



## Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro Sanitário

G. F. da Silva<sup>a</sup>, C. M. V. B. de Almeida<sup>b</sup>

*a. Universidade Paulista, São Paulo, gfrimaio@gmail.com*

*b. Universidade Paulista, São Paulo, cmvbag@unip.br*

---

### Resumo

Em países em desenvolvimento os aterros sanitários se destacam como a técnica de disposição final de resíduos sólidos urbanos por apresentar menor custo e apresentar técnicas de engenharia que visam minimizar os impactos à saúde pública e ambientais. Nesse sentido este estudo realiza a síntese em emergia de um aterro sanitário na cidade de São Paulo, que possui um projeto de compensação ambiental e geração de energia elétrica por meio da queima do biogás. A emergia total do sistema corresponde a  $1,22 \times 10^{20}$  sej, as transformidades do RSU e da energia elétrica foram correspondem a  $8,36 \times 10^{11}$  sej/J e  $4,67 \times 10^3$ .

**Palavras-chave:** Emergia, Aterro sanitário, biogás, resíduos sólidos urbanos.

---

### 1 Introdução

Os aterros sanitários destacam-se entre as técnicas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. Segundo Mariano (1999) é técnica a mais empregada em países em desenvolvimento por apresentar menor custo, quando comparado às outras técnicas, a exemplo da incineração.

Pelo fato dos aterros sanitários possuírem uma técnica de engenharia apropriada, os impactos à saúde pública e ambientais são minimizados por meio de um sistema de drenagem e coleta de lixiviados, impermeabilização de base e cobertura do maciço aterrado, captação do biogás, dentre outras. Estas medidas visam à proteção do solo, da qualidade do ar e dos corpos d' água.

O biogás produzido a partir da decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos é um dos gases que contribui para o fenômeno conhecido como efeito estufa. De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006) a concentração de metano ( $\text{CH}_4$ ) no biogás de aterro sanitário corresponde a 50%.

Considerando que a queima do biogás, além de gerar eletricidade transforma o metano em dióxido de carbono e vapor d' água, seu aproveitamento deve ser considerado, uma vez que num período de 100 anos, 1 grama de metano contribui 21 vezes mais para a formação do efeito estufa do que 1 grama de dióxido de carbono (WORLD BANK, 2004).

Para Coelho (2008), a criação de cotas de emissões de gases de efeito, advindas

principalmente do aproveitamento energético do biogás tem despertado crescente interesse em países como os Estados Unidos e membros da União Europeia em realizar investimentos em países em desenvolvimento como o Brasil.

Tendo em vista que o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos se constitui em uma questão de suma importância, este estudo tem por objetivo utilizar a síntese em energia para avaliar o suporte ambiental necessário para a implantação e operação do aterro sanitário Sítio São João, que possui acoplado um projeto de compensação ambiental e um sistema de captação de biogás para a geração de energia elétrica descentralizada para a cidade de São Paulo.

Ocupando uma área de 80 hectares, dos quais 50 hectares foram destinados à deposição de resíduos sólidos urbanos, o aterro sanitário Sítio São João recebeu resíduos sólidos durante 17 anos no período compreendido entre 1992 a 2009, tendo recebido cerca de 29 mil toneladas de resíduos sólidos.

Pelo fato da área ocupada por este empreendimento caracterizar-se por um local anteriormente coberto pelo bioma mata atlântica, e considerando que sua instalação e operação promoveram impactos ambientais ao meio local, foi implantado em suas adjacências, em 2009, um projeto de compensação ambiental visando atender as exigências efetuadas pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente.

As atividades de captação e queima do biogás para produção de energia elétrica foi iniciada em 2007, ocupando uma área de 2.416 m<sup>2</sup> dentro da área do aterro sanitário Sítio São João. Operando com 16 grupos de motogeradores, produz energia elétrica para alimentar uma cidade de 400 mil habitantes (BIOGÁS-SÃO JOÃO, 2008).

## 2 Metodologia

A metodologia utilizada neste estudo é a síntese em energia, desenvolvida por Odum (1996), capaz de avaliar a utilização de recursos naturais ou antropogênicos por um determinado sistema.

