

Article

Geração de Biogás no Aterro Sanitário de Maceió a Partir de Modelos Empíricos

Claudionor de Oliveira Silva ^{1*} , Odorico Konrad ² , Nélia Henriques Callado ³ 

¹ Doutor (Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Brasil). ORCID: 0000-0002-6566-0451. E-mail: claudionor.silva@universo.univates.br

² Doutor (Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Brasil). ORCID: 000-0002-6968-7969. E-mail: okonrad@univates.br

³ Doutora (Universidade Federal de Alagoas, Brasil). ORCID: 0000-0002-2393-555X. E-mail: nelia.callado@yahoo.com.br

*Correspondence: claudionor.silva@universo.univates.br

RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos dispostos em aterro sanitário e a partir do processo da digestão anaeróbia gera biogás, o seu reaproveitamento minimiza os impactos ambientais e gera uma fonte de energia renovável. O trabalho estudou o potencial de geração do biogás do aterro sanitário do município de Maceió, no estado de Alagoas, por meio do modelo cinético de primeira ordem recomendado pela CETESB, comparando os dados empíricos de emissões não controladas, com dados medidos em campo de emissões controladas, buscando estimar a eficiência de coleta pelos drenos verticais de biogás do aterro, e estimar o potencial de geração de energia a partir do biogás do aterro. Na composição do biogás, o percentual de CH₄ encontrados nos drenos verticais foi de 56,86% e a vazão média de 7,4 Nm³/h, de CH₄ por dreno. A produção de biogás acumulada em 20 anos com o modelo LandGEM, foi 15.116.325 Nm³, com uma energia acumulada de 155,28 GWh e potência média de geração de 243,65 kW. Para o modelo Biogás, a produção acumulada é de 15.981.110 m³, com uma energia acumulada de 164,16 GWh, para uma potência média de geração de 257,50 kW.

Palavras-chave: aterro sanitário; resíduos sólidos domésticos; emissões de biogás; modelos empíricos; fontes renováveis.

ABSTRACT

Urban solid waste, disposed of in landfill and from the anaerobic digestion process generates biogas, its reuse minimizes environmental impacts and generates a renewable energy source. The work studied the biogas generation potential of the landfill in the municipality of Maceió, in the state of Alagoas, using the first order kinetic model recommended by CETESB, comparing the empirical data of uncontrolled emissions with data measured in the emission field. controlled, aiming to estimate the collection efficiency by the vertical biogas drains from the landfill, and to estimate the potential of energy generation from the landfill biogas. In the composition of biogas, the percentage of CH₄ found in vertical drains was 56.86% and the average flow rate was 7.4 Nm³ / h, of CH₄ per drain. The biogas production accumulated in 20 years with the LandGEM model was 15,116,325 Nm³, with an accumulated energy of 128.68 GWh and an average generation power of 242 kW. For the Biogas model, the accumulated production is 15,981,110 m³, with an accumulated energy of 141.31 GWh, for an average generation power of 255 kW.

Keywords: landfill; domestic solid waste; biogas emissions; empirical models; renewable sources.



Submissão: 31/10/2020



Aceite: 18/05/2022



Publicação: 02/08/2022



1. Introdução

Os aterros sanitários são obras de engenharia, destinadas, ao armazenamento ou a guarda de resíduos (PORTELLA e RIBEIRO, 2014) que podem auxiliar na minimização de impactos ambientais dos sistemas de gerenciamento e resíduos sólidos urbanos (GOMES *et al.* 2015). Podem ser considerados como um reator biológico anaeróbico, tendo como entrada resíduos sólidos e a água, e como saída biogás e chorume (PINAS *et al.*, 2016), ricos em compostos orgânicos e inorgânicos (RIGOBELLO *et al.* 2015), que são coletados através de drenos de captação.

A digestão anaeróbia é uma tecnologia que tem sido aceitável porque permite o uso de biogás como energia renovável, visto que seu biogás é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de gases-traços como o gás sulfídrico, nitrogênio, entre outros (BARROS, 2016). O metano é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa (GEE), com potencial de aquecimento global 21 vezes maior do que o gás carbônico. Dessa forma, o biogás proveniente de aterros sanitários além de ser uma alternativa energia viável devido ao poder energético do metano existente (VIEIRA *et al.* 2015), sua utilização evita que o mesmo seja lançado para atmosfera.

A utilização de energia através de resíduos sólidos está gerando uma ampla disseminação de interesse em todo mundo, e a maior parte desses resíduos está depositado em aterros sanitários (MUKHERJEE *et al.*, 2020), tornando-os um método promissor para gestão dos RSU e produção de energia através do biogás (MIRMOHAMADSADEGHI *et al.* 2019). Segundo Banja *et al.* (2019) a Alemanha é o maior mercado europeu produtor de biogás para fins de eletricidade, representando 53% de toda eletricidade de biogás da União Europeia, enquanto a Itália e o Reino Unido contribuem com cerca de 13% cada.

Segundo a ANEEL (2017) no Brasil, o biogás possui capacidade instalada de geração elétrica de 122.250 kW, seu poder calorífico varia de acordo com a quantidade de metano existente em sua composição, atingindo cerca de 4500 a 6000 kcal por metro cúbico, apresentando uma participação de aproximadamente 0,08% na matriz elétrica. A Região Sudeste coleta praticamente a metade (52,6%) do volume total de RSU gerados no Brasil, e a Região Nordeste, vem em segundo lugar coletando cerca de um quarto dos RSU (22,1%). Reichert (2014) cita que cada tonelada de resíduos disposto em aterros tem potencial energético da ordem de 0,1 a 0,2 MWh.

No aterro sanitário os resíduos são cobertos com uma camada de solo compactada, formando uma barreira, inclusive para evitar ou minimizar o escape de biogás. No entanto, o tempo e as condições ambientais, reduz a eficiência dessa barreira e amplia a possibilidade de escape dos gases no aterro sanitário (MACIEL e JUCA, 2011), diminuindo a eficiências de coleta pelos drenos verticais (emissão controlada), reportadas normalmente entre 50 a 95%, com valor médio de 75% (EPA, 2008).

