

**UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI**

**Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Ambiente e Sociedade**

**Jéssica Rodrigues Andrade**

**ESTUDO SOBRE O POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO SÓLIDO DA  
MICRORREGIÃO DE TEÓFILO OTONI A PARTIR DA PRODUÇÃO DE METANO**

**Teófilo Otoni - MG**

**2018**

**Jéssica Rodrigues Andrade**

**ESTUDO SOBRE O POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO SÓLIDO DA  
MICRORREGIÃO DE TEÓFILO OTONI A PARTIR DA PRODUÇÃO DE METANO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Ambiente e Sociedade da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Sylvio Vieira da Costa

Colaborador: Prof. Me. Caio Mário Leal Ferraz

**Teófilo Otoni - MG**

**2018**

Ficha Catalográfica  
Preparada pelo Serviço de Biblioteca/UFVJM  
Bibliotecário responsável: Gilson Rodrigues Horta – CRB6 nº 3104

A553e Andrade, Jéssica Rodrigues.  
2018 Estudo sobre o potencial energético do resíduo sólido da Microrregião de Teófilo Otoni a partir da produção de metano. / Jéssica Rodrigues Andrade. Teófilo Otoni, 2018.  
67 p. ; il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Ambiente e Sociedade, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Sylvio Vieira da Costa.

1. Resíduos sólidos. 2. Composição gravimétrica. 3. Matéria orgânica. 4. Metano. 5. Potencial energético. I. Título.

**CDD: 547**

JÉSSICA RODRIGUES ANDRADE

**Estudo sobre o potencial energético do resíduo sólido da  
Microrregião de Teófilo Otoni a partir da produção de metano**

Dissertação apresentada ao  
MESTRADO EM TECNOLOGIA,  
AMBIENTE E SOCIEDADE, nível de  
MESTRADO como parte dos requisitos  
para obtenção do título de MAGISTER  
SCIENTIAE EM TECNOLOGIA,  
AMBIENTE E SOCIEDADE

Orientador : Prof. Dr. Alexandre Sylvio  
Vieira Da Costa

Data da aprovação : 27/03/2018



Prof.Dr. ALEXANDRE SYLVIO VIEIRA DA COSTA - UFVJM



Prof.Dr.<sup>a</sup> ALESSANDRA DE PAULA CARLI - UFVJM



Prof.Dr. STENIO CAVALIER CABRAL - UFVJM



Prof.Dr. JOSE APARECIDO DE OLIVEIRA LEITE - UFVJM

TEÓFILO OTONI

A Deus.  
Aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e sabedoria.

Agradeço meus pais, Nilzete Rodrigues Pinheiros e Raimundo César Souza Andrade (*In Memoriam*), e, a toda minha família, pelo amor, carinho e compreensão ao longo de todos os anos da minha vida.

Agradeço aos meus amigos por terem me ajudado ao longo dessa caminhada, e pelas palavras de carinho proferidas no intuito de não me deixar desistir.

Aos professores Alexandre Sylvio e Caio Mário Leal Ferraz pela orientação e conhecimento transmitido durante este trabalho.

A associação dos Municípios da Microrregião do Vale do Mucuri e a Bruno Balarini pelo fornecimento de dados essenciais para o desenvolvimento da minha pesquisa.

“Pois o teu amor me guia, e a tua verdade sempre me orienta”  
(SALMOS, 26:3).

## RESUMO

O crescimento populacional e a melhora da qualidade de vida da população brasileira têm contribuído para o aumento da produção de resíduos e comprometimento da qualidade ambiental. Grande parte dos resíduos gerados tem sido disposta em locais ambientalmente inadequados como os lixões. A biodegradação anaeróbica destes resíduos gera diversos gases principalmente dióxido de carbono e metano, gases que potencializam o efeito estufa. Parte desses gases, como o metano, apresenta elevado poder de combustão e potencial para geração de energia. Entretanto, para se estudar possibilidades como estas, é essencial conhecer o padrão de disposição destes resíduos nos aterros sanitários e a composição gravimétrica dos resíduos. Dessa forma, o presente projeto teve como objetivo obter informações sobre a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos das cidades componentes da microrregião de Teófilo Otoni e estimar a geração de metano até 2045 e após o seu fechamento, até 2055, visando avaliar o seu potencial de geração de energia elétrica pelo processo de combustão. A coleta dos dados da composição gravimétrica amostral dos resíduos foi realizada na AMUC (Associação dos Municípios do Mucuri) e a estimativa total de produção de resíduos foi calculada considerando a população urbana dos municípios e a sua estimativa de crescimento. Para cálculo da taxa anual de geração de gás metano considerando a composição gravimétrica dos resíduos foi utilizado o modelo de cálculo proposto pelo Banco Mundial, no qual proporcionou o cálculo do potencial energético, avaliando ainda seu retorno econômico proveniente tanto da comercialização da energia gerada quanto a venda de créditos de carbono. Verificou-se que, pelas projeções de geração de resíduos e crescimento populacional, em 2045, a microrregião produziria cerca de 40.001,976 toneladas de matéria orgânica e produção de 767.496,821 m<sup>3</sup> de metano com potencial de geração de 5,063 MWh de energia nesse mesmo ano, com potencial energético para suprir as necessidades energéticas de 894 residências/mês. A venda de créditos de carbono renderia em média R\$ 320.019,49 no primeiro ano, e em 2045 seu valor máximo estimado chegaria a R\$418.995,71.

**Palavras-chave:** RESÍDUOS SÓLIDOS. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA. MATÉRIA ORGÂNICA. METANO. POTENCIAL ENERGÉTICO.



## ABSTRACT

The population growth and the improvement of the quality of life of the Brazilian population have contributed to the increase of the production of residues and impairment of the environmental quality. Much of the waste generated has been disposed of in environmentally unsuitable places such as dumps. The anaerobic biodegradation of these wastes generates several gases, mainly carbon dioxide and methane, greenhouse gases. Some of these gases, such as methane, have high combustion power and potential for power generation. However, to study possibilities such as these, it is essential to know the pattern of disposition of these residues in landfills and the gravimetric composition of the residues. The objective of this project was to obtain information on the gravimetric composition of municipal solid waste from the component cities of the Teófilo Otoni's Microregion and to estimate the methane generation until 2045 and after its closure until 2055, in order to evaluate its potential generation of electricity by the combustion process. The data collection of the sample gravimetric composition of the residues was performed at the AMUC (Association of Municipalities of Mucuri) and the total estimate of waste production was calculated considering the urban population of the municipalities and their estimate of growth. In order to calculate the annual rate of methane gas generation considering the gravimetric composition of the wastes, the calculation model proposed by the World Bank was used, in which it provided the calculation of the energy potential, also evaluating its economic return from both the commercialization of the generated energy and sale of carbon credits. It was verified that, due to projections of waste generation and population growth, in 2045, the microregion would produce about 40,001,976 tons of organic matter and produce 767,496,821 m<sup>3</sup> of methane with the potential of generating 5,063 MWh of energy in that same year, with energy potential to meet the energy needs of 894 residences / month. The sale of carbon credits would average R \$ 320,019.49 in the first year, and in 2045 its estimated maximum value would reach R \$ 418,995.71.

**Keywords:** SOLID WASTE. GRAVIMETRIC COMPOSITION. ORGANIC MATTER.  
METHANE. ENERGY POTENTIAL.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxo esquemático da produção de resíduo pela sociedade até a geração de energia e créditos de carbono.....	35
Figura 2 – Sistema de captação do biogás e geração de energia elétrica em aterro sanitário...35	
Figura 3 - Valores de ‘k’ propostos pelo Banco Mundial.....	43
Figura 4 - Valores de $L_0$ em função da degradabilidade do resíduo sólido.....	43
Gráfico 1 - Projeção da população anual da Microrregião de Teófilo Otoni.....	49
Gráfico 2 – Resíduo total coletado anualmente.....	52
Gráfico 3 – Matéria orgânica coletada anualmente.....	52
Gráfico 4 – Quantidade de metano gerada anualmente.....	53
Gráfico 5 – Potência disponível por ano.....	55
Gráfico 6 – Energia disponível por dia.....	55
Gráfico 7 – Quantidade de $CO_2$ equivalente.....	58
Mapa 1 - Localização do município de Teófilo Otoni na Microrregião de Teófilo Otoni....	39
Quadro 1 - Fases de degradação dos resíduos do biogás.....	30

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de GWP de alguns gases de efeito estufa.....	31
Tabela 2 – Porcentagem de matéria orgânica presentes nas amostras dos resíduos sólidos urbanos das cidades da Microrregião de Teófilo Otoni.....	46
Tabela 3 – Dados populacionais (2010 e 2015) dos municípios da Microrregião de Teófilo Otoni e a estimativa da taxa de crescimento populacional anual.....	47
Tabela 4 – Projeção anual da população da Microrregião de Teófilo Otoni.....	48
Tabela 5 – Projeção da população dos municípios da Microrregião de Teófilo Otoni.....	49
Tabela 6 - Composição gravimétrica e dados da população urbana da Microrregião de Teófilo Otoni.....	50
Tabela 7 - Geração anual estimada de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos e de gás metano na Microrregião de Teófilo Otoni.....	51
Tabela 8 - Potência e energia disponível em função da vazão do metano.....	54
Tabela 9 - Rendimento econômico anual de energia elétrica.....	57
Tabela 10 - Rendimento anual dos créditos de carbono.....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMUC	Associação dos Municípios do Mucuri
BM&F BOVESPA	Bolsa de Valores, Mercadorias e Futuros
CH <sub>3</sub>	Metano
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CERs	Certificados de Emissões
RCE	Redução Certificada de Emissão
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NBR	Norma Brasileira
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
pH	Potencial hidrogeniônico
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UNEP	<i>United Nation Environment Program</i>
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>25</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Resíduos sólidos urbanos .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Destinação dos resíduos sólidos .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3 Decomposição dos resíduos sólidos e geração do biogás.....</b>	<b>29</b>
<b>3.4 Efeito estufa.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5 Cenário atual.....</b>	<b>32</b>
<b>3.6 Fatores que influenciam a produção do biogás .....</b>	<b>33</b>
<b>3.7 Aproveitamento do biogás .....</b>	<b>34</b>
<b>3.8 Mensuração do biogás .....</b>	<b>36</b>
<b>3.9 Tecnologias para conversão do biogás em energia .....</b>	<b>36</b>
<b>3.10 Protocolo de Quioto, mecanismo de desenvolvimento limpo e o mercado de carbono.....</b>	<b>37</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Descrição da área de estudo.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Coleta de dados e quantificação .....</b>	<b>40</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem contribuído para o aumento na produção de resíduos sólidos urbanos, responsáveis por grandes impactos ambientais, que além de transformar a paisagem, comprometem o ecossistema. Estes problemas têm ocorrido de forma intensa e recorrente porque grande parte dos resíduos urbanos são dispostos em locais considerados inadequados, como lixões, lotes vazios, margens de rios, lagos, entre outros (MUCELIN; BELLINI, 2008).

