

## POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS GERADOS NA MICRORREGIÃO DE TEÓFILO OTONI, MINAS GERAIS

Alexandre Sylvio Vieira da Costa<sup>1</sup>  
Jéssica Rodrigues Andrade<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri*

<sup>2</sup>*Centro Universitário de Caratinga*

DOI: 10.47168/rbe.v27i4.506

### RESUMO

O crescimento populacional e a melhora da qualidade de vida têm contribuído para o aumento da geração de resíduos e, conseqüentemente, a geração de gases que potencializam o efeito estufa. Este trabalho teve como objetivo caracterizar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos das cidades da microrregião de Teófilo Otoni, em Minas Gerais, e estimar a geração de metano e de energia elétrica até 2055. A coleta dos dados da composição gravimétrica dos resíduos foi realizada na Associação dos Municípios do Mucuri, enquanto a estimativa total de produção de resíduos foi feita considerando a população urbana dos municípios e a estimativa de crescimento. No cálculo da taxa de geração de metano foi utilizado o modelo do Banco Mundial. Verificou-se, pelas projeções, que a microrregião produziria aproximadamente 40 mil toneladas de matéria orgânica em 2045, ano de fechamento do aterro. Nesse mesmo ano estima-se a produção de 767,5 mil m<sup>3</sup> de gás metano e potencial de geração de quase 1.850 MWh/ano, suficiente para atender as necessidades de 894 residências/mês.

Palavras-chave: Metano; Composição gravimétrica; Matéria orgânica; Aterro sanitário.

### ABSTRACT

Population growth and improved quality of life have contributed to the increase in waste generation and, consequently, the generation of gases that potentiate the greenhouse effect. This work aimed to characterize a gravimetric composition of urban solid waste in cities in the micro-region of Teófilo Otoni, Minas Gerais, and also estimate the generation of methane and electricity until 2055. Data collection on the gravimetric composition of waste was carried out at Association of Municipalities of Mucuri, while the total estimate of waste production was made consi-

dering the urban population of the municipalities and the estimated growth. In calculating the methane generation rate, the World Bank model was used. According to projections, the microregion would produce approximately 40 thousand tonnes of organic matter in 2045, the year the landfill would be closed. In that same year, the production of 767,5 thousand m<sup>3</sup> of methane gas is estimated, with a potential generation of almost 1,850 MWh/year, enough to meet the needs of 894 homes/month.

Keywords: Methane; Gravimetric composition; Organic matter; Sanitary Landfill.

## 1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, por consequência do expressivo aumento do consumo nos centros urbanos, os problemas relacionados à disposição final dos resíduos têm ganhado destaque nas discussões relativas às questões ambientais (PECORA; FIGUEIREDO; VELASQUEZ, 2006). Pedott e Aguiar (2014) ressaltam que o fato da alternativa de aterramento do lixo ser a mais utilizada em relação às outras opções existentes, para destinação final dos resíduos, se deve a questões de ordem técnica, ambiental, econômica e social. Dos métodos existentes, o aterro sanitário é o mais adequado, pois entre suas fases de execução têm-se a impermeabilização do solo e cobertura dos resíduos, evitando a contaminação do solo e dos aquíferos (PECORA et al., 2008).

No Brasil, a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ocorre em lixões, aterros controlados e aterros sanitários, porém, em relação ao potencial poluidor pós descarte, e comparando as formas de destinação final mais adequadas, e como previsto na legislação, a melhor alternativa são os aterros sanitários (ARAÚJO et al., 2020).

No Brasil, levantamento junto aos municípios indica que o aterro sanitário é o sistema mais utilizado para a disposição dos RSU (ABRELPE, 2020). A opção pelos aterros sanitários também permite o reaproveitamento dos compostos gerados.

Entretanto, segundo o Relatório do Panorama da Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos no Estado de Minas Gerais, da Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) (MINAS GERAIS, 2016), na região do Vale do Mucuri, que tem 29 municípios, apenas três destinam seus RSU de forma regularizada, com 26 municípios apresentando destinação irregular, com disposição principalmente em lixões.

Os principais materiais que compõem os RSU no Brasil são metais, papel, papelão, plástico, vidro e matéria orgânica. Segundo levantamento da ABRELPE (2012), a matéria orgânica representa, em

média, 51,4% da massa total.

Segundo Cabral (2007), os RSU apresentam grande heterogeneidade, sendo de extrema importância conhecer a composição gravimétrica dos mesmos. A composição gravimétrica indica o percentual de cada componente do resíduo em relação à massa total da amostra.

A degradação da matéria orgânica proveniente do resíduo sólido urbano tem como um de seus produtos finais o biogás. Ao ser disposto sem cobertura, pode ser verificado olfativamente o início do processo de produção do biogás. Quando realizada a cobertura do resíduo, o biogás continua sendo produzido, e com decréscimo de produção ao longo dos anos (BORBA, 2006).

Em um aterro sanitário, durante a decomposição da matéria orgânica, ocorrem basicamente dois processos: a decomposição aeróbica e a anaeróbica. No início do período de deposição do resíduo, a decomposição aeróbica ocorre com posterior diminuição da presença do oxigênio, seguido do predomínio do processo de decomposição anaeróbica (BORBA, 2006).

