

## **ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COM USO DA TECNOLOGIA DE DIGESTÃO ANAERÓBICA EM BIODIGESTORES**

**E. R. Silva<sup>1</sup>, Juliana T. C. L. Toneli<sup>1</sup>, R. Palacios-Bereche<sup>1</sup>**

Universidade Federal do ABC – Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas  
Rua Santa Adélia, 166 – Bairro Bangu – CEP 09210-170 – Santo André/SP, Brasil  
Tel. +55 86 98151-2885 – e-mail: elissando.silva@ufabc.edu.br

*Recibido 28/07/17, aceptado 27/09/17*

**RESUMO:** Este artigo tem por como objetivo estimar o potencial energético da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos dispostos no aterro sanitário de Caieiras com o uso da tecnologia de digestão anaeróbica em biodigestores. Para estimar o potencial energético foram usados dois modelos matemáticos que permitem estimar a produção de metano em função dos diversos fatores que interferem no processo (concentração de acetato e de micro-organismos, variação do pH, dentre outros). De acordo com os resultados obtidos seria possível uma potência elétrica mínima de 32,5 MW e uma potência máxima de 47,0 MW. Baseados nos resultados obtidos, conclui-se que a produção anual de eletricidade, obtidas a partir da combustão do biogás, produzido a partir do processo de digestão anaeróbica, representa cerca de 70% do consumo de energia elétrica (residencial, comercial, rural, industrial e iluminação pública) do município de Caieiras (no qual o aterro está localizado), no ano de 2016.

**Palavras-chave:** resíduos sólidos urbanos, digestão anaeróbica, biogás, potencial energético.

### **INTRODUÇÃO**

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) estão presentes em qualquer sociedade, como resultado das atividades humanas, são constituídos por diversos componentes, tais como: orgânicos, papel, plásticos, metais, vidros, dentre outros. Sua taxa de produção e composição física variam geograficamente, pois dependem do nível socioeconômico e cultural da população e das condições climáticas da região, além de sofrerem influências sazonais (Akinci et al., 2012; Al-Jarallah e Aleisa, 2014; Silva, 2015).

No âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída no Brasil (no ano de 2010), devem ser considerados como objetivos para o gerenciamento dos RSU, na seguinte sequência, não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Os municípios precisam encontrar meios para que a disposição seja feita em espaços e/ou sob condições adequadas, de modo a minimizar os impactos socioeconômicos e ambientais (Brasil, 2010).

Os principais métodos de tratamento de RSU com recuperação de energia incluem a incineração com recuperação energética, a digestão anaeróbica em biodigestores e a disposição em aterros sanitários com aproveitamento do biogás. Aterros sanitários são indispensáveis em sistemas integrados de gestão de RSU, uma vez que qualquer outro método de tratamento gerará rejeitos que não poderão mais ser reutilizados ou recuperados, ou seja, deverão ser depositados em aterros sanitários.

A escolha da alternativa mais adequada para a gestão dos RSU de uma determinada região deve ser baseada em fatores econômicos, sociais, ambientais e técnicos. Dentre os fatores técnicos, um dos mais importantes é a composição dos RSU. A fração orgânica constitui o principal fator determinante da viabilidade da compostagem e digestão anaeróbica, ao passo que a fração inorgânica determina a viabilidade da incineração devido ao elevado poder calorífico destes materiais (Silva et al., 2014).

No Brasil, a disposição em aterros sanitários é a tecnologia mais amplamente utilizada para o tratamento dos RSU. Uma vez que, nos municípios brasileiros, os RSU contêm uma elevada fração de orgânicos, ao serem dispostos no aterro, eles sofrem um processo natural de degradação com ausência de oxigênio, produzindo biogás. Entretanto, devido ao fato dos microrganismos não se encontrarem em condições ideais, esse processo é muito lento e pode continuar ao longo de dezenas de anos.

A digestão anaeróbia pode ser definida, de forma resumida, como o processo de conversão de materiais biodegradáveis em biogás composto majoritariamente por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ) e digestato (lodo), por meio da ação de bactérias em um ambiente com ausência de oxigênio (Adekunle e Okolie, 2015). O processo de digestão anaeróbia tem início com a hidrólise dos compostos orgânicos. Em seguida, ocorre a fermentação dos açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, que são convertidos em dióxido de carbono, hidrogênio, amônia, álcoois e ácidos orgânicos. Esses produtos são convertidos em ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio. Na fase da metanogênese é produzido o biogás, uma mistura de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e outros gases em menor proporção (Silva, 2015).