Para o levantamento de todos os dados da fase de implantação e operação dos sistemas deste estudo, foram realizadas visitas *in loco* que permitiram quantificar materiais, equipamentos e mão-de-obra, considerando as fases de implantação e operação.

A contabilidade dos serviços do ambiente, como ocupação de solo, calor geotérmico, insolação e evapotranspiração, foram realizadas pesquisas em órgãos específicos e na literatura.

Para melhor entendimento do sistema, a metodologia utiliza os diagramas de energia que possui uma simbologia própria. Os fluxos de entrada dos sistemas estudados são classificados em três categorias: recursos renováveis (R), não renováveis (N) e provenientes da economia (F).

O tratamento dos dados consistiu em realizar conversões e/ou transformações, que possibilitaram estimar individualmente todos os fluxos de energia que o sistema utiliza. Alguns insumos foram contabilizados considerando sua massa, a exemplo de maquinários e materiais de construção. No caso das sementes, foi utilizada a razão energia/dólar do Brasil, que compreende  $1,20 \times 10^{13}$  (COELHO ET AL., 2002).

A fase posterior compreendeu encontrar com base na literatura, o valor da transformidade, energia específica ou energia por unidade de cada insumo. A transformidade permite mensurar a quantidade de joules de energia necessários para produzir um joule de determinado produto ou serviço (sej/J).

A multiplicação das quantidades de cada insumo por sua respectiva transformidade permite colocar os fluxos de energia do sistema em uma métrica comum, o joule de energia solar (sej).

Após a realização das etapas descritas foi construída a tabela de energia, que mostra a energia de cada fluxo, sua classificação quanto aos recursos, sua transformidade, a energia de cada fluxo, como também a energia total do sistema.

Odum (1996), em sua metodologia desenvolveu o índice de rendimento em energia (EYR, *emergy yield ratio*), o índice de investimento em energia (EIR, *emergy investment ratio*) e o índice de carga ambiental (ELR, *environmental loading ratio*), que são capazes de fornecer informações relevantes dos sistemas estudados, considerando a capacidade de carga do ambiente. Por meio dos fluxos de entrada do sistema, avaliam-se os indicadores da síntese em energia do sistema em estudo, enfatizando a interação entre os sistemas e o ambiente no qual está inserido (Tabela 1).

Tabela 1. Apresentação e descrição dos indicadores da síntese em energia.

Descrição	Indicador		Equação	
	EYR		Y/F	
Rendimento em energia ( <i>emergy yield ratio</i> ): É a relação entre a energia total contida no produto (Y) em relação aos recursos provenientes da economia (F), ou seja, é a energia do sistema dividido pela entrada dos fluxos de energia provenientes da economia. É um indicador de retorno de energia sobre o investimento realizado, fornecendo a energia líquida do sistema, ou seja a contribuição da energia proveniente do sistema de produção (R + N). Demonstra a capacidade do processo para explorar os recursos locais provenientes da natureza. O valor mínimo é a unidade.			ou	$(R + N + F)/F$
Índice de carga ambiental ( <i>environmental loading ratio</i> ): É definido como a relação entre energia de entrada dos recursos locais não renováveis e de recursos provenientes da economia pela energia do recurso local renovável. Avalia o estresse imposto ao ambiente, quando menor o valor, menor o estresse causado.	ELR			$(N+F)/R$
Investimento em energia é uma relação entre recursos provenientes da economia e os recursos gratuitos. Um índice baixo indica que o ambiente provê mais recursos para o processo que a economia (materiais e serviços).	EIR			$F/(R+N)$
Índice de Sustentabilidade: Mede a taxa de sustentabilidade. Valores maiores indicam sustentabilidade por períodos de tempo maior. Um sistema para ser considerado sustentável por longo prazo deve ter uma baixa carga ambiental e alto rendimento em energia.	ESI			EYL/ELR
Percentual de recursos renováveis: Indica a porcentagem de fluxo de energia que é proveniente de fontes renováveis. Os sistemas com alto	%R			

valor deste índice são mais sustentáveis.

