



Interciencia

ISSN: 0378-1844

ISSN: 2244-7776

interciencia@gmail.com

Asociación Interciencia

Venezuela

Pereira de Oliveira, Douglas Eldo; Carvalho Miranda, Amanda; Bonette Klepa, Rogério;  
Cortellazzi Franco, Marco Antonio; Catureba da Silva, Silvério; Curvelo Santana, José Carlos

ANÁLISE DO POTENCIAL DA PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA  
INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE SÃO PAULO

Interciencia, vol. 43, núm. 11, 2018, Novembro, pp. 778-783

Asociación Interciencia

Caracas, Venezuela

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33957918007>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica Redalyc

Rede de Revistas Científicas da América Latina e do Caribe, Espanha e Portugal

Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso aberto

# ANÁLISE DO POTENCIAL DA PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE SÃO PAULO

Douglas Eldo Pereira de Oliveira, Amanda Carvalho Miranda, Rogério Bonette Klepa, Marco Antonio Cortellazzi Franco, Silvério Catureba da Silva Filho e José Carlos Curvelo Santana

## RESUMO

No Brasil o principal destino dos resíduos sólidos urbanos são os aterros controlados e sanitários embora uma parte considerável ainda seja enviada a depósitos a céu aberto mais conhecido como lixões. Qualquer que seja destinação dada a esses resíduos (aterros ou lixões) um monitoramento constante dessas áreas é necessário devido à geração efluentes líquidos e gasosos que necessitam de tratamentos especiais, geralmente por prazos superiores ao triplo do utilizado como depósito dos resíduos. Nas principais cidades as áreas utilizadas para esse fim encontram-se saturadas e a necessidade de destinar novas áreas a essa finalidade mostra que esse tipo de solução apenas transfere o prob-

lema para o futuro sem solucioná-lo. A alternativa mais utilizada no mundo para esse problema é a utilização desses resíduos sólidos como combustível de usinas termoeletricas. O objetivo deste trabalho foi o de realizar um estudo da viabilidade da incineração de resíduos sólidos urbanos para a produção de energia elétrica na cidade de São Paulo. O estudo foi desenvolvido a partir de uma pesquisa bibliográfica. Os resultados obtidos indicaram que a alternativa estudada é viável e que a quantidade de resíduos sólidos urbanos coletados pela cidade de São Paulo permite a geração anual de até 4.591GW de energia elétrica e a obtenção de uma receita de R\$ 155x10<sup>6</sup>/ano.

## Introdução

A oferta de energia é um fator determinante no desenvolvimento de uma sociedade. No Brasil, as fontes de energia mais utilizadas são a hidroelétrica, os derivados de petróleo, o carvão mineral e a nuclear. Como os recursos fósseis não são renováveis, o potencial hidroelétrico é finito e mal distribuído e a utilização da energia nuclear é restrita, observa-se um crescente interesse na utilização de fontes alternativas para a geração

de energia (EPE, 2014; Miranda *et al.*, 2017).

Segundo Machado (2015) e Maranhão (2008) a incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma fonte alternativa de energia utilizada em vários países, mas pouco difundida no Brasil, justificando assim uma análise exploratória de suas características com o fim de orientar as políticas públicas a respeito.

No Brasil, os RSU são dispensados principalmente em aterros controlados e aterros sanitários, apesar de parte con-

siderável ainda ser enviada para áreas conhecidas como lixões (EPE, 2014). Nas principais cidades brasileiras, esses locais estão quase saturados e, segundo a mesma publicação, a necessidade de construir novos aterros mostra que a adoção de soluções similares apenas transfere o problema para o futuro sem efetivamente resolvê-lo, motivando assim, novos estudos sobre a aplicação de soluções que reduzam a quantidade de lixo a ser disposta, e ainda permitam benefícios adicionais

como a obtenção de receitas pela comercialização de outros produtos gerados, como energia elétrica, energia térmica, biocombustíveis, aproveitamento de recicláveis, adubos naturais e cinzas utilizadas na construção civil (EPE, 2014; Oliveira *et al.*, 2017).

Uma aplicação interessante foi a desenvolvida por Klepa (2012) e Klepa *et al.* (2017), para a produção de uma matéria-prima com potenciais características tanto para absorver quanto refletir energia, a partir da reutilização de resí-

## PALAVRAS CHAVE / Créditos de Carbono / Desenvolvimento Sustentável / Geração de Energia / Incineração / Resíduo Sólido Urbano /

Recebido: 16/11/2017. Modificado: 23/10/2018. Aceito: 26/10/2018.

