

# Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário

## ESTIMATE METHODS OF BIOGAS GENERATION IN SANITARY LANDFILL

Luiz Gustavo Galhardo Mendes  
Pedro Magalhães Sobrinho  
Universidade Estadual Paulista - UNESP  
Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá - FEG  
Departamento de Energia - DEN

### RESUMO

Produto da decomposição de material orgânico, o biogás apresenta como principais constituintes da sua composição o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o metano ( $\text{CH}_4$ ), sendo este último um combustível possível de ser coletado e utilizado como fonte de energia. Existem diferentes métodos para calcular a quantidade de metano gerado, desde métodos que apresentam uma aproximação grosseira, considerando somente a quantidade de resíduo sólido doméstico disposta no aterro, até métodos que considerem uma cinética de geração de biogás, função de três tipos importantes de parâmetros (condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo). Avaliar os métodos de estimativa de geração de biogás em aterros sanitários, aplicar um modelo matemático baseado em uma população fictícia, discutir as estimativas aplicadas em cada método e obter uma conclusão a este respeito são objetivos deste trabalho.

### PALAVRAS CHAVE

Geração de biogás. Biomassa. Aterro sanitário. Energia.

### ABSTRACT

Product of the decomposition of organic material, the biogas presents as main representatives of his composition the carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) and the methane ( $\text{CH}_4$ ), being this last one a possible fuel of being collected and used as source of energy. Different methods exist to calculate the amount of generated methane, from methods that present a rude approach, considering only the amount of domestic solid residue disposed in the landfill, even methods that consider a kinetics of biogas generation, function of three important types of parameters (local climatic conditions, concentration of nutrients in the soil and composition of the residue). To evaluate the methods

of estimate of biogas generation in sanitary landfill, to apply a mathematical model based on a fictitious population, to discuss the applied estimates in each method and to obtain a conclusion to this respect they are objective of this work.

### KEYWORDS

Biogas generation. Biomass. Sanitary landfill. Energy.

### INTRODUÇÃO

A qualidade do gás de aterro (LFG – Landfill gas) depende do sistema microbiológico, do substrato (resíduo) que é decomposto, e das variáveis específicas do aterro como acesso a oxigênio para o aterro e o teor de umidade (HAM; MORTON, 1989). O LFG é tipicamente descrito como constituído de aproximadamente 50 por cento de metano e 50 por cento de dióxido de carbono com menos de 1 por cento de outros componentes gasosos, inclusive sulfetos de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e mercaptanos.

Há quatro fases de produção do LFG e estas ocorrem durante a vida de um aterro. A duração de cada uma dessas fases é dependente de numerosos fatores, incluindo o tipo de resíduo, teor de umidade, nutrientes, tipos de bactérias e nível de pH.

A primeira fase, decomposição aeróbica, ocorre imediatamente depois do lixo ter sido colocado, enquanto o oxigênio está presente dentro do resíduo. A decomposição aeróbica produz dióxido de carbono, água e calor. O próximo estágio é a fase anóxica, não metanogênica em que compostos ácidos e gás hidrogênio são formados, enquanto há continuada produção de dióxido de carbono. A terceira fase é a instável metanogênica. Durante esta fase, a produção de dióxido de carbono começa a declinar porque a decomposição do lixo muda da decomposição aeróbica para a decomposição anaeróbica. A decomposição anaeróbica produz calor e água, mas, diferentemen

te, da decomposição aeróbica, também produz metano. Durante a quarta fase, o metano é gerado na faixa entre 40 e 70 por cento do volume total (McBEAM; ROVERS; FARQUHAR, 1995). Tipicamente, o lixo na maior parte dos aterros atingirá a fase metanogênica estabelecida dentro de menos de 2 anos após a sua decomposição. Dependendo da profundidade da massa de lixo, e de seu teor de umidade, a fase metanogênica pode ser alcançada tão rapidamente quanto seis meses após a disposição. O LFG pode ser produzido num aterro durante numerosas décadas mantendo-se em níveis declinantes durante com emissões de até 100 anos após a data de deposição. O gráfico das fases de formação do biogás são mostradas na Figura 1.

