

# REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

## **Análise comparativa e avaliação do potencial de produção de biogás na ETE e aterro sanitário de Itajubá (MG)<sup>1</sup>**

Pedro Baptista Borges<sup>2</sup>, Mariana Salles Rangel<sup>2</sup> e Ivan Felipe Silva dos Santos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Aceito para Publicação no 3º Trimestre de 2016.

<sup>2</sup>Graduandos em Engenharia Ambiental pelo Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá (MG), [pbborges@yahoo.com.br](mailto:pbborges@yahoo.com.br), [rangelsmariana@gmail.com](mailto:rangelsmariana@gmail.com).

<sup>3</sup>Engenheiro Hídrico e Mestre em Engenharia de energia pelo Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá (MG), [ivanfelipece@hotmail.com](mailto:ivanfelipece@hotmail.com).

### **RESUMO**

O biogás é um gás combustível de alto potencial energético, produzido a partir da degradação anaeróbia de matéria orgânica que pode ser utilizado para diversas aplicações como geração de calor, abastecimento de veículos ou geração de eletricidade. Em Itajubá (MG), se verifica a presença de duas estruturas municipais nas quais é possível a recuperação de biogás: O aterro sanitário e a estação de tratamento de esgotos (ETE). Neste contexto, o presente trabalho avalia o potencial de produção de biogás na cidade de Itajubá (MG) por meio do aterro sanitário e da ETE municipal. O potencial de ambas as estruturas foi ainda comparado o que permitiu a conclusão de que o aterro possui um potencial de produção de metano per capita superior ao da ETE. A potência elétrica disponível por meio da combustão de todo metano produzido também foi calculada.

**Palavras chave:** Eletricidade, Metano, Biogás.

## ABSTRACT

Biogas is a fuel gas of high energy potential, produced by the anaerobic digestion of organic matter and that can be used for many applications as: Heat generation, vehicle supply or electricity generation. In Itajubá (MG) are verified the existence of two mains structures for biogas recovery: The municipal landfill and the anaerobic wastewater treatment plant (WWTP). In this context, the present work evaluates the biogas production potential in Itajubá (MG) city by means of the municipal landfill and WWTP. The potential resident in both structures was compared what allowed the conclusion that the landfill has a per capita methane production potential higher than the WWTP. The total electric Power available the methane combustion also was calculated.

## Introdução

O Biogás é uma mistura gasosa resultante da degradação anaeróbia da matéria orgânica, sendo formado principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Quanto maior a formação de metano, mais energia por unidade de massa o biogás contém. Há ainda dezenas de substâncias, como o gás sulfídrico causador de mau cheiro, traços de siloxinas, que reduzem a vida útil dos equipamentos de uso energético, e vapor d'água (GOLDEMBERG, 2006). A composição do biogás varia de fonte para fonte, contudo seus valores típicos podem ser encontrados no quadro 1.

Quadro 1: Composição média do biogás. *Average biogas composition*

<b>Componentes</b>	<b>Percentual</b>
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	50 - 75%
<b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	25 - 40%
<b>Nitrogênio (azoto)</b>	0,5 - 2,5%
<b>Oxigênio (O)</b>	0,1 - 1,0%
<b>Sulfeto de Hidrogênio (H<sub>2</sub>S)</b>	0,1 - 0,5%
<b>Amoníaco (NH<sub>3</sub>)</b>	0,1 - 0,5%
<b>Monóxido de Carbono (CO)</b>	0,0 - 0,1%
<b>Hidrogênio (H)</b>	1,0 - 3,0%

Fonte: Rego e Hernandez (2006).

O biogás é um excelente gás combustível que pode ser utilizado para diversas aplicações em função do nível de tratamento a ser aplicado no mesmo. Este pode ser utilizado para geração de energia térmica (Para indústrias ou cozinha), elétrica (Em motores de combustão interna ou turbinas a gás), ou para cogeração. Além disto, quando submetido a processos de tratamento, pode ainda, ser utilizado como combustível em veículos ou injetado na rede de gás como substituto ao gás natural (AEBIOM, 2009). O poder calorífico do biogás é função da concentração de CH<sub>4</sub> do mesmo, sendo que o poder calorífico do CH<sub>4</sub> é por volta de 35 MJ/m<sup>3</sup> (QASIN, 1999).

