



ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ATERRO SANITÁRIO E INCINERAÇÃO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PROJETO REGIONAL FORMADO POR UM CONSÓRCIO DE MUNICÍPIOS

Benedito Luiz Martins¹ & Alcides Lopes leão²

RESUMO: O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre um projeto regional com 39 municípios para análise comparativa para destinação dos rejeitos dos resíduos sólidos urbanos em um incinerador e disposição em um aterro sanitário com captação do biogás, considerando a possibilidade de recuperação energética em ambos os sistemas, bem como a comparação com relação à emissão de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. Para realização deste estudo foram adotadas as seguintes metodologias: caracterização gravimétrica das frações de resíduos sólidos produzidas na região; cálculo de captação do biogás com recuperação energética utilizando a equação elaborada pelo IPCC - International Panel on Climate Change, com distribuição triangular da produção do metano gerado ao longo dos anos pela degradação lenta e rápida dos resíduos; e recuperação de energia em sistema de incineração. Os resultados mostraram que o sistema de incineração tem eficiência em 3,2 vezes maior para a produção de energia em relação ao sistema de aterro sanitário, o qual emite gases de efeito estufa 2,9 vezes mais que o sistema de incineração. A conclusão do estudo é que a incineração leva vantagem sobre o aterro sanitário na gestão de resíduos sólidos, porque gera mais energia elétrica, emite menos gases de efeito estufa, utiliza menos área física de terra e, por ser um sistema fechado e estanque apresenta melhores condições para mitigação dos impactos ambientais negativos.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos. Destinação. Disposição. Aterro sanitário. Incineração. Energia. Sustentabilidade.

COMPARATIVE STUDY BETWEEN SANITARY LANDFILL AND INCINERATION FOR ENERGY GENERATION IN A REGIONAL PROJECT FORMED BY A CONSORTIUM OF MUNICIPALITIES

ABSTRACT: The objective of this work was to carry out a comparative study between sanitary landfill and incineration of urban solid waste, considering the possibility of energy recovery, as well as to compare both systems greenhouse gases and atmospheric pollutant emissions. This study was done within a regional cooperative project among 39 municipalities of central São Paulo State. The following methodologies were adopted: gravimetric characterization of solid waste fractions produced in the region; biogas capture with energy recovery using the equation elaborated by the International Panel on Climate Change (IPCC), with a triangular distribution of the methane production generated over the years by the slow and rapid waste degradation of the wastes; and energy recovery in incineration system. The results showed that the incineration system is 3.2 times more efficient for energy production than the landfill system, which emits greenhouse gases 2.9 times more than the incineration system. The conclusion of the study is that incineration takes advantage of landfill in solid waste management, because it generates more electricity, emits less greenhouse gases, uses less physical land area and, because it is a closed and watertight system, presents better conditions for mitigation of negative environmental impacts.

KEYWORDS: Solid waste. Destination. Disposition. Landfill. Incineration. Energy. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

No século XX, com o surgimento e o rápido desenvolvimento da indústria, mudanças significativas tomaram forma no modelo de vida da população em todo o planeta. As cidades se multiplicaram rapidamente e se tornaram centros de grandes aglomerações humanas, resultando em sistemas complexos de serem

administrados, tamanha a diversidade de atividades e necessidades, as quais iniciaram um processo de produção de severos impactos ao meio ambiente com consequências negativas na saúde das pessoas. A civilização baseada na produção industrial adotou um comportamento consumista voraz, gerador de grandes quantidade e diversidade de resíduos, os quais foram se tornando cada vez mais descartáveis, em razão da rapidez com que as tendências e os avanços tecnológicos foram modificando os produtos e os modos de vida das pessoas.

¹ Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas. Doutor em Energia na Agricultura. E-mail: martinsblm@gmail.com

² Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas. Docente do Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia. E-mail: alcidesleao@fca.unesp.br

Essas mudanças convergiram para a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais para manufatura de novos e inovadores produtos, que resultaram na produção de resíduos de composição mais complexas e mais difíceis de serem tratadas e/ou dispostos. Com isso a gestão dos resíduos sólidos urbanos tornou-se um grande desafio para as administrações municipais, sobretudo na tomada de decisão do que fazer com tanto e tão diversos resíduos. Desta forma, no Brasil, depois de décadas de discussão, surgiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, (PNRS) aprovada e regulamentada por lei e decreto federal. A PNRS trouxe inovações em conceitos sobre a gestão dos resíduos no Brasil, muitos dos quais já em prática no exterior.

A quantidade excessiva de resíduos passou a ser percebida mais claramente no momento da realização da disposição em aterros, em razão dos ostensivos impactos que passaram a causar, com poluição do solo, da água e da atmosfera. Na Europa, Estados Unidos e alguns países da Ásia a incineração dos resíduos passou a ser adotada, principalmente com a recuperação de energia. No Brasil, a predominância absoluta de disposição é o aterro.