**Douglas Eldo Pereira de Oliveira.** Graduado em Tecnologia da Produção, Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga (Fatec), Brasil. Mestrando em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, Universidade Nove de Julho (Uninove), Brasil. e-mail: douglasepo@yahoo.com.br

**Amanda Carvalho Miranda.** Graduada em Farmácia e Bioquímica, Mestre e Doutoranda em Engenharia de Produção, Uninove, Brasil. Docente, Uni-

nove, Brasil. e-mail: mirandacal@hotmail.com

**Rogério Bonette Klepa.** Graduado em Engenharia Elétrica, Universidade Cidade de São Paulo, Brasil. Mestre e Doutorando em Engenharia de Produção, Uninove, Brasil. Docente, Uninove, Brasil. e-mail: klepao@gmail.com

**Marco Antonio Cortellazzi Franco.** Graduado em Engenharia Industrial Mecânica, Faculdade de Engenharia Industrial, Bra-

sil. Mestre e Doutorando em Engenharia de Produção, Uninove, Brasil. e-mail: mafranco@uol.com.br

**Silvério Catureba da Silva Filho.** Graduado em Engenharia Industrial Química, Escola de Engenharia de Lorena-USP, Brasil. Mestre e Doutor em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Brasil. Docente, Uninove, Brasil. e-mail: silverio@uni9.pro.br

**José Carlos Curvelo Santana:** Graduado em Química Industrial, Universidade Federal de Sergipe, Brasil. Mestre e Doutor em Engenharia Química, Unicamp, Brasil. Docente, Uninove, Brasil. Endereço: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Uninove. Av. Francisco Matarazzo, 612, CEP: 05001-100, Água Branca, São Paulo, SP, Brasil. e-mail: jc-curvelo@uni9.pro.br

## ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA POR LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE SÃO PAULO

Douglas Eldo Pereira de Oliveira, Amanda Carvalho Miranda, Rogério Bonette Klepa, Marco Antonio Cortellazzi Franco, Silvério Catureba da Silva Filho y José Carlos Curvelo Santana

### RESUMEN

*En Brasil el principal destino de los residuos sólidos urbanos son los vertederos controlados y los sanitarios, aunque una parte considerable aún se envía a depósitos a cielo abierto más conocidos como basurales. Cualquiera que sea el destino de estos desechos, es necesario un monitoreo constante de estas áreas debido a la generación de efluentes líquidos y gaseosos que requieren un tratamiento especial, generalmente por periodos de más de tres veces los utilizados como depósito de desechos. En las principales ciudades, las áreas utilizadas para este propósito están saturadas y la necesidad de asignar nuevas áreas muestra que este tipo de solución solo transfiere el problema al futuro*

*sin resolverlo. La alternativa más utilizada en el mundo para este problema es el uso de estos desechos sólidos como combustible para las centrales termoeléctricas. El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio de factibilidad de la incineración de residuos sólidos municipales para la producción de energía eléctrica en la ciudad de São Paulo. El estudio fue desarrollado a partir de una búsqueda bibliográfica. Los resultados obtenidos indicaron que la alternativa estudiada es factible y que la cantidad de residuos sólidos urbanos recolectados por la ciudad de São Paulo permite generar hasta 4.591GW de energía eléctrica por año y un ingreso de R\$ 155×10<sup>6</sup>/año.*

## ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF ENERGY PRODUCTION FROM THE INCINERATION OF SOLID URBAN WASTE IN THE CITY OF SÃO PAULO

Douglas Eldo Pereira de Oliveira, Amanda Carvalho Miranda, Rogério Bonette Klepa, Marco Antonio Cortellazzi Franco, Silvério Catureba da Silva Filho and José Carlos Curvelo Santana

### SUMMARY

*In Brazil the main destination of municipal solid waste is controlled and sanitary landfills, although a considerable part is still sent to open-air deposits better known as dumps. Whatever the destination of these wastes (landfills or dumps), a constant monitoring of these areas is necessary due to the generation of liquid and gaseous effluents that require special treatment, usually for periods of more than three times that used as a waste deposit. In the main cities the areas used for this purpose are saturated and the need to allocate new areas to this purpose shows that this type of solution only transfers the problem to the future without solving it.*