Em país populoso como o Brasil, onde há grande geração de resíduos sólidos urbanos e efluentes líquidos, em desenvolvimento, onde se verifica o aumento do índice de tratamento de efluentes e resíduos, sobretudo em aterros e onde o agronegócio é preponderante e são gerados grandes volumes de resíduos vegetais e animais, o uso do biogás é uma opção extremamente interessante para produção de energia renovável (SANTOS, 2015).

Em Itajubá (MG) há duas fontes para produção de biogás: O aterro sanitário e a estação de tratamento de efluentes domésticos (ETE). O aterro recebe resíduos de diversas cidades próximas a Itajubá que compõe o consórcio Intermunicipal dos

Municípios da Microrregião do Alto Sapucaípara Aterro Sanitário (CIMASAS), enquanto que a ETE se caracteriza por ser uma ETE anaeróbia a base de reatores UASBs.

Um aterro sanitário é definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da NBR 8.419/1992 (ABNT, 1992), como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. O método do aterro sanitário utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessários (ABNT, 1992).

Jordão & Pessoa (2009) caracterizaram um modelo de reator anaeróbio, como por exemplo, os reatores UASBs, por possuírem a entrada de esgoto pelo fundo, em fluxo ascendente, e por disporem na parte superior do reator um sistema de separação das fases líquida, sólida e gasosa, com lodo suspenso e formando flocos e grânulos. Ao passar por estes flocos de lodo suspenso a carga orgânica do efluente é degradada, o biogás é formado e o efluente tratado é coletado na parte superior do reator. Um esquema de uma ETE anaeróbia e de um aterro sanitário podem ser encontrados nas figuras 1 e 2.

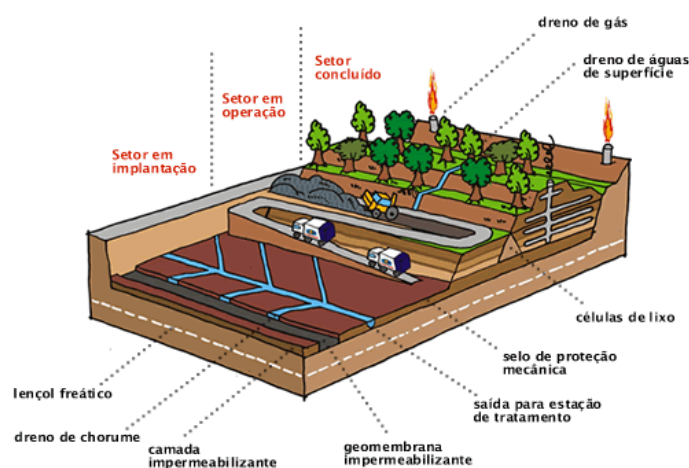


Figura 1: Esquema de um aterro sanitário.

*Scheme of a landfill.* Fonte: Jornal do Saneamento (2015)

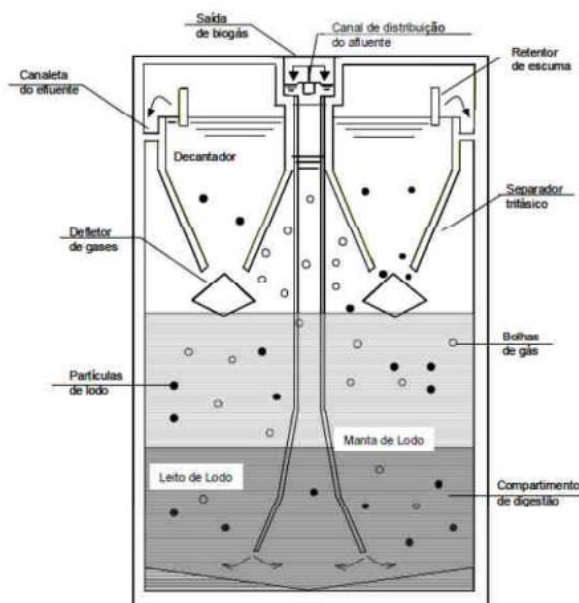


Figura 2: Esquema de um reator anaeróbico. *Scheme of an anaerobic reactor.*

Fonte: Jornal do Saneamento (2015).