Pesquisadores e estudiosos passaram a analisar formas de diminuir a geração de resíduos, e vários estudos foram elaborados discutindo a melhor forma de gestão para promover uma hierarquia racional e sustentável para gerenciamento dos resíduos. A hierarquia elenca as opções mais interessantes para realização da gestão dos resíduos sólidos urbanos sob a ótica ambiental. A prioridade é pela não geração de resíduos, vindo em seguida as opções subsequentes, as quais se estabelecem depois que a primeira não foi conseguida. Não se efetivando a não geração, as demais opções na hierarquia são: redução, reuso, reciclagem, destinação e disposição.

As formas de destinação e disposição de resíduos devem considerar as implicações ambientais, inclusive no tocante às mudanças climáticas. Aterros e incineradores são responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, principalmente o metano nos aterros e o gás carbônico nos incineradores, embora outros gases também sejam emitidos.

Segundo Tan et al. (2014) as duas práticas mais comuns de recuperação de energia a partir do lixo são a incineração de resíduos e a captura de metano em aterros. O metano está presente no biogás ou gás de aterro, o qual é resultante da degradação anaeróbia dos resíduos biodegradáveis. O biogás, além do metano é composto também pelo gás carbônico e por outros gases em menor escala. Islan (2016) afirmou que a opção de geração de energia pelo lixo predominante é a de incineração de resíduos sólidos urbanos misturados, a qual é considerada como uma forma de gestão dos resíduos sólidos urbanos sustentável, tendo sido implantada em países como a Dinamarca, Alemanha, Holanda, Suécia, Malásia, Indonésia, China, Japão e Coreia.

Tan et al. (2014) realizaram considerações sobre a incineração de resíduos para obtenção de energia e a

captura do metano em aterro para consecução do mesmo objetivo, tendo afirmado que aterros sanitários degradam terras que podem apresentar elevado valor, além de emitir o metano que é mais potente para que o gás carbônico para a causa do efeito estufa. Entretanto, pela perspectiva da gestão dos resíduos sólidos urbanos, ambas as práticas se mostram como desafios para o desenvolvimento sustentável.

A obtenção de energia em aterros e incineradores mostra benefícios como a mitigação da emissão de gases de efeito estufa, além de funcionarem efetivamente como sistemas de produção de energia. Em decorrência de o exposto esta pesquisa objetiva analisar comparativamente o desempenho do sistema de aterro sanitário e de incineração de resíduos sólidos para a recuperação de energia. Para realização dos estudos comparativos procedeu-se à formação de um grupo composto com 39 municípios em uma região central do Estado de São Paulo. Com base na quantidade e nas características de resíduos gerados traçou-se um estudo no comportamento destes quando dispostos em aterro sanitário, no qual usa-se o metano gerado e captado, ou destinado para um incinerador, onde são processados termicamente, para recuperação energética, e para complementar o estudo, objetivos adicionais de análise da emissão de gases na atmosfera de ambos os sistemas foram considerados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS REJEITOS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA CIDADE DE LENÇÓIS PAULISTA

Adotou-se o critério de se identificar como rejeitos dos resíduos sólidos urbanos domiciliar e comercial (RRSU) aqueles que são dispostos no aterro, após o processo de coleta seletiva. Efetuou-se a caracterização do RRSU obtido na cidade de Lençóis Paulista porque é a cidade que apresenta maior confiabilidade de dados, uma vez que os mesmos foram obtidos pelo autor, e também porque apresenta um índice de reciclagem alto para os padrões nacionais, em torno de 20% do total de resíduos sólidos urbanos gerados. Com base nos resultados obtidos houve a extrapolação para os demais municípios da região considerada.

Para caracterização gravimétrica do RRSU do município de Lençóis Paulista foi realizada uma divisão da cidade em bairros segundo o desempenho social dos mesmos, obtido através de avaliação apresentada pela Diretoria de Promoção e Assistência Social, por meio do índice de vulnerabilidade social. Quanto maior o índice de vulnerabilidade social, maior a dependência da população em relação aos serviços prestados pela administração pública (federal, estadual e municipal). Desta forma realizou-se a caracterização dos bairros que apresentaram índice de vulnerabilidade social de 0% a 9%; de 10% a 19%; de 20% a 29% e acima de 30%. O centro comercial da cidade também recebeu o estudo da

análise de gravimetria do RSU separadamente. Portanto, foram destacadas cinco regiões com o critério de amostragem de três cargas em cada uma delas, totalizando quinze amostras para realização da caracterização gravimétrica. Após a separação dos materiais recicláveis, o que resultou passou a ser considerado como rejeito dos resíduos sólidos urbanos (RRSU). Este material resultante foi separado e caracterizado por tipo. A caracterização gravimétrica realizada em Lençóis Paulista teve como objetivos a obtenção dos seguintes dados:

- a) Porcentual dos rejeitos dos resíduos sólidos urbanos (RRSU) em relação ao total de RSU gerado nas diversas cidades;
- b) Porcentual de separação pelo sistema de reciclagem;
- c) Porcentual de resíduos rapidamente e lentamente degradados;
- d) Porcentual de materiais que não geram metano ou possuem pouca significação na geração do gás;

2.2 METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM PROJETO DE CONSÓRCIO DE MUNICÍPIOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Para efeito deste estudo tomou-se uma região do Estado de São Paulo tendo como cidade principal Bauru, para formação de um consórcio de municípios. Os dados referentes à produção de resíduos sólidos urbanos dos municípios foram obtidos em CETESB (2015), que é o inventário estadual de resíduos sólidos, e a fonte oficial do Governo do Estado de São Paulo.