Por outro lado, existem diversos fatores que podem alterar a composição do biogás de aterros municipais, entre os quais a parcela de matéria orgânica nos resíduos sólidos domésticos (RSD), a umidade desses resíduos, a forma de operação do aterro e fatores climáticos tais como (GEBERT *et al.* 2006; TECLÉ *et al.* 2008; PARK *et al.*, 2001): pressão atmosférica (quanto maior a pressão menor a emissão de gases), precipitação (o aumento do teor de umidade no solo, diminui o espaço nos poros para o transporte gasoso), temperatura do ar e do solo (a taxa de emissões na superfície é máxima quando ocorrem valores máximos de temperatura do ar e do solo).

Barros (2012) cita que existem vários modelos para a estimativa teórica de produção de biogás. Destes, os modelos do Scholl Canyon recomendado pelo Banco Mundial, primeiro modelo a ser criado; o LandGEM proposto pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA); o BIOGAS desenvolvido pela Companhia Ambiental de São Paulo (CETESB), e os modelos apresentados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), são os mais utilizados. Em todos eles a fração de resíduos passíveis de decomposição, a taxa de geração de metano (k) e o potencial de geração de metano (L_0) são parâmetros de grande importância, pois refletem a realidade de cada aterro.

O Scholl Canyon é um modelo cinético de primeira ordem, fácil de entender e aplicar, que se baseia na premissa de que uma fração constante de matéria orgânica se degrada por unidade de tempo, e a taxa k de geração de metano é função da precipitação anual (BANCO MUNDIAL, 2003).

O LandGEM considera dois tipos de emissões, a não controlada e a controlada. A emissão não controlada é um modelo cinético de primeira ordem cuja taxa k de geração de metano também depende da precipitação. A emissão controlada leva em conta a emissão não controlada e a eficiência do sistema coleta de gases (USEPA, 2008). Já o BIOGAS é um programa desenvolvido pela CETESB que utiliza o modelo cinético de primeira ordem da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (CETESB, 2006).



O IPCC (1996) apresenta dois modelos, um chamado de Padrão que se baseia no balanço de massas que supõe que todo metano é liberado instantaneamente no ano em que os resíduos foram depositados. O segundo é um modelo cinético de primeira ordem que reconhece que o metano é liberado ao longo do tempo e não instantaneamente, e utiliza as mesmas taxas de geração de metano do LandGEM.

No Brasil, inseridos no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), um dos instrumentos do Protocolo de Quioto para auxiliar o processo de redução de emissões de gases do efeito estufa, como por exemplo o metano, existem 59 projetos cadastrados (BRASIL, 2015), entre eles o da Central de Tratamento de Resíduos de Maceió (CTRM) com potência máxima de 10,5 MW, mas ainda com registro em validação (NASCIMENTO *et al*, 2019).

Nesse contexto, este trabalho estudou o potencial de geração do biogás do aterro sanitário do município de Maceió, no estado de Alagoas, por meio do modelo cinético de primeira ordem recomendado pela CETESB, comparando os dados empíricos de emissões não controladas, com dados medidos em campo de emissões controladas, buscando estimar a eficiência de coleta pelos drenos verticais de biogás do aterro, e estimar o potencial de geração de energia a partir do biogás do aterro.

2. Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido na CTR - Central de Tratamento de Resíduos de Maceió (aterro sanitário), estado de Alagoas, Brasil, localizado do bairro do Benedito Bentes, com uma área total com 140 há, área de massa aterrada atual de 84 ha, com vida útil de 20 anos, a partir de 2010. O biogás produzido é drenado por meio de 130 drenos verticais e queimados em *flares*. A Figura 1 ilustra o aterro sanitário de Maceió.



Figura 1. Vista aérea do aterro sanitário de Maceió.

2.1 Especificação e quantificação da emissão controlada de biogás no aterro

Para especificação e quantificação das emissões controladas do biogás do aterro foram definidos nove drenos verticais existentes, estrategicamente localizados de modo que representassem a área do aterro, e georreferenciados com o auxílio de um GPS (Global Positioning System) do modelo GPSMAP 64, fabricado pela empresa Garmin.

A quantificação a emissão controlada de biogás no aterro foi feita um aparato em tubo de PVC 100 mm acoplados nos drenos verticais selecionados, com 1m de comprimento e diâmetro 9,7 cm de diâmetro interno, com um furo de 33 mm na tampa (para fechar uma das extremidades do tubo), onde foi colocada uma torneira de passagem e uma mangueira de silicone. A mangueira de silicone foi inicialmente acoplada a um analisador de gás portátil, da marca Biogás 5000, para medição de temperatura, pressão. Depois foi conectada a um anemômetro, da marca Geotech, utilizado para medir a velocidade do biogás nos drenos verticais. A vazão efetiva de biogás foi obtida multiplicando-se a velocidade do biogás pela seção (área do orifício) da peça. As medições de vazão foram realizadas de acordo Mills et al. (1993) utilizando a equação 1.

$$Q = (V \times A) \times \frac{273,15}{273,15+T} \times P \dots\dots\dots \text{equação 1}$$



Sendo: Q: vazão de biogás (Nm³/s)

V: velocidade de saída do biogás (m/s)

A: área da seção de passagem do fluido (m²)

T: temperatura de saída do biogás (°C)

P: pressão atmosférica (bar)

Para especificação do biogás foram realizadas a coletas nos drenos utilizando o mesmo aparato em tubo PVC usado na medição de vazão, onde a mangueira de silicone foi ligada ao bag de coleta, modelo Supel-Insert Multi-Layer Foil 1L/, e um anemômetro (kit Biogás 5000, Geotech), como ilustrado na figura 2.

As nove bags foram levados ao laboratório do Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis (CPETS/TECNOVATES) - Universidade do Vale do Taquari - Univates. O gás foi analisado por meio da Cromatografia Gasosa (GC), modelo Clarus 580 GC - ARNL5840 modificado, marca PerkinElmer, equipado com Detector por Condutividade Térmica (TCD) para leitura de CH₄, CO₂, H₂, O₂ e N₂ e Detector Fotométrico de Chama (FPD) para identificação de H₂S. As colunas utilizadas no ensaio foram empacotadas (Hayesep e Peneira Molecular), o gás de arraste utilizado foi argônio e o gás de combustão para o FPD foi o hidrogênio, a temperatura do forno foi de 60 °C e as temperaturas dos detectores foram 250 °C para o TCD e 325 °C para o TCD. O software utilizado foi o Total Chrom & Int LINK. Os dados de vazão e composição de biogás foram tratados estatisticamente por meio de média e desvio padrão.