O potencial de conversão energética dos RSU (processo de biodigestão anaeróbia) pode ser estimado por meio de modelos matemáticos. No entanto, os modelos utilizados são complexos, pois envolvem uma série de variáveis que estão associadas à composição heterogênea da biomassa e à grande variedade de micro-organismos envolvidos no processo e nas várias etapas. Na literatura são encontrados diversos modelos matemáticos para estimativa de  $\text{CH}_4$  produzido em biodigestores anaeróbios. Andrews (1969) propôs um modelo matemático que relacionava a concentração de ácido volátil e a taxa de crescimento das bactérias. Buhr e Andrews (1977) desenvolveram um modelo que incorpora os efeitos da temperatura sobre variáveis biológicas. Moletta et al. (1986) desenvolveram um modelo que inclui duas fases da digestão anaeróbia: a conversão de glicose em acetato e a conversão de acetato em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . Em 2002, a IWA (International Water Association) desenvolveu o modelo ADM1 (Anaerobic Digestion Model No 1) que inclui os principais processos envolvidos na digestão anaeróbia. O ADM1 emprega um grande número de coeficientes, dificultando a simulação da geração de  $\text{CH}_4$ . Liu et al. (2008) desenvolveram um modelo que inclui as fases de hidrólise do substrato, o consumo do substrato solúvel e a produção de  $\text{CH}_4$ .

Diante do exposto, este artigo tem por objetivo estimar o potencial energético da fração orgânica dos RSU (FORSU) depositada no aterro de Caieiras. Para alcançar os objetivos foram utilizadas informações experimentais sobre a composição gravimétrica dos RSU e foram aplicados modelos matemáticos para estimar o potencial de produção de  $\text{CH}_4$  a partir do processo de biodigestão anaeróbia em biodigestores.

## **METODOLOGIA**

### *Local de estudo*

O estudo foi realizado no aterro sanitário de Caieiras, localizado no município de Caieiras (população de 97.016 habitantes), estado de São Paulo, Brasil. O aterro possui uma área de 350 hectares, sendo que 150 hectares foram destinados à área de reserva legal e 200 hectares referem-se à área disponível para a disposição de RSU. O aterro iniciou suas atividades operacionais de recebimento de RSU no ano de 2002. O aterro de Caieiras recebe RSU oriundos dos municípios de Caieiras, Franco da Rocha, Francisco Morato, Cajamar, Campo Limpo Paulista, Várzea Paulista, Mairiporã, Taboão da Serra, Embu-Guaçu, Itapeverica da Serra e São Paulo. Atualmente, o aterro recebe em média 9.800 toneladas de RSU por dia (cerca de 60% é proveniente da cidade de São Paulo).

### *Caracterização RSU dispostos no aterro de caieiras*

Na Tabela 1 são apresentadas as taxas de deposições de RSU no aterro de sanitário de Caieiras no período de 2002 a 2016. O aterro dispõe de registros de deposição dos RSU, de forma que são conhecidas as características, data e local de deposição.

Ano	RSU (ton.ano <sup>-1</sup> )	Ano	RSU (ton.ano <sup>-1</sup> )	Ano	RSU (ton.ano <sup>-1</sup> )
2002	70.981	2007	2.111.539	2012	3.095.262
2003	415.797	2008	2.880.235	2013	3.447.617
2004	454.349	2009	2.579.915	2014	3.571.300
2005	701.725	2010	2.770.520	2015	3.572.000
2006	735.517	2011	2.920.000	2016	3.573.000

Tabela 1: Taxa de disposição de RSU no aterro sanitário de Caieiras.

A caracterização gravimétrica é um importante instrumento de planejamento, pois oferece subsídio para a concepção do sistema de gestão de RSU, como por exemplo, a escolha de alternativas de coleta, tratamento e destinação final. Ela é importante na quantificação do PCI, pois a composição dos RSU é um fator que varia de acordo com as características de cada local. Assim, o potencial energético dos RSU de um determinado local pode variar em relação a outro, devido a fatores socioeconômicos, climatológicos, dentre outros. Na tabela 2 é apresentada a composição gravimétrica dos RSU depositados no aterro sanitário de Caieiras.

Resíduos	(%)	Resíduos	(%)	Resíduos	(%)
Orgânicos	55,7	Têxteis	2,3	Terra/pedras	2,7
Papel/papelão	15,8	Borracha	0,6	Outros	3,9
Plásticos	11,6	Metais	2,9	<b>Total</b>	<b>100</b>
Madeira	2,8	Vidros	1,7		

Tabela 2: Composição gravimétrica dos RSU dispostos no aterro de Caieiras.

Fonte: Essencis, 2012.

#### Estimativa da geração de biogás em biodigestores

Neste artigo, a taxa de geração de CH<sub>4</sub> será obtida a partir dos modelos de Moletta et al. (1986) e Liu et al. (2008). O modelo de Moletta et al. (1986) considera que as taxas de produção de biomassa e metabólitos são descritas por relações distintas. Esse modelo não inclui a inibição da taxa de degradação do propionato por hidrogênio e acetato. No modelo de Moletta et al. (1986), a taxa de variação de bactérias acidogênicas com tempo é expressa pela Equação 15.

$$\frac{dX_a}{dt} = D(X_{ain} - X_a) + \mu_a X_a - K_{da} X_a \quad (1)$$

em que o índice, a, refere-se à fase acidogênica, D é taxa de diluição (d<sup>-1</sup>), X<sub>ain</sub> é a concentração de bactérias do afluente (g.L<sup>-1</sup>), X<sub>a</sub> é a concentração de bactérias no biodigestor (g.L<sup>-1</sup>), K<sub>da</sub> é a taxa de mortalidade das bactérias (d<sup>-1</sup>) e  $\mu_a$  é taxa de crescimento das bactérias (d<sup>-1</sup>), expressa pela Equação 2.