Para obter-se o percentual das frações desejadas adotou-se os dados obtidos no município de Lençóis Paulista para extrapolação dos mesmos aos demais municípios e, portanto, a partir dos dados de Lençóis Paulista obteve-se os valores referentes aos diferentes tipos de resíduos dos demais municípios.

Considerando os valores obtidos no inventário, reduziu-se 20%, que se refere ao percentual de materiais recicláveis que podem ser obtidos no sistema de coleta seletiva, valor este que é conseguido pelo município de Lençóis Paulista. Além dos 20% subtraídos referentes ao volume de materiais recicláveis, tem-se também o volume de materiais que não geram metano, ou possuem pouca significação na geração do gás durante o período de degradação, quais sejam: metais, vidros, plásticos, madeira, eletroeletrônicos, etc. Esses materiais perfazem 23,86% do total, e não serão computados para cálculos de geração de metano. Esses valores são importantes porque serão utilizados para a formulação dos sistemas de aterro sanitário e de incineração relativamente aos municípios escolhidos para formação da região a ser adotada, especificamente os 39 municípios na região de Bauru.

Para o estabelecimento de uma região mais compacta, com maiores possibilidades de sucesso na composição de uma unidade de destinação de RRSU para geração de energia, identificou-se a distância das cidades propostas até a cidade de Bauru, previamente estabelecida como cidade sede. Tem-se que a distância máxima das cidades da região em questão até a cidade de Bauru seja de 120 km, sendo que, inicialmente previu-se a distância máxima desejada de 100 km, porém estendeu-se em mais 20 km para contemplar as cidades de Lins e Botucatu justificando-se pela grande quantidade de resíduos gerada por ambos os municípios. Desta forma a quantidade de 39 municípios deu-se em razão dos critérios de distância e quantificação da geração diária de RRSU, pois que buscou-se obter um valor diário próximo a 1000 toneladas de RRSU, valor este considerado como ideal para a viabilidade operacional e econômica de um incinerador, segundo explicação obtida quando da realização do estudo de caso na cidade de Ingolstadt, na Alemanha pelo autor.

Após a definição da metodologia de escolha das cidades componentes da região, realizou-se um estudo comparativo entre um aterro sanitário regional e uma unidade de incineração de resíduos regional, tendo sido estabelecido um horizonte de 30 anos para ambas as plantas na geração de energia, considerando que o aterro sanitário receberá resíduos por 15 anos, mas continuará a gerar energia por mais 15 anos. A planta de incineração será operada por 30 anos, período em que também estará gerando energia.

2.3 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA GERAÇÃO DE ENERGIA EM UNIDADE DE INCINERAÇÃO REGIONAL

Para obtenção de valores sobre a geração de energia, adotou-se a metodologia de quantidade de energia elétrica, em kWh, obtida por tonelada de resíduo sólido urbano domiciliar comercial. De acordo com Menezes, Gerlach e Menezes (2000), Bhada e Themelis (2008), Martins e Leão (2016), a relação mais comumente encontrada entre uma tonelada de resíduos e geração de energia elétrica foi a de valores entre 500 a 600 kWh/RSU. Nestas condições foi adotado o valor de 500 kWh/tRRSU, e a obtenção do total de energia recuperada é realizada por uma equação simples de multiplicação do total da quantidade de RRSU por 500 kWh.

2.4 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA GERAÇÃO DE METANO EM UM ATERRO SANITÁRIO REGIONAL

A avaliação da geração do metano em aterro e sua conversão em energia foi realizada através da análise documental, onde foram encontrados os valores que referenciam este trabalho.

Para composição dos resíduos que apresentam potencial de geração de metano para captação serão considerados os RRSU e os resíduos verdes.

A análise gravimétrica realizada em Lençóis Paulista mostrou que 95% dos RRSU são degradados rapidamente (restos de alimentos, resíduos verdes, papéis e papelões) e 5% são degradados lentamente (têxteis e couros), valores igualmente identificados por Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993).

Após a determinação das frações rápida e lentamente degradáveis, tem-se condições de obtenção do volume de metano gerado, o qual, depois de captado fornecerá a base para os cálculos de recuperação de energia no aterro sanitário.

2.4.1 Equação do IPCC com distribuição triangular

Para cálculo da geração de metano no aterro sanitário foi utilizada a equação do IPCC (1996) - *International Painel on Climate Change*.