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2008, metade dos municípios brasileiros destinavam seus resíduos sólidos urbanos para vazadouros a céu aberto e 22% para aterros controlados. Somente 27% dos municípios brasileiros dispunham seus resíduos sólidos de forma adequada, em aterros sanitários (PNSB, 2008).

Gouveia (2012) considera que, mesmo que a produção de energia e outras atividades industriais sejam as grandes responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, os resíduos sólidos também contribuem de forma significativa para essa problemática, visto que a matéria orgânica presente em sua composição, ao ser decomposta de forma anaeróbica, gera o biogás.

Os principais gases provenientes do processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos são o metano (degradação anaeróbica) e o dióxido de carbono (degradação aeróbica). A geração destes gases é preocupante, principalmente do gás metano, devido à relação com o efeito estufa (MELLO; GRASSI, 2014).

Dessa forma, é perceptível que o gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos urbanos gera graves problemas ambientais e discutir caminhos para a otimização da geração e utilização destes é essencial, tanto para o meio ambiente como para a qualidade de vida das populações.

Uma alternativa, já difundida e implementada em vários países, é considerar o aproveitamento desses gases para outros fins, como por exemplo, o uso do gás metano presente no biogás como fonte de geração de energia (MELLO; GRASSI, 2014). Entretanto, para se estudar possibilidades como estas, é essencial conhecer a composição gravimétrica dos resíduos as quais se quer utilizar, observando tanto seus aspectos qualitativos quanto quantitativos.

De acordo com o IBGE (2010), a Microrregião de Teófilo Otoni abrange as cidades de Ataléia, Catuji, Franciscópolis, Frei Gaspar, Itaipé, Ladainha, Malacacheta, Novo

Oriente de Minas, Ouro Verde de Minas, Pavão, Poté, Setubinha e Teófilo Otoni, totalizando uma população estimada em 2015 de 277.293 pessoas.

O lixo gerado na cidade de Teófilo Otoni é destinado a uma área próxima a BR-116, com identificação de aterro controlado. Segundo informações pessoais, este aterro está em operação desde 1986, totalizando uma área de 9 hectares, recebendo em média 90 toneladas de resíduos por dia.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial de geração de biogás proveniente da decomposição dos resíduos sólidos urbanos na Microrregião de Teófilo Otoni e o seu potencial para geração de energia elétrica e crédito de carbono.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Obter informações sobre a composição gravimétrica (qualitativa) e quantitativa dos resíduos das cidades componentes da Microrregião de Teófilo Otoni, considerando a implantação de um aterro sanitário.
- Avaliar a taxa de geração de metano utilizando o modelo matemático utilizado pelo Banco Mundial.
- Analisar o potencial para produção de energia elétrica dos gases gerados pelos resíduos sólidos.
- Avaliar a estimativa de retorno econômico com a venda de crédito de carbono.
- Verificar o retorno ambiental gerado pela atividade com a substituição das fontes geradoras de energia elétrica.



### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Resíduos sólidos urbanos**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004:2004, define e classifica os resíduos sólidos de acordo com o processo ou atividade que lhes deu origem, bem como as suas características.

Para efeitos dessa norma, os resíduos sólidos são definidos como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10004, 2004, p. 7).

De acordo com a ABNT NBR 10004:2004, os resíduos são classificados como Classe I (perigosos: apresentam inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade), Classe II (não perigosos), sendo estes subdivididos em Classe II A (não inerte) e Classe II B (inertes). Os resíduos enquadrados na Classe II podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Uma classificação comumente utilizada por muitos autores está relacionada com a fonte geradora dos resíduos. De acordo com essa classificação, são divididos em resíduos sólidos urbanos, resíduos sólidos industriais e resíduos sólidos especiais (SANTOS; MARTINS, 1995). Os resíduos industriais incluem os das empresas de transformação, como os radioativos e agrícolas. Já os resíduos especiais, abrangem os pneus, pilhas, baterias e as lâmpadas fluorescentes. Os resíduos sólidos urbanos são resultantes de resíduos provenientes das residências, de serviços de saúde, da construção civil, poda e capina, portos, aeroportos, entre outros (CABRAL, 2007).

#### **3.2 Destinação dos resíduos sólidos**

Em todo o mundo, por consequência do expressivo aumento do consumo nos centros urbanos, os problemas relacionados à disposição final do lixo tem ganhado destaque nas discussões relativas às questões ambientais (PECORA; SILVIA; COELHO, 2006).

O aumento da intensidade da atividade humana nas últimas décadas, bem como, o crescimento desordenado da população em núcleos urbanos acelerou a produção excessiva de resíduos sólidos urbanos, causando uma série de problemas para a sociedade, em especial à gestão pública. Esse crescimento contínuo da escala econômica sobre o meio ambiente agravou uma questão específica no processo de sustentabilidade relacionada às ações de manejo de resíduos e sua correta disposição final (MARTINS; SILVA; VELAME, 2016, p. 2).

Os resíduos sólidos urbanos podem ser dispostos em locais como aterros sanitários, aterros controlados, lixões. É essencial a compreensão dos conceitos desses termos. O lixão, também conhecido como vazadouro a céu aberto, é o local em que o lixo é lançado sobre terrenos sem nenhum tratamento.

Entende-se como “lixão” uma área de disposição final de resíduos sólidos sem nenhuma preparação anterior do solo. Não tem nenhum sistema de tratamento de efluentes líquidos. O chorume, líquido preto que escorre do lixo, penetra pela terra levando substâncias contaminantes para o solo e para o lençol freático e aquíferos. Moscas, pássaros e ratos convivem com o lixo livremente (SOARES, 2014, p.1).

Os aterros controlados possuem o diferencial de cobrir com camadas de terra o lixo coletado. Já o aterro sanitário, representa a solução mais viável ambientalmente. Em que o lixo é disposto no solo utilizando técnicas de engenharia, buscando cobri-los com camadas de terra em períodos frequentes e ainda drenar o chorume e captar os gases emitidos pelos resíduos (ARCADIS Tetraplan, 2010).

Segundo Souza *et al.* (s.d.), dentre as diversas formas de disposição dos resíduos, a mais comum que se têm adotado é o aterramento. Essa opção de destinação traz consigo uma série de problemas ambientais, como contaminação dos solos e emissão de gases tóxicos em virtude da decomposição da matéria orgânica. A adoção frequente desse local se dá devido ao baixo custo, a facilidade de execução e grande capacidade do mesmo. 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 por exemplo a contaminação do solo, problema presente na adoção das demais técnicas citadas (PECORA *et al.*, 2008). Por outro lado, Alves, Colares e Uturbey (2008) ressaltam que o problema da adoção dos aterros sanitários são os riscos de explosões e incêndios que esse método traz, principalmente em locais próximos do aterro devido à emissão frequente de gases inflamáveis, como o biogás, proveniente da decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos coletados. Ainda assim, com bases nos textos desses autores, a adoção do aterro como destino dos resíduos é viável, visto que esse problema descrito pode ser solucionado

com a possibilidade de captação dos gases que esse método permite, podendo optar pela utilização destes para a queima ou utilização do mesmo para geração de energia elétrica.

No Brasil, a destinação final da maior parte dos resíduos sólidos se dá através dos lixões, e aterros controlados (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008). Cenário considerado inadequado do ponto de vista ambiental, que requer medidas efetivas e sustentáveis (PEDOTT; AGUIAR, 2014).

Os principais materiais que compõem os resíduos sólidos urbanos no Brasil são metais, papel, papelão, plástico, vidro e matéria orgânica, sendo esta última representando 51,4% de participação (ABRELPE, 2012).

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

O gerenciamento inadequado desses resíduos contribui para a degradação do meio ambiente, contaminação dos recursos naturais, além de transmissão de doenças (BROLLO; SILVA, 2001). Dessa forma, a necessidade de gerenciamento dos resíduos sólidos se torna imprescindível.

Entretanto, para isso deve-se dispor de dados como composição, fonte geradora, quantidades, entre outras, bem como o tipo de resíduo que é descartado no meio ambiente, para então poder caracterizá-lo (BUENROSTRO; BOCCO, 2003). A caracterização torna-se importante, visto que a mesma permite obter informações dos resíduos de uma determinada cidade, possibilitando criar subsídios para um correto tratamento e disposição final dos mesmos (SCHALCH *et al.*, 2002).

A geração de grandes quantidades de resíduos sólidos têm sido um dos problemas ambientais preocupantes na atualidade, visto que o consumo de produtos traz consigo grandes volumes de resíduos que são descartados em locais considerados inadequados. O marco legal determina a disposição do lixo em aterros sanitários como opção correta entre as demais (MARTINS; SILVA; VELAME, 2016).