$$\mu_a = \frac{\mu_{amax}}{1 + (K_{xa}/S) + (A_h/K_{ixa})} \quad (2)$$

em que, A<sub>h</sub> é a concentração de ácido acético não-ionizado (g.L<sup>-1</sup>), K<sub>xa</sub> é uma constante de saturação do crescimento dos micro-organismos (g.L<sup>-1</sup>), K<sub>ixa</sub> é uma constante de inibição do crescimento de bactéria (g.L<sup>-1</sup>),  $\mu_{amax}$  é a taxa de crescimento máxima dos micro-organismos acidogênicos (d<sup>-1</sup>) e S é a concentração equivalente de glicose do substrato (g.L<sup>-1</sup>).

A taxa de variação de glicose no substrato na fase acidogênica, expressa por (g.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>), é dada por:

$$\frac{dS_a}{dt} = D(S_{inf} - S) - \left(\frac{dS}{dt}\right)_x - \left(\frac{dS}{dt}\right)_{ac} \quad (3)$$

em que, S<sub>inf</sub> é a concentração substrato do afluente (g.L<sup>-1</sup>), (dS/dt)<sub>x</sub> é a taxa de conversão do substrato para biomassa acidogênica (g.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>) e (dS/dt)<sub>ac</sub> é a taxa de conversão de substrato para ácido acético (g.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>). A concentração de ácido acético não-ionizado é estimada pela Equação 4.

$$A_h = \frac{A}{1 + (K_e / H^+)} \quad (4)$$

em que,  $A$ , é o total de ácido acético ( $\text{g.L}^{-1}$ ),  $K_e$  é uma constante de dissociação do ácido acético, a  $35^\circ\text{C}$  e  $H^+$  ( $= 10^{-\text{pH}}$ ) é a concentração de íons de hidrogênio ( $\text{g.L}^{-1}$ ).

A taxa de variação das bactérias metanogênicas é dada pela Equação 5.

$$\frac{dX_m}{dt} = D(X_0 - X_m) + \mu_m X_m - K_{dm} X_m \quad (5)$$

em que  $X_0$  e  $X_m$  são as concentrações de bactérias metanogênicas no afluente e no biodigestor ( $\text{g.L}^{-1}$ ), respectivamente,  $K_{dm}$  é a taxa de mortalidade das bactérias metanogênica e  $\mu_m$  é a taxa de crescimento das bactérias metanogênica ( $\text{d}^{-1}$ ).

$$\mu_m = \frac{\mu_{m\max}}{1 + (K_{sm} / A_h) + (A_h / K_{ixm})} \quad (6)$$

onde,  $K_{sm}$  é a constante de saturação do crescimento das bactérias ( $\text{g.L}^{-1}$ ),  $K_{ixm}$  é a constante de inibição do crescimento das bactérias ( $\text{g.L}^{-1}$ ) e  $\mu_{m\max}$  é a taxa de crescimento máxima das bactérias ( $\text{d}^{-1}$ ). A taxa de produção de  $\text{CH}_4$ , expressa por ( $\text{g.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ ), descrita pelo modelo de Moletta et al. (1986) é obtida pela Equação 7.

$$\frac{d\text{CH}_4}{dt} = V_{m\max} X_m \left( \frac{A_h}{A_h + K_m} \right) \left( \frac{K_{im}}{K_{im} + A_h} \right) \quad (7)$$

onde,  $V_{m\max}$  é a taxa de rendimento máxima de geração de  $\text{CH}_4$  (a  $0^\circ\text{C}$  e pressão de 1 atm) por grama de bactérias metanogênicas, por dia ( $\text{g.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$ ),  $K_{im}$  é uma constante de inibição do acetato ( $\text{g.L}^{-1}$ ) e  $K_m$  é uma constante de saturação de geração de  $\text{CH}_4$  ( $\text{g.L}^{-1}$ ).

No modelo de Liu et al. (2008) o processo de digestão anaeróbia foi dividido em três etapas: hidrólise de substratos, consumo de substrato solúvel e produção de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . A taxa de variação da concentração de bactérias hidrolíticas pode ser obtida a partir da Equação 8.

$$\frac{dX_h}{dt} = \mu_h X_h - K_{dh} X_h \quad (8)$$

em que,  $k_{dh}$  é a taxa de mortalidade de bactérias hidrolíticas ( $\text{g.L}^{-1}$ ),  $X_h$  é concentração das bactérias hidrolíticas ( $\text{g.L}^{-1}$ ) e  $\mu_h$  é a taxa de crescimento das bactérias hidrolíticas, expressa pela Equação 9.

$$\mu_h = \frac{\mu_{h\max} S_h}{K_{sh} + S_h} \quad (9)$$

onde  $\mu_{h\max}$  é a taxa de crescimento máxima das bactérias ( $\text{d}^{-1}$ ),  $S_h$  é concentração de glicose equivalente de substratos orgânicos biodegradáveis ( $\text{g.L}^{-1}$ ) e  $K_{sh}$  é o coeficiente de meia-saturação para bactérias ( $\text{g.L}^{-1}$ ). A Equação 10 fornece a taxa variação do substrato solúvel na fase acidogênica.