*The most widely used alternative in the world for this problem is the use of these solid wastes as fuel for thermoelectric power plants. The objective of this work was to carry out a feasibility study of the incineration of municipal solid waste for the production of electric energy in the city of São Paulo, Brazil. The study was developed from a bibliographic search. The obtained results indicated that the studied alternative is feasible and that the amount of urban solid waste collected by the city of São Paulo allows the generation of up to 4.591GW of electric energy per year and a revenue of R\$ 155×10<sup>6</sup>/year.*

duos da construção civil juntamente com óxido de zinco (ZnO), podendo ser utilizada na construção de células fotovoltaicas e tachas refletivas utilizadas para orientação de tráfego em rodovias, entre outras aplicações.

O aproveitamento energético dos RSU é de fato uma alternativa promissora. De imediato, apresenta-se a alternativa de geração de energia elétrica, que embora não possua potencial suficiente para sustentar uma estratégia de expansão da oferta em longo prazo, pode ser parte importante de uma estratégia regional ou local.

Assim, o objetivo deste trabalho foi o de realizar um estudo da viabilidade da incineração de RSU para a produção

de energia elétrica na cidade de São Paulo.

### Panorama brasileiro dos RSU

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) em 2014 a geração de RSU no Brasil foi de ~78,6×10<sup>6</sup>t (387.630kg/habitante por ano), um crescimento de 2,9% em relação ao ano anterior, variação essa que supera o crescimento populacional no mesmo período, de 0,9% (ABRELPE, 2014).

Com relação à coleta, os dados apresentam um acréscimo de 3,20% no mesmo período e uma discreta evolução na cobertura dos serviços de coleta que atingiu um total de

71,3×10<sup>6</sup>t no ano de 2014 (ABRELPE, 2014).

Atualmente a maior parte do material coletado é descartada em aterros controlados e sanitários, entretanto, parte considerável ainda é enviada para áreas popularmente conhecida como lixões (EPE, 2014).

Em todas as áreas utilizadas para disposição dos RSU são gerados efluentes líquidos e gasosos que necessitam monitoramento contínuo e tratamentos específicos, geralmente por períodos superiores ao triplo do tempo que o aterro recebeu resíduos (EPE, 2014). Além do mau impacto visual e da desertificação da área utilizada estima-se que a região volte a ser quimicamente inerte somente 50 anos após sua

desativação (Rezende, 2015; Bendito *et al.*, 2017).

Pode-se afirmar que a poluição do local da destinação final é o principal problema ambiental provocado pelos RSU. As regiões vizinhas às áreas utilizadas perdem atratividade para o uso comercial e residencial e sua desvalorização afeta principalmente a população de baixa renda (Bendito *et al.*, 2017).

Os principais problemas causados pela poluição são o mau cheiro, a presença de animais que funcionam como vetores de doenças, os riscos de explosão devido a formação de gás metano e o elevado potencial de poluição do solo e de contaminação do lençol freático (Bendito *et al.*, 2017).

## Emissões de gases de efeito estufa pelos RSU

De acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (EPA) são quatro as principais formas de relacionar os RSU com o efeito estufa (EPA, 2017): 1) emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) decorrente do consumo de energia para extração e produção dos bens (incluindo a extração e processamento dos combustíveis a serem usados); 2) emissão de CO<sub>2</sub> oriunda do consumo não-energético de combustíveis no processo de produção dos bens; 3) emissão de metano (CH<sub>4</sub>) devido a decomposição de restos de alimentos depositados nos aterros sanitários; e 4) fixação de carbono das parcelas dos materiais que não se decompõem nos aterros sanitários.

Pode-se considerar como uma quinta relação a emissão de CO<sub>2</sub> devida ao transporte dos resíduos, desde a coleta até a destinação final.

As emissões produzidas pela decomposição dos resíduos nos aterros sanitários são

compostas por CH<sub>4</sub> (45-60%), CO<sub>2</sub> (40-60%), nitrogênio (2-5%) e, em quantidades <1%, por dezenas de contaminantes orgânicos e inorgânicos conhecidos pela sigla NMOC (*non-methane organic compounds*), que incluem benzeno, tolueno, organoclorados, mercúrio, e organometálicos (EPE, 2008; Rezende, 2015).