Os principais constituintes do biogás gerado no processo de biodegradação dos resíduos, em um aterro sanitário, são: metano, dióxido de carbono, oxigênio, sulfeto de hidrogênio, amônia, hidrogênio e monóxido de carbono. Dentre eles, os mais abundantes são o dióxido de carbono (40% - 60%), com maior produção na decomposição aeróbica, e o metano (45% - 60%), preponderante na etapa de decomposição anaeróbica (MELLO; GRASSI, 2014).

A presença do metano no biogás faz com que este seja uma fonte alternativa para gerar energia elétrica, considerando que seu poder calorífico é 35,7 MJ/Nm<sup>3</sup>. Sendo assim, constata-se que quanto maior a proporção de metano presente no biogás, maior pode ser a produção de energia (FIGUEIREDO, 2007).

De acordo Dalpaz (2019), o aproveitamento do biogás pode ser na produção de energia térmica, na queima direta em fogões, caldeiras e aquecedores. O biogás pode ser usado em motores após passar por tratamentos de purificação (KONRAD, 2016).

Segundo Soares (2014), a captação do biogás em aterros sanitários é viável do ponto de vista econômico, energético e ambiental, e pode trazer redução de custos para a gestão pública. Apesar do custo de implantação um sistema gerador de energia elétrica nos aterros sanitários, utilizando o biogás, é importante ressaltar que a eletricidade gerada pode ser consumida localmente e, eventualmente, o excedente poderá ser comercializado. Assim, haveria o benefício econômico e ambiental, pela redução das emissões de GEE (Gases do Efeito Estufa) (MARTINS; SILVA; VELAME, 2016).

Para estimar a viabilidade energética e econômica, o potencial de geração do gás deve ser calculado. A previsão é realizada através de estimativas que indicam a produção do gás e seu perfil temporal, ou

seja, o tempo de produção e seus picos (PEDOTT; AGUIAR, 2014).

Os modelos numéricos mais utilizados para o cálculo da geração de biogás em aterros sanitários são as metodologias desenvolvidas pelo Banco Mundial, o IPCC e pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA) (MELLO; GRASSI, 2014).

Este artigo teve como objetivo avaliar o potencial de geração de biogás proveniente da disposição dos RSU gerados na Microrregião de Teófilo Otoni, bem como o seu potencial de geração de energia elétrica.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Situada na Mesorregião Vale do Mucuri (Figura 1), no Nordeste de Minas Gerais, a Microrregião de Teófilo Otoni, é composta pelos municípios (Figura 2<sup>1</sup>) de Ataléia, Catuji, Franciscópolis, Frei Gaspar, Itaipé, Ladainha, Malacacheta, Novo Oriente de Minas, Ouro Verde de Minas, Pavão, Poté, Setubinha e Teófilo Otoni (IBGE, 2016). A cidade de Teófilo Otoni é considerada polo da microrregião, com uma população de 141.505 habitantes, estimada em 2016, e uma área territorial de 3.241 km<sup>2</sup> (IBGE, 2016).

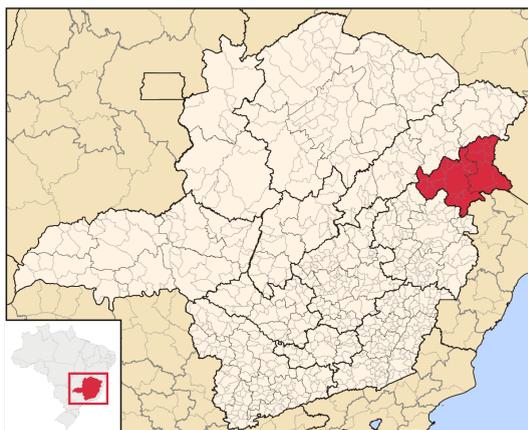


Figura 1 - Localização da Mesorregião do Vale do Mucuri em Minas Gerais

1 <https://www.brasilchannel.com.br/>

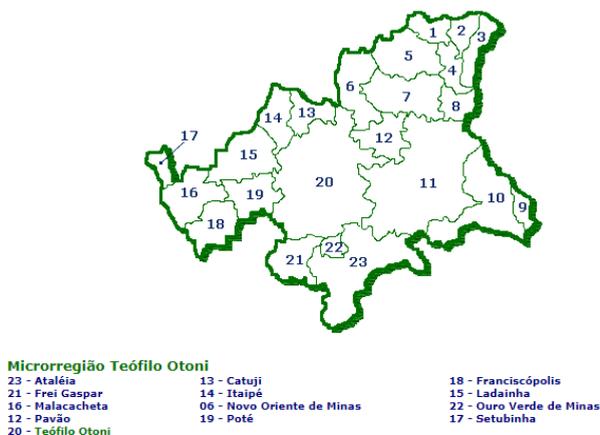


Figura 2 - Cidades que compõem a Microrregião de Teófilo Otoni em Minas Gerais

O levantamento das informações da microrregião de Teófilo Otoni foi realizado em etapas. Os dados da composição gravimétrica dos RSU de Teófilo Otoni foram obtidos na Prefeitura Municipal da cidade. Um arquivo elaborado em 2015 identificou as frações percentuais dos diferentes tipos de resíduos sólidos enviados para disposição final. As avaliações foram realizadas pela empresa responsável pela coleta de resíduos sólidos da cidade. As amostras foram analisadas utilizando o método de quarteamento, sendo divididas em quatro quadrantes, descartando dois deles e analisando os restantes, conforme metodologia descrita pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 10007) (ABNT, 2004).

