



## **Comparação entre tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos.**

### ***Comparison between technologies for energy recovery from municipal solid waste.***

DOI: <https://doi.org/10.24979/ambiente.v1i1.924>

Gustavo de Lima Olivo - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP <https://orcid.org/0000-0001-6679-5510>  
Maria Cristina Rizk - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP <https://orcid.org/0000-0003-2414-6680>

**RESUMO:** O presente estudo trata de uma análise do potencial de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (RSU) e sua consequente redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Para o estudo, considerou-se uma produção diária de 330 toneladas de RSU e estimou-se a geração de energia elétrica pela incineração e pela recuperação de metano em aterro sanitário. A geração estimada de metano foi obtida por meio do modelo LandGEM 3.02 e o PCI dos RSU foi calculado por meio da lei de Dulong-Petit. As emissões de GEE foram estimadas de acordo com a metodologia proposta pela UNFCCC (2018). Os resultados mostraram que a incineração dos RSU geraria 77.500 MWh.ano<sup>-1</sup> de eletricidade e evitaria a emissão de 22.250 t CO<sub>2</sub>.ano<sup>-1</sup>. A recuperação de metano de aterro geraria 23.500 MWh.ano<sup>-1</sup> de eletricidade e evitaria a emissão de 12.500 t CO<sub>2</sub>.ano<sup>-1</sup>. Assim, em termos de recuperação energética, a incineração foi mais vantajosa, porém a escolha de tecnologias envolve, além de questões técnicas relativas à eficiência do processo, questões ambientais, sociais, políticas e econômicas.

**Palavras-chave:** Energia. Incineração. Metano. RSU.

**ABSTRACT:** The present study is an analysis of the potential for energy recovery of municipal solid waste (MSW) and its consequent reduction in greenhouse gases (GHG) emissions. For the study, a daily production of 330 tons of MSW was considered and the generation of electric energy was evaluated through the incineration and methane recovery of a landfill. Methane generation was obtained using the LandGEM 3.02 model and the MSW LCV was calculated using the Dulong-Petit law. GHG emissions were estimated using the methodology proposed by UNFCCC (2018). Results showed that incineration would generate 77.500 MWh.year<sup>-1</sup> of electricity and avoid the emission of 22.250 t CO<sub>2</sub>.year<sup>-1</sup>. Methane recovery would generate 23.500 MWh.year<sup>-1</sup> of electricity and avoid the emission of 12.500 t CO<sub>2</sub>.year<sup>-1</sup>. Thus, in terms of energy recovery, incineration was more advantageous, however the choice of technologies involves, in addition to technical issues related to efficiency of the process, environmental, social, political and economic issues.

**Keywords:** Energy. Incineration. Methane. MSW.

## INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) prevê a recuperação energética como uma alternativa para a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos. Dentre as tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (RSU), destacam-se a recuperação de metano dos aterros sanitários e a incineração.

A recuperação energética é prevista ainda na Política Nacional sobre Mudanças do Clima (Brasil, 2008) como estratégia para redução das emissões nacionais de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que contribui para a correta gestão dos resíduos sólidos e ainda produz energia considerada renovável.

Dentre as principais barreiras apontadas para viabilidade técnico-econômica da implementação de tecnologias de recuperação energética estão os custos de instalação e operação, a baixa quantidade de resíduo a ser tratado em cidades de médio e pequeno porte e a composição gravimétrica do resíduo (Barros, 2014). Parte destas dificuldades podem ser superadas a partir dos ganhos de escala e maior poder de negociação propiciados pela formação de consórcios intermunicipais, que precisam solucionar regionalmente os problemas referentes aos RSU, podendo considerar a opção de aproveitar a energia contida nos resíduos como alternativa para o problema, sendo, para isso, de fundamental importância conhecer a potencialidade de geração de energia, bem como avaliar a possibilidade de reduzir os impactos ambientais decorrentes dos tratamentos escolhidos.