Embora relativamente constantes em termos de composição química, as emissões variam tanto na velocidade de produção quanto na quantidade produzida ao longo do tempo de deposição em função de fatores climáticos, forma de disposição e da própria composição dos rejeitos (EPE, 2008; Rezende, 2015).

A Figura 1 apresenta a variação das emissões de gases de efeito estufa com o tempo de exposição ao meio ambiente, convertidos a CO<sub>2</sub>, influenciada pela forma da deposição dos resíduos sólidos de restos de alimentos (condições ambientais tropicais e úmidas). Para os resíduos dispostos em vazadouro a céu aberto (lixão), as emissões acumuladas na

situação somaram 0,4t CO<sub>2</sub> eq. Para os resíduos dispostos em aterro sanitário as emissões atingem 0,9t CO<sub>2</sub> equivalente. Os dados apresentados na figura indicam que os resíduos de alimentos depositados em aterro sanitário emitem mais que o dobro do que aqueles depositados em lixões a céu aberto (EPE, 2014).

Segundo Rezende (2015) em todo o mundo os aterros sanitários produzem entre 20 e 60×10<sup>6</sup>t/ano de CH<sub>4</sub> como resultado direto da decomposição orgânica dos componentes do lixo, evidenciando que mesmo nos aterros sanitários, tidos como a melhor solução para os RSU, as emissões de gases de efeitos estufa são elevadas, principalmente nos primeiros anos de operação.

Além dos gases de efeito estufa a decomposição dos componentes orgânicos presentes no lixo produz um efluente líquido conhecido como chorume que pode contaminar o lençol freático e provocar consideráveis danos ao ecossistema quando encaminhado a rios e lagos existente nas vizinhanças (EPE, 2014).

A incineração de RSU para a produção de energia elétrica contribui para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e do chorume pelos aterros sanitários, além de substituir parte da energia gerada a partir de fontes fósseis (EPE, 2014).

## Combustão do RSU

Apesar da expansão da indústria global de geração de energia a partir dos RSU na última década, centenas de milhões de toneladas de resíduos sólidos municipais são depositadas em aterros sanitários. Para cada tonelada de resíduo depositada em aterros, as emissões de gases com efeito de estufa, convertidos a CO<sub>2</sub>, aumentam em pelo menos 1,3 toneladas (Themelis e Keufman, 2004a).

Atualmente a técnica mais utilizada para a geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos é a combustão da matéria orgânica em caldeiras devido à sua simplicidade e custo de capital relativamente baixo. A fornalha mais comum foi desenvolvida pela Martin GmbH de Munique, Alemanha, e tem uma capacidade instalada para processar cerca de 59×10<sup>6</sup>t por ano de resíduos. A usina de Brescia, Itália, é uma das mais recentes instalações da Martin GmbH. A Figura 2 apresenta um corte da câmara de combustão da caldeira dessa usina.

Segundo Themelis e Keufman (2004b) 47 dos 50 estados norte-americanos geram anualmente cerca de 28,5×10<sup>6</sup>t de resíduos sólidos urbanos que podem ser incinerados para a produção de energia elétrica.