O padrão de vida e hábitos de consumo de uma população influencia a geração de resíduos urbanos. Sua coleta, tratamento e disposição final afetam tanto a qualidade de vida da população quanto à qualidade dos recursos naturais como cursos de água, vetores patogênicos e atividades como a pesca (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009).

Diante do problema em questão, no Brasil foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos, por meio da Lei 12.305/2010, que prevê a substituição dos lixões e aterros controlados pelos aterros sanitários.

Esta Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010, p. 1).

### **3.3 Decomposição dos resíduos sólidos e geração do biogás**

A degradação da matéria orgânica proveniente do resíduo sólido urbano tem como resultado o biogás. Ao ser disposto no aterro, pode ser verificado que o lixo ainda sem cobertura inicia a produção do biogás. Posterior a execução da cobertura do resíduo, o biogás continua sendo produzido, mesmo apresentando um decréscimo de produção ao longo dos anos, até o encerramento da célula do aterro (BORBA, 2006).

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

Segundo Vanzin (2006), a formação dos gases de aterro segue fases distintas, conforme descrito no Quadro 1.

**Quadro 1 - Fases de degradação dos resíduos do biogás**

Fase I: Ajuste inicial	A biodegradação acontece em condições aeróbicas, formando gás carbônico e água. A terra utilizada como cobertura contribui como fonte de microrganismos.
Fase II: Transição	A disponibilidade de oxigênio diminui e as reações anaeróbicas tem início. Os nitratos e sulfatos podem ser receptores de elétrons nas reações biológicas de conversão. Ocorre a produção de metano e com a queda do potencial de oxirredução os microrganismos iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos.
Fase III: Ácida	As reações são aceleradas e ocorre grande produção de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. Hidrólise dos compostos de maior massa molecular em compostos apropriados para o uso como fonte de energia para os microrganismos. Acidogênese e acetogênese com a conversão dos compostos resultantes da hidrólise em compostos intermediários, como o ácido cético, com menor massa molecular. O dióxido de carbono é o principal gás gerado.
Fase IV: Metanogênica	Microorganismos estritamente anaeróbicos convertem o ácido acético e gás hidrogênio em metano e dióxido de carbono. A formação do metano ocorre ao mesmo tempo em que os ácidos (com formação reduzida).
Fase V: Maturação	Ocorre quando já há grande quantidade de metano e dióxido de carbono. A taxa de geração do gás diminui porque a maioria dos nutrientes já foi consumida, restando os de degradação lenta. Pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio pode ser encontradas no gás.

Fonte: adaptado de VANZIN, 2006.

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

De acordo com Martins, Silva e Velame (2016), é possível encontrar metano já nos três primeiros meses, após a adição do resíduo no local, podendo ainda continuar sendo produzido durante 30 anos ou mais.

De acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (apud ALMEIDA; SANTOS; MOTA, 2011), o valor estimado de emissões de metano provenientes de aterros varia entre 20 a 70 t/ano no mundo. Comparando esses valores com a quantidade dessas emissões provenientes de fontes antropogênicas, o aterro é responsável por gerar cerca de 6 a 20% do total de metano no mundo.

Atualmente a estimativa de produção de biogás nos aterros, no mundo, alcance um total entre 20 e 60 milhões de toneladas de metano por ano. Dois terços dessas

emissões são de países do chamado primeiro mundo, sendo que onze destes países representam 70% das emissões. Os EUA são os maiores emissores, seguidos da China, Canadá, Reino Unido e Comunidade dos Estados Independentes (USEPA, apud PEDOTT; AGUIAR, 2014, p.3 - 4).

Segundo Soares (2014, p. 1) “[...] a captação do biogás em aterros sanitários é viável do ponto de vista econômico, energético e ambiental, trazendo redução de custos para a prefeitura local e um destino nobre para o lixo”.

Caso o biogás não seja coletado, este pode emanar para áreas próximas ao lixão e ainda ocasionar explosões, trazendo problemas tanto para o meio ambiente quanto para a população (PECORA; FIGUEIREDO; VELÁZQUEZ, 2006).

A emissão desses gases se mostra preocupante do ponto de vista ambiental, devido a sua relação com o efeito estufa, ainda que o elevado teor de metano presente no biogás permita várias aplicações de caráter energético, entre elas, a geração de energia elétrica (MELLO; GRASSI, 2014).

### 3.4 Efeito estufa

O efeito estufa é um fenômeno natural do planeta na qual os gases absorvem e reemitem uma parte da radiação solar infravermelha, sendo essencial para a manutenção da vida terrestre. Esses gases são conhecidos como Gases de Efeito Estufa (GEE). Dentre eles destacam-se o vapor d’água, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), entre outros (ARCADIS tetraplan, 2010).

Para cada GEE têm-se o potencial de aquecimento global, *Global Warming Potencial* (GWP), que diz respeito ao tempo de determinado gás na atmosfera (Tabela 1), sendo que a base é o potencial do dióxido de carbono (ALMEIDA; SANTOS; MOTA, 2011).

**Tabela 1 - Valores de GWP de alguns gases de efeito estufa**

Gás	Fórmula	GWP
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	21
Óxido de Nitrogênio	N <sub>2</sub> O	310

Fonte: adaptado ALMEIDA; SANTOS; MOTA, 2011.

O excesso da concentração desses gases em função de ações antropogênicas como queima de combustíveis fósseis, usinas termelétricas, indústrias, entre outros, resulta no aquecimento da superfície da atmosfera, alterando assim o equilíbrio energético natural do

planeta. Cada região poderá sofrer de maneira diferente com os efeitos dessas mudanças climáticas. Estas podem alterar temperaturas, regimes de chuvas e secas e ainda causar fenômenos como furacões (ALVES, COLARES, UTURBEY, 2008).

Os principais gases componentes do biogás são o dióxido de carbono e o gás metano. O metano é considerado um dos gases de efeito estufa, “[...] com um potencial de aquecimento global 21 vezes maior que o dióxido de carbono, como também responsável por 25% do aquecimento terrestre” (BRITO FILHO, 2005, p.16). Dessa forma é perceptível que a destruição do metano é fundamental para a mitigação do efeito estufa (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009).

### **3.5 Cenário atual**

Nas últimas décadas há uma preocupação mundial em promover o desenvolvimento em bases sustentáveis. Uma das questões que têm sido analisadas é a necessidade de compatibilizar o fator econômico e o consumo energético elevado às questões ambientais. Pensando nisso, pode-se avaliar que o aumento da concentração de gases de efeito estufa tende a dificultar essa compatibilização, sendo essencial a busca por medidas que contribuam positivamente a esse cenário (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008).

Nesse contexto, foram criados alguns mecanismos em busca de atividades alternativas que minimizem esses agravantes, elaboradas tanto em âmbito nacional como internacional. Como exemplos, podemos citar o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que busca incentivar a produção de energia elétrica através do uso de fontes renováveis e ainda o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), em que países desenvolvidos financiam projetos de desenvolvimento limpo nos países em desenvolvimento, contribuindo para a diversificação do sistema energético do país (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008).

Uma atividade iniciada há poucos anos no Brasil que contribui ativamente para a redução da emissão de GEE é o uso energético do biogás gerado por aterros. Além de contribuir para a redução das mudanças climáticas globais, essa atividade utiliza uma fonte de energia que está, a princípio, sendo desperdiçada para a atmosfera, sendo este o primeiro atrativo do uso do biogás que será, então, considerado uma energia alternativa, na categoria de biomassa [...] (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008, p.1).

No Brasil a utilização energética dos gases têm se desenvolvido lentamente, com algumas prefeituras e empresas privadas buscando se conveniar com empresas de pesquisa e

universidades estrangeiras para estudos relacionados ao aproveitamento do biogás proveniente dos aterros sanitários para geração de energia (JUCÁ apud SOUZA *et al.*, s.d.).

Dos 204 projetos de MDL registrados em diversos setores no Brasil, 68 são realizados em aterros sanitários. Destes, apenas 7 foram registrados com intuito de geração de energia e outros 12 estão em validação, constituindo-se uma oportunidade promissora para promover a sustentabilidade social e ambiental do desenvolvimento municipal no país, por meio do estímulo a uma gestão mais apropriada dos resíduos sólidos urbanos (*United Nation Environment Program* (UNEP) apud PEDOTT; AGUIAR, 2014, p. 2).

Segundo Ensinas (2003), nos projetos de aproveitamento de biogás em aterros sanitários com o intuito de gerar energia deve ser considerado que a produção do biogás é viável ao longo do tempo. Dessa forma, é necessária a busca pela maximização da energia.

### 3.6 Fatores que influenciam a produção do biogás

A produção do biogás é influenciada por diversas variáveis. Entre elas (BORBA, 2006):

- Temperatura: os microorganismos são sensíveis à temperatura, pois estes não controlam sua temperatura corporal, sendo susceptíveis ao meio. Caso esta não estiver adequada, a biodegradação é prejudicada.

- pH (potencial hidrogeniônico): “Para a geração de metano a melhor faixa de variação é entre 6 e 8, sendo que em condições acima ou abaixo de valor limitarão a produção de metano”(MELLO; GRASSI, 2014, p.21).

- Umidade: a água da chuva contribui para a aceleração das reações químicas e biológicas nos resíduos.

[...]Em períodos muito chuvosos ocorre à entrada de oxigênio dissolvido, possibilitando a atividade de bactérias aeróbias e facultativas. Isso leva a elevação da temperatura, causando variações bruscas que desestabilizam a degradação anaeróbica (MELLO; GRASSI, 2014, p. 21).

- Composição dos resíduos: os resíduos urbanos são compostos por materiais inertes e biodegradáveis, sendo estes representando maior parcela. A composição dos resíduos apresenta variações durante diferentes períodos do ano, em função de situações como férias, períodos chuvosos, estação climática. Maiores quantidades de material



biodegradável presente nos resíduos aumentam a disponibilidade de substrato para os microorganismos, contribuindo para a taxa de geração de gases.