Deste modo, o objetivo do presente trabalho foi estimar o potencial energético teórico proveniente do metano produzido no aterramento de RSU e da incineração de RSU e comparar os ganhos energéticos obtidos em cada tecnologia, bem como quantificar as emissões evitadas de gases do efeito estufa em cada tecnologia.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente, para obtenção de parâmetros necessários aos cálculos que serão aqui apresentados, assumiu-se que a unidade de geração de energia operaria por 30 anos e estaria localizada no estado de São Paulo, em um município ou consórcio intermunicipal cuja produção diária de resíduos sólidos urbanos seria da ordem de 330 t.dia<sup>-1</sup>.

Adotou-se também uma taxa anual de crescimento da geração de resíduos de 0,44% a.a. Este valor foi obtido a partir da média de crescimento da produção de resíduos entre os anos de 2013 e 2018, divulgados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2020).

A produção de metano no aterramento de RSU foi estimada por meio do modelo LandGEM 3.02 (EPA, 2005), cuja equação é apresentada a seguir (Equação 1):

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}}$$

Em que:  $Q_{CH_4}$  = geração anual de metano (m<sup>3</sup>/ano),  $i$  = incremento de 1 ano,  $n$  = (ano do cálculo) – (ano de início de operação do aterro),  $j$  = incremento de 0,1 ano,  $k$  = taxa de geração de metano (ano<sup>-1</sup>),  $L_0$  = potencial de geração de CH<sub>4</sub> por tonelada de resíduo depositado (m<sup>3</sup>/t),  $M_i$  = massa de resíduos depositada no  $i$ -ésimo ano (t),  $t_{ij}$  = idade da  $j$ -ésima massa  $M_i$  de resíduos depositada no  $i$ -ésimo ano (anos decimais).

Os valores de  $k$  e  $L_0$  foram de, respectivamente, 0,1 ano<sup>-1</sup> e 171 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>, obtidos a partir do projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) elaborado para o aterro Anaconda, localizado na cidade de Santa Isabel (SP) (Anaconda Ambiental e Empreendimentos Ltda, 2006) e massa aterrada de resíduos foi considerada como sendo de 330 t.dia<sup>-1</sup>.

O poder calorífico inferior (PCI) dos RSU foi

estimado por meio da lei de Dulong-Petit (POLI *et al.*, 2014), equação 2, apresentada a seguir:

$$PCI = (1 - w) \times \left[ 7831 \times C + 35932 \times \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2212 \times S + 1187 \times O + 578 \times N - 32 \right] - [(1 - w) \times 9 \times H + w] \times 583,2$$

Em que: PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal.kg<sup>-1</sup>), w = taxa de umidade do resíduo (%), C = % em massa e em base seca de carbono orgânico, H = % em massa e em base seca de hidrogênio, O = % em massa e em base seca de oxigênio, S = % em massa e em base seca de enxofre, N = % em massa e em base seca de nitrogênio.

A composição gravimétrica dos resíduos e a composição elementar adotadas para o cálculo do PCI, são apresentadas nas tabelas 1 e 2 abaixo:

**Tabela 1:** Composição gravimétrica estimada dos resíduos sólidos urbanos.

Material	Porcentagem (%)
Matéria orgânica	44,37
Plásticos	12,13
Papel, papelão e tetrapak	13,63
Vidro	2,73
Alumínio	0,48
Ferro	1,84
Têxteis, couro e borracha	4,76
Outros	20,06

**Fonte:** Valores médios calculados a partir de Brasil (2012) e Kim (2019).

**Tabela 2:** Composição elementar dos resíduos sólidos urbanos (% em base seca) e teor de umidade.

Material	C	H	O	N	S	Umidade
Matéria orgânica	48	6,4	37,6	2,6	0,4	70
Plásticos	60	7,2	22,8	0	0	2
Papel, papelão e tetrapak	40	5,9	44,6	0,3	0,2	6
Vidro	0	0	0	0	0	0,5
Alumínio	0	0	0	0	0	0,5
Ferro	0	0	0	0	0	0,5
Têxteis, couro e borracha	51,5	6,8	33,6	1,8	0,4	9
Outros	25	3	1	0,5	0,2	8