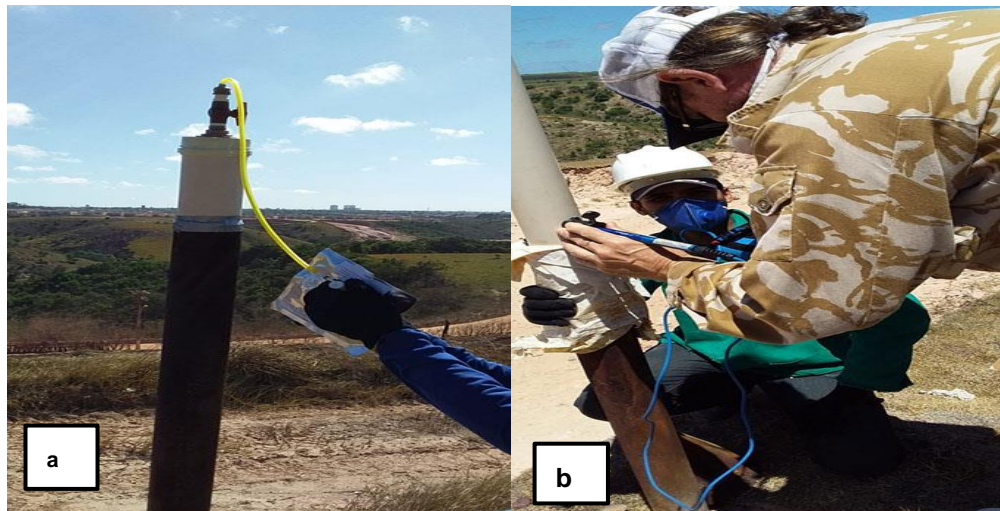


Figura 2. Coleta de gás nos drenos verticais, (a) Bags para coleta de gás (b) anemômetro para medição da velocidade do gás nos drenos.

2.2 Estimativa da emissão não controlada de biogás no aterro

Para estimativa da geração de biogás foi utilizado o modelo empírico de primeira ordem LandGEM (USEPA, 2005), sem controle de emissão. O software possibilita calcular as emissões de metano, dióxido de carbono, NMOCs (nonmethane organic compounds) e outros poluentes atmosféricos, por meio da equação 2.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

equação 2

Onde: Q_{CH₄} = quantidade de metano produzida por ano (m³/ano)

i = 1 - tempo em anos a ser incrementado

n = ano do inventário (2010)

j = 0,1 - tempo em anos a ser incrementado

k = taxa de geração de metano (0,04 ano⁻¹)

L₀ = potencial da geração de metano (170 m³ de CH₄/ton.resíduo)

M_i = massa de resíduos sólidos recebidos no ano “i”(ton./ano) =>tabela 7



t = idade da seção “j” dos resíduos M_i recebidos no ano “i”

Os parâmetros K e L_0 são os mais importantes, pois refletem variações de acordo com o local, clima e tipo de resíduos. Os valores de k dependem da pluviometria, sendo recomendado pelo BM os valores apresentados na Tabela 1, tendo sido adotado o valor de $0,06 \text{ ano}^{-1}$, uma vez que a pluviometria anual de Maceió é entre 1500 e 1700 mm/ano.

Tabela 1. Valores recomendados de k (BANCO MUNDIAL, 2003).

Precipitação Anual	Valores para k		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
< 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 valor de L_0 foi estimado segundo o recomendado pelo IPCC (1996), através da Equação 3.

$$L_0 = FCM \times COD \times CODf \times F \times (16/12) \dots\dots\dots \text{equação 3}$$

Onde: L_0 : potencial de geração de metano do lixo (Gg de CH_4 /Gg de RSU);

FCM : fator de correção de metano (%);

COD : carbono orgânico degradável (%);

$CODf$: fração de COD dissociada (%);

F : fração em volume de metano (%);

$16/12$: fator de conversão de carbono em metano (%).

O Fator de correção para o CH_4 (FCM) é uma correção em função do tipo de aterro, como apresentado na Tabela 2. Como se trata de aterro sanitário, o valor adotado foi de 1,0.

Tabela 2. Cálculo do fator de correção para o metano (IPCC, 1996).

Tipo de aterro	FCM
Controlado	1,0
Não controlado – profundo (≥ 5 m de resíduos)	0,8
Não controlado – pouco profundo (< 5m de resíduos)	0,4

A fração de carbono orgânico degradável (COD) é calculado por meio da porcentagem do resíduo dos principais tipos de resíduo aterrados, segundo a equação 4, e para tanto é necessário realizar a gravimetria dos resíduos que chegam ao aterro.

$$COD = (0,4xA) + (0,17xB) + (0,15xC) + (0,4xD) + (0,3xE) \dots\dots\dots \text{equação 4}$$

Onde: A: Papel/Papelão (%)

B: resíduos de Parques e jardins (%)

C: Restos de alimento (%)

D: Têxteis (%)

E: Madeira (%)

Como dados da composição gravimétrica foram utilizados os dados levantados por Silva *et al.*, (2020), no aterro sanitário de Maceió, apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Composição gravimétrica média dos resíduos sólidos.

Componentes		Percentual (%)
A	Papel/ Papelão	8,75
B	Matéria Orgânica	67,45
C	Resíduo de poda/ jardim	3,75
D	Têxteis	4,63
E	Madeira	1,51

Fonte: Silva et al. (2020)

A fração de COD dissociada (COD_f), indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, sendo função da temperatura da zona anaeróbia, e pode ser obtida pela equação 5. O valor de temperatura adotado foi a média aritmética dos valores medidos em campo nos nove drenos verticais de gás amostrados.

$$\text{COD}_f = 0,014 \cdot T + 0,28 \dots\dots\dots \text{equação 5}$$

Onde: T: temperatura na zona anaeróbia [°C]

Para fração em volume de metano (F) foi utilizado à média aritmética dos valores medidos em campo nos nove drenos verticais de gás amostrados.

Para o cálculo anual da massa de resíduos sólidos domiciliares (M_i) gerados em Maceió, ao longo de 20 anos, considerou-se a taxa da geração *per capita* (G_{PCi}) e a população (P_i), segundo a equação 6.

$$M_i = P_i \times G_{PCi} \dots\dots\dots \text{equação 6}$$

O cálculo da população foi através da estimativa do crescimento populacional com base em dados históricos dos censos e contagem populacional do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Tabela 4).