### 3 Resultados e discussão

No diagrama da Fig. 1 visualizam-se os fluxos dos componentes que o sistema do aterro sanitário com projeto de compensação ambiental e produção de energia elétrica utiliza, e as interações existentes entre eles.

Cada linha que adentra no diagrama representa um recurso utilizado pelo sistema em forma de fluxo de energia, podendo ser renovável (R), não renovável (N) ou proveniente da economia (F).

A fase de implantação é constituída predominantemente por recursos provenientes da economia (F), com exceção do solo que é um recurso não renovável (N).

Os recursos renováveis (R), como sol, evapotranspiração, pluviosidade, RSU e energia geotérmica estão situados à esquerda do diagrama e são contabilizados na fase de operação do sistema.

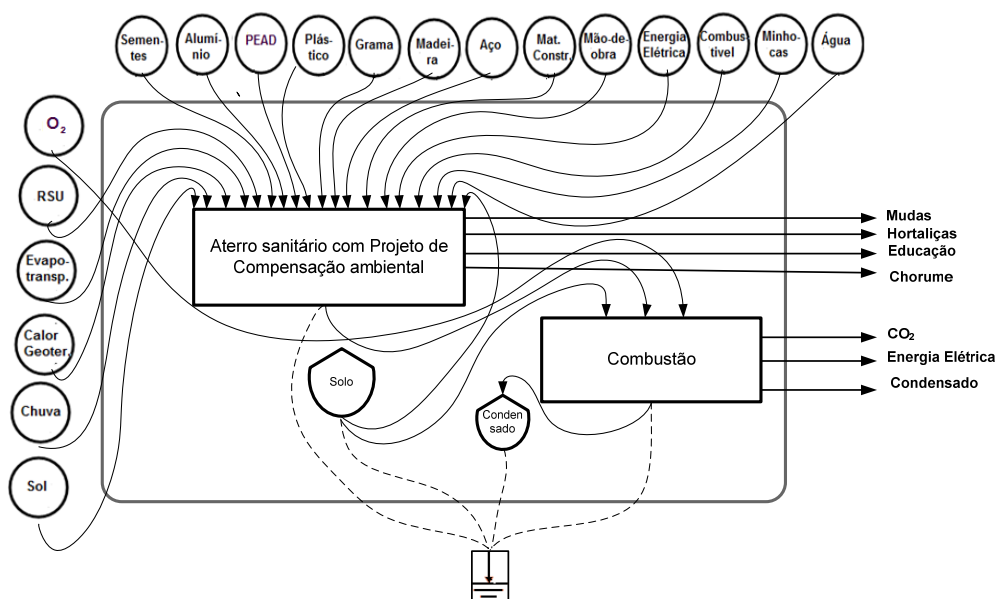


Figura 1. Diagrama de energia do aterro sanitário com compensação ambiental e produção de energia elétrica

No diagrama abaixo (Fig. 2) visualiza-se em detalhes a caixa da Fig. 1, correspondente ao Aterro sanitário com projeto de compensação ambiental.

