de PCI e rendimento da conversão eletromecânica de energia do biogás para eletricidade.

Tabela 1 – Composição do RSU – Poder Calorífico Inferior (Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2006)

	Proporção (%)	Poder calorífico específico (kJ/kg)	Poder calorífico proporcional (kJ/kg)
Orgânicos	48	5.706	2739
Metais ferrosos	3	0	0
Metais não-ferrosos	2	0	0
Papel	16	13941	2231
Papelão	6	13702	822
Plásticos	12	30478	3657
Vidro	2	0	0
Outros	11	6643	731
TOTAL	100	-	10.180

Obs: poder calorífico proporcional = 10.180 kJ/kg RSU = 2.431 kcal/kg RSU.



3. OS ATERROS SANITÁRIOS

Os aterros sanitários têm sido utilizados no Brasil como a forma mais econômica e ambientalmente segura para a disposição final de RSU. Seu princípio construtivo básico constitui-se nas seguintes etapas: impermeabilização de uma determinada área superficial do solo através de mantas plásticas, evitando a contaminação do solo pelo chorume; disposição do lixo urbano sobre esta área, cobrindo com uma camada de terra, garantindo a decomposição anaeróbica do qual resulta a formação do biogás. No aterro, devem ser dispostos coletores para a captura do biogás e drenos para a coleta do “chorume”, uma vez que estes resíduos são poluentes e devem ser tratados adequadamente.

A captura do biogás tem se tornado economicamente viável por duas motivações: a geração de energia elétrica para consumo próprio do aterro e venda do excedente; a obtenção de créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) com a redução das emissões de metano (CH_4). A queima do biogás gera créditos de carbono pois, ainda que a queima do metano tenha como resultado a emissão de dióxido de carbono (CO_2), o potencial de contribuição deste para o aquecimento global é cerca de vinte e uma vezes inferior ao potencial do metano, conforme IPCC (2000). As alternativas de aproveitamento do biogás pressupõem sua queima, seja em flare, em caldeira, em motor de combustão interna ou em turbina a gás.

O município de São Paulo deposita cerca de 13.000 toneladas de RSU diariamente nos aterros Caieiras e São João, pois o aterro Bandeirantes teve recentemente sua capacidade esgotada.

A composição do biogás gerado pelos RSU do município de São Paulo é a apresentada na Tabela 2. Tais valores tomaram por base o levantamento da USEPA (1997), que será utilizada neste estudo para estimar as emissões de CO_2 decorrentes da queima do biogás em aterros sanitários.

Tabela 2 – Composição média do biogás – São Paulo (USEPA, 1997)

Componente	Participação (% molar)
Metano (CH_4)	55
Gás carbônico (CO_2)	40
Outros gases	5



4. A INCINERAÇÃO

As principais finalidades da incineração dos RSU são: destruir a patogenicidade ou periculosidade dos resíduos, reduzir significativamente a massa e o volume dos RSU para sua disposição final, e gerar energia elétrica. Existem basicamente quatro tipos de processos de incineração de RSU em escala comercial: combustão em grelha; combustão em câmaras múltiplas; combustão em leito fluidizado; e combustão em corpo rotativo.

E, no controle da poluição do ar, a etapa do resfriamento rápido (*quenching*) é muito importante para minimizar a formação das dioxinas e furanos, reduzindo o volume dos gases no tratamento posterior de remoção de particulados, remoção de gases ácidos e eliminação de névoa (*demister*) antes do lançamento na atmosfera.

As dioxinas e os furanos são compostos considerados com elevado grau de toxicidade para a vida animal e, em particular, para os seres humanos. Portanto os processos de combustão e os produtos químicos seriam os dois grandes grupos que poderiam gerar dioxinas e furanos (WHO/EURO, 1987 apud ASSUNÇÃO, 1999), o que leva à reflexão sobre os riscos da queima não controlada de resíduos sólidos nos lixões em baixas temperaturas.

5. ESTUDO COMPARATIVO: ATERRO X INCINERADORES

De posse das informações a respeito destas duas tecnologias para disposição e tratamento dos resíduos sólidos urbanos, pode-se apresentar de forma preliminar, suas características, vantagens e desvantagens. A Tabela 3 mostra as vantagens e desvantagens comparativas entre Aterros Sanitários e Incineradores de lixo.

À luz destas características, referentes às duas tecnologias para disposição do RSU, o presente estudo visa comparar o potencial de geração de energia elétrica e as emissões gasosas entre as mesmas.