Os dados da composição dos RSU das demais cidades da microrregião foram fornecidos pela AMUC (Associação dos Municípios do Mucuri). As informações foram tabuladas por município, incluindo dados de geração per capita de RSU, peso específico médio dos RSU das respectivas amostras e o percentual de resíduo nas classes orgânica e inorgânica.

Após a tabulação das informações foi realizada a seleção do modelo matemático para o cálculo de geração do metano, considerando a disponibilidade dos dados obtidos. O modelo matemático adotado para estimar a geração de gás metano foi o desenvolvido pelo Banco Mundial.

O arquivo de dados tabulados continha o percentual dos resíduos divididos nas seguintes categorias: matéria orgânica, poda, plás-

tico, papel e papelão, vidro, metal ferroso, metal não-ferroso, pedra, terra, louça e cerâmica, madeira, couro, borracha, têxtil, contaminantes biológicos, contaminantes químicos, equipamentos eletrônicos e diversos.

O número de amostras dos RSU variou entre as cidades. Visando a obtenção da porcentagem média de material orgânico que é enviado ao destino final das cidades, foi realizada a soma da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos para cada amostra de cada cidade. Posteriormente, foi calculada a média das amostras, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação das amostragens.

Para o cálculo da massa de RSU produzida por ano, foram estimadas as taxas anuais de crescimento populacional. Para isso, foi feita uma projeção em 30 anos (2015 a 2045), tempo médio da vida útil de um aterro. Os dados populacionais de referência foram obtidos a partir das informações do Censo 2010, disponibilizados pelo IBGE, e a estimativa da população em 2015 é a do mesmo instituto. Assim, foi calculada a taxa de crescimento anual da população em cada cidade até 2045. A quantidade anual de RSU produzido, em toneladas, foi calculada pela Equação 1:

$$RTA = (PTA \times GRPP \times 365 \text{ dias}) \times 1000^{-1} \quad (1)$$

Sendo:

RTA = Resíduo total no ano (toneladas)

PTA = População total no ano (habitantes)

GRPP = Geração de resíduos per capita (kg.dia<sup>-1</sup>)

Foi realizada consulta ao site do Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2013), no qual foi obtida a porcentagem da população urbana de cada município. Em seguida, através do banco de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), foi obtida a taxa de cobertura da coleta de resíduos sólidos domiciliares em relação à população urbana, no intuito de discernir a quantidade de matéria orgânica que realmente é coletada, considerando que no meio rural a coleta não é realizada. Entretanto, para cidades como Ataléia, Ladainha, Novo Oriente de Minas, Ouro Verde de Minas e Setubinha a informação não estava disponível no SNIS. Como estimativa, foi realizada a média aritmética com os dados existentes das cidades de mesmo porte, da mesma microrregião.

Os valores de matéria orgânica e do resíduo sólido domiciliar total, em toneladas, estimados para cada ano, foram multiplicados pelas porcentagens da população urbana e pelas taxas de cobertura

da coleta de resíduos sólidos domiciliares em relação à população urbana. Dessa forma, obteve-se para todos os municípios, durante 30 anos, as estimativas das quantidades totais coletadas de matéria orgânica e RSU, em toneladas. Ao final, foi realizada a soma anual de todos as estimativas de matéria orgânica e RSU em cada município das cidades da microrregião de Teófilo Otoni, de 2015 a 2045.

O modelo do Banco Mundial (*Scholl Canyon*) para estimativa da produção de metano está descrito no *Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean*, de 2004. Esse modelo baseia-se na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro, por unidade de tempo (BORBA, 2006). O método propõe o valor da taxa de geração de metano em relação à precipitação anual e o potencial de geração de metano, em função da degradabilidade do resíduo. O modelo é representado pela Equação 2.

$$Q_{(CH_4)_i} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-kt} \quad (2)$$

Sendo:

$Q_{(CH_4)_i}$  = metano produzido no ano  $i$  ( $m^3 \cdot ano^{-1}$ )

$k$  = taxa de geração de metano ( $ano^{-1}$ ).

$L_0$  = potencial de geração de metano por tonelada de resíduo depositado ( $m^3 \cdot t^{-1}$ ).

$m_i$  = massa de resíduo disposta no ano  $i$  ( $t \cdot ano^{-1}$ ).

$t$  = anos após o fechamento (ano).

A partir da Equação 2 foi realizado o cálculo da quantidade de metano gerada (em  $m^3$ ) por ano. Os parâmetros “ $k$ ” e “ $L_0$ ” dependem da degradabilidade dos resíduos, e seus valores foram definidos a partir dos parâmetros apresentados nas Tabelas 1 e 2, extraídas do relatório do Banco Mundial (2004).