$$\frac{dS_a}{dt} = \frac{\mu_h X_h}{Y_{vh}} - \frac{\mu_a X_a}{Y_a} \quad (10)$$

onde,  $X_a$  é a concentração de bactérias ( $\text{g.L}^{-1}$ ),  $Y_a$  e  $Y_{vh}$  são os coeficientes de degradação e rendimento de  $S_a$ , respectivamente. A biomassa acidogênica é,

$$\frac{dX_a}{dt} = \mu_a X_{0a} - K_{da} X_{0a} \quad (11)$$

onde  $X_{0a}$  é a concentração inicial de bactérias acidogênicas ( $\text{g.L}^{-1}$ ).

A taxa de crescimento das bactérias acidogênicas é obtida pela Equação 12.

$$\mu_a = \mu_{amax} \frac{1}{1 + (K_{sa}/S_a) + (A_h/K_{ia})} \quad (12)$$

onde,  $\mu_{amax}$  é a taxa máxima de crescimento das bactérias acidogênicas ( $d^{-1}$ ),  $K_{sa}$  é uma de constante de crescimento das bactérias ( $g.L^{-1}$ ) e  $K_{ia}$  é o coeficiente de inibição do acetato não-ionizado ( $g.L^{-1}$ ). A variação da concentração do acetato é,

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\mu_a X_a}{Y_{va}} - \frac{\mu_m X_m}{Y_m} \quad (13)$$

em que  $Y_m$  é o coeficiente de degradação de A e  $Y_{va}$  é o coeficiente de rendimento de A. O balanço de ionização do acetato é obtido por:  $A = A_u + A_c^-$ , em que  $A_c^-$  é a concentração de acetato ionizado ( $g.L^{-1}$ ) e  $A_u$ , é a concentração de acetato não-ionizado ( $g.L^{-1}$ ), descrita pela Equação 14.

$$A_u = \frac{Ac^- \times H^+}{K_e} \quad (14)$$

A taxa de variação de bactérias metanogênica, descrita pelo modelo de Liu et al. (2008) pode ser obtida a partir da Equação 15 e o crescimento das bactérias metanogênica é obtido pela Equação 16.

$$\frac{dX_m}{dt} = \mu_m X_m - K_{dm} X_m \quad (15)$$

$$\mu_m = \frac{\mu_{mmax}}{1 + (K_{sm}/A_u) + (A_u/K_{ixm}) + (NH_{3(u)}/K_{iam})} \quad (16)$$

onde  $NH_{3(u)}$  é a concentração de amônia não-ionizada ( $g.L^{-1}$ ),  $K_{iam}$  é o coeficiente de inibição de amônia não-ionizada ( $g.L^{-1}$ ). A variação da concentração de amônia é,

$$\frac{dNH_3}{dt} = \mu_h X_h Y_{NH_3} - (\mu_h - K_{dh} + \mu_a - K_{da} + \mu_m - K_{dm}) Y_N \quad (17)$$

em que  $NH_3$  é a concentração total de amônia ( $g.L^{-1}$ ),  $Y_{NH_3}$  é o coeficiente de rendimento para amônia e  $Y_N$  é a coeficiente de consumo de amônia.

A expressão da taxa de produção de metano, expressa por ( $g.L^{-1}.d^{-1}$ ), descrita pelo modelo de Liu et al. (2008) pode ser obtida pela Equação 18.

$$\frac{dCH_4}{dt} = V_{mmax} X_m \left( \frac{Ac^- \times 10^{-pH}}{Ac^- \times 10^{-pH} + K_e K_m} \right) \times \left( \frac{K_{im} K_e}{K_{im} K_e + Ac^- \times 10^{-pH}} \right) \quad (18)$$

### *Estimativa da potência elétrica*

Normalmente, a potência elétrica,  $P_{AD}$  (MW), é obtida a partir da taxa de geração de metano,  $R_{AD}$  ( $m^3.s^{-1}$ ), em biodigestores anaeróbios. Assim, a potência elétrica pode ser expressa por:

$$P_{AD} = \eta_m \eta_g F_c P_{CH_4} R_{AD} \quad (23)$$

onde,  $\eta_m$  (= 28%) é a eficiência dos motores de combustão interna,  $\eta_g$  (= 98%) é a eficiência do gerador elétrico,  $F_c$  (= 0,90) é o fator de capacidade, e  $P_{CH_4}$  (= 36 MJ/m<sup>3</sup>) é o poder calorífico inferior (PCI) do gás metano.

## Parâmetros utilizados para estimar a geração de metano em biodigestores

Nas Tabelas 3 a 5 são apresentados os parâmetros utilizados para estimar o potencial de produção de metano em biodigestores anaeróbios. Na Tabela 3 são apresentadas as constantes utilizadas pelos modelos para estimar o potencial de geração de CH<sub>4</sub> (parâmetros determinados experimentalmente por vários autores). Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros de processo utilizados para as estimativas da geração de CH<sub>4</sub> em biodigestores com variação de sólidos totais de 2,4 a 39%. É importante que esses parâmetros tenham sido determinados para as mesmas condições ambientais (temperatura, sólidos totais e tempo de retenção hidráulico). Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros calculados a partir dos dados apresentados nas Tabelas 3 e 4. Os valores de X<sub>m</sub> foram assumidos com base nos valores sugerido por Mu et al. (2008), que pode variar de 0,15 a 15,0 (g.L<sup>-1</sup>).