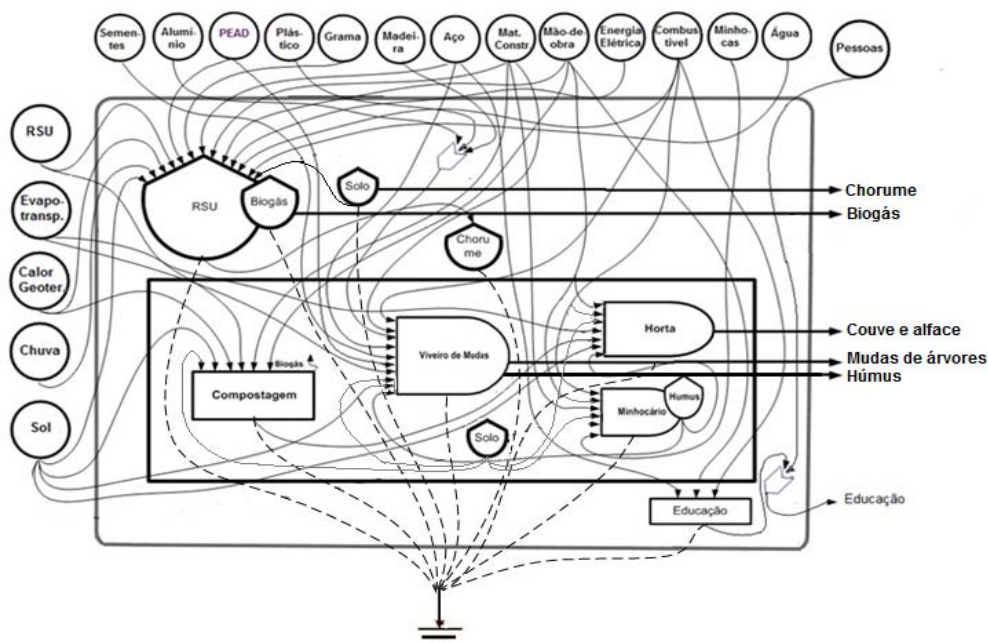


Figura 2. Diagrama de energia do aterro sanitário com Projeto de compensação ambiental

Na tabela 2, apresentam-se somente os fluxos de energia e material mais significativos para o sistema do aterro sanitário com projeto de compensação ambiental e produção de energia elétrica, tendo sido excluídos os fluxos cujos percentuais são inferiores a 1%.

Tabela 2. Fluxos de energia do aterro sanitário São João com projeto de compensação ambiental e produção de energia elétrica da fase operacional para o ano de 2009 – 2010.

Nota	Descrição	Unida	Classe	Valor /(un/ano)	Energia por unidade /(sej/un)	Correção	Energia* /(sej/ano)	% /(sej/sej)
<b>Implantação</b>								
1	Solo	J	N	$6,28 \times 10^{13}$	$2,21 \times 10^4$	1,00	$1,39 \times 10^{18}$	1,14%
2	Concreto	g	F	$2,46 \times 10^9$	$1,54 \times 10^9$	1,68	$6,37 \times 10^{18}$	5,21%
3	Geom. PEAD	g	F	$1,68 \times 10^9$	$8,85 \times 10^9$	1,00	$1,49 \times 10^{19}$	12,18%
<b>Operação</b>								
4	RSU	g	F	$6,35 \times 10^{11}$	$1,33 \times 10^7$	1,00	$8,45 \cdot 10^{18}$	6,91%
5	Britas	g	F	$2,68 \times 10^{10}$	$1,00 \times 10^9$	1,68	$4,50 \times 10^{19}$	36,79%
6	O <sub>2</sub> para queima	g	R	$8,03 \times 10^{11}$	$5,16 \times 10^7$	1,00	$4,14 \times 10^{19}$	33,84%
7	Mão-de-obra	J	F	$6,26 \times 10^{11}$	$4,30 \times 10^6$	1,00	$2,69 \times 10^{18}$	2,20%
Energia Total							$1,22 \times 10^{20}$	100%

\* Cálculos completos com o autor

A energia total do sistema corresponde a  $1,22 \times 10^{20}$  sej/ano. Os recursos provenientes da economia (F) mais significativos são as britas representam 36,79% e a geomembrana PEAD 12,18%, que juntas representam 48,97% do sistema.

A utilização do oxigênio (recurso renovável) para a queima do metano representa 33,84% da energia total do sistema.

A utilização do oxigênio (recurso renovável) para a queima do metano representa 33,84% da energia total do sistema.

Este estudo permitiu calcular a transformidade da energia elétrica que corresponde a  $4,67 \times 10^3$  sej/J e a energia por unidade do processo de aterramento do RSU cujo valor é de  $8,36 \times 10^{11}$  sej/m<sup>3</sup>.

De acordo com as tabelas 1 e 2 apresentadas, os recursos são classificados em três categorias: renováveis (R), não renováveis (N) e provenientes da economia (F). Esta classificação dos insumos possibilita utilizar os indicadores da síntese em energia.

#### 4 Indicadores

De acordo com as tabelas apresentadas neste capítulo, os recursos são classificados em três categorias: renováveis (R), não renováveis (N) e provenientes da economia (F). Esta classificação dos insumos possibilita utilizar os indicadores da síntese em energia.