- Idade dos resíduos: geralmente os resíduos depositados recentemente nos aterros possuem maior potencial de geração de energia do que os mais antigos.
- Tamanho das partículas: quanto menores os resíduos, maior é a velocidade de degradação dos mesmo.

A presença do metano no biogás faz com que este seja uma fonte alternativa para gerar energia elétrica, considerando que seu poder calorífico é 35,736 KJ/Nm<sup>3</sup>. Sendo assim, constata-se que quanto maior a proporção de metano presente no biogás, maior será a produção de energia elétrica (FIGUEIREDO, 2007).

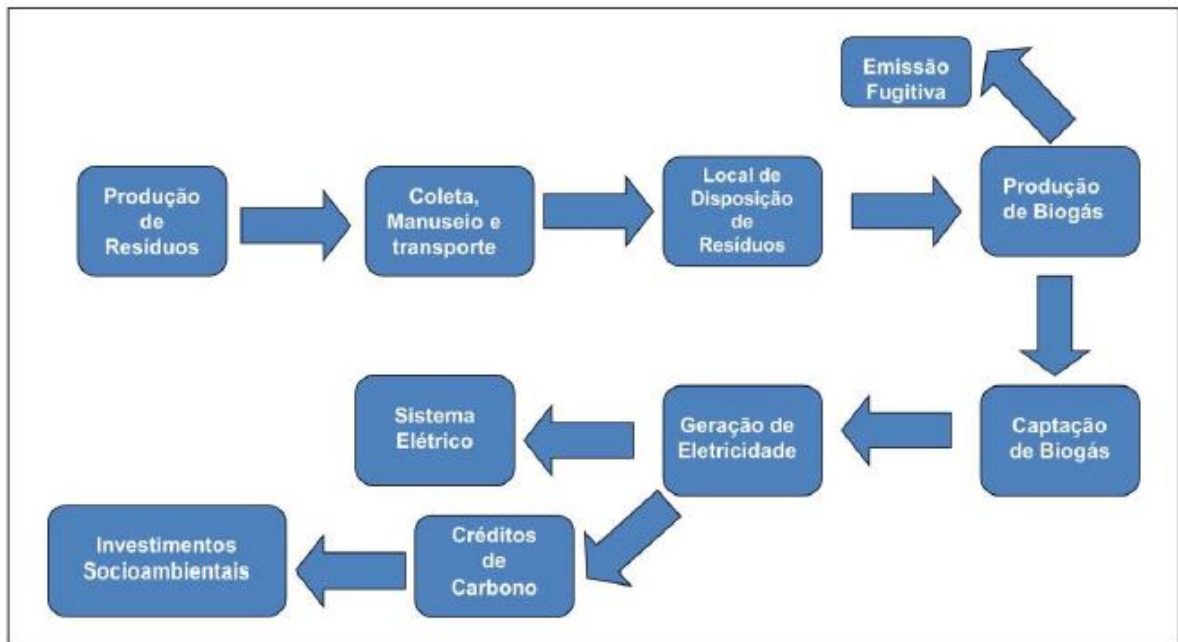
### **3.7 Aproveitamento do biogás**

O metano é um gás com grande potencial poluidor. A sua queima por meio de *flare*, em que o metano é convertido em dióxido de carbono, ou seu aproveitamento para geração de energia minimizaria significativamente o efeito estufa e ainda contribuiria para o desenvolvimento energético sustentável (SOUZA *et al.*, s.d.). Outra forma de aproveitamento do biogás seria a utilização do mesmo para sistemas de iluminação a gás (PECORA *et al.*, 2008).

Apesar do alto custo que um sistema capaz de gerar energia elétrica em um aterro possui, é importante ressaltar que a energia produzida no aterro, além de ter a possibilidade de ser consumida no próprio aterro, caso exceda, ainda poderá ser comercializada, proporcionando assim tanto um retorno financeiro como também ambiental, já que além de contribuir para a redução de GEE ainda ajuda a diminuir a sobrecarga das concessionárias (MARTINS; SILVA; VELAME, 2016).

De forma geral, a Figura 1 mostra esquematicamente os passos desde a geração do resíduo até a geração de energia.

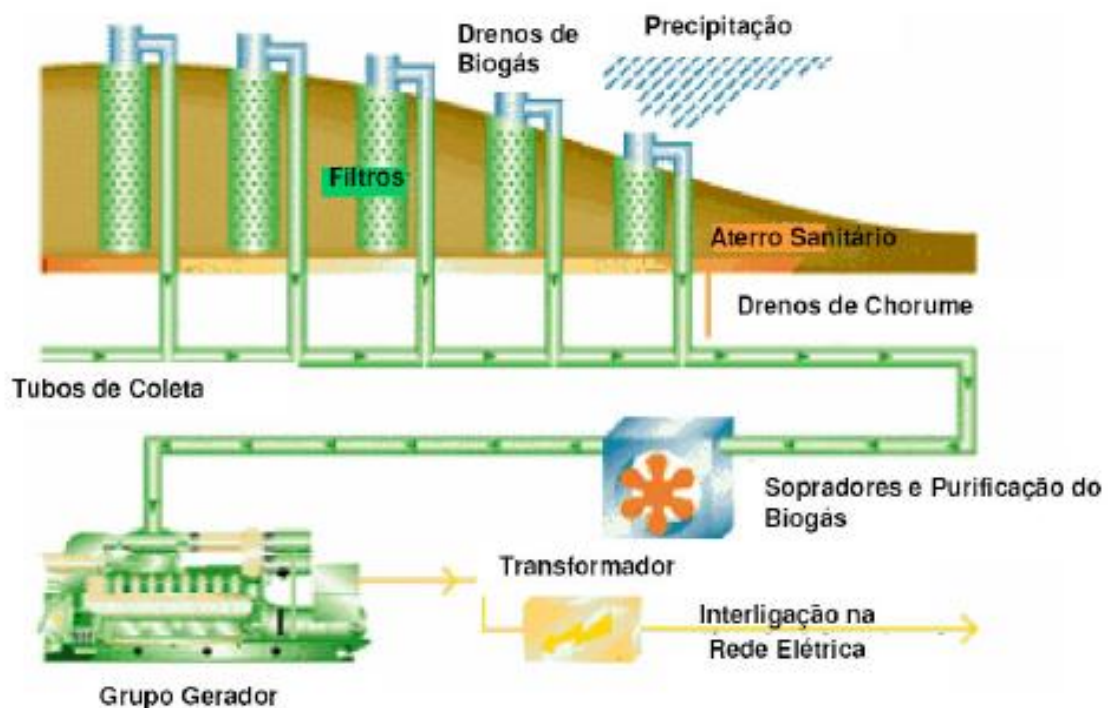
**Figura 1 – Fluxograma esquemático da produção de resíduo pela sociedade até a geração de energia e créditos de carbono**



Fonte: adaptado de PEDOTT; AGUIAR, 2014.

Um exemplo de funcionamento de um sistema de captação do biogás e geração de energia elétrica em um aterro sanitário pode ser observado na Figura 2.

**Figura 2 – Sistema de captação do biogás e geração de energia elétrica em aterro sanitário**



Fonte: WILLUMSEN apud PECORA *et al.*, 2008.

### 3.8 Mensuração do biogás

Para estimar a viabilidade energética e econômica de atividades como estas a determinação do potencial de geração do gás deve ser calculada. A previsão é realizada através de formulações teóricas. Essas estimativas nos permitem calcular a quantidade de tempo que um projeto será viável economicamente e ainda identificar seus picos de produção (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 (USEPA) (MELLO; GRASSI, 2014).

De acordo com Borba (2006), as equações apresentadas pela USEPA, Banco Mundial e IPCC têm em comum o fato de serem equações cinéticas de primeira ordem e consideram os mesmos parâmetros iniciais, como a massa de resíduos que ingressa anualmente no aterro; o tempo de atividade do aterro e/ou após o fechamento; a taxa de geração de metano e o potencial de geração de metano.

Pinãs *et al.* (2016), estimaram a quantidade de biogás e energia gerada do aterro sanitário de Três corações, Minas Gerais, utilizando os modelos Land GEM e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Os resultados mostraram que os valores obtidos com a aplicação dos modelos apresentaram pequenas variações de valores, em torno de 5%.

As estimativas iniciais são fundamentais para o sucesso econômico e ambiental dos projetos de aproveitamento do biogás de aterro, pois para obtenção dos resultados é preciso levantar algumas informações como as condições do aterro, sistemas de drenagem, o tipo de resíduo disposto nesses locais, entre outros, auxiliando assim no estudo de viabilidade (ARCADIS Tetraplan, 2010).

### 3.9 Tecnologias para conversão do biogás em energia

Há várias tecnologias para a realização da conversão energética, processo no qual a energia química contida nas moléculas do biogás são convertidas em energia mecânica, através da combustão controlada (PECORA *et al.*, 2008). De acordo com Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) (2005), as tecnologias atualmente utilizadas para a conversão energética do biogás são as turbinas a gás, as microturbinas e os motores a combustão interna (motores ciclo Otto). Esse motor é apontado como opção mais vantajosa,

visto que apresenta alta eficiência quando operados com biogás e ainda possuem baixo custo comparados com as demais opções.

Para a conversão energética do biogás, os motores de combustão interna possuem maior eficiência, além de serem mais baratos. Já as turbinas a gás possuem maior eficiência global de conversão, quando operadas em cogeração (calor e eletricidade), porém, por ser um equipamento importado, o seu valor e os custos de operação e manutenção são elevados [...] (SOUZA *et al.*, s.d., pg 2).

O processo de conversão de energia é importante visto que os resíduos urbanos, que antes eram descartados e considerados um problema ambiental passaram a ser fonte de energia alternativa (SOUZA *et al.*, s.d.), sendo uma solução para os grandes volumes de lixo produzidos, trazendo benefícios ambientais e ainda agregando valor, considerando-se a produção de energia.

Procedimentos como a queima ou a conversão em energia elétrica do metano podem gerar Certificados de Emissões (CERs), através do MDL, e ainda proporcionar a venda de créditos de carbono, previsto pelo Protocolo de Quioto (BORBA, 2006).