Para a International Solid Waste Association (ISWA) a

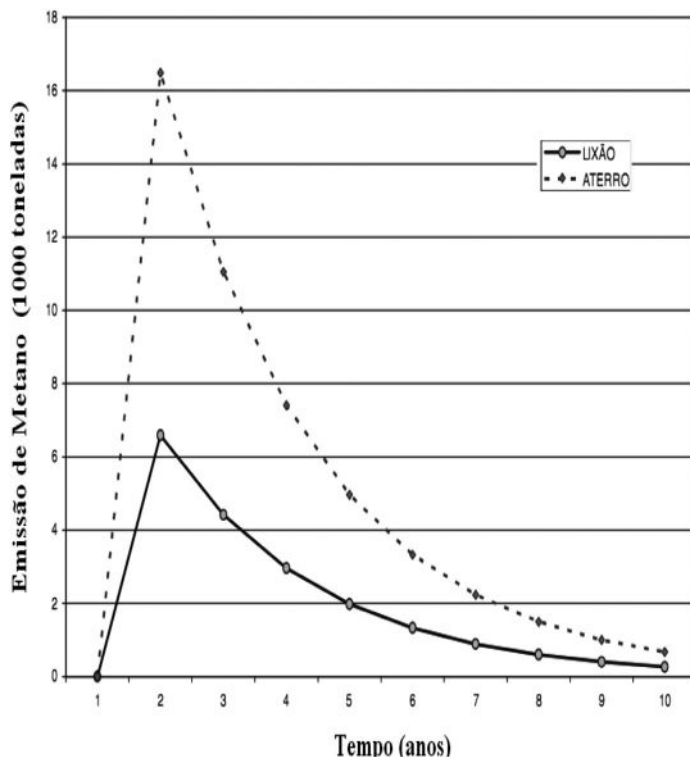


Figura 1. Emissões de metano por tipo de disposição de RSU. Adaptado de EPE (2014).

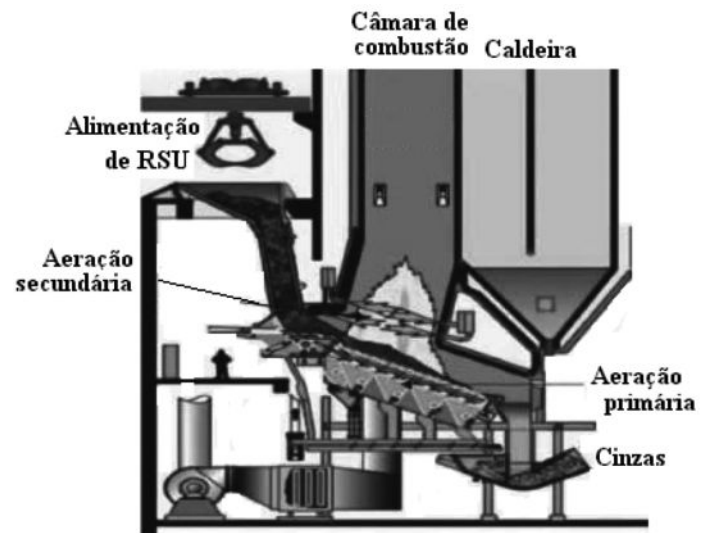


Figura 2. Fornalha tipo Martin usada para a combustão de RSU. Adaptado de Themelis (2003).



capacidade instalada de processamento de RSU das usinas norte americanas e europeias era de ~29,4 e 40×10<sup>6</sup>t/ano, respectivamente. Na Europa eram gerados 41×10<sup>6</sup> de GJ de energia elétrica e 110GJ de energia térmica. (IWSA, 2013).

Nota-se que ao contrário da Europa, os EUA utilizam pouco o vapor de exaustão das turbinas geradoras de energia, para o aquecimento residencial ou industrial (IWSA, 2013). O Japão transforma 314kg per capita de RSU em energia elétrica, Cigapura 252 e os EUA 105 (IWSA, 2013).

De acordo com Machado (2015) a maioria das instalações para produção de energia elétrica a partir de RSU encontra-se na Europa, com uma capacidade instalada de 3051MW; os EUA possuem 1541MW de capacidade instalada e os demais países não ultrapassam 727MW no total. Segundo o citado autor a capacidade média das usinas de incineração de lixo é de 1500t/dia de RSU, a maior instalação tem capacidade de processar 3000t/dia e está localizada na China.

No Brasil, de acordo com Machado (2015) apenas indústrias de grande porte possuem incineradores, como parte da sua política de redução de resíduos sólidos e cogeração de energia. Estas empresas são responsáveis pela incineração de 80.750t/ano com uma capacidade de incineração que varia de 7,5 até 50t/dia. Todos os incineradores possuem lavadores de gases e, na maioria, as cinzas produzidas são direcionadas a aterros industriais próprios.

## Metodologia

O método utilizado para o desenvolvimento deste trabalho consistiu de uma pesquisa exploratória da literatura para identificar os fundamentos teóricos que justificassem a escolha do tema. Como ponto de partida para a revisão bibliográfica buscou-se identificar na literatura acadêmica artigos que contivessem as palavras: resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, incineração de

resíduos sólidos urbanos, termelétricas e cogeração.

Quanto a natureza, esta pesquisa pode ser considerada aplicada, quanto a abordagem, qualitativa, e quanto ao objetivo, exploratória.

## Coleta de dados

Os dados sobre a composição do resíduo sólido urbano foram obtidos no site da Prefeitura Municipal de São Paulo em 2017 e nos artigos obtidos pela pesquisa bibliográfica.