Tabela 4. Populações no período 1991/2019 para o município de Maceió.

ANO	POPULAÇÃO
1970	269.415
1980	409.191
1991	628.241
1996	723.230
2000	797.759
2010	915.821
2019	1.053.131

Fonte: IBGE, (2000, 2010, 2019).

Os dados populacionais foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados para diferentes funções estatísticas de crescimento (exponencial, logarítmico e linear), e foi calculado o coeficiente de correlação para cada função, tendo sido adotada a equação de crescimento que apresentou coeficiente de correlação mais próximo da unidade (melhor ajuste). Os resultados dos ajustes e suas respectivas equações e coeficientes de correlação, estão apresentados na Figura 3, onde se verifica que o melhor ajuste foi para função logarítmica, com curva de crescimento expressa pela equação 7.

$$P = 30.734.515,84 \times \text{LN}(T) - 232.847.526,07 \dots\dots\dots \text{equação 7}$$

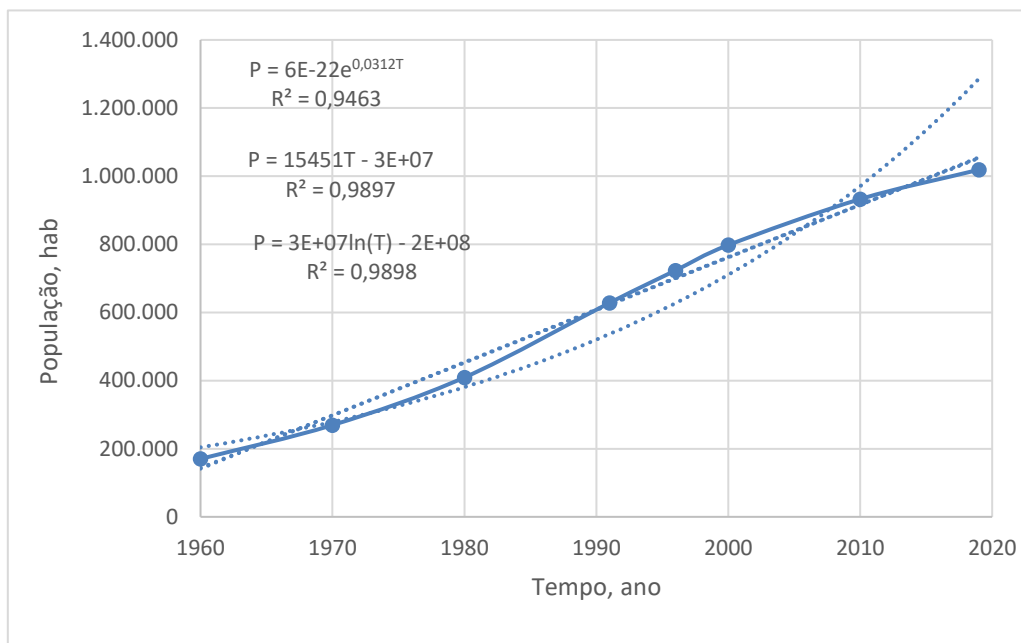


Figura 3. Ajuste das funções de crescimento da população de Maceió.

A taxa de *per capita* anual de resíduos sólidos domiciliares foi estimada para o período de 2020 a 2040 a partir de dados secundários do SNIS e dados de pesquisa levantados para Maceió (JUCÁ, MARIANO e SILVA, 2002; MELO, 2007; SILVA et al. 2020), constantes na Tabela 5. Esses dados foram ajustados estatisticamente pelo método dos mínimos quadrados (exponencial, logarítmico e linear), gerando-se as equações das curvas de crescimento e calculando-se o coeficiente de correlação linear para verificar ajuste. Os resultados dos ajustes e suas respectivas equações e coeficientes de correlação, estão apresentados na Figura 4, onde se verifica que o melhor ajuste foi para função logarítmica, com curva de crescimento expressa pela equação 8.

$$P = 0,021 \times T - 42,421 \dots\dots\dots \text{equação 8}$$

Tabela 5. Taxa *per capita* no período 2000/2018 para o município de Maceió

ANO	Per capita	Fonte	ANO	Per capita	Fonte
2000	0,62	Jucá <i>et al</i> ,2002	2010	0,70	Snis, 2010
2002	0,70	Snis,2002	2011	0,70	Snis, 2011
2003	0,75	Snis, 2003	2012	0,70	Snis, 2012
2004	0,70	Snis, 2004	2013	0,68	Snis, 2013
2004	0,90	Melo, 2004	2014	1,04	Snis, 2014
2005	0,57	Snis, 2005	2016	1,14	Snis, 2016
2007	0,80	Snis,2007	2017	1,02	Snis, 2017
2008	0,70	Snis,2008	2017	0,98	Silva <i>et al</i> , 2020
2009	0,70	Snis, 2009	2018	1,04	Snis, 2018

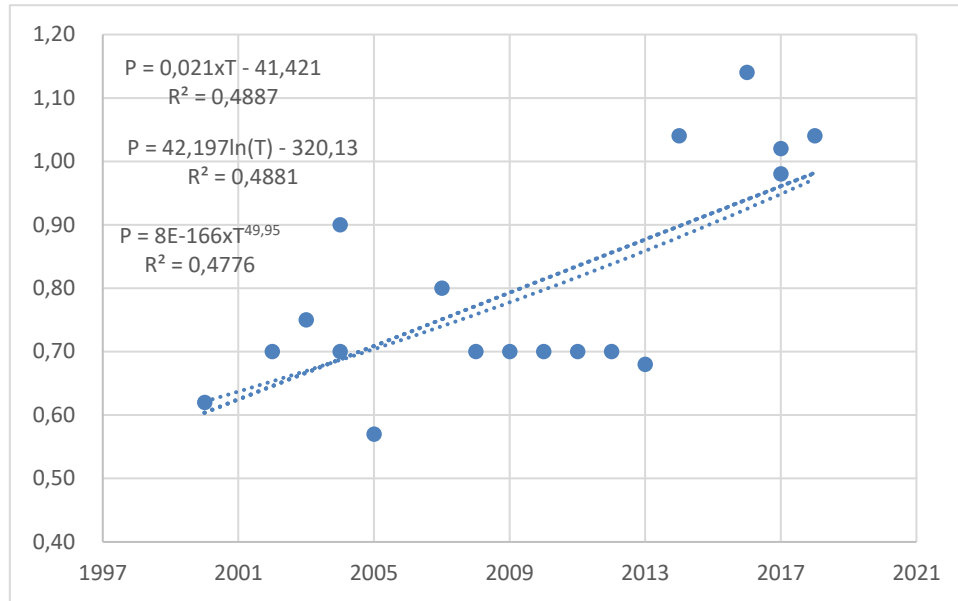


Figura 4. Ajuste das funções de crescimento da taxa per capita de lixo.