Parâmetros	Valor <sup>1</sup>	Parâmetros	Valor <sup>2</sup>	Parâmetros	Valor <sup>3</sup>
K <sub>m</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	0,086	V <sub>mmax</sub> (g.g <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> )	0,50	μ <sub>mmax</sub> (d <sup>-1</sup> )	0,60
K <sub>im</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	0,086	K <sub>ixm</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	0,04	μ <sub>amax</sub> (d <sup>-1</sup> )	0,40
K <sub>sm</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	0,10	K <sub>ia</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	0,02	K <sub>iam</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	0,12
K <sub>dm</sub> (d <sup>-1</sup> )	0,069	Y <sub>NH3</sub>	0,183	K <sub>N</sub>	5,3 x 10 <sup>-10</sup>
μ <sub>hmax</sub> (d <sup>-1</sup> )	0,069	Y <sub>N</sub>	0,15	Y <sub>a</sub>	0,188
K <sub>sh</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	0,069	Y <sub>vh</sub>	0,22	Y <sub>va</sub>	2,65
K <sub>dh</sub> (d <sup>-1</sup> )	0,069	K <sub>e</sub>	1,728 x 10 <sup>-5</sup>	Y <sub>m</sub>	0,08

Tabela 3: Constantes utilizados para estimar a produção de metano em biodigestores.

Fonte: <sup>1</sup>Siegrist et al. (2002); <sup>2</sup>Moletta et al. (1986); <sup>3</sup>Kiely et al. (1996).

Parâmetros	Valor <sup>1</sup>	Valor <sup>2</sup>	Valor <sup>3</sup>	Valor <sup>4</sup>
TS (%)	2,4	11	16	39
T (°C)	37	30	30	37
pH	7,7	7,2	7,15	7,4
Ac (g.L <sup>-1</sup> )	0,5	0,5	0,55	1,8*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g.L <sup>-1</sup> )	0,1	0,5	0,60	2,65

Tabela 4: Parâmetros de processo utilizados para as estimativas de biogás.

Fonte: <sup>1</sup>Zhang e Jahng (2012); <sup>2,3</sup>Dong et al. (2010); <sup>4</sup>Derbal et al. (2009); \*Assumido.

Parâmetros	TS = 2,4%	TS = 11%	TS = 16%	TS = 39%
μ <sub>m</sub> (d <sup>-1</sup> )*	3,40 x 10 <sup>-3</sup>	1,10 x 10 <sup>-2</sup>	1,30 x 10 <sup>-2</sup>	2,40 x 10 <sup>-2</sup>
μ <sub>m</sub> (d <sub>-1</sub> )**	3,40 x 10 <sup>-3</sup>	1,10 x 10 <sup>-2</sup>	1,30 x 10 <sup>-2</sup>	1,70 x 10 <sup>-2</sup>
A <sub>u</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	5,77 x 10 <sup>-4</sup>	1,80 x 10 <sup>-3</sup>	2,00 x 10 <sup>-3</sup>	4,00 x 10 <sup>-3</sup>
H <sup>+</sup> (g.L <sup>-1</sup> )	1,99 x 10 <sup>-8</sup>	6,31 x 10 <sup>-8</sup>	7,08 x 10 <sup>-8</sup>	3,98 x 10 <sup>-8</sup>
NH <sub>3</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	4,50 x 10 <sup>-2</sup>	7,20 x 10 <sup>-2</sup>	7,60 x 10 <sup>-2</sup>	6,00 x 10 <sup>-1</sup>
X <sub>m</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	4,0 x 10 <sup>-1</sup>	4,0 x 10 <sup>-1</sup>	4,0 x 10 <sup>-1</sup>	5,0 x 10 <sup>-1</sup>

Tabela 5: Parâmetros calculados e utilizados para estimar a taxa de produção de metano.

\*Calculado a partir da Equação 6; \*\*Calculado a partir da Equação 16.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para estimar a taxa de produção de metano foi desenvolvido um algoritmo usando o Software MATLAB (MATLAB, 2012), que permite estimar a taxa de produção de metano em biodigestores anaeróbios. Na Figura 1 são apresentadas as estimativas do potencial de produção de metano em biodigestores anaeróbios. A taxa de produção de metano foi obtida considerando a condição de biodigestor com concentração de sólidos totais de 2,4%. De acordo com o modelo de Moletta et al. (1986) e Liu et al. (2008) seria possível obter 74,0 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por tonelada de matéria orgânica tratada no biodigestor. Na Figura 2 foram simuladas as taxas de produção de metano em biodigestores anaeróbios para a condição de sólidos totais de 11%. Foi obtida uma quantidade de metano de 68,0 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por tonelada de matéria orgânica, para ambos os modelos. Na figura 3, as simulações

foram realizadas para a condição de sólidos totais de 16% e foi obtido 64,0 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por tonelada de FORSU, tanto para o modelo de Moletta et al. (1986) como para o modelo de Liu et al. (2008). Nas Figuras 1 a 3, as simulações realizadas mostraram que os modelos de Moletta et al. (1986) e Liu et al. (2008) apresentaram resultados iguais.