Tabela 1 - Valores de  $k$  propostos pelo Banco Mundial

Precipitação anual	k (Intervalo de valores)		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
< 250mm	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

Tabela 2 - Valores de  $L_0$  em função da degradabilidade do resíduo sólido

Caracterização dos resíduos	Valor mínimo de $L_0$	Valor máximo de $L_0$
Resíduos relativamente inertes	5	25
Resíduos moderadamente degradáveis	140	200
Resíduos altamente degradáveis	225	300

Em função da composição gravimétrica dos resíduos dos municípios, e baseando-se em Banco Mundial (2004), os resíduos foram classificados como moderadamente degradáveis. Foi determinada uma média dos valores máximo e mínimo de  $L_0$ , e o valor adotado foi 170.

Em relação ao parâmetro  $k$ , e considerando que a região possui uma precipitação média anual acima de 1000 mm (FERRAZ; ANDRADE; COSTA, 2016), o valor adotado foi 0,06. Para o parâmetro  $t$  foi adotado 0, considerando que o cálculo é realizado para aterro ativo em 30 anos.

Considerando o fechamento do aterro em 2045, foi realizada uma projeção de 10 anos de geração de gás metano após seu fechamento. Dessa forma, o parâmetro  $t$  da componente exponencial em 2046 é  $t = 1$ , e sucessivamente para os demais anos, mantendo então o valor da massa de resíduos no aterro sanitário constante entre de 2045 e 2055.

Nesse contexto, a partir dos valores provenientes do cálculo da geração do metano, foi possível calcular o potencial energético e a energia disponível da microrregião de Teófilo Otoni por meio das Equações 3 e 4 (PECORA; FIGUEIREDO; VELASQUEZ, 2006).

A potência elétrica que poderia ser gerada é estimada por:

$$P_x = (Q_x \times PC_{\text{metano}} \times \eta) / 860.000 \quad (3)$$

Sendo:

$P_x$  = potência elétrica a cada ano (MW)

$Q_x$  = vazão de metano a cada hora, em determinado ano ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )

$PC_{\text{metano}}$  = poder calorífico do metano ( $35.736 \text{ kJ/Nm}^3$ )

$\eta$  = eficiência do motor (0,28).

Foi considerada a utilização de motores ciclo Otto, para os quais foi adotada eficiência de 28% (PECORA, 2006).

A energia elétrica que pode ser gerada é dada por:

$$E_x = P_x \times FC \times \text{Tempo máximo de operação} \quad (4)$$

Sendo:

$E_x$  = energia elétrica que pode ser gerada (MWh dia<sup>-1</sup>)

$P_x$  = potência elétrica (MW)

FC = fator de capacidade (87% = 0,87)

Tempo máximo de operação = 24 (h dia<sup>-1</sup>)

Na estimativa da geração elétrica anual foi considerada a operação uniforme em 365 dias do ano.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As populações de cada cidade no ano de referência, e as taxas de crescimento estimadas, podem ser observadas na Tabela 3. Para a maioria dos municípios a taxa média anual de crescimento é positiva, tendo por base o verificado no período 2010 a 2015, exceto para as cidades de Catuji, Franciscópolis e Ataléia. Assumir a mesma taxa de crescimento (ou de decréscimo) populacional em 2015-2045, em relação ao verificado no período 2010-2015, é evidentemente uma simplificação.

A população total da microrregião em 2015 totalizava 277.293. Para 2045 a estimativa populacional é de 356.449 habitantes, ou seja, um crescimento populacional de 79.156 habitantes em 30 anos.

Tabela 3 - Projeção da população dos municípios da Microrregião de Teófilo Otoni

Cidade	Taxa de crescimento anual %	População	
		2015	2016
Ataléia	- 0,576	14.039	11.807
Catuji	- 0,075	6.683	6.535
Franciscópolis	- 0,189	5.745	5.427
Frei Gaspar	0,507	6.028	7.015

Tabela 3 - Projeção da população dos municípios da Microrregião de Teófilo Otoni (continuação)

Cidade	Taxa de crescimento anual %	População	
		2015	2016
Itaípe	1,312	12.572	18.588
Ladainha	1,156	17.976	25.375
Malacacheta	0,442	19.191	21.906
Novo O. de Minas	0,905	10.807	14.162
Ouro V. de Minas	0,372	6.128	6.851
Pavão	0,349	8.739	9.703
Poté	1,066	16.502	22.682
Setubinha	1,749	11.837	19.915
Teófilo Otoni	0,935	141.046	186.483

Na Tabela 4 são apresentadas as taxas médias de geração diária de resíduos sólidos pela população urbana das cidades avaliadas. Podemos verificar entre as cidades uma variação de valores de aproximadamente 75%, como é o caso das cidades de Franciscópolis, com uma taxa diária de geração de resíduos per capita de 0,626 kg, e Catuji com 1,182 kg. A geração média per capita de resíduos dos municípios da microrregião é equivalente a 0,827 kg/dia.