Tabela 3 – Tabela comparativa – Aterros Sanitários e Incineradores

Aterros Sanitários	Usina de Incineração
<p style="text-align: center;">VANTAGENS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recebem os RSU praticamente da maneira como são recolhidos, através das estações de transbordo; • Dispõem o lixo de maneira adequada ambientalmente; • Geram biogás que pode ser capturado e aproveitado; • Exige a captura e o tratamento do “chorume” • Emissão de carbono é distribuída no tempo, uma vez que o ciclo de vida de um aterro é de em média 40 anos. 	<p style="text-align: center;">VANTAGENS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduz 70 – 75% da massa e cerca de 90% do volume dos RSU; • Incentiva a triagem e reciclagem de materiais, uma vez que alguns deles não podem ser inseridos no incinerador; • Não exige grandes áreas como o aterro, apenas a área da usina; • Inexiste o “chorume”; • Elimina emissões de CH₄; • Gera significativa quantidade de energia elétrica, reduzindo a queima de combustíveis fósseis em termelétricas.
<p style="text-align: center;">DESVANTAGENS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exige grandes áreas para implantação; • Impossibilita o uso da área por muitos anos após o fechamento do aterro; • Exige topografia adequada; • Provoca grande movimentação de terra e resíduos; • Gera menor quantidade de energia elétrica ao longo do tempo; • Após capacidade esgotada, exige ainda cuidados e manutenção por pelo menos 30 anos. 	<p style="text-align: center;">DESVANTAGENS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Necessita tratamento do lixo urbano para retirada de metais, vidro, redução de resíduos de alimentos e umidade, antes do envio para incineração; • Emite grande quantidade de CO₂, mas tais emissões podem ser compensadas com as respectivas reduções nas termelétricas; • Pode emitir poluentes como CO, SO_x, NO_x, material particulado, dioxinas e furanos caso medidas mitigadoras não sejam tomadas.

Para isto, serão estudadas as implantações de duas unidades para disposição de RSU, um aterro sanitário e uma usina de incineração de lixo, ambas com a mesma capacidade de processamento, de 500.000 ton/ano. As premissas numéricas para a realização do estudo comparativo estão indicadas na Tabela 4.



Tabela 4 – Premissas para o estudo comparativo

Aterro Sanitário	Usina de Incineração
PREMISSAS	PREMISSAS
<ul style="list-style-type: none"> • Combustível: gás de aterro sanitário proveniente de RSU com PCI = 10.000 kJ/kg • Recebe 500.000 ton/ano de lixo urbano • Cálculo da produção de biogás segundo o IPCC • Duração: 20 anos (disposição) + 40 anos (“after care”) • - Parte do metano é convertido em energia elétrica através de motores a combustão ciclo Otto, sendo o restante queimado em “flare”. • Taxa de conversão de 1,43kWh/m³ de biogás. Fonte CARDOSO (2001) apud Cenbio (2006) 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustível: resíduo sólido urbano com PCI = 10.000 kJ/kg • Alimentação: 57 ton resíduo/hora, equivalente a 500.000 ton/ano • Vida útil: 20 anos • Caldeira de RSU @ 100bar, 525°C • Turbogenerador de condensação, para geração de EE com toda a energia disponível no vapor. • Modelamento com software GateCycle GE Energy

De posse destas premissas, foi calculada a geração de energia elétrica considerando-se a disponibilidade dos resíduos sólidos urbanos por um período de 20 anos para as duas opções.

5.1. Geração elétrica a partir do biogás

Para o cálculo da geração de energia elétrica no aterro sanitário deste estudo, foi considerada a metodologia do IPCC (2000). Calculando-se o total de biogás gerado no aterro sanitário ao longo de sua vida útil, que compreende os 20 anos de deposição do lixo mais o período de geração exponencial, e utilizando-se o fator de 1,43 kWh/m³ já mencionado, chegou-se aos valores mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores finais de geração de Biogás e EE – Aterro Sanitário

Volume de biogás ao longo da vida útil energética do aterro	795.998.264 m ³
Montante de energia elétrica ao longo da vida útil do aterro (20 + 40 anos)	1.138.277.517 kWh
Quantidade total de CO ₂ no aterro	929,185 ton



Para o cálculo das emissões de CO_2 decorrentes da formação e queima do biogás no aterro sanitário, considerou-se que 100% do metano gerado foi capturado e queimado na geração termelétrica (metodologia apresentada por ECEN, 2000 e dados por MCT apud DUBEUX, 2007).

Com relação aos custos associados a esta alternativa, não foi prevista neste estudo uma análise econômica referente a investimentos ou ciclo de vida do empreendimento. No entanto é interessante apresentar dados referentes ao estudo do Governo do Estado de São Paulo (2006). Para um aterro sanitário com a mesma capacidade, foi levantado o custo total de propriedade e determinada a taxa do lixo que necessitaria ser cobrada para cobrir os custos totais do ciclo de vida do aterro. Os resultados apontam para um custo inicial de investimento da ordem de R\$75 milhões e taxas de coleta de lixo variando entre R\$ 67,00 e R\$ 97,00/tonelada de RSU.