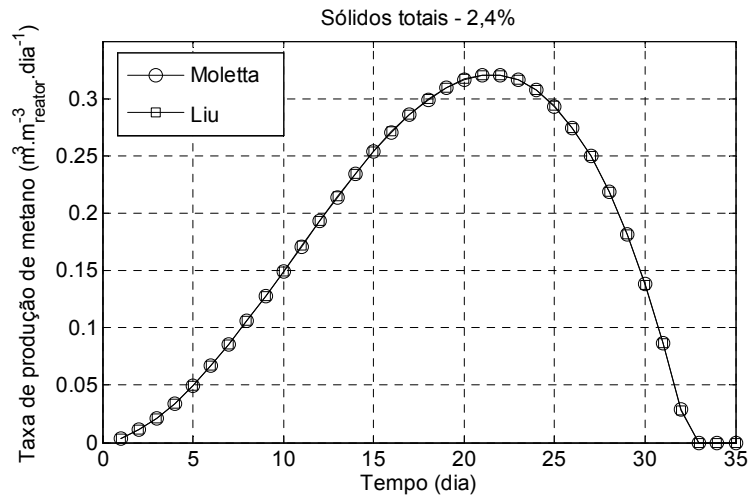


Figura 1: Taxas de produção metano em biodigestores anaeróbios com teor de sólidos totais de 2,4%.

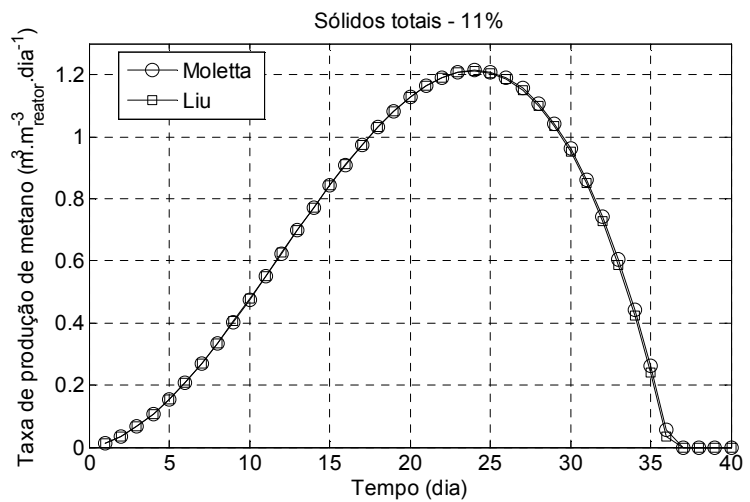


Figura 2: Taxas de produção metano em biodigestores anaeróbios com teor de sólidos totais de 11%.

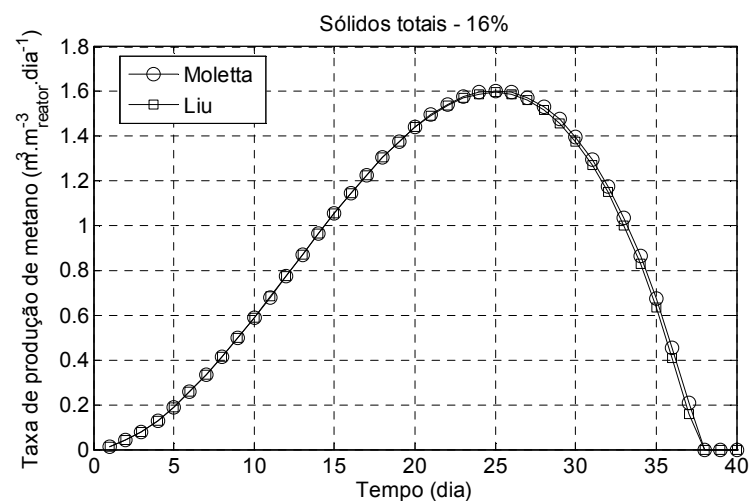


Figura 3: Taxas de produção metano em biodigestores anaeróbios com teor de sólidos totais de 16%.

Na Figura 4 são apresentadas as simulações da taxa de produção de metano em biodigestores anaeróbios para a condição de sólidos totais de 39%. Nas condições de simulações da Figura 4, o modelo de Liu et al. (2008) apresentou resultados inferiores aos resultados obtidos pelo modelo de Moletta et al. (1986). A quantidade de metano estimada foi de 84,0 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por tonelada de FORSU, para o modelo de Moletta et al. (1986), e 58,0 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por tonelada de FORSU, para o modelo de Liu et al. (2008).