Tabela 4 - Composição gravimétrica e dados da população urbana da Microrregião de Teófilo Otoni

Cidade	Geração de resíduo per capita (Kg.dia <sup>-1</sup> )	Média de matéria orgânica (%)	Porcentagem de população urbana (%)*	Taxa de cobertura da coleta dos resíduos sólidos domiciliares em relação a população urbana (%)**
Ataléia	-	-	49,80	-
Catuji	1,182	49,26	25,22	100,00
Franciscópolis	0,626	66,90	41,34	100,00
Frei Gaspar	0,783	54,28	32,59	100,00
Itaipé	0,809	50,78	41,90	100,00
Ladainha	0,696	50,11	25,36	-
Malacacheta	0,677	54,81	62,94	100,00
Novo O. de Minas	0,905	50,56	42,76	-
Ouro V. de Minas	0,827	51,61	60,32	100,00

Tabela 4 - Composição gravimétrica e dados da população urbana da Microrregião de Teófilo Otoni (continuação)

Cidade	Geração de resíduo per capta (Kg.dia <sup>-1</sup> )	Média de matéria orgânica (%)	Porcentagem de população urbana (%)*	Taxa de cobertura da coleta dos resíduos sólidos domiciliares em relação a população urbana (%)**
Pavão	0,673	51,05	60,59	100,00
Poté	0,857	50,93	59,60	100,00
Setubinha	0,892	50,64	25,74	-
Teófilo Otoni	0,997	53,59	81,69	100,00

\*Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2016).

\*\*Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2018).

Para a avaliação da produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos é de grande importância o teor médio de matéria orgânica. As informações do levantamento realizado da geração de matéria orgânica dos RSU são apresentadas na Tabela 4. A composição gravimétrica dos RSU dos municípios indica acima de 49% de matéria orgânica. A menor porcentagem é a da cidade de Catuji, com 49,26%, e a maior em Franciscópolis, com 66,90%. Segundo Borba (2006), quanto maior a porcentagem de materiais biodegradáveis, maior a taxa de geração de gases. De acordo com a ABRELPE (2012), verifica-se que os principais resíduos coletados no Brasil são metais, papel, papelão, plástico, vidro e matéria orgânica, sendo a matéria orgânica o resíduo predominante, representando em média 51,4% de participação.

A variação da composição se dá por fatores culturais, renda familiar, padrão de vida e hábitos de consumo (BIDONE; POVINELLI, 1999). Os autores afirmam que quanto maior o poder econômico da população, maior será a quantidade de resíduos produzida, e que o percentual de matéria orgânica presente nos resíduos é maior em população com baixa renda.

Em relação à porcentagem da população urbana, verifica-se uma grande diversidade entre os municípios. Enquanto o município de Catuji apresentava 25,22% da sua população na zona urbana, em Teófilo Otoni essa parcela era de 81,69%. O percentual está relacionado a diversas fatores, como área territorial do município, tamanho populacional, grau de desenvolvimento, dentre outros. Outro fato a ser considerado é que de acordo com dados do SNIS, o resíduo sólido domiciliar da população urbana é coletado em 100% dos municípios estudados. Os municípios de Ataléia, Ladainha, Novo Oriente de Minas, Ouro Verde de Minas e Setubinha não informaram ao SNIS as suas porcentagens de coleta de resíduos sólidos (Tabela 4).

Os resultados dos cálculos da quantidade de matéria orgânica

total estimada na coleta e a quantidade de metano que pode ser gerada são apresentados na Tabela 5.

Estima-se que em 2045 a microrregião geraria 40 mil toneladas (40.001,976) de matéria orgânica, o que poderia promover a produção de 767, 5 mil m<sup>3</sup> (767.496,821 m<sup>3</sup>) de metano. Considerando 10 anos após o seu fechamento, o aterro ainda produzirá 421,2 m<sup>3</sup> (421.211,186 m<sup>3</sup>) de metano, em 2055.

Na Tabela 5 também verificamos os valores da possível geração do metano durante o período de 2015 e 2055. A produção é crescente à medida que o aterro recebe lixo, haja vista que a cada tonelada de lixo depositada aumenta-se o potencial de geração de biogás. O máximo ocorre no ano de 2045, último ano de deposição (fechamento do aterro), e posteriormente os valores apresentam um decaimento devido à interrupção do lançamento de resíduos sólidos no local.

De acordo com o Banco Mundial, o modelo de cálculo de geração de gás metano é comumente utilizado e aceito nas Américas do Norte e do Sul, por ser de fácil aplicação. Por outro lado, Borba (2006) aponta como fragilidade do modelo o fato de não considerar algumas variáveis, como teor de umidade, tamanhos das partículas, temperatura e pH. Apesar de considerar de extrema importância as observações descritas, os dados disponíveis para a região estudada são limitados, sendo necessária a adoção da metodologia descrita.