### **3.10 Protocolo de Quioto, mecanismo de desenvolvimento limpo e o mercado de carbono**

A necessidade de redução da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera proporcionou a criação de quadros regulamentares com o intuito de incentivar tanto o setor público como o privado em investimentos em energia elétrica (ARCADIS Tetraplan, 2010).

Nesse contexto, surge o protocolo de Quioto, criado em 1997 com o intuito de determinar que os países desenvolvidos reduzissem as emissões de gases de efeito estufa. Dentre as metas a serem cumpridas por esse protocolo, foram desenvolvidas alternativas que auxiliariam os países no cumprimento destas, conhecidos como mecanismo de flexibilização. Caso os países não conseguissem atingir as metas de reduções propostas, os mesmos poderiam comprar créditos de carbono de países em desenvolvimento, como o Brasil, que possuísse projetos de MDL (MARTINS; SILVA; VELAME, 2016).

O MDL permite que países desenvolvidos, listados no Anexo I do protocolo, atinjam suas metas de redução de emissão de GEE por meio de financiamentos de projetos sediados em países em desenvolvimento. O MDL surgiu de uma proposta da delegação brasileira durante uma das Conferências das Partes para certificação de projetos que contribuam para a redução de emissões de GEE (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008, p. 5).

Dentre os projetos de MDL estão inclusos “[...] as reduções de emissões de GEE e resgate e fixação (sequestro) de carbono, sendo que estes últimos incluem projetos de

reflorestamento e florestamento” (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008, p. 5). Comprovada a efetividade do projeto, ou seja, após verificar se o mesmo reduz emissão ou captura carbono, CERs são emitidos e comercializados como créditos de carbono (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008).

O uso do metano, proveniente da decomposição de resíduos em aterros, para produção de energia elétrica é considerado uma prática dentro das diretrizes de MDL (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008).

Um crédito de carbono equivale a uma tonelada de dióxido de carbono equivalente – tCO<sub>2eq</sub> (MENEGUIN, 2012). Para os outros gases, existe uma tabela de equivalência dos mesmos em relação ao CO<sub>2</sub>. O potencial de aquecimento global do metano, por exemplo, é 21 vezes maior do que o gás carbônico (PECORA, VELÁZQUEZ, COELHO; 2009). Na qual são computadas quantidades que deixaram de ser emitidas através do uso de alternativas sustentáveis.

[...] Cada tonelada de CO<sub>2</sub> reduzida ou removida da atmosfera corresponde a uma unidade emitida pelo Conselho Executivo do MDL, denominada de Redução Certificada de Emissão (RCE). Cada tonelada de CO<sub>2</sub> e equivale a 1 crédito de carbono (MARTINS; SILVA; VELAME, 2016, p.4).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Descrição da área de estudo

Situada na Mesorregião Vale do Mucuri no Nordeste de Minas Gerais, a Microrregião de Teófilo Otoni (Mapa 1), é composta pelos municípios 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 para 2016, e uma área territorial de 3.241,270 Km<sup>2</sup> (IBGE, 2016).

**Mapa 1 – Localização do Município de Teófilo Otoni na Microrregião de Teófilo Otoni**



Fonte: adaptado DE ANICIO, 2011.

## 4.2 Coleta de dados e quantificação

O levantamento de dados e informações da Microrregião de Teófilo Otoni foi realizado em etapas. Os dados da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos 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 quartamento, sendo divididas em quatro quadrantes, descartando dois destes e analisando os restantes.

Os dados da composição dos resíduos sólidos urbanos das demais cidades da microrregião foram fornecidos pela AMUC (Associação dos Municípios do Mucuri). A exceção foi o município de Ataléia, que não possuía as informações. As informações foram tabuladas por município contendo dados de geração *per capita* de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), peso específico médio dos RSU das respectivas amostras e o percentual de resíduo dividido nas classes orgânica e inorgânica, em diversas categorias.

Após a tabulação das informações foi realizada a seleção do modelo matemático para o cálculo de geração do metano, considerando a disponibilidade de dados obtidos durante a primeira fase da pesquisa. O modelo matemático adotado para estimar a geração de gás metano considerando a implantação do aterro sanitário intermunicipal foi o desenvolvido pelo Banco Mundial.

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

A quantidade de amostras dos resíduos sólidos urbanos 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 e poda 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 quantidade de massa de resíduo produzida por ano, foi necessária a obtenção dos valores de crescimento populacional anual. Para isso, foi definida uma projeção de 30 anos (2015 a 2045), tempo médio da vida útil de um aterro. Os dados populacionais foram obtidos a partir das informações do Censo 2010, disponibilizados pelo

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), e a estimativa da população em 2015 fornecido pelo mesmo instituto. Com estas informações foi calculada a taxa de crescimento anual da população de cada cidade até 2045. Seus valores foram arredondados para números inteiros. A quantidade de resíduo anual em toneladas foi calculada pela Equação 1:

$$RTA = \frac{PTA \times GRPP \times 365 \text{ dias}}{1000}$$

(Equação 1)

Em que,

RTA = Resíduo Total no Ano<sub>i</sub> (toneladas).

PTA = População total no ano<sub>i</sub> (habitantes).

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

O cálculo foi realizado obtendo-se o valor anual do número de habitantes esperado para cada cidade ao longo de 30 anos. Posteriormente, esses valores foram multiplicados pelas porcentagens de matéria orgânica de suas respectivas cidades e divididos por 100, encontrando assim, o valor total de matéria orgânica em toneladas gerada em cada ano.

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, as cidades como Ataléia, Ladainha, Novo Oriente de Minas, Ouro Verde de Minas e Setubinha não possuíam esta informação no SNIS. Para obtenção destas informações foi realizada a média aritmética com os dados existentes das cidades de mesmo porte da mesma microrregião, para ser utilizada nos municípios nos quais os dados não foram informados.

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



suas taxas de cobertura da coleta de resíduos sólidos domiciliares em relação à população urbana. Desta forma, obteve-se de todos os municípios, durante 30 anos, as quantidades totais coletadas de matéria orgânica, e resíduo sólido urbano, em toneladas. Ao final dessa etapa, foi realizada a soma anual de todos os valores finais de matéria orgânica e resíduos sólidos total gerados em cada município das cidades da Microrregião de Teófilo Otoni de 2015 a 2045.

Todos os cálculos foram elaborados no intuito de utilizar o modelo do Banco Mundial para obtenção dos valores de metano gerado anualmente na microrregião de Teófilo Otoni. Sua metodologia está descrita no *Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean* de 2004, na qual apresenta o modelo *Scholl Canyon*. 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.

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

(Equação 2)

Em que,

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

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

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

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

$t$  = anos após do fechamento (ano).

Os valores “ $k$ ” e “ $L_0$ ” dependem da degradabilidade dos resíduos.

A partir da Equação 2 descrita, foi realizado o cálculo para obtenção da quantidade de metano gerada em  $m^3$  por ano. Nesta mesma equação, duas constantes ( $k$  e  $L_0$ ) foram definidas a partir das Figuras 3 e 4, presentes no relatório do Banco Mundial (2004).

Figura 3 - Valores de 'k' propostos pelo Banco Mundial

Precipitação Anual	Intervalo de k Valores		
	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

Fonte: adaptado BANCO MUNDIAL, 2004.

Figura 4 - 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 degradável	140	200
Resíduos Altamente Degradável	225	300

Fonte: adaptado BANCO MUNDIAL, 2004.

Em função da composição gravimétrica dos resíduos dos municípios e baseando-se no Banco Mundial (2004), os resíduos foram classificados como moderadamente degradáveis. Foi concebida 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 de k foi 0,06.

O valor de t adotado é igual a 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 exponencial em 2046 foi  $t=1$  e os demais anos sucessivamente, mantendo então o valor da massa de 2045, que para os demais anos não fosse alterado, visto o fim da disposição de resíduos no aterro sanitário.

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; SILVIA; COELHO, 2006).

Determinação da potência disponível:

$$P_x = (Q_x \times P_{c \text{ metano}} \times \eta) / 860.000$$

(Equação 3)

Onde:

$P_x$  = potência disponível a cada ano (MW).

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

$P_{c \text{ metano}}$  = poder calorífico do metano ( $8500 \text{ Kcal} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

$\eta$  = eficiência do motor (0,28).

Para a conversão energética, os motores de combustão interna são mais eficientes. Considerando a utilização de motores ciclo Otto, adota-se uma eficiência de 28% (PECORA; SILVIA; COELHO; 2006).

Determinação da energia disponível:

$$E = P \times \text{Rend} \times \text{Tempo de operação}$$

(Equação 4)

Onde,

$E$  = energia disponível ( $\text{MWh} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

$P$  = potência disponível (MW).

Rend = rendimento do motor a plena carga ( $87\% = 0,87$ ).

Tempo de operação = 24 ( $\text{h} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

A partir da energia disponível por dia obtida, foi calculada a energia disponível por ano em KWh/ano. Visto que o valor da energia adotado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em janeiro de 2018 foi igual a R\$ 0,521 por KWh, foi possível calcular o rendimento financeiro energético por ano.

Dessa forma, a conversão do metano em energia, que *a priori* seria lançado na atmosfera, proporciona a mitigação do efeito estufa, gerando certificados de emissões por meio do mecanismo de desenvolvimento limpo, previsto pelo Protocolo de Quioto, possibilitando posteriormente a venda como créditos de carbono (BORBA, 2006). A quantidade de crédito de carbono calculada e o seu valor é igual às toneladas equivalentes de dióxido de carbono que deixou de ser emitida (ALVES, COLARES, UTURBEY; 2008).