**Fonte:** Valores determinados a partir de Poletto Filho (2008) e Chakrabarti (2019).

A geração de energia elétrica pela recuperação de metano e pelo incinerador foi calculada, respectivamente, pelas equações 3 e 4 abaixo:

$$E_{dm} = Q_x \times P_{cm} \times E_c \times E_{mm} \times h_x \times 10^{-3} \div 31\,536\,000$$

$$E_{di} = G_i \times \frac{PCI}{240} \times E_{mi} \times h_o \times 0,28$$

Em que: E<sub>dm</sub> = Energia elétrica disponível pela queima de metano (MWh), Q<sub>x</sub> = Produção anual de metano estimado pelo modelo LandGEM (m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>), P<sub>cm</sub> = Poder calorífico do metano (35,530 kJ.m<sup>-3</sup> de metano), E<sub>c</sub> = Eficiência de coleta de gases (%), E<sub>mm</sub> = Eficiência do motor de combustão de metano (%), h<sub>d</sub> = tempo de funcionamento do motor em um ano (h), 31 536 000 = segundos em um ano, E<sub>gi</sub> = Energia elétrica disponível pela incineração (MWh), G<sub>i</sub> = Quantidade de resíduo incinerado (t.ano<sup>-1</sup>), PCI = poder calorífico dos resíduos (kcal.kg<sup>-1</sup>), E<sub>mi</sub> = Eficiência de conversão energética (%), h% = tempo de funcionamento de um incinerador (% de um ano).

O valor adotado para E<sub>c</sub> foi de 55,5% (Santos *et al.*, 2017), para E<sub>mm</sub> considerou-se uma eficiência de 35% (EPE, 2014), o tempo de operação h<sub>x</sub> e h% foi de 7.008 horas, o que equivale a 80% de um ano, e o valor estimado para E<sub>mi</sub> foi de 25%.

As emissões de CO<sub>2</sub> evitadas foram estimadas pela metodologia recomendada pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) para projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (UNFCCC, 2018). O cálculo foi feito por meio da multiplicação da energia gerada pelas tecnologias de aproveitamento energético, em MWh, pelo fator de emissão de gás carbônico da matriz energética brasileira. O cálculo do fator de emissão foi feito pela equação 5.

$$F_e = F_c w_c + F_o w_o$$

Em que:

F<sub>e</sub> = Fator de emissão de gás carbônico (tCO<sub>2</sub>/MWh);

F<sub>c</sub> = Fator de emissão médio da margem de

construção da matriz energética nacional (tCO<sub>2</sub>/MWh);

F<sub>o</sub> = Fator de emissão médio da margem de operação da matriz energética nacional (tCO<sub>2</sub>/MWh);

w<sub>c</sub> = Peso do fator F<sub>c</sub>;

w<sub>o</sub> = Peso do fator F<sub>o</sub>.

Os valores de F<sub>c</sub> e F<sub>o</sub> adotados foram de 0,137 e 0,539, respectivamente (BRASIL, 2019). Para w<sub>c</sub> e w<sub>o</sub> foi adotado o valor de 0,5 (UNFCCC, 2018).

Para o cálculo das emissões, considerou-se que a emissão de CO<sub>2</sub> pela combustão do metano é nula, uma vez que este carbono equivale à quantidade do gás que foi fixada pelos organismos fotossintetizantes (EPE, 2014).