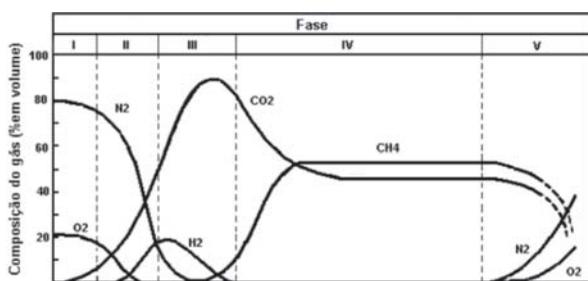


Figura 1 – Produção dos componentes do biogás em relação ao tempo

## MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

Segundo CETESB/SMA (2003), existem diferentes métodos para calcular a quantidade de metano gerado, desde métodos que apresentam uma aproximação grosseira, considerando somente a quantidade de resíduo sólido doméstico disposta no aterro, até métodos que considerem uma cinética de geração de biogás em função de três tipos importantes de parâmetros (condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo).

Algumas metodologias para estimativas teórica da produção de gás metano em locais de deposição de resíduos sólidos urbanos são encontradas na literatura. Esses métodos variam em suas considerações, em sua complexidade e na quantidade de dados de que necessitam.

Em IPCC (1996) é apresentada uma metodologia de fácil aplicação para cálculo de emissão de metano a partir de resíduos sólidos para países ou regiões específicas. Esse método, que segue a equação (1), envolve a estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável presente no lixo, calculando assim a quan-

tidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo depositado, considerando diferentes categorias de resíduos sólidos domésticos. São necessários dados estatísticos sobre a população e sobre os resíduos sólidos urbanos. Caso não haja dados disponíveis para o cálculo no país, poderão ser usados dados padronizados fornecidos pelo IPCC (International Panel on Climate Change), mas a qualidade dos resultados pode ser prejudicada. Essa equação também é conhecida como equação de inventário do IPCC (CETESB/SMA, 2003).

$$Q_{CH_4} = \frac{Pop_{urb} \cdot TaxaRSD \cdot RSDf \cdot L_0}{pCH_4} \quad (1)$$

Sendo:

$Q_{CH_4}$ : metano gerado [ $m^3CH_4$ /ano]

$Pop_{urb}$ : população urbana [habitantes]

$TaxaRSD$ : taxa de geração de resíduos sólidos domiciliares por habitante por ano [kg de RSD/habitante · ano]

$RSDf$ : fração de resíduos sólidos domésticos que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos [%]

$L_0$ : potencial de geração de metano do lixo [kg de  $CH_4$ /kg de RSD]

$pCH_4$ : massa específica do metano [ $kg/m^3$ ].

Obs: O valor da massa específica do metano é  $0,740 \text{ kg/m}^3$  (CEGAS, 2005).

O potencial de geração de metano ( $L_0$ ) representa a produção total de metano ( $m^3$  de metano por tonelada de lixo). O valor de  $L_0$  é dependente da composição do resíduo e, em particular, da fração de matéria orgânica presente. O valor de  $L_0$  é estimado com base no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e num fator de conversão estequiométrico. Valores típicos para esse parâmetro variam de  $125 \text{ m}^3$  de tonelada de  $CH_4$ /tonelada de resíduo a  $310 \text{ m}^3$  de tonelada de  $CH_4$ /tonelada de resíduo. A maior compactação do resíduo não tem efeito direto no parâmetro de  $L_0$ . No entanto, a compactação e a densidade do lixo tem um efeito direto na massa de lixo num dado volume e, portanto, no potencial de quantidade de LFG que pode ser produzido durante algum tempo, bem como nas características de desempenho dos sistemas que serão necessários para coletar o LFG.

O potencial de geração de metano a partir do lixo ( $L_0$ ) pode ser obtido pela metodologia apresentada em

IPCC (1996), que segue a equação (2).

$$L_0 = FCM \cdot COD \cdot CODf \cdot F \cdot \left(\frac{16}{12}\right) \quad (2)$$

Sendo:

$L_0$ : potencial de geração de metano do lixo [kg de CH<sub>4</sub>/kg de RSD];

FCM: fator de correção de metano [%];

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD];

CODf: fração de COD dissociada [%];

F: fração em volume de metano no biogás [%];

(16/12): fator de conversão de carbono em metano [kg de CH<sub>4</sub>/kg de C].

Conforme CETESB/SMA (2003), o FCM varia em função do tipo de local. O IPCC define quatro categorias de locais: Aterros Inadequados, Aterros Controlados, Aterros Adequados (Aterro Sanitário) e Aterros Sem Classificação e para cada uma das categorias o FCM apre-

Tabela 1 - Valores para o FCM (IPCC, 1996)

Tipo de local de disposição	FCM
Lixão	0,4
Aterro Controlado	0,8
Aterro Sanitário	1,0
Locais sem categoria	0,6

senta um valor diferente, como mostra a tabela 1.