Para o cálculo de redução de emissões dos gases do efeito estufa foi utilizada a metodologia definida pelo IPCC para a quantificação da tonelada de carbono equivalente (Equação 5) (MELLO, GRASSI; 2014).

$$\text{CO}_{2\text{Eq.}} = Q_{\text{CH}_4} \times d_{\text{CH}_4} \times \text{PAG}$$

(Equação 5)

Onde:

$\text{CO}_{2\text{Eq.}}$  = Quantidade de  $\text{CO}_2$  equivalente (ton.).

$Q_{\text{CH}_4}$  = Volume de metano ( $\text{m}^3$ ).

$d_{\text{CH}_4}$  = Massa específica de metano ( $0,7167 \times 10^{-3} \text{ton} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

PAG = Potencial de aquecimento global (21 vezes maior que o  $\text{CO}_2$ ).

O valor de um crédito de carbono no mercado internacional custa em média 9,05 euros (*INVESTING*, 2018) por tonelada de carbono equivalente ( $\text{tCO}_2\text{Eq}$ ). Utilizando o valor do euro de acordo com a BM&F BOVESPA do dia 06 de fevereiro de 2018 de R\$ 4,008, temos que cada tonelada de  $\text{CO}_2$  equivalente rende em média R\$ 36,2724. Com estes valores foi estimado o rendimento anual da venda do crédito de carbono.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a avaliação da produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos, assume grande importância a determinação do teor médio de matéria orgânica, tornando mais fidedigna a informação sobre a produção do biogás. As informações pertinentes ao levantamento realizado com os dados da geração de matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos obtidos dos municípios da Microrregião de Teófilo Otoni foram organizadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Porcentagem de matéria orgânica presentes nas amostras dos resíduos sólidos urbanos das cidades da Microrregião de Teófilo Otoni.**

Cidade	Ataléia	Catuji	Franciscópolis	Frei Gaspar	Itaípe	Ladainha	Malacacheta	Novo Oriente de Minas	Ouro Verde de Minas	Pavão	Poté	Setubinha	Teófilo Otoni
Amostra 1 (kg de MO em %)	-	52,52	-	-	52,42	50,92	56,74	53,33	57,52	54,25	52,10	52,01	
Amostra 2 (kg de MO em %)	-	-	-	-	56,94	52,76	53,58	-	-	-	50,53	-	
Amostra 3 (kg de MO em %)	-	45,24	-	-	42,97	40,95	49,95	45,31	45,71	48,73	49,00	47,41	
Amostra 4 (kg de MO em %)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Amostra 5 (kg de MO em %)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Amostra 6 (kg de MO em %)	-	50,02	64,57	54,69	-	55,81	58,96	53,04	-	50,19	52,08	52,51	
Amostra 7 (kg de MO em %)	-	-	69,23	53,88	-	-	-	-	-	-	-	-	
Média Final (%)	-	49,26	66,90	54,28	50,78	50,11	54,81	50,56	51,61	51,05	50,93	50,64	53,59
Desvio Padrão	-	3,70	3,30	0,57	7,13	6,43	3,92	4,55	8,35	2,86	1,48	2,82	
Coefficiente de variação das amostragens	-	7,52	4,93	1,06	14,04	12,83	7,15	9,00	16,19	5,60	2,90	5,56	

Fonte: AUTOR, 2017.

Um grande número de amostras coletadas dos resíduos sólidos urbanos dos municípios apresentou em sua composição gravimétrica mais de 50% de matéria orgânica. A menor porcentagem média foi obtida na cidade de Catuji, com 49,26% e a maior em Franciscópolis, com 66,90%. Fator positivo na geração de gás metano, pois 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 em relação aos outros tipos de resíduos no Brasil.

Ao observar os valores do coeficiente de variação das amostras, verificam-se pequenas variações indicando um elevado grau de repetibilidade entre as amostras coletadas

de cada município, tornando mais precisa a informação obtida e sua extrapolação para os dados populacionais. O maior valor de coeficiente de variação foi obtido com as amostras da cidade de Ouro Verde de Minas com 16,18%, mas que, para o parâmetro avaliado, pode ser considerado um coeficiente baixo.

Os dados populacionais e as taxas de crescimento podem ser observados na Tabela 3. A maioria dos municípios em estudo apresenta uma taxa média de crescimento anual positiva, representando um aumento da população, ao comparar os anos de 2010 (Censo) em relação ao de 2015 (amostragem), exceto as cidades de Catuji, Franciscópolis e Ataléia que apresentaram uma taxa de crescimento negativa.

**Tabela 3 - Dados populacionais (2010 e 2015) dos municípios da Microrregião de Teófilo Otoni e a estimativa da taxa de crescimento populacional anual**

Cidade	Ataléia	Catuji	Franciscópolis	Frei Gaspar	Itaípe	Ladainha	Malacacheta	Novo Oriente de Minas	Ouro Verde de Minas	Pavão	Poté	Setubinha	Teófilo Otoni
População em 2010 - IBGE	14.455	6.708	5.800	5.879	11.798	16.994	18.776	10.339	6.016	8.589	15.667	10.885	134.745
Estimativa População em 2015 - IBGE	14.039	6.683	5.745	6.028	12.572	17.976	19.191	10.807	6.128	8.739	16.502	11.837	141.046
Taxa Média de Crescimento Anual (%)	-0,5756	-0,0745	-0,1897	0,5069	1,3121	1,1557	0,4421	0,9053	0,3723	0,3493	1,0659	1,7492	0,9352

Fonte: AUTOR, 2017.

Com a obtenção da taxa média de crescimento anual e o número de habitantes estimado pelo IBGE em 2015, foi realizado o cálculo de estimativa populacional dos anos de 2015 a 2045 de cada uma das cidades da microrregião. O crescimento total populacional das cidades da microrregião a cada ano está indicado na Tabela 4. Na Tabela 5 é possível analisar e comparar a previsão do crescimento populacional de cada uma dessas cidades em 30 anos.

**Tabela 4 - Projeção anual da população da Microrregião de Teófilo Otoni**

<b>Ano</b>	<b>População da Microrregião de Teófilo Otoni</b>
2015	277293
2016	279538
2017	281807
2018	284101
2019	286419
2020	288764
2021	291133
2022	293529
2023	295951
2024	298399
2025	300874
2026	303375
2027	305904
2028	308461
2029	311046
2030	313658
2031	316299
2032	318969
2033	321669
2034	324397
2035	327155
2036	329.944
2037	332763
2038	335612
2039	338493
2040	341405
2041	344349
2042	347325
2043	350333
2044	353374
2045	356449

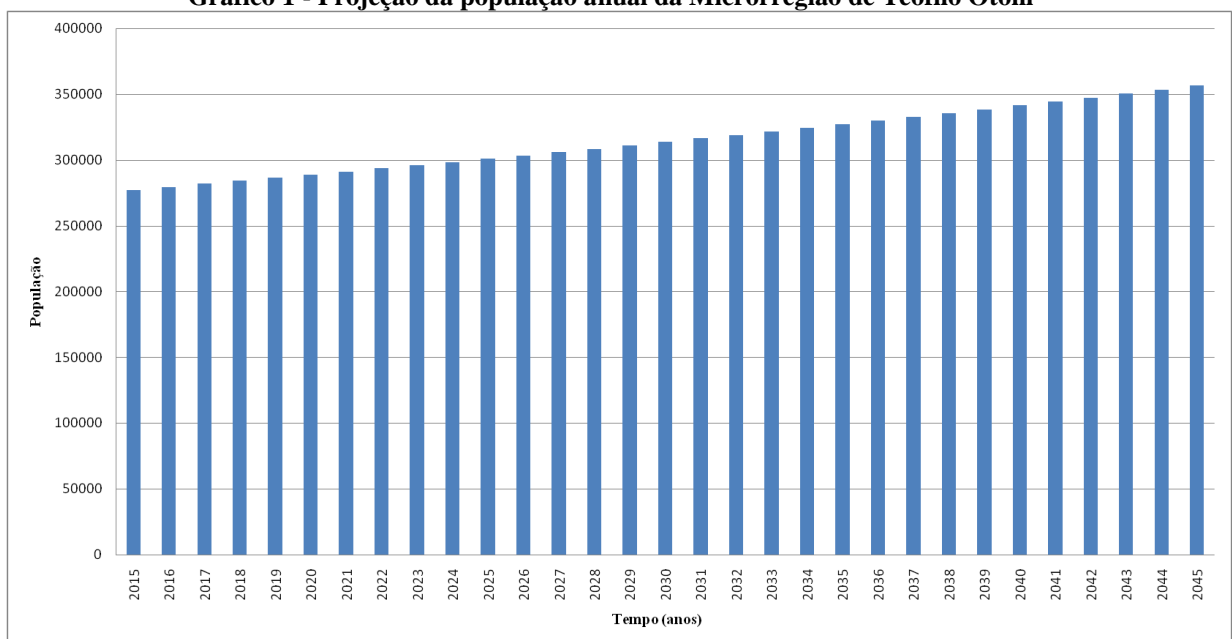
Fonte: AUTOR, 2017.

**Tabela 5 - Projeção da população dos municípios da Microrregião de Teófilo Otoni**

Cidade	Ano	
	2015	2045
Ataléia	14.039	11.807
Catuji	6.683	6.535
Franciscópolis	5.745	5.427
Frei Gaspar	6.028	7.015
Itaípe	12.572	18.588
Ladainha	17.976	25.375
Malacacheta	19.191	21.906
Novo Oriente de Minas	10.807	14.162
Ouro Verde de Minas	6.128	6.851
Pavão	8.739	9.703
Poté	16.502	22.682
Setubinha	11.837	19.915
Teófilo Otoni	141.046	186.483

Fonte: AUTOR, 2017.

Verifica-se que, a população da microrregião em 2015 totalizava 277.293. Para 2045 a estimativa populacional será de 356.449 habitantes, um crescimento populacional de 79.156 habitantes em 30 anos (Gráfico 1).

**Gráfico 1 - Projeção da população anual da Microrregião de Teófilo Otoni**

Fonte: AUTOR, 2018.