Visualizam-se na tabela 3 os resultados dos indicadores da síntese em energia para os sistemas estudados.

Tabela 3. Resultados dos indicadores da síntese em energia.

Indicadores da Síntese em energia	Aterro sanitário com projeto de compensação ambiental e produção de energia elétrica
EYR	1,54
EIR	1,86
ELR	1,95
ESI	0,79
%R	33,88%

O EYR é um indicador capaz de fornecer um índice da habilidade que o sistema possui para explorar recursos energéticos locais da natureza.

O resultado aponta que o sistema explora de maneira pouco eficiente os recursos locais, embora utilize grande parte de O<sub>2</sub> (recurso renovável) para a queima do biogás.

O indicador investimento em energia (EIR), que expressa a razão entre os insumos provenientes da economia (F) em relação aos recursos renováveis (R) e não renováveis (N) utilizados.

Por meio dos resultados deste indicador, podemos notar que os recursos provenientes na economia são utilizados quase que duas vezes mais, em relação aos recursos renováveis e não renováveis.

Outro indicador utilizado é o Índice de Carga Ambiental (ELR), que avalia o estresse ambiental, quanto menor seu valor, menor o estresse causado pelo sistema ao meio ambiente (BROWN E ULGIATI, 2002). Nesse contexto por meio do índice apresentado, podemos concluir que o sistema não causa grande estresse ao meio ambiente local.

O índice de Sustentabilidade (ESI) aponta que o sistema apresenta a sustentabilidade ao curto prazo.

O indicador de Percentual de Renovabilidade (%R) mostra que o sistema do Aterro sanitário com compensação Ambiental e aproveitamento energético utiliza 33,88% de recursos renováveis.

Os resultados obtidos pelos indicadores para os sistemas em estudo podem ser mais bem observados, quando se utiliza o diagrama ternário (BARRELA ET AL., 2005, ALMEIDA ET AL., 2005 e GIANNETTI ET AL., 2006).

Observa-se no diagrama triangular, Figura 3 que o sistema do que o sistema do Aterro sanitário com Projeto de compensação ambiental e recuperação de biogás aproxima-se do índice de sustentabilidade.

A energia total do sistema do aterro sanitário com Projeto de compensação ambiental e produção de energia elétrica é de  $1,22 \times 10^{20}$  sej/ano. Nesse sistema, os recursos provenientes da economia (F) mais significativos se igualam aos recursos do sistema anterior, onde as britas representam 36,79% e a geomembrana PEAD 12,18%, que juntas representam 48,97% do sistema.

A utilização do oxigênio (recurso renovável) para a queima do metano representa 33,84% da energia total do sistema.

Os resultados obtidos pelos indicadores para os sistemas em estudo podem ser mais bem observados, quando se utiliza o diagrama ternário (BARRELA ET AL., 2005, ALMEIDA ET AL., 2005 e GIANNETTI ET AL., 2006).

Observa-se no diagrama triangular, Figura 26 que o sistema do Aterro sanitário com Projeto de compensação ambiental não ocupa uma região de sustentabilidade.