Tabela 5 - Matéria orgânica nos RSU e geração anual estimada de gás metano na Microrregião de Teófilo Otoni

Ano	Quant. total de resíduos coletados (ton.ano <sup>-1</sup> )(1)	Quant. total de matéria orgânica coletada (ton.ano <sup>-1</sup> )(2)	Quant. de metano gerado (m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> )(3)
2015	57470,27345	30582,859	586196,789
2016	57983,32067	30854,829	591429,871
2017	58501,34211	31129,429	596713,689
2018	59024,38796	31406,687	602048,757
2019	59552,50897	31686,629	607435,591
2020	60085,75641	31969,282	612874,715
2021	60624,18209	32254,674	618366,657
2022	61167,8384	32542,833	623911,952
2023	61716,77824	32833,785	629511,138
2024	62271,05512	33127,559	635164,762
2025	62830,72309	33424,184	640873,376
2026	63395,83678	33723,689	646637,535
2027	63966,45141	34026,102	652457,804
2028	64542,62278	34331,453	658334,752

Tabela 5 - Matéria orgânica nos RSU e geração anual estimada de gás metano na Microrregião de Teófilo Otoni (continuação)

Ano	Quant. total de resíduos coletados (ton.ano <sup>-1</sup> )(1)	Quant. total de matéria orgânica coletada (ton.ano <sup>-1</sup> )(2)	Quant. de metano gerado (m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> )(3)
2029	65124,4073	34639,772	664268,954
2030	65711,86197	34951,089	670260,992
2031	66305,04439	35265,433	676311,453
2032	66904,0128	35582,836	682420,931
2033	67508,82605	35903,329	688590,026
2034	68119,54362	36226,943	694819,345
2035	68736,22562	36553,709	701109,501
2036	69358,93283	36883,66	707461,115
2037	69987,72665	37216,828	713874,812
2038	70622,66916	37553,246	720351,225
2039	71263,82311	37892,946	726890,996
2040	71911,25191	38235,962	733494,769
2041	72565,01965	38582,328	740163,2
2042	73225,19113	38932,078	746896,95
2043	73891,83184	39285,246	753696,685
2044	74565,00796	39641,867	760563,081
2045	75244,78641	40001,976	767496,821
<b>Após o fechamento do aterro</b>			
2046	75244,78641	40001,976	722801,286
2047	75244,78641	40001,976	680708,616
2048	75244,78641	40001,976	641067,232
2049	75244,78641	40001,976	603734,383
2050	75244,78641	40001,976	568575,629
2051	75244,78641	40001,976	535464,362
2052	75244,78641	40001,976	504281,346
2053	75244,78641	40001,976	474914,286
2054	75244,78641	40001,976	447257,431
2055	75244,78641	40001,976	421211,186

(1) Valores obtidos através da Equação 1.

(2) Resultado da multiplicação da quantidade de resíduo total coletado pela porcentagem de matéria orgânica, e posterior soma.

(3) Estimativa da quantidade gerada de metano, através da Equação 2.

Verifica-se que em 2015 a estimativa de resíduo coletado nas cidades da região supera 57 mil toneladas/ano, atingindo 75 mil toneladas em 2045. Atualmente, na região estudada todo o metano gerado é liberado para atmosfera. Além da perda da energia, o metano é um

gás tóxico e que tem elevado potencial de aquecimento global. Assim, é essencial a disposição adequada do RSU, reduzir as emissões e a utilização do gás em finalidades energéticas (GOUVEIA, 2012; ALVES et al., 2008).

Com a previsão da capacidade de geração do metano, foi calculada a potência e a energia elétrica que podem ser geradas a partir da decomposição anaeróbica dos resíduos sólidos no aterro. A Tabela 6 apresenta os resultados de potência e energia elétrica calculadas para o período entre 2015 e 2055.

Com os valores obtidos de geração de gás metano têm-se um potencial disponível inicial estimado de 0,185 MW, e em 2045 de 0,242 MW. Após o fechamento do aterro, em 2045, mesmo com o decaimento da produção de metano, este ainda manteria um potencial de geração de eletricidade ao longo dos anos, atingindo 0,133 MW em 2055.

Tabela 6 - Potência e energia disponível em função da vazão do metano

Ano	Quantidade de metano gerada (m <sup>3</sup> /ano)	Quantidade de metano gerada (m <sup>3</sup> /h)	Potência Disponível (MW)(1)	Energia Disponível (MWh/ano)
2015	586.196,79	66,917	0,185	1.441,46
2016	591.429,87	67,515	0,187	1.423,86
2017	596.713,69	68,118	0,189	1.436,64
2018	602.048,76	68,727	0,19	1.449,42
2019	607.435,59	69,342	0,192	1.462,55
2020	612.874,72	69,963	0,194	1.475,63
2021	618.366,66	70,59	0,195	1.488,83
2022	623.911,95	71,223	0,197	1.502,34
2023	629.511,14	71,862	0,199	1.515,48
2024	635.164,76	72,507	0,201	1.529,35
2025	640.873,38	73,159	0,202	1.542,86
2026	646.637,54	73,817	0,204	1.556,72
2027	655.427,80	74,481	0,206	1.571,09
2028	658.334,75	75,152	0,208	1.585,19
2029	664.268,95	75,83	0,21	1.599,43
2030	670.260,99	76,514	0,212	1.613,66
2031	676.311,45	77,205	0,214	1.628,27
2032	682.420,93	77,902	0,216	1.642,86
2033	688.590,03	78,606	0,218	1.653,83
2034	694.819,35	79,317	0,22	1.672,71
2035	701.109,50	80,035	0,221	1.688,12