Na Tabela 6 estão descritas as taxas médias de geração diária de resíduos sólidos pela população urbana das cidades avaliadas. Podemos verificar uma variação de valores entre



as cidades atingindo aproximadamente 75% de diferença como é o caso das cidades de Franciscópolis com uma taxa de geração de resíduo *per capita* de 0,626 kg e Catuji com 1,182 kg. De modo geral, a geração média *per capita* de resíduos dos municípios da microrregião é equivalente a 0,827 kg/dia.

Estas mesmas cidades apresentaram os valores mais diferenciados comparadas as demais cidades avaliadas em relação à taxa de matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos. O município de Catuji foi o único a apresentar em sua composição gravimétrica, teor de matéria orgânica abaixo de 50%, enquanto no município de Franciscópolis esta taxa atingiu 66,9%.

**Tabela 6 - Composição gravimétrica e dados da população urbana da Microrregião de Teófilo Otoni**

Cidade	Geração de resíduo per capita (Kg . dia-1)	Média de Matéria Orgânica (%)	Porcentagem de População Urbana (%) (Dados do Atlas Brasil)	Taxa cobertura da coleta Resíduos Sólidos Domiciliares em relação à pop. Urbana (%) (Dados do SNIS)
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
Itaípe	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 Oriente de Minas	0,905	50,56	42,76	-
Ouro Verde de Minas	0,827	51,61	60,32	-
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

Fonte: AUTOR, 2017.

A variação desses valores 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 apresenta 25,22% da sua população na zona urbana, em Teófilo Otoni essa parcela é de 81,69%. Este fator está relacionado a diversas variáveis como área territorial do município, tamanho populacional, grau de desenvolvimento, dentre outros fatores. 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.

Os resultados dos cálculos da quantidade de matéria orgânica total estimada na coleta e a quantidade de metano gerada foram dispostos na Tabela 7.

**Tabela 7 - Geração anual estimada de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos e de gás metano na Microrregião de Teófilo Otoni**

Ano	Quantidade de Resíduo Total Coletado (ton/ano) <sup>(1)</sup>	Quantidade de Matéria Orgânica Total Coletada (ton/ano) <sup>(2)</sup>	Quantidade de Metano Gerada (m <sup>3</sup> /ano) <sup>(3)</sup>
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
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	36883,660	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	740163,200
2042	73225,19113	38932,078	746896,950
2043	73891,83184	39285,246	753696,685
2044	74565,00796	39641,867	760563,081
2045	75244,78641	40001,976	767496,821
<b>Após 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 por cidades, e posterior soma total.

(3) Quantidade gerada de metano através na Equação 2.

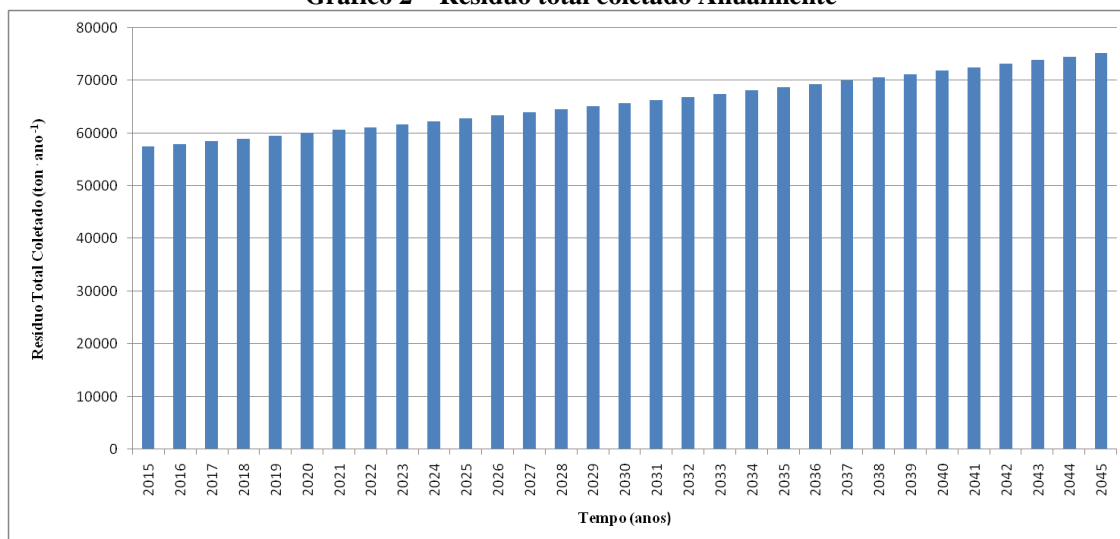
Fonte: AUTOR, 2017.

Verifica-se que em 2045, a microrregião geraria cerca de 40.001,976 toneladas de matéria orgânica, promovendo a produção de 767.496,821 m<sup>3</sup> de metano nesse mesmo ano.

Considerando 10 anos após o seu fechamento, o aterro ainda produzirá 421.211,186 m<sup>3</sup> de metano em 2055.

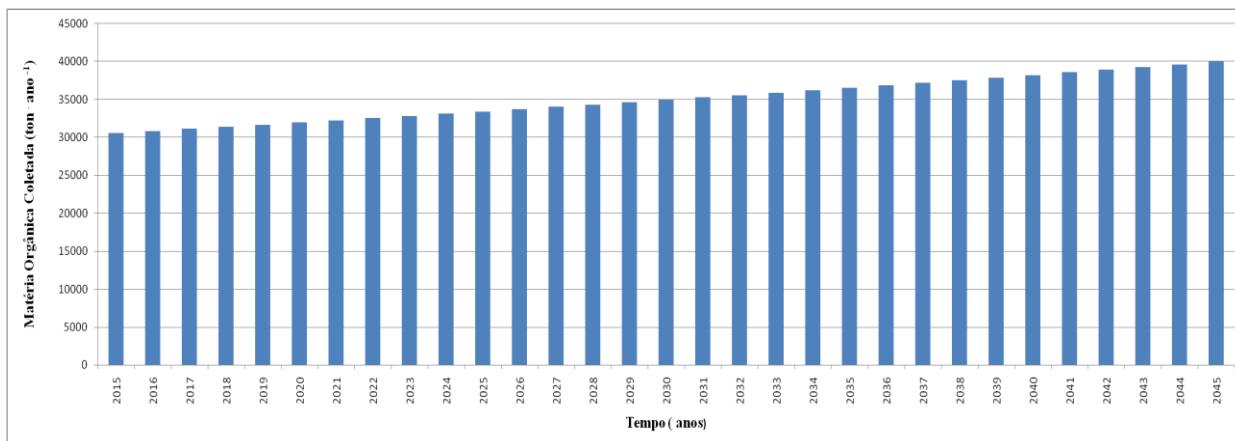
Para melhor compreensão dos resultados, os Gráficos 2, 3 e 4 foram elaborados.

**Gráfico 2 – Resíduo total coletado Anualmente**



Fonte: AUTOR, 2018.

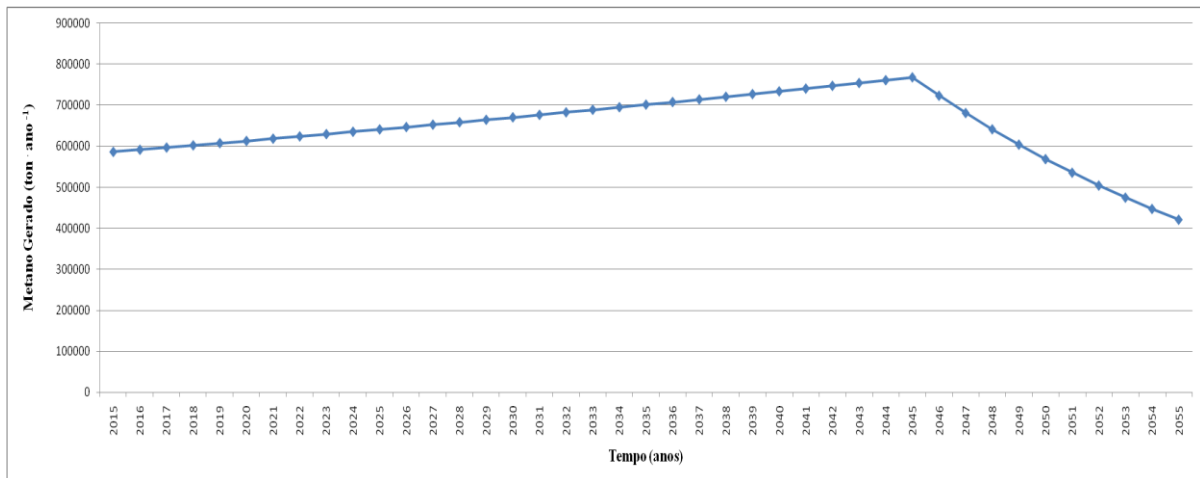
**Gráfico 3 – Matéria orgânica coletada anualmente**



Fonte: AUTOR, 2018.

O Gráfico 4 demonstra o comportamento da geração do metano durante esses anos. É perceptível que a curva tem um comportamento crescente à medida que o aterro recebe lixo, haja vista que a cada tonelada de lixo depositada, aumenta-se o potencial de geração do biogás. O ponto máximo ocorre no ano de 2045, último ano de deposição (fechamento do aterro), e posteriormente a curva apresenta um decaimento devido à interrupção do lançamento de resíduos sólidos no local.

Gráfico 4 – Quantidade de metano gerada anualmente



Fonte: AUTOR, 2018.

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

O metano é um gás com elevado potencial tóxico e o aumento de sua concentração na atmosfera altera o equilíbrio natural da terra, podendo afetar a temperatura da mesma por exemplo. É essencial a busca por reduções de emissões desses gases e ainda quando inevitáveis a utilização destes para finalidades energéticas diretas, utilizando-o como fonte alternativa de energia elétrica (ALVES; COLARES; UTURBEY, 2008). Atualmente na região, devido a existência de lixões e aterros controlados na área deste estudo, todo o metano gerado é liberado para atmosfera, comprometendo a qualidade do meio ambiente.