A equação necessita do conhecimento dos seguintes dados: a) taxa de crescimento da população da região estabelecida - que foi obtida junto ao SEADE (Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados), no Portal de Estatística do Estado de São Paulo, como sendo de 0,87% ao ano; b) geração “per capita” do RRSU; c) fração degradável do RRSU; d) potencial de geração de metano do RRSU (L0). Multiplica-se o valor encontrado por 365 para obtenção do metano gerado durante o ano. Desta forma, a fórmula final adaptada fica com a seguinte expressão:

$$QCH_4 = Popurb \times 0,494 \times L0 \times 365 \quad (1)$$

Onde:

QCH_4 : quantidade de metano

Popurb: população da região dos municípios

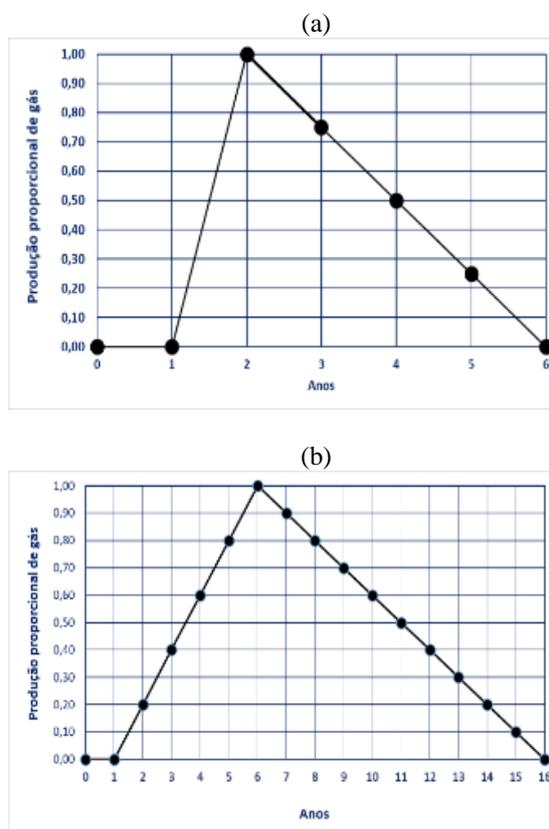
0,494: quantidade da fração degradável de resíduos “per capita”

L0: potencial de geração de metano (170 m³ por tonelada de RRSU – valor utilizado pelo Banco Mundial)

365: número de dias no ano

O modelo triangular, na versão original elaborada por Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), considera os dois diferentes tempos de biodegradação dos RRSU. Os autores consideraram o tempo de 5 anos para a fração rapidamente degradável e 15 anos ou mais para a fração lentamente degradável. Para cada uma destas duas categorias é assumida uma distribuição triangular de produção de gás no aterro, caracterizadas pelo diferente pico de produção no tempo. Observa-se que o primeiro ano é considerado como uma fase de adaptação e de não geração de metano.

Assim tem-se que a geração de metano no aterro é reduzida gradativamente até chegar a praticamente zero no final do 15º ano. O modelo metodológico é linear.



(a) – Resíduos rapidamente degradados
(b) – Resíduos lentamente degradados
Fonte - Tchobanoglous; Theisen, Vigil (1993)

Figura 1 - Modelo de distribuição triangular da formação de metano em aterro pela degradação rápida e lenta dos resíduos.

Utilizando a área do triângulo para cálculo do volume de metano formado, em adaptação ao estudo original de Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), tem-se para os resíduos rapidamente degradáveis (RD) a seguinte equação:

$$A = b.h/2 \quad (2)$$

A = volume do metano (CH₄)

A = b.h/2, onde h = altura máxima do triângulo formado pelo volume de metano

A = 5.h/2, onde b = 5, refere-se aos anos de degradação dos resíduos (RD)

A = h/2,5

O volume de metano (A) é produzido ao longo de 5 anos de forma que, no segundo ano de uso do aterro tem-se o primeiro ano de formação do gás (h – altura do triângulo de metano). No segundo ano tem-se 3/4h, no terceiro ano 2/4h, no quarto ano 1/4h, até chegar em 0 no quinto ano.

A distribuição do metano gerado a partir da degradação dos resíduos lentamente degradáveis (LD), que equivale a 5% do total de metano gerado ao longo do tempo, fica estabelecida da seguinte forma: primeiro ano = 0; segundo ano = 1/5h; terceiro ano = 2/5h; quarto ano = 3/5h; quinto ano = 4/5h; sexto ano = h; sétimo ano =

9/10h; oitavo ano = 8/10h; nono ano = 7/10h; décimo ano = 6/10h; décimo primeiro ano = 5/10h; décimo segundo ano = 4/10h; décimo terceiro ano = 3/10h; décimo quarto ano = 2/10h; décimo quinto ano = 1/10h; e décimo sexto ano = 0.

2.5 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DO METANO GERADO

Para obtenção do valor de energia elétrica a partir da queima do metano, utilizou-se como base o seu poder calorífico inferior, 35.736 kJ/Nm³, apresentado por Silva e Braz (2002), equivalente a 9,92 kWh (1kJ equivale a 0,000277778 kWh).

Para a obtenção dos dados referentes à produção de energia elétrica não será considerado a porcentagem de eficiência do sistema em transformar a energia térmica em energia elétrica, pois que se adota que 1 m³ de metano gera 9,92 kWh de energia elétrica.