O cálculo da quantidade de carbono orgânico degradável (COD) segue a equação (3) e é baseado na composição do lixo e na quantidade de carbono em cada componente da massa de resíduo como apresentado em IPCC (1996). Na tabela 2, são encontrados os valores de COD para diferentes componentes do lixo.

Tabela 2 - Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do lixo (BIRGEMER; CRUTZEN, 1987)

Componente	Porcentagem COD (em massa)
A) papel e papelão	40
B) resíduos de parques e jardins	17
C) restos de alimentos	15
D) tecidos	40
E) madeira*	30

\* excluindo a fração de lignina que se decompõe muito lentamente.

(3)

$$COD = (0,40 \cdot A) + (0,17 \cdot B) + (0,15 \cdot C) + (0,40 \cdot D) + (0,30 \cdot E)$$

Sendo:

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD];

A: fração de papel e papelão no lixo

B: fração de resíduos de parques e jardins no lixo

C: fração de restos de alimentos no lixo

D: fração de tecidos no lixo

E: fração de madeira no lixo

A fração de COD dissociada (CODf), segundo Birgerner & Crutzen (1987), indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida pela equação (4).

$$CODf = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad (4)$$

Sendo:

CODf: fração de COD dissociada [%];

T: temperatura na zona anaeróbia [°C].

Assim como o IPCC, a USEPA também desenvolveu uma equação recomendada para a elaboração de inventários e esta é conhecida como equação de Inventário da USEPA (USEPA, 1997a):

$$Q = População \cdot TaxaRSD \cdot RSDf \cdot 0,45 \cdot F \quad (5)$$

Sendo:

Q = metano gerado [m<sup>3</sup>/ano];

População = número de habitantes atendidos pelo aterro [habitantes];

Taxa RSD = taxa de geração de resíduos sólidos por habitante por ano [kg RSD/habitantes · ano];

RSDf = fração de resíduos sólidos coletados que é depositada nos LDRS [%];

0,45 = volume de biogás gerado por 1kg de resíduo sólido [m<sup>3</sup> biogás/kg RSD];

F = fração de metano no biogás [%].

Os métodos de inventário apresentados acima são uma aproximação grosseira, pois calculam o biogás gerado em função de dados do Censo sem levar em conta a cinética de geração do biogás pelos resíduos (CETESB/SMA, 2003).

Para uma avaliação mais detalhada da geração de metano em aterros sanitários, recomendam-se métodos que levem em consideração a geração de biogás ao longo dos anos, por meio de uma aproximação da cinética de decomposição do resíduo.

Assim como nas equações de inventário, os méto-

dos de cinética encontrados são também da USEPA e do IPCC (CETESB/SMA, 2003). Portanto, serão descritos mais dois métodos diferentes: Método de Projeto e Método de Decaimento de Primeira Ordem I.

Esses dois métodos utilizam uma constante denominada constante de decaimento (k). A constante de

decaimento é função de fatores como disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e principalmente umidade. Os valores sugeridos para k podem variar de 0,01 ano<sup>-1</sup> a 0,09ano<sup>-1</sup> conforme pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3 - Valores sugeridos para k (WORLD BANK, 2003)

Precipitação anual	Valores para k [ano <sup>-1</sup> ]		
	Relativamente inerte	Decomposição moderada	Decomposição alta
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 a < 500 mm	0,01	0,03	0,05
> 500 a < 1000 mm	0,02	0,05	0,08
> 1000 mm	0,02	0,06	0,09

O Método de Projeto (USEPA 1, 1997 ; IPCC, 1996) é recomendado para aterros sanitários ainda na fase de projeto, pois ainda não se sabe realmente qual será o fluxo anual de resíduos.

Conforme CETESB/SMA (2003), esse método se divide em duas etapas: enquanto o aterro recebe resíduos e após o seu fechamento.

Enquanto o aterro está aberto, o termo de cinética  $e^{k \cdot c}$  será igual a 1. Após o fechamento, esse termo de cinética deverá ser considerado. Assim, pode-se dividir essa equação em duas:

- durante a vida útil:

$$Q = F \cdot R \cdot L_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (6)$$

- após o fechamento do aterro:

$$Q = F \cdot R \cdot L_0 \cdot (e^{-k \cdot c} - e^{-k \cdot t}) \quad (7)$$

Sendo:

Q = metano gerado [m<sup>3</sup>/ano];

F = fração de metano no biogás [%];

R = quantidade média de resíduos depositados durante a vida útil do aterro [kg RSD/ano];

L<sub>0</sub> = potencial de geração de biogás [m<sup>3</sup> de biogás/kg RSD];

k = constante de decaimento [ano<sup>-1</sup>];

c = tempo decorrido desde o fechamento do aterro [ano];

t = tempo decorrido desde a abertura do aterro

[anos].