5.2. Geração de energia elétrica a partir de usina de incineração

Para o cálculo da geração de energia elétrica na usina de incineração deste estudo, foi desenvolvido um modelo de usina de geração termelétrica composta por uma caldeira de combustão em grelha e um turbogerador a vapor. Os cálculos foram realizados a partir deste modelo, desenvolvido no software Gate Cycle 5.6 GE Energy®, para análise de ciclos térmicos energéticos. Os dados de entrada para a análise foram:

- Combustível: resíduo sólido urbano com PCI = 10.000 kJ/kg
- Alimentação: 57 ton resíduo/hora, equivalente a 500.000 ton/ano
- Caldeira de RSU @ 100 bar, 525°C
- Turbogenerador de condensação, para geração de EE com toda a energia disponível no vapor.

Simulando-se a queima de todo o resíduo sólido urbano diretamente no sistema acima ao longo dos 20 anos de disponibilidade de lixo, e utilizando-se os demais parâmetros já mencionados, chegou-se aos valores mostrados na Tabela 6.



Tabela 6 – Valores finais de geração de EE – Usina de Incineração

Montante de energia elétrica ao longo da vida útil da usina (20 anos)	4.134.720.000 kWh
Volume total de CO ₂ na incineração	9.772,8 ton

Para o cálculo das emissões de CO₂ decorrentes da queima na usina de incineração, o RSU foi considerado com alto teor de biomassa (orgânicos + papel + papelão = 70%) de acordo com a metodologia apresentada por ECEN (2000) e dados por MCT apud DUBEUX (2007). É importante ressaltar que esta emissão se dá ao longo dos 20 anos de operação da usina.

A incineração controlada dos RSU tornou-se uma fonte menos importante de emissão de dioxinas e furanos, de acordo com a referência do EPA – Office of Air Planning & Standards (2002). Desta maneira, pode-se dizer que, com a atual tecnologia disponível para incineração, as emissões de dioxinas e furanos são consideradas de baixíssimo impacto.

No estudo do Governo do Estado de São Paulo (2006), para uma usina de incineração com a capacidade de processamento de 500.000 ton RSU/ano, foi levantado o custo total de propriedade e determinada a taxa do lixo que seria cobrada para cobrir os custos totais do ciclo de vida da usina. Os resultados apontam para um custo inicial de investimento da ordem de R\$563 milhões e taxas de coleta de lixo variando entre R\$50,00 e R\$71,00/ton de lixo.

6. RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1. Resultados

O aterro sanitário apresenta sua geração total de energia elétrica cerca de 4 vezes inferior comparado à usina de incineração, sendo a geração de CO₂ pela queima do metano cerca de 10 vezes inferior àquela decorrente da queima direta do RSU. Isto se explica pelo fato de que, na usina de incineração, todo poder calorífico e carbono presentes no RSU estão sendo queimados para geração de energia elétrica e conseqüentes emissões. Salienta-se que não foi contabilizada a emissão natural do gás carbônico intrínseco ao biogás ainda não queimado. Uma contabilização apurada das emissões totais de CO₂ para as duas opções, somando não somente a parcela da queima dos combustíveis mas também as parcelas de todo o pro-



cesso, pode trazer resultados diferentes.

É importante ressaltar que, embora partindo da mesma quantidade de RSU, as duas tecnologias tenham tempos diferentes de processamento. Enquanto o aterro sanitário leva 60 anos para aproveitar o seu potencial energético a usina de incineração o faz em 20 anos, reduzindo instantaneamente todo RSU disponibilizado.

Dado que o aterro sanitário não converte todo o poder calorífico do RSU, mas apenas do biogás dele resultante, decorrem daí duas conseqüências:

- ao final de toda sua vida útil, o resíduo remanescente tem ainda algum poder calorífico;
- grande parcela do carbono presente no RSU depositado no aterro fica fixado no solo, dado que apenas o biogás representa a parcela de carbono que se desprende.

A respeito dos custos abordados para cada tecnologia, embora a opção de incineração tenha investimento inicial muito superior ao do aterro sanitário, as tarifas de lixo dela decorrentes são menores, o que indica um menor custo de administração do lixo no longo prazo para o poder público.

A opção de incineração elimina o RSU quase imediatamente, o que representa a redução do passivo em resíduos que o aterro representa, o que exige cuidados por até 40 anos após a deposição final dos resíduos.