2.6 METODOLOGIA PARA COMPARAÇÃO DE GERAÇÃO ENERGÉTICA ENTRE OS SISTEMAS

Na metodologia adotada para comparação de ambos os sistemas foi considerado como base o consumo médio de residências na região sudeste, que segundo EPE (2015), foi de 179 kWh/mês.

Ambos os sistemas recebem a mesma quantidade de resíduos até o 15º ano, quando a vida útil do aterro se encerra. Já o sistema de incineração continua a receber resíduos por 30 anos, e assim tem-se a metodologia de obtenção de energia em ambos os sistemas.

Desta forma, ambos os sistemas receberão a quantidade de 4.934.061,55 toneladas de RRSU durante 15 anos, mas o incinerador continua a operar por mais 15 anos, totalizando 30 anos. Assim, em 30 anos o incinerador receberá 10.953,925,67 toneladas de RRSU.

2.7 METODOLOGIA PARA COMPARAÇÃO DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA ENTRE OS SISTEMAS

Para estabelecer a comparação de ambos os sistemas neste critério, foram analisados valores obtidos em análise documental sobre a gestão dos resíduos sólidos urbanos.

Em incineradores, Tan et al. (2014), informaram que cada tonelada de RRSU incinerada gera 0,490 tCO₂e (tonelada de CO₂ equivalente).

Em aterros sanitários, Maciel e Jucá (2011) informaram que a captação do metano é eficiente em 50%, e 50% escapa pela superfície. Ministry for the Environment (2011) e JICA (2014) afirmaram que o percentual de oxidação do metano que ocorre próximo à superfície do aterro é de 10%. Tem-se ainda que do total

do biogás produzido, aproximadamente 46% é composto por CO₂.

O potencial de efeito estufa do metano é 21 vezes superior ao dióxido de carbono (CO₂), e assim os valores obtidos em relação ao metano serão multiplicados por 21.

Os gases de efeito estufa são expressados em CO₂e (dióxido de carbono equivalente). Se um aterro emitisse 1.000 toneladas de CH₄ e 1.000 toneladas de CO₂, o resultado seria 22.000 toneladas de CO₂e (21.000 toneladas de CH₄ e 1.000 toneladas de CO₂e).

3 RESULTADOS DA BASE DE DADOS

3.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA NO MUNICÍPIO DE LENÇÓIS PAULISTA – FRAÇÕES RÁPIDA E LENTAMENTE DEGRADÁVEIS

A importância da análise gravimétrica na cidade de Lençóis Paulista é grande porque indica as diferentes frações que compõem os RRSU: recicláveis, degradáveis, resíduos verdes e rejeitos.

Para o sistema de incineração a maior quantidade de resíduos orgânicos degradáveis rápida e lentamente, resulta em baixo poder calorífico dos rejeitos dos resíduos sólidos e, portanto, na baixa recuperação de energia.

Para o sistema de aterro sanitário, a maior quantidade de resíduos degradáveis resulta em maior volume de metano, e conseqüentemente em maior quantidade de energia recuperada. Conclui-se que as características dos RRSU requeridas por um sistema não são ideais para as características requeridas pelo outro sistema.

Tabela 1 - Frações rápida e lentamente degradáveis em %

Degradabilidade	Resíduo	%
Rápida	Fração orgânica	81,76
Rápida	Papel/papelão	13,25
Rápida	Folhas, ramos	0,45
Lenta	Madeira	1,10
Lenta	Têxteis e couros	3,44
		100,00

Fonte – o autor.

3.2 RESÍDUOS COM POTENCIAL ENERGÉTICO GERADOS NA REGIÃO DE BAURU

A tabela 2 indica as massas de RRSU gerados na região adotada, sendo que as frações determinadas são estabelecidas com base nos valores percentuais obtidos em Lençóis Paulista.

Tabela 2 - Quantidade de RSU com potencial de geração de energia gerada na região de Bauru/SP

	Cidade	População	Massa de RRSU gerados em ton/d	Resíduos verdes
1	Agudos	36.524	27,92	0,44
2	Arealva	8.351	4,60	0,10
3	Areiópolis	11.049	6,87	0,13
4	Avaí	5.275	2,48	0,06
5	Balbinos	4.819	1,09	0,06
6	Bariri	34.048	25,84	0,41
7	Barra Bonita	36.321	28,45	0,44
8	Bauru	366.992	324,57	5,23
9	Bocaina	11.810	7,62	0,14
10	Boracéia	4.631	2,91	0,06
11	Borebi	2.519	1,54	0,03
12	Botucatu	141.032	120,95	1,55
13	Cabrália Paulista	4.371	2,66	0,05
14	Cafelândia	17.499	10,64	0,21
15	Dois Córregos	26.517	20,09	0,32
16	Duartina	12.558	7,90	0,15
17	Guarantã	6.651	3,97	0,08
18	Iacanga	11.066	6,75	0,13
19	Ibitinga	57.649	44,30	0,70
20	Igará do Tietê	24.451	17,02	0,30
21	Itaju	3.606	1,84	0,04
22	Itapuí	13.328	8,91	0,17
23	Jau	143.283	124,92	1,73
24	Lençóis Paulista	66.131	51,73	0,80
25	Lins	76.562	60,16	0,92
26	Lucianópolis	2.372	1,31	0,03
27	Macatuba	17.013	11,56	0,21
28	Mineiros do Tietê	12.700	8,49	0,15
29	Paulistânia	1.840	0,88	0,02
30	Pederneras	44.910	33,41	0,54
31	Pirajuí	24.456	14,00	0,30
32	Piratininga	13.093	7,86	0,16
33	Pongai	3.508	2,06	0,04
34	Pratânia	5.021	2,66	0,06
35	Presidente Alves	4.179	2,43	0,05
36	Reginópolis	8.640	3,60	0,10
37	São Manuel	40.367	31,50	0,49
38	Ubirajara	7.711	2,39	0,09
39	Uru	1.229	0,75	0,02
		1.038,63	16,51	16,51
			632,65	830,91
			649,16 *	847,42 **