## Poder calorífico estimado dos RSU

Segundo Themelis (2013) verificar a fonte o poder calorífico inferior (PCI), expresso em kcal/kg, de combustíveis orgânicos pode ser calculado pela Eq. 1, onde  $Y_{\text{combustível}}$ ,  $Y_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $Y_{\text{vidro}}$  e  $Y_{\text{metais}}$  representam a proporção de cada material em 1kg de RSU.

$$\text{PCI} = \frac{18.500 * Y_{\text{combustível}} - 2.636 * Y_{\text{H}_2\text{O}} - 628 * Y_{\text{vidro}} - 544 * Y_{\text{metais}}}{4,185} \quad (1)$$

A fração de água existente no material orgânico (folhas, madeira, material em decomposição, etc.) deve ser excluída por já estar considerada na variável  $Y_{\text{H}_2\text{O}}$ . Na ausência de dados pode-se utilizar o valor típico de 60% como estimativa

do teor de umidade (Themelis e Kauman, 2004 b).

## Análise do processo de produção de energia do RSU

A Tabela I apresenta o poder calorífico de materiais normalmente encontrados em RSU e permite inferir quais resíduos sólidos, em que predominam orgânicos, tendem a apresentar menor poder calorífico (Themelis e Kauman, 2004 b).

Para a EPE (2014) e De Nogueira (2015), embora a classificação segundo o PCI não possa ser levada como definitiva para estabelecer a destinação do RSU considera-se:

-para  $\text{PCI} < 1.675 \text{ kcal/kg}$ : *inviável*, pois além de dificuldades técnicas, é exigida a adição de combustível auxiliar;

-para  $1.675 \text{ kcal/kg} < \text{PCI} < 2.000 \text{ kcal/kg}$ : *parcialmente viável*, pois o combustível ainda depende de algum tipo de pré-tratamento para elevar o seu poder calorífico;

-para  $\text{PCI} > 2.000 \text{ kcal/kg}$ : *viável*, a incineração do material bruto é tecnicamente viável e usinas de incineração podem gerar 450-700kWh/ton de RSU.

## Contabilidade de custos ecológicos

As vantagens ambientais, econômicas e sociais desta

proposta de pesquisa basearam-se as seguintes premissas (Giraçol *et al.*, 2011; Passarini *et al.*, 2014):

-A incineração dos RSU evita que tais rejeitos sejam dispostos nos lixões e aterros sanitários.

-A combustão do RSU gera energia e a partir dela se obtém receitas com a sua comercialização. De acordo com a ANEEL (2017), a energia pode ser comercializada no Brasil por 0,39865 R\$/kWh.

-Do metano não emitido se obtém créditos de carbono, que também podem ser vendidos. De acordo com Miranda *et al.* (2017), cada crédito de carbono pode ser vendido a €\$ 6,0 (1€\$= R\$ 3,42).

A redução na emissão de gases de efeito estufa traz benefícios ao meio ambiente, a saúde humana e a imagem da empresa no mercado. (Giraçol *et al.*, 2011; Passarini *et al.*, 2014).

## Resultados e Discussões

A Tabela II apresenta a composição percentual do RSU da cidade de São Paulo e a quantidade de energia que pode ser gerada por sua incineração.

A parte metálica é removida pelos eletroímãs instalados nas esteiras de alimentação do forno; assim sendo, a porcentagem que corresponde ao total

TABELA I  
PODER CALORÍFICO DE MATERIAIS ENCONTRADOS EM RSU

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

RSU: resíduos sólidos urbanos, PCI: poder calorífico inferior. Adaptado de De Nogueira (2015) e EPE (2014).

TABELA II  
COMPOSIÇÃO PERCENTUAL EM MASSA E ENERGIA DO RSU DA CIDADE DE SÃO PAULO

	Mater. Orgânico	Plástico	Papel/Papelão	Metais	Outros
Composição RSU	57,80	16,77	11,08	2,18	12,43
Fração RSU sem metal	0,5893	0,1710	0,1130	-	0,1267
PCI (kcal/kg)	1310,0	6300,0	4030,0	-	4102,5
Energia RSU (kcal/kg)	772,00	1077,2	455,26	-	519,92
RSU não metálico (%)	98,08		PCI total (kcal/kg RSU)		2824,38

RSU: resíduos sólidos urbanos, PCI: poder calorífico inferior. Fonte: ABRELPE (2014) e Themelis e Kauman (2004b).

de lixo sem metal é de 98,08%, valor que será usado como redutor da massa total de RSU gerada diariamente e que pode ser usada na incineração para a geração de energia. Como se nota, a maior quantidade de energia de RSU provém dos plásticos, que mesmo tendo 4,5 vezes menos massa gera 40% a mais de energia do que o material orgânico (resto de alimentos).