Dado os benefícios e aplicações diversas do biogás já discutidas e a presença de uma ETE e um aterro sanitário em Itajubá (MG), nos quais ainda não há presença de reaproveitamento do biogás, o presente trabalho propõe-se a avaliar o potencial de produção de biogás em Itajubá (MG) em seu aterro sanitário e em sua ETE anaeróbia.

## Metodologia

### Projeção populacional

Naturalmente a produção de biogás em Itajubá (MG) é função da população que gera resíduos para o aterro sanitário e que gera efluentes domésticos para a ETE. Assim sendo, a avaliação do potencial de geração de biogás em Itajubá dependerá da população da cidade.

O modelo de projeção populacional escolhido para se utilizar no presente trabalho foi o modelo logístico, pois apresenta uma tendência de estabilização dado por um valor máximo de população ( $K_s$  – Equação 1). Inicialmente apresentado por Verhust, e posteriormente aplicado, de diversas formas, por diversos autores, o modelo logístico propõe que o crescimento populacional segue uma relação matemática

logística (Curva em S). Como no caso anterior, permanece a restrição que deve ser respeitada:  $P_1^2 \neq P_0 \cdot P_2$ . A previsão da população (equação 2) pode ser calculada após o cálculo das constantes a e c (Equações 3 e 4) (QUASIN,1999).

$$K_s = \frac{2P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2} \quad (1)$$

$$P(t) = \frac{K_s}{1 + ce^{a(t-t_0)}} \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \left[ \frac{P_0(K_s - P_1)}{P_1(K_s - P_0)} \right] \quad (3)$$

$$c = \frac{K_s - P_0}{P_0} \quad (4)$$

Sendo: a e c - Constantes da equação;  $K_s$  - População de saturação;  $P_0, P_1, P_2$  - População nos três anos do histórico populacional e  $t_0, t_1, t_2$  - ano inicial, ano 1 e ano 2, respectivamente.

### Produção de gás em um aterro sanitário

As equações para estimativa de produção de gás em aterros sanitário geralmente se baseiam em reações cinéticas de primeira ordem, como por exemplo, a equação utilizada neste trabalho (2), utilizada no software LandGEM®, desenvolvido pela Agência Americana de Proteção Ambiental (USEPA, 2005).

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) \cdot e^{-kt_{ij}} \quad (5)$$

Onde: k = taxa de decaimento da produção de metano [1/ano],  $L_0$  = Potencial de geração de metano [ $m^3/ton$ ],  $M_i$  = massa de resíduos aportada ao aterro no ano i que é função da população dada na equação 6 (USEPA, 2005) e Q = vazão anual de biogás.

$$M = GR \cdot P \cdot d \quad (6)$$

Onde: GR = índice de geração de resíduos per capita por dia, P = população e d = número de dias no ano = 365.

Deve-se ressaltar que nem todo biogás produzido nos aterros pode ser coletado e uma boa parcela deste escapa pelos poros do solo do aterro. Esta parcela é chamada de emissões de fuga e deve ser descontada da vazão Q produzida. Este desconto normalmente é feito pela multiplicação de Q por um fator de correção chamado de eficiência de coleta ( $E_{col}$ ).

### Produção de gás em uma ETE de reator anaeróbio

A equação para estimativa da produção de gás em um reator anaeróbio (Como é o caso do reator UASB) é baseada na carga de DQO removida no reator, como apresenta a equação 7 (CHERNICHARO, 2007).

$$Q = \frac{Q_e \cdot [S_0 \cdot (1 - Y) - S] \cdot (1 - I)}{f(T) \cdot C} \quad (7)$$

Onde:  $Q_e$  = vazão de esgotos que é função da população e pode ser calculada pela equação 8,  $S_0$  = Concentração de Demanda Química de Oxigênio - DQO afluente ao reator (mg/l), S = Concentração de DQO efluente ao reator, I = Índice de perdas por vazamentos ou por biogás dissolvido no reator, C = concentração de  $CH_4$  no biogás e Y = rendimento de produção de sólidos. O fator f(T) se refere a um fator de correção de temperatura que pode ser calculado pela equação 9.