* Resíduos destinados ao aterro sanitário

** Resíduos destinados ao incinerador

Fonte – adaptado de CETESB (2015).

A tabela 2 apresenta o volume total de RRSU gerados (1.038,63 t), do qual subtrai-se 20% referente aos resíduos recicláveis (207,72 t/d), o que resultou em um volume de 830,91 toneladas diárias, valor que será utilizado para os cálculos de geração de energia em incinerador, adicionado de 16,51 toneladas de resíduos verdes, totalizando 847,42 toneladas.

Para o cálculo de geração de metano no aterro sanitário, o valor obtido é de 632,65 t diárias de RRSU, que corresponde à fração degradável dos RRSU. Com a adição de 16,51 toneladas de resíduos verdes, obtém-se o valor de 649,16 toneladas, que determina uma geração “per capita” de RRSU que geram metano de 0,494 kg/hab, conforme informado na fórmula indicada na metodologia.

3.3 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM UNIDADE DE INCINERAÇÃO

Em atendimento a metodologia estabelecida, a tabela 3 apresenta os valores referentes a geração de energia elétrica.

No sistema de incineração a produção de energia se inicia a partir do funcionamento do incinerador e, desta forma, no primeiro ano já é possível fornecer energia

elétrica para 72013 residência com consumo médio de 179 kWh por mês (Tabela 3), ao contrário do que ocorre no sistema de aterro sanitário que inicia o fornecimento de energia a partir do segundo ano (Tabela 4).

Tabela 3 - Potencial de geração de energia elétrica em unidade de incineração e potencial quantitativo de atendimento a residências.

Ano	População	tRRSU/ano	Energia bruta kWh/ano	Energia líquida kWh/mês	Qtdd Residências *
2.015	1.314.082	309.367,75	154.683.877,43	12.890.323,12	72.013
2.016	1.325.515	312.059,25	156.029.627,16	13.002.468,93	72.639
2.017	1.337.046	314.774,17	157.387.084,91	13.115.590,41	73.271
2.018	1.348.679	317.512,71	158.756.352,55	13.229.696,05	73.909
2.019	1.360.412	320.275,07	160.137.532,82	13.344.794,40	74.552
2.020	1.372.248	323.061,46	161.530.729,36	13.460.894,11	75.201
2.021	1.384.186	325.872,09	162.936.046,70	13.578.003,89	75.855
2.022	1.396.229	328.707,18	164.353.590,31	13.696.132,53	76.515
2.023	1.408.376	331.566,93	165.783.466,54	13.815.288,88	77.180
2.024	1.420.629	334.451,57	167.225.782,70	13.935.481,89	77.852
2.025	1.432.988	337.361,29	168.680.647,01	14.056.720,58	78.529
2.026	1.445.455	340.296,34	170.148.168,64	14.179.014,05	79.212
2.027	1.458.031	343.256,92	171.628.457,71	14.302.371,48	79.902
2.028	1.470.716	346.243,25	173.121.625,29	14.426.802,11	80.597
2.029	1.483.511	349.255,57	174.627.783,43	14.552.315,29	81.298
2.030	1.496.418	352.294,09	176.147.045,15	14.678.920,43	82.005
2.031	1.509.436	355.359,05	177.679.524,44	14.806.627,04	82.719
2.032	1.522.568	358.450,67	179.225.336,30	14.935.444,69	83.438
2.033	1.535.815	361.569,19	180.784.596,73	15.065.383,06	84.164
2.034	1.549.176	364.714,85	182.357.422,72	15.196.451,89	84.896
2.035	1.562.654	367.887,86	183.943.932,30	15.328.661,02	85.635
2.036	1.576.249	371.088,49	185.544.244,51	15.462.020,38	86.380
2.037	1.589.963	374.316,96	187.158.479,43	15.596.539,95	87.132
2.038	1.603.795	377.573,52	188.786.758,21	15.732.229,85	87.890
2.039	1.617.748	380.858,41	190.429.203,00	15.869.100,25	88.654
2.040	1.631.823	384.171,87	192.085.937,07	16.007.161,42	89.425
2.041	1.646.020	387.514,17	193.757.084,72	16.146.423,73	90.203
2.042	1.660.340	390.885,54	195.442.771,36	16.286.897,61	90.988
2.043	1.674.785	394.286,25	197.143.123,47	16.428.593,62	91.780
2.044	1.689.356	397.716,54	198.858.268,64	16.571.522,39	92.578
2.045	1.704.053	401.176,67	200.588.335,58	16.715.694,63	93.384

* consumo médio de 179 kWh/mês

Fonte: o autor.