Para o cálculo de emissões do incinerador, adotou-se uma correção relativa às emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da queima do plástico e que, portanto, não seriam neutras em carbono. Para tanto calculou-se a massa de CO<sub>2</sub> produzida pela queima de plástico a partir da proporção de carbono na composição elementar do material. Segundo Chandel *et al.* (2012) os filtros de um incinerador são capazes de reter até 90% das emissões de carbono. Assim, a correção para o incinerador foi feita subtraindo-se dos resultados obtidos a partir equação 5, 10% da massa calculada de CO<sub>2</sub>.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

**Tabela 3:** Geração estimada de energia e de emissões evitadas.

Tecnologia	Geração média estimada de energia elétrica (MWh.ano <sup>-1</sup> )	Emissão média estimada evitada de CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> .ano <sup>-1</sup> )
Incineração	77.500	22.250
Recuperação de metano	23.500	12.500

Os resultados apresentados são compatíveis com outros estudos de recuperação energética como os apresentados por EPE (2014) e Dalmo *et al.* (2019), mas como

foram baseados em dados teóricos, necessitam de investigação mais aprofundada para que sejam validados. O valor de PCI encontrado foi de 2.480 kcal.kg<sup>-1</sup>. Dentre as limitações dos modelos está a não incorporação da variação temporal da gravimetria e da quantidade gerada de resíduos, o que pode influenciar positiva ou negativamente a geração de energia. O modelo LandGEM, por exemplo, apresenta variáveis previamente estipuladas, o que pode induzir a superestimações ou subestimações da quantidade de metano gerado.

Na incineração, a quantidade de energia gerada é proporcional à quantidade de resíduo incinerado, respeitados os limites da unidade de processamento de resíduos. Na recuperação de metano, porém, existe um aumento do volume de metano disponível ao longo do tempo de vida útil do aterro e uma vez que o mesmo é encerrado, os volumes caem drasticamente.

A incineração mostrou um maior poder de recuperação energética dos RSU e consequentemente maior redução nas emissões de CO<sub>2</sub>.

A incineração é uma técnica de rápida eliminação da massa e volume de resíduos, porém, o custo de instalação e manutenção de um incinerador é elevado. Dentre as preocupações concernentes à incineração, destaca-se a poluição atmosférica. Para garantir que os efluentes gasosos atendam à legislação vigente, são necessários modernos sistemas de tratamento de gases o que contribui para o alto investimento necessário. Existe também a necessidade de uma vigilância constante e eficaz destes sistemas de tratamento, uma vez que a combustão de resíduos, como, por exemplo na incineração, pode liberar substâncias tóxicas como as dioxinas e furanos, colocando em risco a

saúde e bem-estar de trabalhadores e população local.

Quanto à recuperação de metano de aterro sanitário, destaca-se a necessidade de coleta e tratamento do mesmo. Em geral, aterros planejados para fazer a recuperação de metano apresentam eficiência de coleta superior em comparação com aterros que adotaram a recuperação energética após sua construção.

A purificação do metano para recuperação energética dependerá da forma de aproveitamento a ser adotado, mas, em geral, a queima industrial e a combustão para geração de energia elétrica demandam tratamentos simples, apenas para ajuste da umidade e das concentrações de CO<sub>2</sub> e remoção de gases sulfurados. A necessidade de se ajustar o gás bruto às condições especificadas para recuperação energética, dentre outros fatores, introduzem custos de instalação e operação que, associados a grande variação temporal na disponibilidade de gás, podem inviabilizar economicamente recuperação energética do metano.

Além do exposto, cabe apontar que o estudo também permitiu refletir que a recuperação energética dos RSU não é uma alternativa que exclui a necessidade de se pensar em estratégias de não geração, redução, reutilização e reciclagem de resíduos, mas sim apresenta-se como tecnologia complementar para a gestão de resíduos sólidos.