$$Q_e = GE \cdot P \cdot d \quad (8)$$

$$f(T) = \frac{P_a K}{RT} \quad (9)$$

Onde: GE = geração de esgotos per capita por dia,  $P_a$  = Pressão atmosférica = 1 [atm], T = Temperatura média do meio ambiente = 25 [°C] ou 298 [K], R = Constante universal dos gases = 0,08206 [atm.l/mol.K] e K = DQO consumida para produção de 1 mol de  $CH_4$  = 64 gDQO/mol (Chernicharo, 2007).

Quadro 2: Parâmetros utilizados nos cálculos. *Parameters used in the calculations*

Parâmetro	Valor	Fonte
Taxa de decaimento da produção de metano no aterro $k$	0,05 [1/dia]	USEPA (2005)
Potencial de produção de metano no aterro $L_0$	170 [m <sup>3</sup> /ton]	USEPA (2005)
Geração de esgotos per capita GE	150 [l/hb.dia]	Chernicharo (2007)
Concentração de DQO afluente ao reator anaeróbio $S_0$	0,715 [kg/m <sup>3</sup> ]	Oliveira e Von Sperling (2005)
Concentração de DQO efluente ao reator anaeróbio $S$	0,251 [kg/m <sup>3</sup> ]	Oliveira e Von Sperling (2005)
Rendimento da produção de sólidos $Y$	0,17 [kgDQO <sub>lodo</sub> /kgDQO <sub>afluente</sub> ]	Chernicharo (2007)
Eficiência de coleta do gás no Aterro	0,555	Silva (2013) e Watermolenet al. (2012).
Eficiência de coleta do gás no reator UASB (1-I)	0,6	Chernicharo (2007)

## Resultados

Inicialmente procedeu-se com a projeção populacional. Para os cálculos do aterro utilizou-se como população equivalente a soma da população de cada ano nas cidades que compõe o consórcio CIMASAS. Este consórcio é composto dos seguintes municípios: Delfim Moreira, Itajubá, Piranguinho, Piranguçu, São José Alegre, Cachoeira de Minas, Brazópolis, Maria da fé, Marmelopólis, Wenceslau Braz, Santa Rita do Sapucaí (ITAJUBÁ NOTÍCIAS, 2013 e CIMASAS, 2014). Para os cálculos da vazão de esgotos na ETE foram utilizados somente os valores de população da cidade de Itajubá (MG). Ambas as projeções estão apresentadas nas figuras 3a e 3b. Os dados



de população históricos foram obtidos nos censos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

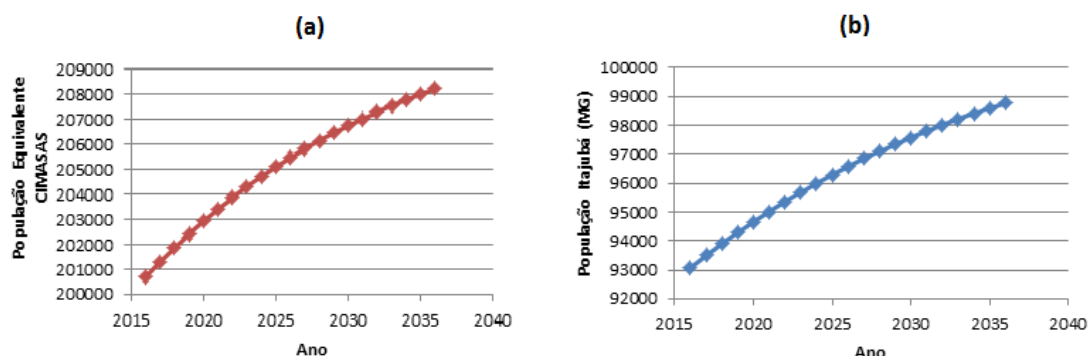


Figura 3: Projeções populacionais. (a) População equivalente do consórcio CIMASAS. (b) População total da cidade de Itajubá (MG).