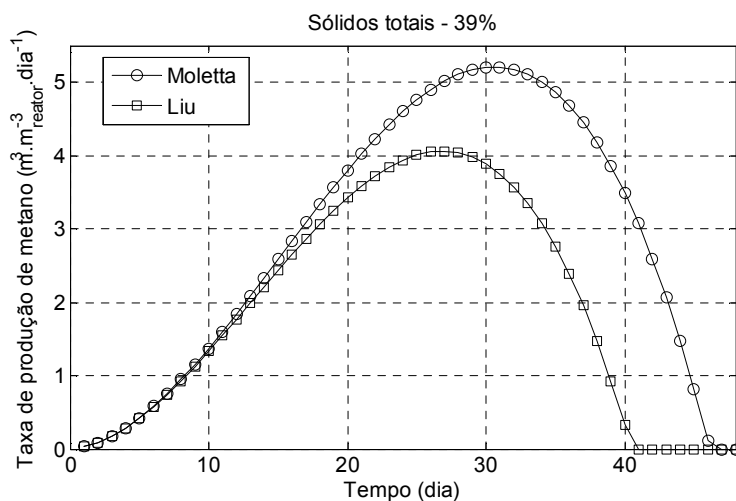


Figura 4: Taxas de produção metano em biodigestores com teor de sólidos totais de 394%.

Basicamente, o que difere os modelos de Moletta et al. (1986) e Liu et al. (2008) é termo inibitório (NH<sub>3(u)</sub>) introduzido por Liu et al. (2008) na equação do crescimento dos micro-organismos metanogênicos (Equação 16). Dessa forma, se a quantidade de amônia for elevada, o modelo de Liu et al. (2008) fornece valores menores para a taxa de produção de metano. Cabe ressaltar que diversos microrganismos que atuam no processo de biodigestão anaeróbia utilizam amônia (íon), mas o excesso de amônia, pode inibir a degradação da matéria orgânica, a produção de ácidos voláteis e a metanogênese (Kelleher et al., 2002), e pode ser tóxica para concentrações acima de 1,5 (g.L<sup>-1</sup>) (Mata-Alvarez, 2003). A redução da taxa de produção de CH<sub>4</sub>, observada na Figura 1(d) (modelo de Liu et al. (2008)), pode ser explicada pelo fato da simulação ter sido realizada para condições de biodigestor com elevador teor de amônia. Por outro lado, concentração elevada de acetato pode influenciar positivamente a taxa de produção de CH<sub>4</sub>, mas aumenta o tempo de retenção hidráulico.

A quantidade total de CH<sub>4</sub> foi obtida a partir da FORSU depositada no aterro de Caieiras em 2016, nesse ano foram depositadas 3,57 milhões de toneladas de RSU, desse total 55,7% eram de resíduos orgânicos, ou seja, 1,99 milhões de toneladas. A produção de metano em biodigestores depende das características da fração orgânica dos RSU (FORSU). De acordo com as simulações realizadas seria possível obter entre 58 a 84 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por tonelada de FORSU. Na Tabela 7 são apresentadas as estimativas das taxas de produção de CH<sub>4</sub> e potência elétrica.

Modelo	TS (%)	CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> .ton <sup>-1</sup> )	CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> )	R <sub>AD</sub> (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Potência (MW)
Moletta et al. (1986)	2,4	74	147.201.840	4,67	41,5
	11	68	135.266.550	4,29	38,0
	16	64	127.309.700	4,04	36,0
	39	84	167.093.980	5,30	47,0
Liu et al. (2008)	2,4	74	147.201.840	4,67	41,5
	11	68	135.266.550	4,29	38,0
	16	64	127.309.700	4,04	36,0
	39	58	115.374.410	3,66	32,5

Tabela 6: Estimativa do potencial energético da FORSU.

A demanda por eletricidade (residencial, comercial, rural, industrial e iluminação pública) do município de Caieiras, no ano de 2015 foi de 417.108.150 kWh (São Paulo, 2016). De acordos com os



resultados obtidos (Tabela 6) seria possível uma quantidade mínima de energia de 284.700.000 kWh e uma quantidade máxima de energia de 411.720.000 kWh. Esses valores (mínimo e máximo) correspondem a 68,3% e 98,7%, respectivamente, do consumo de eletricidade, no município de Caieiras, no ano de 2015.

Atualmente, no Brasil, a disposição dos RSU em aterros sanitários é a única forma ambientalmente viável que está em operação. Sabe-se, entretanto, que para sua execução, há necessidade de disponibilização de grandes áreas que apresentem características geográficas adequadas, para evitar contaminação do solo e de mananciais. Isso faz com que a logística e os custos com transportes dos RSU se tornem um problema. A gestão adequada dos RSU é essencial para uma redução da área necessária para a destinação final dos RSU sob a forma de aterros sanitários, resultando em menores custos e redução de áreas degradadas e impactadas.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foram avaliados dois modelos matemáticos utilizados para estimar da produção de metano em biodigestores. Foi sugerido um conjunto de parâmetros cinéticos para estimativa da taxa de produção de biogás em biodigestores anaeróbios. Foi estimada a produção de metano em biodigestores e a potência elétrica que poderia ser obtida a partir da combustão do gás metano.