O valor estimado para o poder calorífico inferior do RSU coletado na cidade de São Paulo foi de 2824,38kcal/kg; portanto é viável sua incineração para a produção de energia elétrica (EPE, 2014; De Nogueira, 2015).

Segundo a ABRELPE (2014) a cidade de São Paulo gera ~19.000 toneladas diárias de RSU. Considerando-se que 98,08% desse total é de material orgânico, é possível instalar 13 usinas com capacidade média de 1500 toneladas diárias de RSU.

A Tabela III apresenta o resumo da produção de energia elétrica pela incineração total do RSU por unidade incineradora e as receitas obtidas. Para o cálculo das receitas obtidas pela venda de energia elétrica e créditos de carbono foram considerados os valores de 0,39865 R\$/kW/h e R\$ 20,52 por crédito de carbono (ANEEL, 2017; Miranda *et al.*, 2017).

Verifica-se que a quantidade de energia gerada foi de 968MW por dia, que corresponde a 353GW anuais e a

uma receita com a venda de energia de até R\$ 140,8×10<sup>6</sup>/ano. Verifica-se também que cada unidade de incineração é capaz de adquirir diariamente 190t de CO<sub>2</sub> equivalente, que corresponde a 693.500 créditos de carbono anuais, e a uma receita com sua venda na bolsa de valores de R\$ 14,231×10<sup>6</sup>. Somando-se as duas fontes de lucro, cada unidade pode gerar receitas de até R\$ 155×10<sup>6</sup>/ano.

Além das receitas que podem ser obtidas com a venda da energia elétrica produzida, a utilização de RSU como combustível para a produção de energia elétrica:

-reduz das emissões de gases de efeito estufa pelos aterros sanitários;

-as cinzas geradas pela queima do RSU podem ser usadas para a produção de adubo, na recuperação de solos e na fabricação de cerâmicas;

- ocupa área insignificante quando comparada aos aterros sanitários;

- não haveria a necessidade de desocupação de áreas para a criação destes aterros;

- evita a destruição de área de mata nativa e sua desertificação;

-evita a contaminação do meio ambiente e a contaminação do lençol freático pelo vazamento de chorume e lixiviação de metais pesados;

-reduz a presença de animais e insetos vetores de doenças;

## Conclusão

O poder calorífico inferior do RSU coletado na cidade de São Paulo é maior que 2000 kcal/kg; segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas esse valor torna viável sua utilização como combustível para a produção de energia elétrica (EPE, 2014).

A quantidade de RSU gerada por dia, 19.000t, permite a instalação de 13 usinas com capacidade diária de 968MW cada uma.

A venda da energia elétrica gerada por cada usina, 354GW por ano e dos créditos de carbono, 694t equivalentes de carbono no mesmo período, tem a possibilidade de gerar uma receita de R\$ 155×10<sup>6</sup> anuais.

A utilização dos resíduos sólidos urbanos (lixo) da cidade de São Paulo como combustível de usinas termoeletricas é uma alternativa viável e sustentável em longo prazo. Além das receitas que podem ser obtidas, a utilização dessa alternativa diminui significativamente a emissão de gases de efeito estufa pelos aterros sanitários e lixões, e a degradação e contaminação das áreas a eles destinadas.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE (2014) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2014*. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, Brasil. 120 pp.

ANEEL (2017). *Tarifas ao Consumidor*. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasil. <http://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores>

Bendito BPC, De Souza PA, Picanço AP, Da Silva RR, Siebeneichler SC (2017) Diagnóstico da degradação ambiental na área de depósito inadequado de resíduos sólidos de Porto Nacional - TO. *Gaia Scient. 11*: 129-151.

De Nogueira YCT (2015) *Viabilidade Técnica e Econômica de Usinas "Waste-to-Energy"*. Tese. Universidade de Brasília. Brasil. 85 pp.