Considerou-se que o serviço de coleta atende 100% em todos os bairros de Maceió e todo RSU vai para o aterro sanitário.

2.3 Estimativa da eficiência de coleta pelos drenos verticais de biogás do aterro

O sistema de drenagem do biogás é composto por drenos verticais que perpassa todas as camadas de resíduos ao longo das células desde a base até o platô superior. Os drenos verticais são compostos por tubos de concreto, dotados de orifícios, para possibilitar a entrada do biogás ao longo de seu comprimento. Para proteger a tubulação de drenagem, os tubos são envoltos por britas, contida por malha de ferro.

A captação do biogás no aterro é realizada através de drenos verticais, em que o biogás é queimado diretamente nos queimadores acoplados na parte superior destes drenos. Nesse sistema a eficiência de coleta do biogás pode chegar a até 80% em relação ao total de gás produzido no aterro sanitário.

2.4 Potencial de geração de energia a partir do biogás do aterro

Para estimar a geração de energia a partir do biogás gerado no aterro, foi utilizada a equação 9, e expressa a relação entre a quantidade de gás metano (vazão do metano), poder calorífico do gás metano e eficiência do grupo gerador.

$$P = Q \cdot PC_i \cdot n \cdot FC \quad \dots\dots\dots \text{equação 9}$$

Onde: P = Potência disponível a cada ano (kW);

Q = Vazão do metano a cada ano (m^3 de CH_4);

PC_i = poder calorífico do metano (kWh/m^3);

n = eficiência da planta (%);

FC = Fator de Capacidade (%).

O poder calorífico inferior (PCI) do biogás é aproximadamente $5.500 \text{ kcal}/m^3$, quando a proporção de metano for, aproximadamente de 60% (MULYLAERT et al. 2001). Os parâmetros para cálculo de geração de energia, PC_i do metano $10,5 \text{ kWh}/m^3$ CH_4 (LMOP, 2011), eficiência da planta (motor de combustão interna) 33% (EPA, 1996), fator de capacidade, 85% (MUYLAERT et al. 2001).

Para estimar a potência elétrica com motor de combustão interna (KW), foi utilizada a equação 10 (TIAGO FILHO et al., 2011).

$$P_{ICE} = P \cdot E_{ICE} \dots\dots\dots \text{equação 10}$$



Onde: P_{ICE} = potência elétrica com motor de combustão interna (kW);

P = potência disponível a cada ano (kW);

E_{ICE} = eficiência de motor de combustão interna.

3. Resultados e Discussão

3.1 Composição do biogás do aterro

Os dados obtidos a partir da cromatografia gasosa, das amostras coletadas nos drenos verticais do aterro sanitário mostram a composição apresentada na Tabela 6. Verifica-se que os valores médios foram de 56,86 % de CH_4 , 41,72 % de CO_2 , 0,22 % de O_2 e 1,20 de N_2 não tendo sido observado gás hidrogênio.

Tabela 6. Composição do biogás no aterro sanitário de Maceió (%).

Componentes	Teor dos gases (%)
CH_4	56,86 ± DP
CO_2	41,72 ± DP
O_2	0,22 ± DP
H_2	0,00 ± DP
N_2	1,20 ± DP

O percentual de CH_4 , encontrado neste estudo, é próximo aos realizados em outros aterros sanitários (Tabela7), e na pesquisa de Freire (2018), 57%. O autor acrescenta que a composição analisada é de ótima qualidade para geração de energia. O biogás possui um poder calorífico entre 2.333,85 e 6.253,01 kcal.kg⁻¹ e é composto por 40 a 75% de metano (LANNICELLI, 2008). Essas características são importantes para conversão de máquinas que empregam outros combustíveis em máquinas de combustão à biogás (LANNICELLI, 2008).

É imprescindível, nesses estudos, a observação da situação estrutural do aterro sanitário em campo, para verificação da deterioração dos drenos e possíveis fuga do biogás, que pode influenciar na vazão. Além disso, as condições favoráveis à degradação anaeróbia, condições dos sistemas de drenagem do aterro e condições ambientais externos (SILVA e CAMPOS, 2008).

Tabela 7. Composição de biogás em outros aterros sanitários.

Autores	Componentes e teor de gases (%)				
	CH_4	CO_2	O_2	H_2	N_2
Guedes, (2018)	57,5	41,2	0,9	nd	nd
Benato e Macor, (2019)	55,0	41,0	0,4	nd	0,7
Dimitrov et al. (2019)	58,0	37,5	nd*	nd	nd
Rasi, (2009)	57,0	37,0	1,0	nd	1,0

n.d*: não analisado

A vazão média de biogás considerado os drenos verticais monitorados no aterro sanitário estão apresentados na Tabela 8, onde se verifica que a vazão média de biogás por dreno vertical é de 13,44 Nm³/h e de CH_4 é de 7,4 Nm³/h. Considerando a vazão média de biogás nos drenos (13,44 Nm³.h⁻¹) e CH_4 (7,4 Nm³.h⁻¹), por dreno vertical obtida neste estudo e o número de drenos verticais do aterro (130), estima-se que o aterro sanitário de Maceió (área do estudo), esteja produzindo cerca de 1.747Nm³.h⁻¹de biogás e aproximadamente 962 Nm³.h⁻¹, de CH_4 .