Tabela 6 - Potência e energia disponível em função da vazão do metano (continuação)

Ano	Quantidade de metano gerada (m <sup>3</sup> /ano)	Quantidade de metano gerada (m <sup>3</sup> /h)	Potência Disponível (MW)(1)	Energia Disponível (MWh/ano)
2036	707.461,12	80,76	0,223	1.703,45
2037	713.874,81	81,493	0,226	1.718,78
2038	720.351,23	82,232	0,228	1.734,48
2039	726.891,00	82,978	0,23	1.750,17
2040	733.494,77	83,732	0,232	1.765,87
2041	740.163,20	84,494	0,234	1.781,93
2042	746.896,95	85,262	0,236	1.798,35
2043	753.696,69	86,038	0,238	1.814,78
2044	760.563,08	86,822	0,24	1.831,20
2045	767.496,82	87,614	0,242	1.847,99
<b>Após fechamento do aterro</b>				
2046	722.801,29	82,512	0,228	1.740,32
2047	680.708,62	77,706	0,215	1.638,85
2048	641.067,23	73,181	0,203	1.543,58
2049	603.734,38	68,919	0,191	1.453,43
2050	568.575,63	64,906	0,18	1.369,15
2051	535.464,36	61,126	0,169	1.289,18
2052	504.281,35	57,566	0,159	1.213,99
2053	474.914,29	54,214	0,15	1.143,54
2054	445.257,43	51507	0,141	1.076,75
2055	421.211,19	48,083	0,133	1.013,97

(1) Valores de potência obtidos através da Equação 3.

(2) Valores de energia obtidos através da Equação 4.

A utilização dos resíduos como matéria-prima para conversão do gás metano em energia elétrica se torna uma alternativa sustentável (RIBEIRO; MORELLI, 2009), contribuindo para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia elétrica na região. Conforme demonstrado neste estudo, o pico de geração de energia elétrica é de 1.847,99 MWh/ano em 2045.

No Brasil, alguns aterros já utilizam o biogás produzido para a geração de energia elétrica. O aterro sanitário da central de tratamento de resíduos de Nova Iguaçu, no estado do Rio de Janeiro, iniciou suas atividades em 2003/04, com capacidade para receber 5 mil toneladas diárias de RSU. A unidade de produção de energia elétrica utilizando o biogás iniciou suas atividades em 2019, com capacidade de geração

de 16.932 kW de energia elétrica (ANEEL, 2021). O Aterro Sanitário Metropolitano de Salvador, na Bahia, iniciou suas atividades em 1997 recebendo resíduos de aproximadamente três milhões de pessoas. A usina termelétrica instalada no local opera desde dezembro de 2010 com potência outorgada e fiscalizada de 19.730 kW (SANTOS, 2011; ANEEL, 2021).

A possibilidade do uso energético do biogás contribuiria para flexibilizar a matriz de geração de eletricidade. Além disso, o aproveitamento de materiais, até então sem utilidade, como fonte alternativa de energia elétrica limpa, contribui para com o desenvolvimento sustentável (RIBEIRO; MORELLI, 2009).

De acordo com a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso, ano base 2005, realizado pela Eletrobrás (2007), o consumo médio residencial na região sudeste em 2005 foi 169,8 kWh por mês. Em termos comparativos, e tendo como base esse valor de consumo mensal, no ano de geração máxima de energia elétrica no aterro em Teófilo Otoni (2045), a instalação poderia suprir energeticamente 894 residências.

A eletricidade gerada pelo biogás pode ser consumida pelo próprio aterro, ou poderá ser comercializada caso haja excedentes. Juntamente com a receita da venda de energia elétrica, já houve a possibilidade de venda de créditos de carbono em função das emissões evitadas (PECORA; VELASQUEZ; COELHO, 2009).

A implantação de um sistema de geração de energia elétrica em um aterro requer investimentos consideráveis e a viabilidade econômica precisa ser analisada, o que não foi feito neste trabalho.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo foram identificadas as características dos resíduos sólidos urbanos da microrregião de Teófilo Otoni através da composição gravimétrica e outras informações, como geração de resíduo per capita, porcentagem da população urbana, taxa da coleta de resíduos sólidos domiciliares em relação à população urbana, dados populacionais, entre outros.

Os cálculos da quantidade de matéria orgânica total que pode ser coletada na microrregião e a estimativa da geração de metano permitiram a estimativa do potencial de geração de energia elétrica.

A implantação do aterro sanitário na microrregião contribuiria com 767,5 mil m<sup>3</sup>/ano (767.496,821 m<sup>3</sup>/ano) de metano no 30° ano de funcionamento do aterro, podendo gerar quase 1.850 (1.847,99) MWh/ano de energia elétrica no mesmo ano. Após o fechamento do aterro, ainda haveria geração de 421,2 m<sup>3</sup>/ano (421.211,186) m<sup>3</sup>/ano de gás

metano dez anos após, com potencial de geração de 0,133 MW, ou o equivalente a 1.013,97 MWh/ano.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012. 10 ed. São Paulo. Disponível em: <<http://a3p.jbrj.gov.br/pdf/ABRELPE%20%20Panorama2012.pdf>. 2012>.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2020). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/>. 2020>.