EPA (2017) *Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling*. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, EUA. <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials->

[waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials](https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-)

EPE (2008) *Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Nota Técnica DEN 06/08*. Série Recursos Energéticos. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energias. Rio de Janeiro, Brasil. 73 pp.

EPE (2014) *Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Nota Técnica DEN 18/14*. Série Recursos Energéticos. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energias. Rio de Janeiro, Brasil. 50 pp.

Giraçol J, Passarini KC, Silva Filho SC, Calarge FA, Tambourgi EB, Santana JCC (2011) Reduction in ecological cost through bio-fuel production from cooking oils: an ecological solution for the city of Campinas, Brazil. *J. Clean. Prod. 19*: 1324-1329.

ISWA (2013) *Waste Atlas Report. International Solid Waste Association*. <http://www.atlas-waste.com/Documents/WASTE%20ATLAS%202013%20REPORT.pdf>

Klepa RB (2012) *Uma Abordagem Sustentável no Desenvolvimento de um Material com Alta Capacidade Reflexiva a Partir de Resíduo da Construção Civil*. Tese. Universidade Nove de Julho. São Paulo, Brasil. 77 pp.

Klepa RB, Medeiros MF, Farias TMB, Santana JCC (2017) Viabilidade econômica de um sensor termoluminescente produzido a partir dos resíduos da construção civil. Em *XXIV SIMPEP Simpósio de Engenharia de Produção*. Vol. 1. Bauru, SP, Brasil.

Machado CF (2015) *Incineração: Uma Análise dos Tratamentos Térmicos dos Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru-SP*. Tese. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil. 97 pp.

Maranho AS (2008) *Potencial de Geração de Energia Elétrica a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos para Bauru e Região*. Tese. Universidade Estadual Paulista Brasil. 107 pp.

Miranda AC, Gomes LF, Ribeiro NL, Silva Filho SC, Silva TAF, Santana JCC, Tambourgi EB (2017) Viabilidade técnica, ambiental e econômica da produção de biodiesel a partir do óleo de fritura usado na cidade de São Paulo. *Anais 10º Simpósio Nacional de Biocom-*

TABELA III  
RESUMO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA  
E RECEITAS OBTIDAS

RSU (t/dia)	Capacidade (t/dia)	Nº de usinas	
19000	1500	13	
Produção de energia			
RSU por usina (t/dia)	Diária (MW)	Anual (GW)	Receita (×10 <sup>6</sup> R\$)
1461,538	967,659	353,196	140,801
Créditos de carbono			
Conversão CC (CO <sub>2</sub> eq.)	Diário (eq.)	Anual (eq.)	
1,3	1,900	693,500	14,231
Receita anual por unidade (×10 <sup>6</sup> R\$)			155,032
Receita anual total (×10 <sup>6</sup> R\$)			2015,417

Preço energia= 39.865 R\$/kWh (Aneel, 2017); 1 CC= 6 €\$ ou R\$ 20,52.

- bustiveis*, BIOCOM2017. Recife, PE, Brasil.
- Oliveira STM, Miranda AC, Silva Filho SC, Klepa RB (2017) Cinza a partir do bagaço da cana-de-açúcar reutilizada como parte integrante em argamassas e concretos na indústria civil. *Anais XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. (10-13/10/2017) Joinville, SC, Brasil. pp. 1-14.
- Passarini KC, Pereira MA, Farias TMB, Calarge FA, Santana JCC (2014) Assessment of the viability and sustainability of an integrated waste management system for the city of Campinas (Brazil), by means of ecological cost accounting. *J. Clean. Prod.* 65: 479-488.
- Reis LB, Hinrichs RA, Kleinbach M (2010) *Energia e Meio Ambiente*. Cengage Learning. Brasil. 543 pp.
- Rezende AGOB (2015) *Avaliação do Potencial Energético e Econômico do Tratamento, Destinação e Reutilização de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)*. Tese. Universidade Federal de São João del Rei. Brasil. 165 pp.
- Themelis NJ (2003) An overview of the global waste-to-energy industry. *Waste Manag. World* (July-Aug): 40-47.
- Themelis NJ, Kaufman SM (2004a) Waste in a land of plenty - Solid waste generation and management in the US. *Waste Manag. World* (Sep-Oct): 23-28.
- Themelis NJ, Kaufman SM (2004b) State of garbage in America: data and methodology assessment. *BioCycle* 45(4): 22-26.