**Tabela 8.** Vazões de biogás e gás metano dos drenos verticais no aterro sanitário de Maceió

Monitoramento	Vazão (Nm ³ .h ⁻¹)
Vazão média de biogás por dreno	13,44 ± DP
Vazão média de gás metano por dreno	7,4 ± DP
Vazão total de biogás	912,45
Vazão total de gás metano	518,82

A vazão média de CH₄ por dreno, neste estudo, é compatível a outros trabalhos realizados em aterros sanitários (Tabela9). Vale ressaltar o estudo realizado em uma célula experimental do aterro sanitário da Muribeca/PE, por Maciel, Jucá e Codeceira Neto (2011), a vazão média atingiu de CH₄ e de biogás, 19,4 e 38,7, respectivamente. Os autores destacaram que a vazão do biogás está relacionada o lento enchimento da célula e a não existência de camadas de cobertura intermediárias e maior influência das condições atmosféricas relacionado com a profundidade útil dos drenos na célula, a qual foi inferior a 4,0 m. Ainda assim, “a ineficiência do sistema de captação amplia o escape fugitivo de gás metano no aterro sanitário, ou seja, emite-se fugitivamente parte daquilo que o sistema construído não foi capaz de captar” (CANDIANI e VIANA, 2017).

Tabela 9. Vazão de biogás nos drenos verticais obtido em diferentes estudos.

Autores	Monitoramento da vazão de biogás e metano por dreno (Nm ³ . h-1)			
	Média de biogás	Média de metano	Total biogás	Total metano
Guedes, (2018)	n.d*	7,0	104,0	63,0
Fernandes, (2009)	n.d	8,3	n.d	21,10
Audibert e Fernandes, (2012)	n.d	7,5	n.d	102
Maciel, Jucá e Codeceira Neto (2011)	38,7	19,4	193,5	97,3

n.d*: não analisado

3.2 Estimativa de geração de biogás

Através das informações do total da população e a geração *per capita* kg/hab./dia, dos resíduos sólidos urbanos, com um acréscimo de 0,98% ao ano, pode-se projetar a quantidade de resíduos em toneladas ano a ano e o volume de resíduos em tonelada, acumulado para uma vida útil de 20 anos do aterro sanitário de Maceió, Tabela 10.



Tabela 10. Quantidade de resíduos gerados no aterro de Maceió de 2010 a 2029.

Município de Maceió – (2010 – 2029)				
Ano (t)	População (habitantes)	Índice per capita de massa coletada, com acrécimo de 0,98% ao ano (kg/hab./dia)	Lixo (ton/dia)	Lixo (ton/ano)
2010	915.821	0,789	722,58	263.741,70
2011	931.108	0,810	754,20	275.283,00
2012	945.387	0,831	786,45	287.054,25
2013	961.659	0,852	819,33	299.055,45
2014	976.923	0,873	852,85	311.290,25
2015	992.180	0,894	887,01	323.758,65
2016	1.007.429	0,915	921,80	336.457,00
2017	1.022.670	0,936	957,22	349.385,30
2018	1.037.904	0,957	993,27	362.543,55
2019	1.053.131	0,978	1.029,96	375.936,17
2020	1.068.350	0,999	1.067,28	389.557,65
2021	1.083.561	1,020	1.105,23	403.409,73
2022	1.098.765	1,041	1.143,81	417.492,14
2023	1.113.961	1,062	1.183,03	431.804,71
2024	1.129.150	1,083	1.222,87	446.347,28
2025	1.144.331	1,104	1.263,34	461.119,66
2026	1.159.505	1,125	1.304,44	476.121,70
2027	1.174.671	1,146	1.346,17	491.353,22
2028	1.189.830	1,167	1.388,53	506.814,05
2029	1.204.981	1,188	1.431,52	522.504,03

3.3 Geração de metano e energia a partir dos software LandGEM e Biogás

Software LandGEM (EPA)

Para os cálculos da geração de metano a partir dos modelos foram utilizados os dados da quantidade de resíduos da tabela 10. O software LandGEM possibilitou estimar o volume de CH₄, produzido no ano de encerramento das atividades do aterro sanitário (2029), considerado na simulação com uma vida útil de 20 anos, que recebe diariamente cerca de 722 toneladas de RSU, alcançou o valor de 15.126.325 Nm³ CH₄/ano. Após esse período, as emissões de CH₄ passam a diminuir, no entanto, ainda continuam ocorrendo por muitos anos (Figura 5). Estudo desenvolvido por Ensinas (2003) mostrou que a vazão de CH₄ para o Aterro Delta (Campinas - SP), que recebe diariamente cerca de 645 toneladas de RSU, atingiu a marca de 1370 Nm³ CH₄/h após 15 anos de disposição de RSU. Nesse sentido, o valor de Nm³ CH₄/ano é 11.836.800.

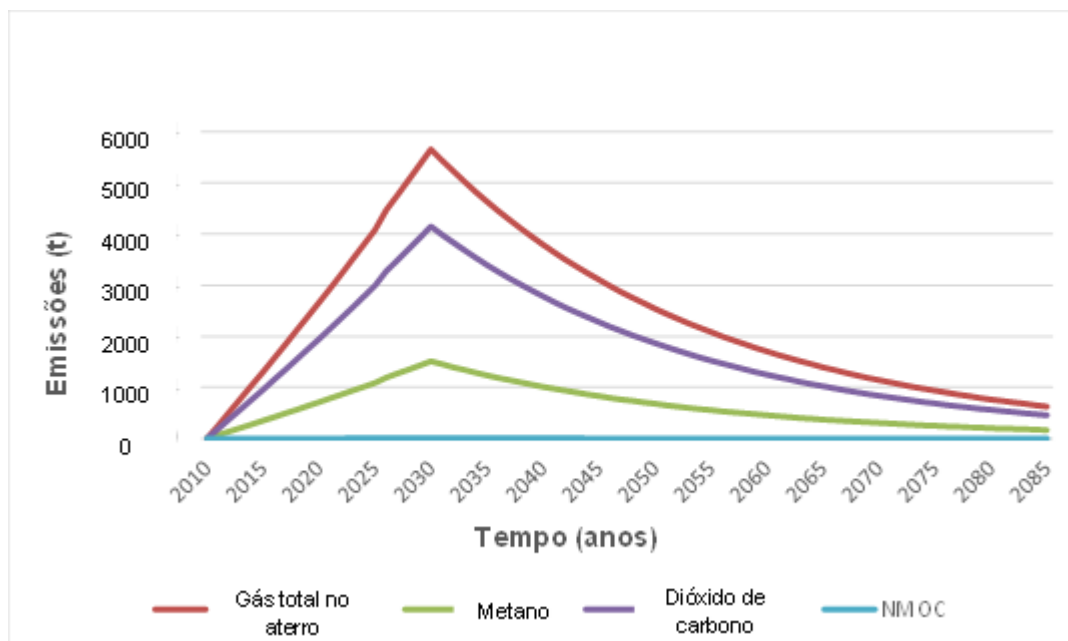


Figura 5. Emissões de CH₄ pelo Software LandGEM (EPA).Software Biogás (Cetesb)

Com o software Biogás, o volume de CH₄ estimado no aterro sanitário foi de 15.981.110 Nm³ CH₄/ano (Figura 6).