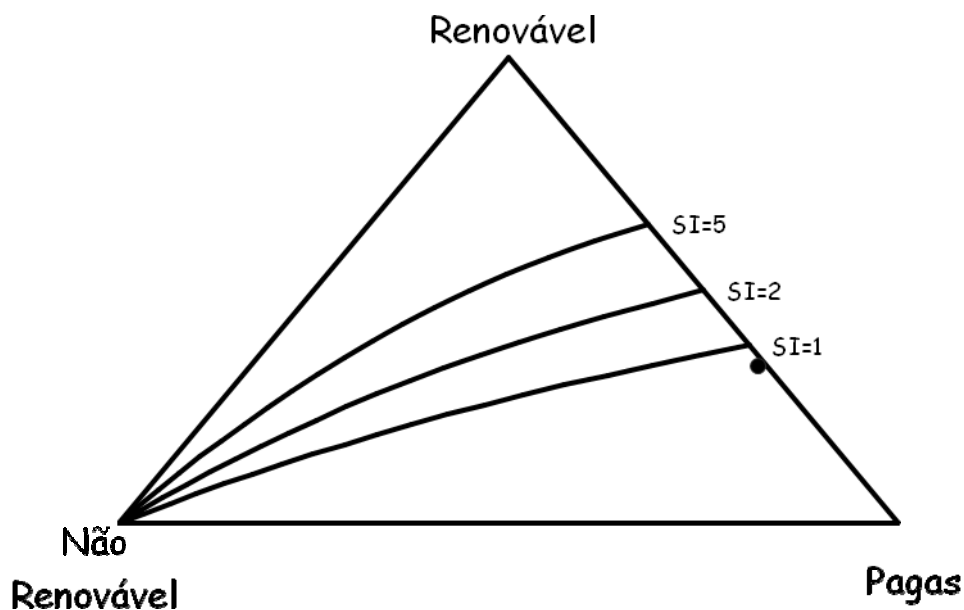


Figura 3. Diagrama ternário dos sistemas do Aterro sanitário com Projeto de compensação ambiental e Aterro sanitário com Projeto de compensação ambiental e produção de energia elétrica.

## 5 Conclusão

O sistema do aterro sanitário Sitio São João com projeto de compensação ambiental e produção de energia elétrica, analisado pelos indicadores demonstra

que faz uso, em sua maioria de recursos provenientes da economia. Este fato demonstra que o sistema explora de maneira pouco eficiente os recursos renováveis locais e se caracteriza como baixa sustentabilidade ou sustentabilidade de curto prazo.

Todavia justifica-se o investimento desses insumos visto que o sistema é implantado com a finalidade de mitigar impactos ambientais ainda maiores, na cidade de São Paulo, caso os resíduos fossem depositados de forma inadequada.

Podemos concluir que a queima do biogás para geração de energia elétrica mais amigável ao meio ambiente, à medida que faz maior uso de recursos naturais, sem contribuir para que ele se torne mais amigável ao meio ambiente, pois contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, sem considerar o fator econômico, pois gera divisas ao município e ao sistema por meio da comercialização da energia elétrica produzida e pela venda de créditos de carbono (que não faz parte deste estudo).

#### Referências

ARAÚJO, S. E., 2005 - Estudo do uso de recursos diretos e indiretos na coleta de resíduos sólidos urbano. 164p, Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Paulista (UNIP) São Paulo.

BIOGÁS-SÃO JOÃO, 2009 – Informações fornecidas pelos engenheiros e funcionários da empresa Biogás-São João Energia Ambiental S.A.

COELHO, O; ORTEGA, E; COMAR, V., 2002 - Balanço de Energia do Brasil, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Disponível em: <<http://www.fea.unicamp.br/docente/ortega/livro/C05-Brasil-COC.pdf>>. Acesso em 17.12.10.

HAUKOOS, D. S., 1998 - Sustainable Architecture and It's Relationship to Industrialized Building. Master Thesis, university of Florida, 1995 - p. 172) apud Buranakarn, V.; Evaluation of Recycling and Reuse of Building Materials Using the Energy Analysis Method. December. University of Florida.

MARIANO, M. O. H., 2001 - Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia São Carlos da Universidade de São Paulo, 408p.

ODUM, H.T., 1996 - Environmental accounting – Emergy and environmental decision making, Ed. John Wiley & Sons Ltd. p.370.

ROMITELLI, M.S., 2000 - Emergy analysis of the new Bolivian-Brazil gas pipeline (gasbol), Emergy Synthesis – Proceedings of the first biennial emergy analysis research conference, Gainesville, Florida, Ed. Mark T. Brown, c.5 p.53-70.

SILVA, C.C., 2006 - Estudo de caso de sistemas de tratamento de efluentes domésticos com o uso de indicadores ambientais. 110p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Paulista (UNIP) São Paulo.



TCHOBANOGLIOUS, G ; O'LEARY, P.R. Landfilling. In: KREITH, F., 1994 - Handbook of Solid Waste Management. New York, McGraw Hill, ISB 0.07-03-5876-1, 887P.

ULGIATI, S.; BROWN, M.T., 2002 - Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions. The case of electricity production. Journal of Cleaner Production.