ALVES, L.; COLARES, R.; UTURBEY, W. As Atratividades Ambientais e Econômicas do Uso do Biogás Produzido pelo Aterro Sanitário de Belo Horizonte para Geração de Energia Elétrica. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2008, Belo Horizonte, MG, p.1-7. 2008.

ANEEL. Matriz por fonte e combustível final. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/signa>. 2021>.

ARAÚJO, L. G. S.; FERREIRA, R. P. S.; NORBERTO, A. S.; MARIANO, M. O. H.; CALLADO, N. H. Temporal analysis of environmental parameters of the leachate from the landfill in Maceió-AL, Brazil. Research, Society and Development, n.9, v.7, p.1-16, 2020.

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL. Consulta. Disponível em: <<http://atlasbrasil.org.br/2013/>>. Banco Mundial. Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe. <http://documents.worldbank.org/curated/pt/954761468011430611/pdf/332640handbook.pdf>. 2004.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. Conceitos básicos de resíduos sólidos. São Carlos: EESC; USP. 1999.

BORBA, S. M. P. Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.

BRASIL. Lei nº 12.305/2010: Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília. 2010.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de Propriedades Mecânicas e de Durabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados, considerando-se a Variabilidade da Composição do RCD. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos- SP. 254p. 2007.

DALPAZ, R. Avaliação energética do biogás com diferentes percentuais de metano na produção de energia térmica e elétrica. Dissertação (Mestrado em Sistemas Ambientais Sustentáveis) – Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. 2019.

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S. A., PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano base 2005 – Casse Residencial – Relatório Brasil. Rio de Janeiro. 2007.

FERRAZ, C. M. L.; ANDRADE, J. R.; COSTA, A. S. V. A Previsibilidade Climática e o Planejamento Hídrico: Análise Preliminar sobre a Pluviosidade em Teófilo Otoni/MG. In: I Workshop Internacional de Biorremediação de áreas Contaminadas e XI SESMA, Vila Velha, Anais. 2016.

FIGUEIREDO, N. J. V. Utilização do Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás - estudo de caso. 90p. Monografia (Graduação) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo. 2007.

GOUVEIA, N. Resíduos Sólidos Urbanos: Impactos Socioambientais e Perspectivas de Manejo Sustentável com Inclusão Social. Ciência & Saúde. São Paulo, p. 1503-1509. 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resultados Censo 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>.

KONRAD, O.; GUERINI FILHO, M; LUMI, C. H. Atlas das biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano. Lajeado: Ed. da Univates, 2016.

MARTINS, L. O. S.; SILVA, L. T.; VELAME, J. L. Análise da Viabilidade Econômica e Financeira da Implantação de Usina de Geração de Energia a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Santo Antônio de Jesus – BA. In: Congresso Internacional de administração, Natal, RN. 2016.

MELLO, A. R.; GRASSI, R. Avaliação do Potencial de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Gerado no Aterro Sanitário do Município de Francisco Beltrão – PR. 81 p. Francisco Beltrão. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - UTF-PR, Campus Francisco Beltrão. 2014.

MINAS GERAIS. Secretaria de Planejamento e Gestão. Meso e Microrregiões do IBGE. 2016. Disponível em: <[https://www.mg.gov.br/sites/default/files/paginas/arquivos/2016/ligminas\\_10\\_2\\_04\\_listamesomicro.pdf](https://www.mg.gov.br/sites/default/files/paginas/arquivos/2016/ligminas_10_2_04_listamesomicro.pdf)>.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Potência de Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás por Meio do Aproveitamento de Biogás Proveniente de Aterro Sanitário. 7º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. UNIFOR – Fortaleza – CE. 2008.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; VELÁSQUEZ, S. M. S. G. Potencial de Geração De Energia Elétrica e Iluminação a Gás por meio do Aproveitamento de Biogás Proveniente de Aterro Sanitário. São Paulo. 2006.

PECORA, V.; VELÁSQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Aproveitamento do Biogás Proveniente dos Resíduos Sólidos Urbanos para Geração de Energia Elétrica: Estudo de Caso Em São Paulo. São Paulo. 2009.

PEDOTT, J. G. J.; AGUIAR, A. O. Biogás em Aterros Sanitários: comparando a geração estimada com a quantidade verificada em projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo. Revista Holos, v.4, p.195-211. 2014.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. Resíduos Sólidos: Problema ou Oportunidade? Rio de Janeiro: Interciência, 158 p. 2009.

SANTOS, A. C. Geração de metano devido à digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos – estudo de caso do aterro sanitário metropolitano centro, Salvador–BA. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.2021.

SOARES, H. A. Captar Biogás dos Aterros de Resíduos e Transformar em Energia Elétrica. 2014. Disponível em: <<http://livrozilla.com/doc/922683/--cened-cursos-ambientais>>.