A partir dos resultados de projeção populacional e dos dados do quadro 2 coletados na literatura, pode-se calcular a produção de resíduos anual e a geração de esgotos anual. A partir destes pode-se calcular a vazão anual de biogás gerado no aterro e na ETE de Itajubá (Equações 5 a 9). A produção de gás no aterro foi calculada pela inserção dos valores de toneladas de resíduos geradas anualmente no software Landgem®, que opera segundo a equação 5. Estes resultados estão apresentados nas figuras 4 e 5.

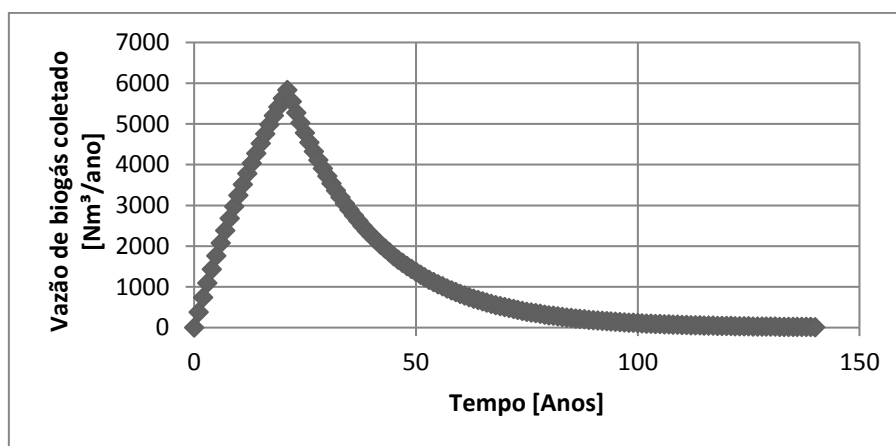


Figura 4: Potencial de vazão de biogás a ser coletada no aterro.

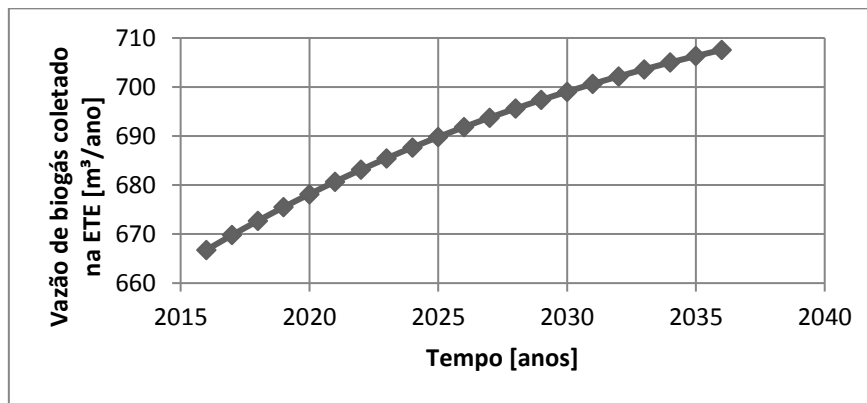


Figura 5: Potencial de Vazão de biogás a ser coletada na ETE.

A análise das figuras 4 e 5 demonstram que a produção de biogás no aterro é muito mais longa que o caso das ETEs dado que após o tempo de fechamento do aterro os resíduos remanescentes no mesmo continuam sendo biodegradados e o biogás continua a ser produzido.

A figura 6 apresenta a comparação da vazão de metano coletável per capita (Considerando-se uma população média) de ambos os sistemas. Nesta, podemos observar que o aterro apresenta uma produção de CH<sub>4</sub> inferior à da ETE até 5 anos, quando a produção de metano neste cresce atingindo valores até 4 vezes superior aos da estação de tratamento de esgoto. A curva de produção específica na ETE apresenta pequeno crescimento e tendendo a estabilização. Tal fato pode ser explicado pela permanência, para anos posteriores, da carga orgânica oriunda de resíduos de anos anteriores ainda não decompostos no aterro. A curva da figura 6 já considera as diferenças de percentual de metano entre os gases produzidos no aterro e na ETE, dado este percentual é inferior nos aterros sanitários (Foram adotados valores de 50% no aterro e 60% na ETE, ambos os valores dentro dos limites dispostos na tabela 1).