As simulações realizadas, para a biodigestão anaeróbia, mostram que é possível obter uma produção constante de biogás. O potencial de produção de metano, considerando somente a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos dispostos no aterro sanitário de Caieiras, estaria entre 115 milhões de  $\text{Nm}^3$   $\text{CH}_4$  e 167 milhões de  $\text{Nm}^3$   $\text{CH}_4$ , em função da fração de sólidos totais, dentro da faixa considerada (2,4 a 39%). Com essa quantidade de  $\text{CH}_4$  seria possível obter uma potência elétrica mínima de 32,5 MW e uma potência elétrica máxima de 47 MW.

## REFERENCIAS

- Adekunle, K. F.; Okolie, J. A. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, v. 6, n. 03, p. 205.
- Akinci, G.; Guven, E. D.; Gok, G. (2012). Evaluation of waste management options and resource conservation potentials according to the waste characteristics and household income: A case study in Aegean Region, Turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 58, p. 114-124.
- Al-Jarallah, R.; Aleisa, E. (2014). A baseline study characterizing the municipal solid waste in the State of Kuwait. *Waste Management*, v. 34, n. 5, p. 952-960.
- Andrews, J. F. (1969). Dynamic model of the anaerobic digestion process. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v. 95, n. 1, p. 95-116.
- Brasil. (2010). Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos. DOU de 03/08/2010.
- Buhr, H. O.; Andrews, J. F. (1977). The thermophilic anaerobic digestion process. *Water Research*, v. 11, n. 2, p. 129-143.
- Derbal, K.; Bencheikh-Lehocine, M.; Cecchi, F.; Meniai, A. H.; Pavan, P. (2009). Application of the IWA ADM1 model to simulate anaerobic co-digestion of organic waste with waste activated sludge in mesophilic condition. *Bioresource technology*, v. 100, n. 4, p. 1539-1543.
- Dong, L.; Zhenhong, Y.; Yongming, S. (2010). Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW). *Bioresource technology*, v. 101, n. 8, p. 2722-2728.
- Essencis – Essencis Soluções Ambientais S.A. (2012). Relatório de análises físico-químicas e gravimétricas dos resíduos sólidos domiciliares. Caieiras-SP.
- Kelleher, B. P. et al. Advances in poultry litter disposal technology—a review. *Bioresource technology*, v. 83, n. 1, p. 27-36, 2002.
- Kiely, G.; Tayfur, G.; Dolan, C.; Tanji, K. (1997). Physical and mathematical modelling of anaerobic digestion of organic wastes. *Water Research*, v. 31, n. 3, p. 534-540.

- Liu, C. F.; Yuan, X. Z.; Zeng, G. M.; Li, W. W.; Li, J. (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 4, p. 882-888, 2008.
- Mata-Alvarez, J. *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. ISBN: 1 900222 14 0. IWA publishing, 2003.
- MATLAB. The language of technical computing, version 7.14.0.739, Matlab, R2012a.
- Moletta, R.; Verrier, D.; Albagnac, G. (1986). Dynamic modelling of anaerobic digestion. *Water Research*, v. 20, n. 4, p. 427-434.
- Mu, S. J.; Zeng, Y.; Wu, P.; Lou, S. J.; Tartakovsky, B. (2008). Anaerobic digestion model no. 1-based distributed parameter model of an anaerobic reactor: I. Model development. *Bioresource technology*, v. 99, n. 9, p. 3665-3675.
- São Paulo (Estado). (2016). Secretaria de Energia e Mineração. Anuário de Energético por Município no Estado de São Paulo, ano base 2015, 124 p. - (Série Informações Energéticas).
- Siegrist, H.; Vogt, D.; Garcia-Heras, J. L.; Gujer, W. (2002). Mathematical model for meso-and thermophilic anaerobic sewage sludge digestion. *Environmental science & technology*, v. 36, n. 5, p. 1113-1123.
- Silva E. R.; Toneli, J. T. C. L. ; Vaz Junior, S. N.; Martins, G. (2014). Estimativa do Potencial de Conversão Energética de Resíduos Sólidos Urbanos Através do Processo de Incineração. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 18, p. 0609-0616.
- Silva, E. R. (2015) Estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos por diferentes rotas de tratamento. Santo André, Tese (Doutorado em Energia) – UFABC.
- Zhang, L. e Jahng, D. (2012). Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements. *Waste Management*, 32(8), 1509-1515.

## ABSTRACT

This paper aims to estimate the energy potential of the organic fraction of municipal solid waste disposed at the Caieiras landfill with the use of anaerobic digestion technology in digesters. In order to estimate the energy potential, two mathematical models were used to estimate methane production as a function of the various factors that influence the process (acetate and microorganisms concentration, pH variation, among others). According to the results obtained would be possible a minimum electric power of 32.5 MW and a maximum power of 47.0 MW. Based on the results obtained, it is concluded that the annual production of electricity, obtained from the combustion of biogas, produced from the anaerobic digestion process, represents about 70% of the electric energy consumption (residential, commercial, rural, industrial And public lighting) of the municipality of Caieiras (in which the landfill is located), in the year 2016.

**Keywords:** municipal solid waste, anaerobic digestion, biogas, energy potential.