3.4 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO

A partir da metodologia estabelecida elaborou-se a tabela 4, a qual apresenta a geração do metano ao longo do tempo no aterro sanitário e a conversão da energia contida explicitada em kWh.

Tabela 4 – Energia produzida em aterro sanitário a partir da captação do metano

Ano	Pop.	RRSU	RD	LD	RD + LD	metano (m³)	Energia	Energia	Qtdd
		t/ano	metano (m³)	metano (m³)	metano (m³)	50% escape	kWh/ano	kWh/mês	Residências
2015	1.314.082	236.942,13							
2016	1.325.515	239.003,52							
2017	1.337.046	241.082,85	7.653,231	26.853	7.680,084	3.840,042	38.093,217	3.174,435	17.734
2018	1.348.679	243.180,27	13.513,444	80.794	13.594,238	6.797,119	67.427,418	5.618,952	31.391
2019	1.360.412	245.295,94	17.403,452	134.734	17.538,186	8.769,093	86.989,404	7.249,117	40.498
2020	1.372.248	247.430,02	19.468,169	270.881	19.739,050	9.869,525	97.905,690	8.158,807	45.580
2021	1.384.186	249.582,66	19.637,543	407.505	20.045,047	10.022,524	99.423,434	8.285,286	46.287
2022	1.396.229	251.754,03	19.808,389	515.354	20.323,743	10.161,872	100.805,767	8.400,481	46.930
2023	1.408.376	253.944,29	19.980,722	587.848	20.568,570	10.284,285	102.020,106	8.501,675	47.495
2024	1.420.629	256.153,60	20.154,554	686.949	20.841,503	10.420,752	103.373,856	8.614,488	48.126
2025	1.432.988	258.382,14	20.329,899	830.550	21.160,449	10.580,224	104.955,827	8.746,319	48.862
2026	1.445.455	260.630,06	20.506,769	904.909	21.411,678	10.705,839	106.201,925	8.850,160	49.442
2027	1.458.031	262.897,54	20.685,178	966.489	21.651,667	10.825,833	107.392,268	8.949,356	49.996
2028	1.470.716	265.184,75	20.865,139	1.015.177	21.880,317	10.940,158	108.526,370	9.043,864	50.524
2029	1.483.511	267.491,86	21.046,666	1.050.863	22.097,529	11.048,764	109.603,743	9.133,645	51.026
2030	1.496.418	269.819,04	21.229,772	1.073,432	22.303,204	11.151,602	110.623,892	9.218,658	51.501
2031			21.414,471	1.082,771	22.497,242	11.248,621	111.586,320	9.298,860	51.949
2032			21.600,777	1.076,167	22.676,944	11.338,472	112.477,642	9.373,137	52.364
2033			12.997,727	1.070,848	14.068,574	7.034,287	69.780,129	5.815,011	32.486
2034			6.517,574	1.004,573	7.522,147	3.761,074	37.309,850	3.109,154	17.370
2035			2.178,790	934,797	3.113,587	1.556,793	15.443,391	1.286,949	7.190
2036				819,548	1.639,095	819,548	8.129,913	677,493	3.785
2037				672,450	672,450	336,225	3.335,353	277,946	1.553
2038				539,496	539,496	269,748	2.675,898	222,991	1.246
2039				420,807	420,807	210,404	2.087,203	173,934	972
2040				316,509	316,509	158,254	1.569,883	130,824	731
2041				226,726	226,726	113,363	1.124,560	93,713	524
2042				151,584	151,584	75,792	751,859	62,655	350
2043				91,212	91,212	45,606	452,412	37,701	211
2044				45,737	45,737	22,869	226,857	18,905	106
2045				15,291	15,291	7,645	75,842	6,320	35

RD - rapidamente degradável LD - lentamente degradável * consumo médio de 179 kWh/mês

Fonte - o autor.

4. RESULTADOS FINAIS E DISCUSSÃO

4.1 COMPARATIVO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

No primeiro ano o aterro sanitário não produz energia para entregar às residências, enquanto que o incinerador pode abastecer 72.013 residências que consomem 179 kWh/mês. Na média dos 30 anos, o incinerador pode fornecer energia para 84.993 residências contra 26.542 residências que poderiam ser abastecidas com energia elétrica a partir da captação do metano obtido no aterro.

4.2 COMPARATIVO DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Ambos os sistemas são responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa e pela poluição da atmosfera.