O Método de Decaimento de Primeira Ordem I (USEPA 2, 1997; IPCC, 1996) considera a geração de metano por uma quantidade de resíduo depositada no ano x durante os anos posteriores. Como a cada ano novas quantidades de resíduos são depositadas, a quantidade de metano gerada em um determinado ano será igual à geração do resíduo depositado no ano T somada às gerações dos resíduos depositados nos anos anteriores, referenciadas no ano T (CETESB/SMA, 2003).

$$Q_T = F \cdot R_x \cdot k \cdot L_0 \cdot e^{-k \cdot (T-x)} \quad (8)$$

Sendo:

Q<sub>T</sub> = metano gerado no ano T [m<sup>3</sup>/ano];

F = fração de metano no biogás [%];

R<sub>x</sub> = quantidade de resíduo depositado no ano x [kg];

k = constante de decaimento [ano<sup>-1</sup>];

L<sub>0</sub> = potencial de geração de biogás [m<sup>3</sup> de biogás/kg RSD];

T = ano atual;

x = ano de deposição do resíduo.

O resíduo disposto anualmente (R<sub>x</sub>) é variável e depende de fatores como a taxa de crescimento populacional, taxa de RSD produzido por habitante ao ano e da porcentagem de resíduos que é coletada e disposta no aterro. A multiplicação de todos esses fatores originam os valores de R<sub>x</sub>.

A equação (9) fornece a emissão de metano gera-

do pelo resíduo que degrada anaerobicamente após sua deposição no aterro; esta afirmação pode ser exemplificada pela figura 2.

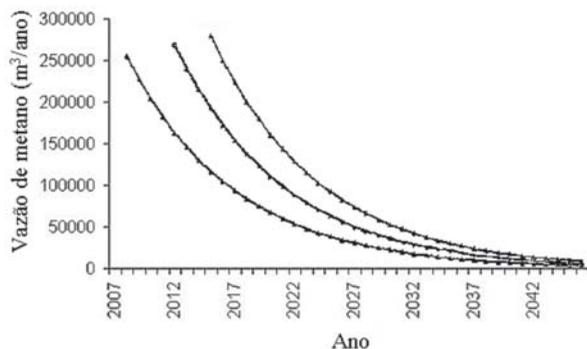


Figura 2 – Exemplo de geração de metano pelo resíduo

A estimativa de soma das vazões ( $SQ_T$ ) de metano é dada pela equação 9, que representa a soma das vazões de metano correspondentes às quantidades de resíduo depositadas no aterro ano a ano.

$$\sum Q_T = F \cdot k \cdot L_0 \cdot \sum R_x \cdot e^{-k \cdot (T-x)} \quad (9)$$

Sendo:

$SQ_T$  = estimativa da soma das vazões de metano no ano considerado [ $m^3CH_4$ /ano].

Portanto, essa estimativa é feita ano a ano, obten-

Tabela 4 - Dados fictícios para a estimativa da geração de metano

Ano de abertura do aterro	1
Ano de fechamento do aterro	20
Tempo que o aterro permanece fechado gerando biogás	20 anos
População atendida pelo aterro	100.000 habitantes
Taxa de crescimento populacional	1,38% ao ano
Taxa de geração de resíduos "per capita" diária	0,5 kg RSD/hab/dia
Taxa de resíduos coletados que são depositados em aterro	88%
Constante de decaimento (k)	0,125/ano
Potencial de geração de biogás	0,25 $m^3$ de biogás/kg RSD
Temperatura de digestão anaeróbia	50°C
Fator de conversão de metano (FCM)	1,0 (aterro sanitário)
Fração de metano no biogás	50%

do-se assim a emissão de metano do aterro durante toda a sua vida útil e pelos anos seguintes após o seu fechamento.

Com o objetivo de demonstrar o comportamento gráfico de cada uma das equações apresentadas acima foram estimados dados para uma população fictícia a fim de exemplificar também os cálculos.

Finalmente, com os dados da tabela 4 podem ser apresentados na figura 3 os métodos utilizados.