Em estudo desenvolvido por Piñas et al. (2016), mostrou a vazão de CH₄ para o aterro da cidade de Três Corações, Minas Gerais, nos 20 anos de vidas útil do aterro sanitário com uma população de 69.618 (2015) e 19.058 toneladas de resíduos (2010), existe uma produção acumulada de Nm³ CH₄/ano é de 27.476.360.

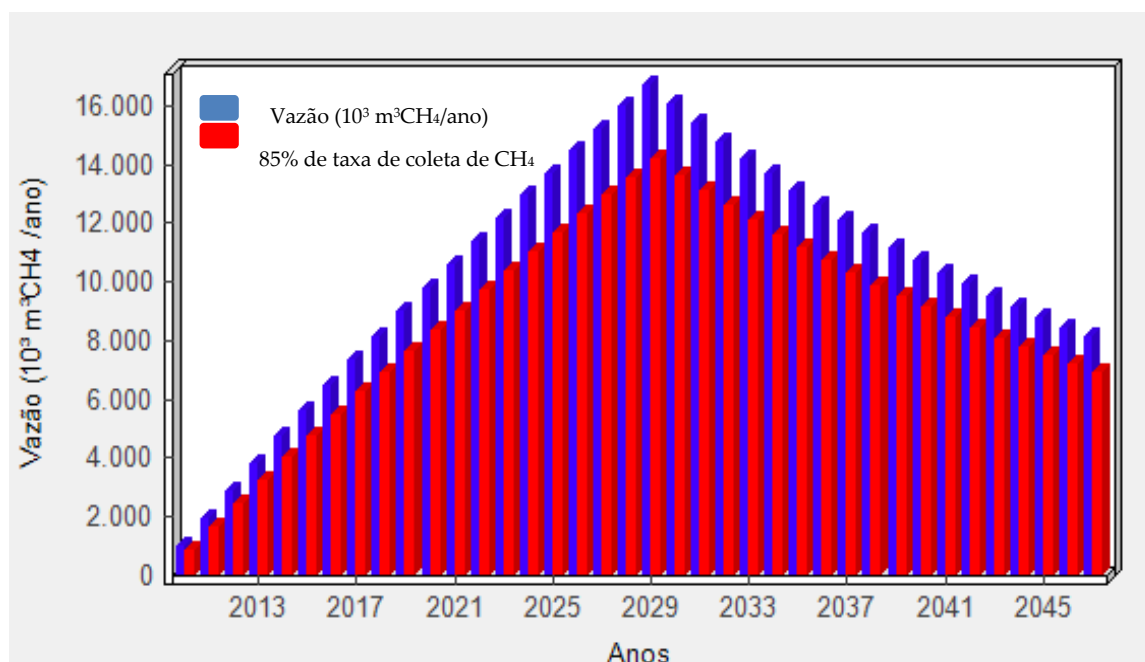


Figura 6. Emissões de CH₄ pelo Software Biogás (Cetesb).Geração de energia

No cálculo da produção de energia, utilizou-se a quantidade de produção de metano em seu pico máximo obtido no **modelo** LandGEM e Biogás, além de que considera-se que apenas 80% do gás emitido é recuperado.

LandGEM:

$$P = (PCI * Q * 0,85 * \eta) / 860.000$$

$$P = 5500 \text{ [kcal/m}^3\text{CH}_4] * 1,512 \times 10^6 \text{ [m}^3\text{CH}_4\text{/ano]} * 0,85 * 0,33 * 1/860.000 \text{ [MW/(kcal/h)]}$$



$$P = 2712,37 \text{ MWh/ano}$$

$$P = 0,310 \text{ MW}$$

Logo,

$$E = P * \text{Rend.} * \text{Tempo de Operação}$$

$$E = 0,310 \text{ [MW]} * 0,87 * 24 \text{ [horas/dia]}$$

$$E = 6,47 \text{ MWh/dia}$$

Biogás:

$$P = (\text{PCI} * Q * 0,85 * \eta) / 860.000$$

$$P = 5500 \text{ [kcal/m}^3\text{CH}_4] * 1,598 * 10^6 \text{ [m}^3\text{CH}_4\text{/ano]} * 0,85 * 0,33 * 1/860.000 \text{ [MW/(kcal/h)]}$$

$$P = 2866,65 \text{ MWh/ano}$$

$$P = 0,327 \text{ MW}$$

Logo,

$$E = P * \text{Rend.} * \text{Tempo de Operação}$$

$$E = 0,327 \text{ [MW]} * 0,87 * 24 \text{ [horas/dia]}$$

$$E = 6,84 \text{ MWh/dia}$$

De posse desses dados, a tabela 11 mostra a comparação da geração de energia dos dois modelos, com energia acumulada durante 20 anos de 155,28 GWh, para o LandGEM, e de 164,16 GWh, para o Biogás.

Para geração de energia elétrica utilizando um motor de combustão interna a pistão (eficiência de 33%), a potência média de 243,65 kWe, com o modelo LandGEM, e de 257,50 kWe, com o Biogás. Houve uma variação de 5,40 entre o LandGEM e Biogás.

Tabela 11. Geração de metano e energia dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb) no aterro sanitário do Município de Maceió - 2010-2029.

Modelo	Emissões de metano (m ³ /ano)	Energia acumulada (GWh)	Potência (kWe)	
			Disponível	Motor de combustão a pistão
LandGEM (EPA)	15.116.325	155,28	739	243,65
Biogás (Cetesb)	15.981.110	164,16	781	257,50
Variação (%)		5,40		

Fonte: EPA, (2005); CETESB, (2006).

Observa-se, na Tabela 11, que não existe diferença considerável entre os dois modelos utilizados para calcular a geração do biogás de aterros sanitários.

4. Conclusões

Na composição do biogás, o percentual de CH₄ encontrados nos drenos verticais foi de 56,86%. Esse resultado é próximo a outros estudos semelhante. A vazão média de 7,4 Nm³/h, de CH₄ por dreno é compatível a outros trabalhos realizados em aterros sanitários.