Tabela 5 - GEE emitidos pelos sistemas

Emissões de GEE - aterro sanitário - Peri. 30 anos - Disposição 4.934.061,55 tRRSU				
		tCH ₄	tCO ₂	GEE tCO _{2e}
Biogás total (m³)	689.665.334,00			
CH ₄ - 50%	344.832.667,00	111.229,23	305.880,37	6.423.487,75
CO ₂ e outros gases	344.832.667,00			
CO ₂ - 46%	317.246.053,64		567.870,44	567.870,44
Total CO _{2e} emitido				6.991.358,18
Emissões de GEE em Incinerador - Per. 15 anos - Disposição de 4.934.061,55 tRRSU				
tCO _{2e} /tRRSU	tRRSU			
0,49	4.934.061,55			2.417,690,16

Fonte – o autor.

Mas há de se destacar que foi considerado apenas a emissão de CO₂ por parte do incinerador. Outros gases gerados no incinerador também podem ser responsáveis pelo efeito estufa à medida que não são captados pelo sistema de limpeza de gases, em circunstâncias de

eventuais falhas. Dentre estes citam-se o óxido nitroso (N₂O), óxidos de nitrogênio (NO_x), amônia (NH₃), carbono orgânico (C), e excepcionalmente até o CH₄. Porém o CO₂ é o gás predominante nas emissões.

Em relação ao aterro sanitário, tem-se que a emissão de CH₄ é bastante intensa e, como foi verificado em pesquisa documental, o metano é um gás muito potente no processo de promoção do efeito estufa.

5 CONCLUSÕES

Em 15 anos o sistema de incineração tem potencial de recuperação de energia de 1,7 vezes maior que o sistema de aterro sanitário, considerando a mesma quantidade de RRSU. Em 30 anos a incineração geraria 3,2 vezes mais energia elétrica que o aterro sanitário. Considerando o mesmo período de geração de energia elétrica (30 anos), o sistema de incineração recebe 2,2 vezes mais quantidade de RRSU.

Aterros são responsáveis por emitir 2,9 vezes mais gases de efeito estufa (GEE) quando comparados com a emissão dos mesmos gases pelo sistema de incineração.

A incineração leva vantagem sobre o aterro sanitário na gestão de resíduos sólidos, porque gera mais energia elétrica, emite menos gases de efeito estufa e, após adotadas metodologias eficientes de controle de gases, polui menos o ambiente.

A incineração por ser um sistema mais fechado e estanque, apresenta melhores condições de controle e mitigação dos impactos ambientais negativos, ao contrário do aterro sanitário que é um sistema mais aberto e que perdura por um período mais longo até que a decomposição total dos resíduos ocorra.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Annual North American Waste-to-Energy Conference 16th, 2008, Philadelphia. **Anais...** Philadelphia: The American Society of Mechanical Engineers. Disponível em:

<<http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/nawtec/nawtec16/nawtec16-1930.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2017.

CETESB. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2014**. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente, 2015. 126 p. (Série Relatórios).

CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancun. **Anais...** Cancun: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2002.

ISLAN, K. M. N. Municipal Solid Waste to Energy Generation in Bangladesh: Possible Scenarios to Generate Renewable Electricity in Dhaka and Chittagong City. Institute of Forestry and Environmental Sciences, University of Chittagong, Chittagong 4331, Bangladesh. **Journal of Renewable Energy**, New York, v. 2016. Disponível em:

<<https://www.hindawi.com/journals/jre/2016/1712370/>>.
Acesso em: 22 mar. 2017.

JICA – Japan International Cooperation Agency. **Solid Waste Management/Landfill (Methane Recovery)**. March, 2014. Disponível em: https://www.jica.go.jp/english/our_work/climate_change/c8h0vm00000137cc-att/M17_Solid_Waste_Management_Landfill_E.pdf. Acesso em 17 out. 2017.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, F. J. T. Evaluation of landfill Gas Production and Emission in MSW Large-Scale Experimental Cell in Brazil. **Journal of Waste Management**, New York, v. 31, p. 966-977, 2011.

MARTINS, B. L.; LEO, A. L. Estudo de caso da gestão de resíduos sólidos urbanos na Alemanha. [S.l.: s.n.], 2016. 40 p. Apostila didática.

MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT. **A guide to landfill methane in the New Zealand Emissions trading scheme**. Wellington: Ministry for the Environment, 2011. Disponível em: <<http://www.epa.govt.nz/Publications/guide-to-landfill-methane-in-nz-ets.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2017.

RESENHA MENSAL DO MERCADO ENERGÉTICO. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-156/Resenha%20Mensal%20do%20Mercado%20de%20Energia%20E1%C3%A9trica%20-%20Julho%202015.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, VII, 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo. Associação Brasileira de Limpeza Pública, 2000.

TAN, S.; HASHIM, H; LIM, J S; HO, W S; LEE, C T; YAN, J. **Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: analysis of a low carbon scenario in Malaysia**. **Applied Energy**, Skudai Johor, v. 136, p. 797–804, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.003>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

TCHOBANOGLOUS, G.; THIESEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management - engineering principles and management issues**. New York: McGraw-Hill International Editions, 1993. 978 p.