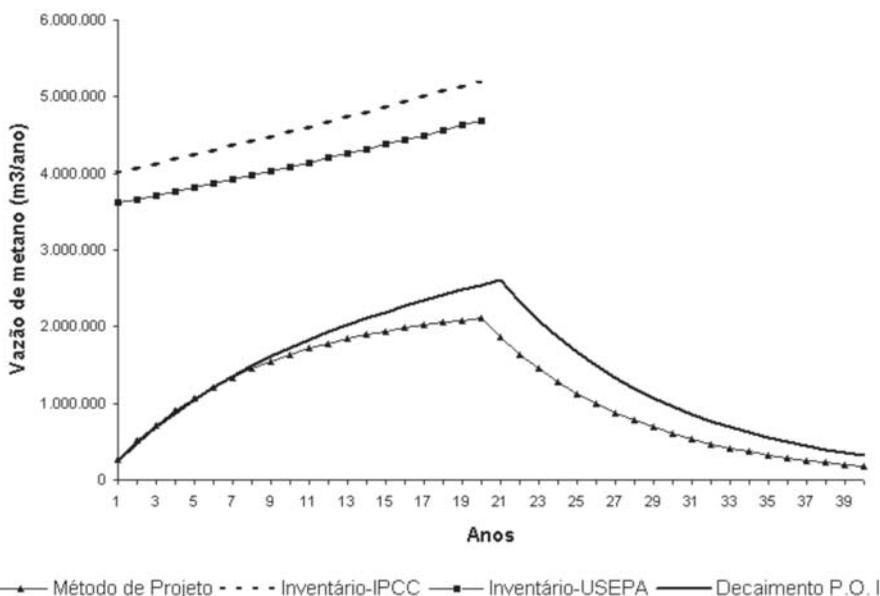


Figura 3 – Gráfico das equações apresentadas

## CONCLUSÕES

O método de inventário do IPCC estima as maiores quantidades de metano, entretanto não deve ser utilizado para estimativas que exijam uma maior precisão.

As duas equações de inventário não apresentam valores de geração de biogás após o encerramento do aterro. Por essa razão não devem ser utilizados em projetos de reaproveitamento de biogás. Além disso, suas estimativas são maiores que as estimativas do método de projeto.

O método do projeto estima as menores quantidades de metano e considera uma geração média de resíduo, isso apresenta resultados imprecisos.

Após avaliar cada uma das metodologias concluiu-se que o Método de Decaimento de Primeira Ordem I (equação 8) é o mais completo e o que mais se aproxima da realidade, visto que ele leva em consideração a emissão de gás metano em longos períodos de tempo, considerando vários fatores que influenciam a taxa de geração deste.

É recomendado o desenvolvimento de pesquisas que definam uma equação com validade em todo o território nacional. Enquanto isso não acontece, é aconselhada a utilização de equações existentes na literatura americana pois, naquele país, foram implantados centenas de projetos com sucesso.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi baseado em um material cedido pelo Engenheiro e Gerente de Questões Globais da CETESB, João Wagner ao qual faço os meus agradecimentos.

## REFERÊNCIAS

BIRGEMER, H.G. & CRUTZEN, P.J. *The production of methane from solid wastes*. Journal of geophysical research, 1987. v. 92, n° D2, pp 2181-2187.

CEGAS – Companhia de Gás do Ceará.  
[www.cegas.com.br/gasna](http://www.cegas.com.br/gasna)

CETESB/SMA – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental & SMA-SP –Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. *Relatório técnico n.º 2 do convênio SMA/MCT n.º 01.0052.00/2001 – aterros*. São Paulo, 2003, 349 p.

HAM, R. K., MORTON A. B. *Measurement and Prediction of Landfill Gas Quality and Quantity in Sanitary Landfilling: process, technology and environmental impact*. New York: Academic press, 1999.

IPCC - International Panel on Climate Change.  
*Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual (Vol.3)*, 1996.

MCBEAN, E.A., ROVERS, F.A, AND FARQUHAR, G.J. *Solid waste landfill engineering and Design*, New Jersey: Prentice Hall, 1995.

USEPA 1 - United States Environmental Protection Agency. *Characterization of landfill sites in Brazil for landfill gas recovery – Business focus series*, prepared by United States Agency International Development, Office of Energy and Technology Center for Environment, Bureau for Global Programs, Field Support and research, 1997.

USEPA 2 – United States Environmental Protection Agency. *Energy Project Landfill Gas Utilization Software (E-PLUS) User´s Manual*; EPA-30-B-97-006, 1997.

WORLD BANK. *Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean*. World Bank. Oct. 2003. 125p.