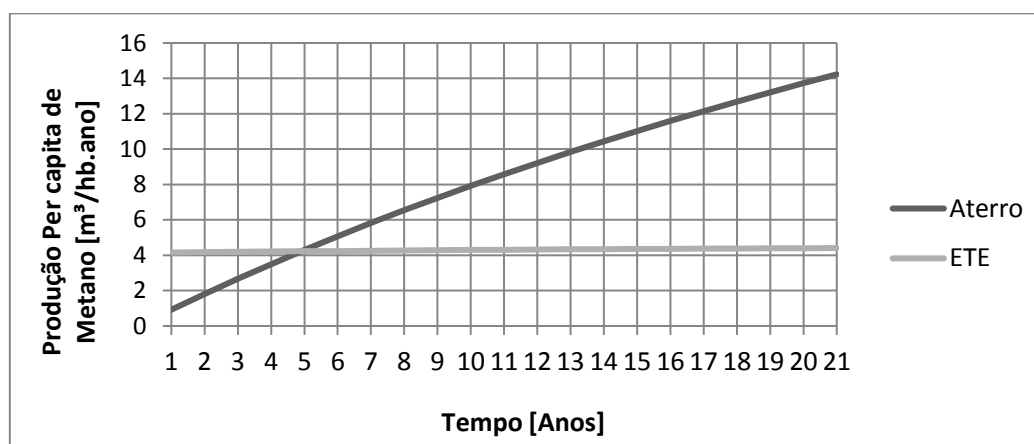


Figura 6: Potencial de Vazão de biogás a ser coletada na ETE.

Por fim, o quadro 3 apresenta a variação anual das vazões de metano da ETE e aterros somados, dentro de um horizonte de 20 anos (Horizonte razoável para atração de um investimento), assim como a potência disponível a cada ano. A potência do biogás foi calculada considerando-se um motor de combustão interna como tecnologia de conversão energética, segundo a equação 10 (CETESB, 2006).

$$P_{dis} = PCI \cdot \eta \cdot Q_{CH_4} \quad (10)$$

Onde: PCI = poder calorífico do metano = 35 MJ/m<sup>3</sup> (Qasin, 1999), P<sub>dis</sub> = potência disponível e η = Rendimento do motor de combustão interna = 30% (CETESB, 2006).

Quadro 3: Vazão total de metano e potencial disponível.

Tempo [Anos]	Vazão total de CH <sub>4</sub> [10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ano]	Potência disponível [kW]
1	589.02	196.12
2	773.12	257.41
3	950.77	316.56
4	1122.29	373.67
5	1287.97	428.83
6	1448.09	482.15
7	1602.93	533.70
8	1752.74	583.58
9	1897.78	631.87
10	2038.28	678.65
11	2174.46	723.99
12	2306.54	767.97
13	2434.74	810.65
14	2559.24	852.11

15	2680.24	892.39
16	2797.91	931.57
17	2912.43	969.70
18	3023.97	1006.84
19	3132.68	1043.03
20	3238.71	1078.34

## Conclusões

O presente artigo avaliou o potencial de produção de biogás em Itajubá (MG) por meio da estação municipal de tratamento de esgotos e do aterro sanitário. Em termos específicos (Produção de metano per capita) a produção do metano pode alcançar índices até 4 vezes superiores aos valores de produção na ETE. Sendo que a partir do ano 5, a produção específica anual de metano do aterro ultrapassa as vazões produzidas na ETE até o último ano do empreendimento. Tal fato pode ser explicado pela degradação dos resíduos que permanecem no aterro ao longo dos anos, cuja decomposição ao longo do tempo colabora para o incremento da vazão de gás em anos (O que não ocorre com o esgoto no reator).