A produção de biogás acumulada para 20 anos para o modelo LandGEM, foi 15.116.325 m³/ano e para o modelo Biogás/Cetesb foi de 15.981.110. A variação média dos modelos LandGEM e Biogás foi 5,40%, podendo-se concluir que não houve diferença considerável.

A energia acumulada para o modelo LandGEM/EPA foi 155,28 e para o Biogás/Cetesb foi 164,16 GWh.



A potência disponível foi 739 e 781 KWe, para o LandGEM e Biogás, respectivamente. A potência média da geração foi de 243,65 kWe, utilizando o LandGEM e de 257,50 kWe com o modelo Biogás, para um motor de combustão interna a pistão com eficiência de conversão elétrica de 33%.

O ápice de geração de CH₄ é aos 20 anos, período do seu encerramento. Após esse momento, a geração de CH₄ vai diminuindo, quando se encerra e deixa de incorporar matéria orgânica.

Portanto, a pesquisa não esgota todo debate a cerca da temática aqui, o aproveitamento da energia oriunda da decomposição microbiana dos resíduos orgânicos dos aterros sanitários, com vista, principalmente, à geração do biogás para o aproveitamento energético. Destaca-se a importância de mais estudos, sobre a utilização do biogás de aterros sanitários como combustível para caldeiras, geração de energia através de motores e purificação para uso como combustível veicular.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Audibert JL, Fernandes F 2012. Avaliação qualitativa e quantitativa da emissão de biogás em aterro controlado de médio porte. *Revista DAE*, (190): 56-73.
- Banja M et al 2019. Apoio ao biogás no setor elétrico da UE - Uma análise comparativa. *Biomassa e Bioenergia* (128): 105313.
- Barros RM 2012. Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta.
- Barros RM 2016. Energia de biogás da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e de aterros sanitários. *Revista O Futuro da Energia* 1 (1).
- Benato A, Macor A 2019. Italian Biogas Plants: Trend Subsidies, Cost, Biogas Composition and Engine Emissions. *Energies* 12:979.
- BRASIL 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico. PNSB – Dados censitários. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 02 abr.2020.
- BRASIL 2012. Ministério de Meio Ambiente. Aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuossolidos/aproveitamento-energetico-do-biogasde-aterro-sanitario>. Acesso em: 01 abr. 2020.
- BRASIL 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico. PNSB – Pesquisa do Saneamento Básico. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 02 abr. 2020.
- Candiani G, Viana E 2017. Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. *Geosp - Espaço e Tempo (Online)* 21 (3): 845-857. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/97398>. Acesso em: 17/set. 2020.
- CETESB 2006. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Biogás: geração e uso energético – versão 1.0/CETESB. Secretaria de meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia, São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/software/> Acesso em: 07mar. 2020.
- Dimitrov R et al 2019. Optimization of biogas composition in experimental studies. *E3S Web of Conferences*, 8th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development - TE-RE-RD 112.
- Ensinas AV 2003. Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta de Campinas-SP. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 143pp.
- EPA 1996. Turning a liability into an asset: a landfill gas-to-energy project development handbook. Landfill Methane Outreach Program - EPA.
- EPA 2005. United States Environmental Protection Agency. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 user's guide. Morrisville, NC. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302.xls> > Acesso em: 07 mar. 2020.
- Fernandes JG 2009. Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, 116 pp.
- Freire VHN 2018. Estimativa do potencial de produção de biogás em um aterro sanitário para aproveitamento energético. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, 102pp.
- Gomes LP et al 2015. Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. *Eng Sanit Ambient* 20 (3): 449-462.



- Guedes MJF 2018. Estudo das emissões de biogás em aterro de resíduos sólidos urbanos no semiárido brasileiro. Tese, Universidade Federal de Campina Grande, 182pp.
- Hoorweg D, Bhada-tata P 2012. O que é um resíduo: uma revisão global do gerenciamento de resíduos sólidos. Documentos de Conhecimento da Série de Desenvolvimento Urbano, Banco Mundial (15).
- INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 1996. Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>>. Acesso em: 20 jun. 2020.
- Lannicelli AL 2008. Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira. Dissertação, Universidade de Taubaté, Taubaté, São Paulo, 84 pp.
- LMOP 2020. Landfill methane outreach program. Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop>. Acesso em: 23 dez. 2020.
- Maciel FJ, Jucá JFT, Codeceira Neto A 2011. Avaliação do projeto piloto de recuperação de biogás no aterro da Muribeca/PE. VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL) e II Seminário de Eficiência Energética do Setor Elétrico (II SEENEL). Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20110930084345-418.pdf> Acesso em: 14 set. 2020.
- Marques MD 2011. Seleção de áreas para implantação de aterro sanitário simplificado - estudo de caso para o município de Guapó - GO. Dissertação, Universidade Federal de Goiás, 119pp.
- Mirmohamadsadeghi S et al 2019. Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports* (7): 100202.
- Mukherjee, C et al 2020. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (119): 109512.
- Murtala AM, Shawal NN, Usman HD 2012. Biomass as a renewable source of chemicals for industrial applications. *Inter J Eng Sc Technol* 4 (02): 721-730.
- Muylaert MS et al 2001. Consumo de energia e aquecimento do planeta – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL do Protocolo de Quioto: Estudos de caso. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- Portella MO, Ribeiro JCJ 2014. Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos. *Revista Direito Ambiental e Sociedade* 4, (1):115-134.
- Rasi SE 2009. Biogas composition and upgrading to biomethane. Dissertation, University of Jyväskylä, 79 pp.
- Rigobello, ES et al 2015. Identificação de compostos orgânicos em lixiviado de aterro sanitário municipal por cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas. *Quim. Nova* 38 (6): 794-800.
- Silva TN, Campos LMS 2008. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos bandeirantes - SP. *Eng. Sanit. Ambient* 13 (1): 88-96.
- Silva TR 2012. Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG. Dissertação. Universidade Federal de Itajubá, 164 pp.
- SNIS 2010, 2011, 2012, 2013, 2014. Diagnóstico dos serviços de resíduos sólidos. Brasília: Ministério das Cidades, Brasil.
- Tiago Filho GL et al 2011. Analysis of Brazilian SHP policy and its regulation scenario. *Energy Policy* 39 (10): 6689-6697.
- Vieira GEG et al 2015. Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão. *Revista Liberato, Novo Hamburgo* 16 (26): 101-220.