6.2. Comentários finais

Gerir eficientemente os RSU proporciona a reciclagem de matérias primas importantes como vidro, metais e papel. O material restante sendo destinado para uso energético contribui para a redução do consumo dos combustíveis fósseis que, de outra forma, seriam destinados à geração de energia elétrica. Isto fica muito claro na opção de incineração do RSU, uma vez que a energia elétrica gerada em larga escala por usinas termelétricas de incineração pode substituir outras usinas termelétricas que utilizem combustíveis fósseis.

Cabe aqui uma discussão a respeito da consideração do RSU como biomassa para efeitos de balanço de carbono. Pela metodologia do IPCC, a geração elétrica a partir da biomassa tem emissão de CO₂ nula, uma vez



que a biomassa captura CO_2 da atmosfera. Pois bem, mas se 70% ou mais do RSU é composto pela biomassa, o mesmo deveria também, ainda que parcialmente, ser beneficiado desta regra. Desta forma, a incineração de RSU não só teria balanço de carbono nulo, como poderia receber créditos de carbono pela substituição de usinas a combustíveis fósseis.

6.3. Desenvolvimento futuro

Para desenvolvimento futuro, apontam-se abaixo itens que podem contribuir com o desenvolvimento científico acerca deste assunto:

A padronização da composição do RSU e de seu poder calorífico seriam muito valiosas, embora de difícil obtenção. Acredita-se que o desenvolvimento de metodologias de triagem e reciclagem que pudessem ser utilizadas em larga escala nos municípios brasileiros poderia levar a valores de RSU final (pós-triagem) com características mais semelhantes.

O cálculo de créditos de carbono, advindos da gestão integrada de RSU e posterior disposição final nas duas tecnologias aqui abordadas, seria interessante para apontar o passivo em emissões para o aquecimento global de cada tecnologia e suas conseqüências econômicas para cada opção.

Dado que a utilização de aterros sanitários com bom controle de emissões é recente no Brasil, o meio científico carece de estudos a respeito do poder calorífico remanescente no RSU após a vida útil total do aterro sanitário. Estudos deste tipo podem revelar no futuro novas oportunidades de aproveitamento energético do lixo.

7. BIBLIOGRAFIA

ASSUNÇÃO, J. V.; PESQUERO, C. R. 1999. "Dioxinas e furanos: origens e riscos". Ver. Saúde Pública vol. 33 n.5 São Paulo.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2006. "Aproveitamento do Biogás Proveniente do Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás". Relatório de Atividades Meta 1 / Fase 1.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006. "Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2006", Governo do Esta-



do de São Paulo – Secretaria do Meio Ambiente, Série Relatórios, São Paulo. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>.

D'ALMEIDA, M. L.; VILHENA, A. 2000. "Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado". IPT / CEMPRE, São Paulo, 370p.

DUBEUX, Carolina B. S. 2007. "Mitigação de emissões de gases do efeito estufa por municípios brasileiros: metodologias para elaboração de inventários setoriais e cenários de emissões como instrumentos de planejamento". Tese de Doutorado, UFRJ, 258p.

ECEN – Jornal e&e – Economia e Energia, nº24, Jan.-Fev./2001, Fornecimento de instrumentos de avaliação de emissões de gases do efeito estufa acopladas a uma matriz energética". ISSN1518-2932. Disponível em <http://ecen.com/>.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO – Secretaria do Meio Ambiente; Governo do Estado da Baviera – Secretaria do Meio Ambiente, Saúde Pública e Proteção ao Consumidor, 2006. "Total costs of ownership: Comparison Incineration Plant-Landfill - Technical Co-Operation Project Bavaria-Sao Paulo". São Paulo.

Grupo Kompac – Energia e Meio Ambiente, Kogenergy International, 2007. "PROJETO RECIFE ENERGIA - Destinação Final de Resíduos Urbanos - Geração de Energia Renovável com Combustível Derivado dos Resíduos – CDR". Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/10/recife_energia.pdf.

HENRIQUES, Rachel Martins. 2004. "Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica". Dissertação de Mestrado, UFRJ, 190p.

ICBE – International Carbon Bank & Exchange – Volume Calculation of one ton CO₂, 2007. Disponível em: <http://www.icbe.com/carbondatabase>.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change 2000. "Third Annual Report", Cambridge University Press.

MONTEIRO, José Henrique Penido [et al]. 2001. "Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos." Rio de Janeiro: IBAM.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1997. "Locating and estimating air emissions from sources of dioxins and furans", EPA-454/R-97-003.



241p.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – CHEMICALS, 2002. Eastern and western South America Regional Report, Global Environment Facility.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY . 1997. "Feasibility assessment for gas-to-energy at selected landfills in São Paulo, Brazil. Public Review Draft". EPA68-W6-004.

WHO/EURO, World Health Organization. Regional Office for Europe. 1987. "Dioxins and furans from municipal incinerators". Copenhagen: WHO. (WHO – Environmental Health Series, 17).