O potencial total de geração de metano no aterro sanitário pode chegar até mais de 3.200.000 m<sup>3</sup> anuais de vazão de metano, o que equivale a 1 [MW] de potência elétrica. Em média, ao longo destes 20 anos, estes valores são de aproximadamente 2.000.000 m<sup>3</sup> anuais e 600 [kW] de potência. Tais valores demonstram a importância de estruturas municipais como a ETE e o aterro na cooperação de uma geração energética mais eficaz e sustentável a nível municipal. Contudo, a viabilidade econômica ainda segue como entrave a estes aproveitamentos, como demonstram trabalhos de Barros et al. (2015) e Santos et al. (2016), dado que os equipamentos necessários para implementação de uma usina de biogás são custosos.

O gás produzido ainda pode ser utilizado para outros fins como geração de calor para indústria, produção de gás de cozinha ou abastecimento de ônibus e podem colaborar em diferentes vertentes para o desenvolvimento energético, social e ambiental de um município.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8.419: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

AEBIOM, 2009. European Biomass Association. A Biogas Road Map for Europe.

BARROS, R. M. et al. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. Energy Policy. V. 65, p. 150-164, 2014.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Biogás - Aterros, versão 1.0 / CETESB, Ministério Brasileiro de Ciência e Tecnologia – Software e Manual. São Paulo, 2006. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Softwares/16-Softwares>>. Acesso: 06/02/2014.

CIMASAS. Consórcio Intermunicipal dos Municípios do Alto do Sapucaí Para Aterro Sanitário, 2014. Disponível em <[http://abes-dn.org.br/eventos/seminario\\_residuos\\_solidos/Paineis\\_SNRS/Painel7/72.pdf](http://abes-dn.org.br/eventos/seminario_residuos_solidos/Paineis_SNRS/Painel7/72.pdf)>. Acesso: 06/05/2015.

CHERNICHARO, C.A.L., 2007. Reatores Anaeróbios. Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais.

GOLDEMBERG, J. Biogás: Projetos e Pesquisas no Brasil. CETESB / Secretaria do Meio Ambiente; Organização: Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer; Responsável Técnico: João Wagner Silva Alves; São Paulo, 2006, 184 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/>>.

ITAJUBÁ NOTÍCIAS, 2013. Nota “Encontro em Itajubá define ampliação de Consórcio de Resíduos que é referência no país”. Disponível em

<<http://www.itajubanoticias.com.br/politica/encontro-em-itajuba-define-ampliacao-de-consorcio-de-residuos-que-e-referencia-no-pais.html>>. Acesso: 06/05/2015.

JORDÃO, E. P., PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgoto Doméstico. Tratamento de Esgoto Doméstico. 5ª ed. Rio de Janeiro, 2009.

JORNAL DO SANEAMENTO. Disponível em <<http://jornaldosaneamento.hol.es/>>. Acesso 12/05/2016.

OLIVEIRA, S.M.A., VON SPERLING, M., 2005. Avaliação de 166 ETES em operação no País, compreendendo diversas tecnologias. Parte I e Análise de Desempenho (Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental) V. 10, 347 e 357.

QASIN, S., R. Wastewater Treatment Plants – Planning design and operation. 2ª ed. Lancaster, Pennsylvania, USA Technomic Publishing Company, 1999, 1107 p.

REGO, E. E.; HERNANDEZ, F. D. M. Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar: contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. *In: Encontro de energia no meio rural*, 6., 2006, Campinas.

SANTOS, I. F. S. Proposta de um método escalonado para a motorização do Aproveitamento do Biogás Gerado por Aterros Sanitários para Fins de Geração de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá (MG), 2015.

SANTOS, I. F.S. BARROS, R.M. TIAGO FILHO, G.L. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: An Assessment of Feasibility and Potential. *Journal of Cleaner Production*, V. 126, p.504-514, 2016.

SILVA, T. N. et al. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. V. 18, Nº 2, 2013.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Landfill Gas Emissions Model.(LandGEM).Version 3.02 User's Guide. USEPA, May 2005b. EPA-600/R-05/047.

WATERMOLEN, B. T. et al. Methane Emission, Oxidation and Collection Efficiency at a Southeastern USA Landfill.Global Waste Management Symposium.Veolia Environmental Services.North America Solid Waste, 2012.Disponível em <<http://dnr.wi.gov/topic/Waste/documents/swip/20121115/MethaneEmissionsUpdate.pdf>>. Acesso: 05/02/2015.