## CONCLUSÕES

A incineração mostrou-se como uma tecnologia com maior poder de recuperação energética e maior redução das emissões de CO<sub>2</sub>, mesmo não sendo uma tecnologia neutra em carbono. A escolha de uma tecnologia de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos passa por questões não somente técnicas referentes à quantidade de energia produzida ou de redução de GEE, mas também deve levar em consideração aspectos

econômicos, ambientais, culturais e políticos, dentre outros, para sua implantação e operação, aspectos estes que precisam ser avaliados detalhadamente antes da tomada de decisões para implantação de tecnologias de tratamento/recuperação energética de resíduos sólidos urbanos.

## AGRADECIMENTOS

Ao PIBIC/UNESP, processo 143351/2019-2, pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – ano base 2013. São Paulo: ABRELPE, 2014.

\_\_\_\_\_. ano base 2014. São Paulo: ABRELPE, 2015.

\_\_\_\_\_. ano base 2015. São Paulo: ABRELPE, 2016.

\_\_\_\_\_. ano base 2016. São Paulo: ABRELPE, 2017.

\_\_\_\_\_. ano base 2017. São Paulo: ABRELPE, 2018.

\_\_\_\_\_. ano base 2018/2019. São Paulo: ABRELPE, 2020.

ANACONDA AMBIENTAL E EMPREENDIMENTOS LTDA. (Brasil). Projeto de gás do aterro Anaconda. 5. ed. Santa Isabel: Mdl - Conselho Executivo, 2006. 45 p.

BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; SILVA, Tiago Rodrigo da. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. Energy Policy, [s.l.], v. 65, p. 150-164, 2014.

BRASIL. Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. Plano Nacional Sobre Mudança do Clima. Brasília: SMCQ, 2008.

\_\_\_\_\_. Lei n. 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; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2010.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente.  
Proposta do Plano nacional de resíduos  
sólidos. Brasília: MMA, 2012.

\_\_\_\_\_. Ministério da Ciência, Tecnologia,  
Inovações e Comunicações. Governo Federal.  
Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> pela geração de  
energia elétrica no Sistema Interligado  
Nacional do Brasil - Ano Base 2018. 2019.  
Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/  
mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/  
arquivos/emissoes\\_co2/  
Despacho\\_2018\\_ano\\_todo.xlsx](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/arquivos/emissoes_co2/Despacho_2018_ano_todo.xlsx). Acesso em:  
19abr. 2020.

CHANDEL, Munish K; KWOK, Gabriel; JACKSON,  
Robert B; PRATSON, Lincoln F. The potential of  
waste-to-energy in reducing GHG emissions.  
Carbon Management, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 133-144,  
abr. 2012.

DALMO, Francisco César *et al.* Energy recovery  
overview of municipal solid waste in São Paulo  
State, Brazil. Journal Of Cleaner Production,  
[s.l.], v. 212, p. 461-474, 2019.

EPA – United States Environmental Protection  
Agency. Landfill Gas Emissions Model  
(LandGEM) Version 3.02 User's Guide.  
Washington, 2005. 56 p.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética.  
Ministério de Minas e Energia. Inventário  
energético dos resíduos sólidos urbanos. Rio  
de Janeiro: EPE, 2014.

KIM, Viviane Jin Hee. Análise da composição  
gravimétrica dos resíduos domiciliares de São  
Carlos (SP). Dissertação (Mestrado) – Curso de  
Hidráulica e Saneamento, Escola de  
Engenharia de São Carlos, Universidade de  
São Paulo, São Carlos, 2019, 168 f.

POLI, D. C. R.; ZANCHETA, M. N.; BOARI, Z. M.;  
MELDONIAN, N. L.; MOURA, C. L.; JIURGIU, P. A.  
Dora de Castro Rubio; *et al.* Uma avaliação das  
metodologias para determinação do poder  
calorífico dos resíduos sólidos urbanos.  
Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, [s.i.],  
v. 8, n. 8, p. 9-31, 17 jun. 2014.

UNFCCC – United Nations Framework

Convention on Climate Change.  
Methodological tool: Tool to calculate the  
emission factor for an electricity system. v. 7,  
2018.