Em função do estudo da previsão da capacidade de geração do metano do aterro sanitário, foi possível calcular a potência e a energia que será disponibilizada pela decomposição anaeróbica dos resíduos sólidos no aterro. A Tabela 8 apresenta a potência e energia disponível calculada, do ano de 2015 até 2055.

Tabela 8 - 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 a cada ano (MW) <sup>(1)</sup>	Energia disponível (MW/dia) (2)
2015	586196,789	66,917	0,185	3,867
2016	591429,871	67,515	0,187	3,901
2017	596713,689	68,118	0,189	3,936
2018	602048,757	68,727	0,190	3,971
2019	607435,591	69,342	0,192	4,007
2020	612874,715	69,963	0,194	4,043
2021	618366,657	70,590	0,195	4,079
2022	623911,952	71,223	0,197	4,116
2023	629511,138	71,862	0,199	4,152
2024	635164,762	72,507	0,201	4,190
2025	640873,376	73,159	0,202	4,227
2026	646637,535	73,817	0,204	4,265
2027	652457,804	74,481	0,206	4,304
2028	658334,752	75,152	0,208	4,343
2029	664268,954	75,830	0,210	4,382
2030	670260,992	76,514	0,212	4,421
2031	676311,453	77,205	0,214	4,461
2032	682420,931	77,902	0,216	4,501
2033	688590,026	78,606	0,218	4,542
2034	694819,345	79,317	0,220	4,583
2035	701109,501	80,035	0,221	4,625
2036	707461,115	80,760	0,223	4,667
2037	713874,812	81,493	0,226	4,709
2038	720351,225	82,232	0,228	4,752
2039	726890,996	82,978	0,230	4,795
2040	733494,769	83,732	0,232	4,838
2041	740163,200	84,494	0,234	4,882
2042	746896,950	85,262	0,236	4,927
2043	753696,685	86,038	0,238	4,972
2044	760563,081	86,822	0,240	5,017
2045	767496,821	87,614	0,242	5,063
<b>Após Fechamento do Aterro</b>				
2046	722801,286	82,512	0,228	4,768
2047	680708,616	77,706	0,215	4,490
2048	641067,232	73,181	0,203	4,229
2049	603734,383	68,919	0,191	3,982
2050	568575,629	64,906	0,180	3,751
2051	535464,362	61,126	0,169	3,532
2052	504281,346	57,566	0,159	3,326
2053	474914,286	54,214	0,150	3,133
2054	447257,431	51,057	0,141	2,950
2055	421211,186	48,083	0,133	2,778

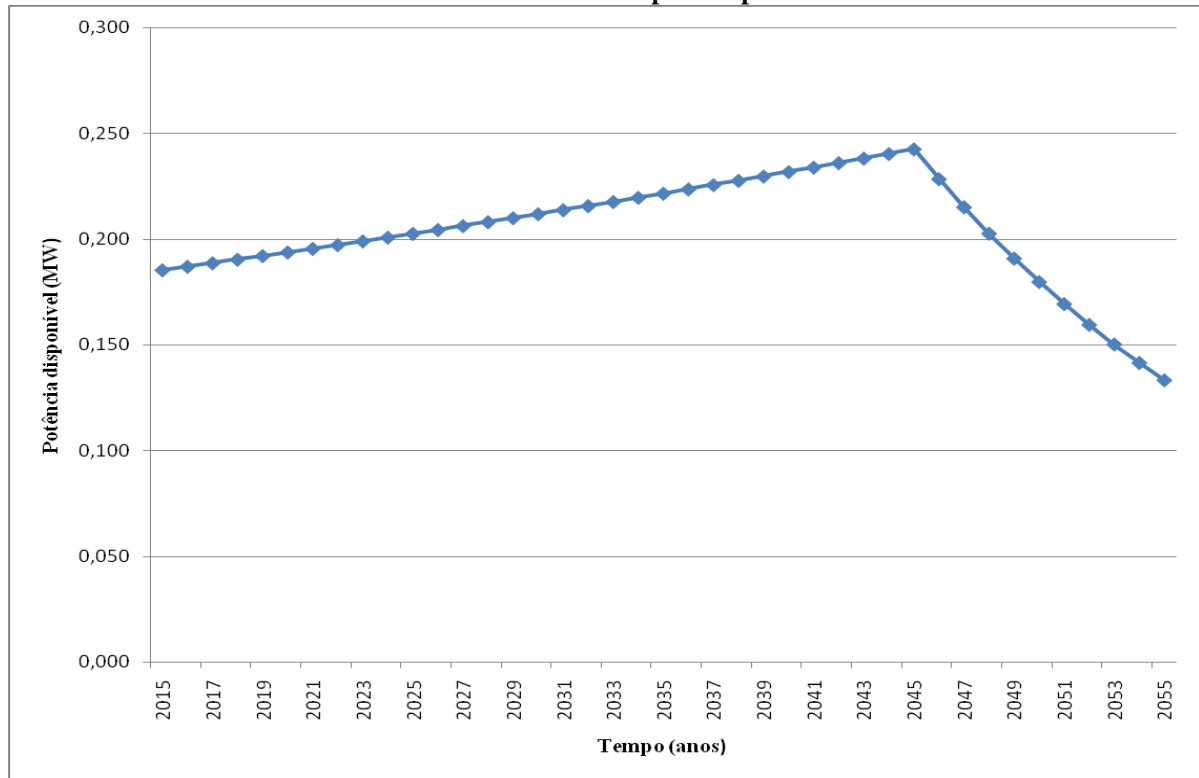
(1) Valores de potência obtidos através da Equação 3.

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

Fonte: AUTOR, 2018.

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. Considerando o seu fechamento em 2045, e o decaimento, este ainda teria um potencial de geração de energia ao longo dos anos, atingindo 0,133 MW em 2055. Conforme apresentado na Tabela 8 e Gráfico 5.

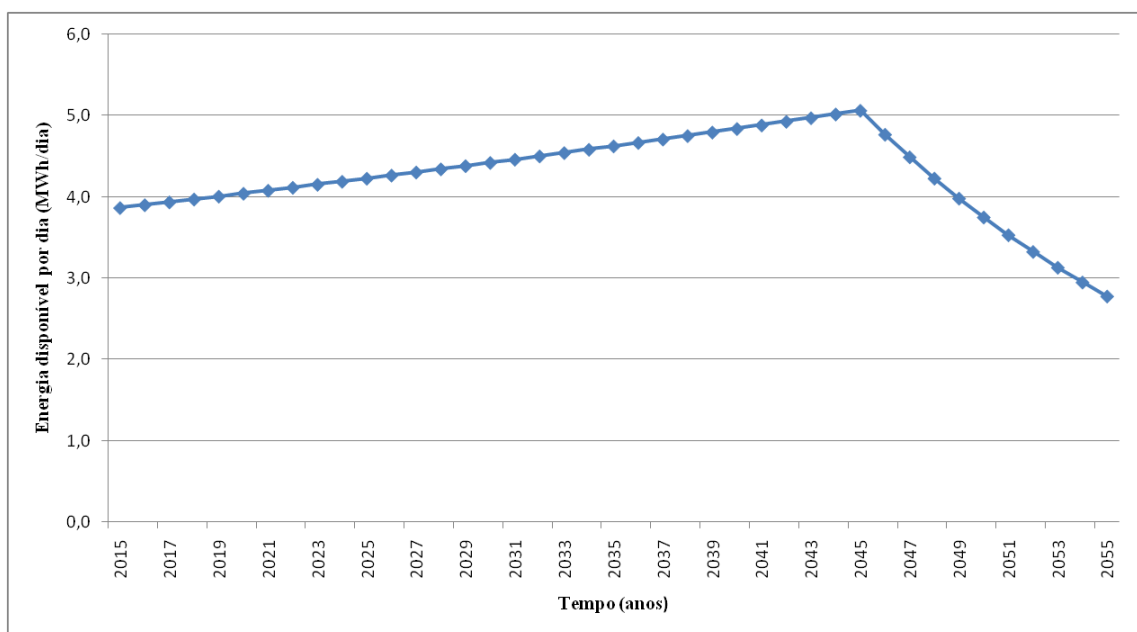
Gráfico 5 – Potência disponível por ano



Fonte: AUTOR, 2018.

O Gráfico 6 representa a energia disponível gerada em função da queima do gás metano produzido no aterro. Com o potencial máximo em 2045 de 0,242 MW, temos uma projeção de retorno energético de 5,06 MWh/dia ou 1.847.882,463 KWh/ano.

Gráfico 6 – Energia disponível por dia



Fonte: AUTOR, 2018.

Considerando as grandes quantidades de resíduos que têm sido dispostas em locais inadequados como aterros e lixões, e as consequências que estes provocam tanto para o meio ambiente quanto para a qualidade de vida das pessoas, é essencial que medidas sejam tomadas em relação a sua disposição adequada (GOUVEIA, 2012). Neste trabalho verificamos que em 2015 a estimativa de resíduo coletado nas cidades avaliadas supera as 57 mil toneladas/ano, atingindo 75 mil toneladas em 2045, valores muito significativos em termos de contaminação ambiental

A utilização desses resíduos como fonte de 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, verificamos um pico de geração de energia elétrica de 5,06 MWh/dia em 2045, valores significativos para a região.

Do ponto de vista econômico, a possibilidade do uso energético do biogás contribuiria para diminuir a dependência de energia de hidrelétricas e termoelétricas. Além disso, o aproveitamento de materiais, até então sem utilidade, como fonte alternativa de energia elétrica limpa, contribui para 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/PROCEL (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), este supriria energeticamente aproximadamente 894 residências.

Tendo como base o valor de R\$ 0,52132760, na qual é cobrada a energia elétrica distribuída pela CEMIG em janeiro de 2018, esta atividade econômica poderia alcançar um retorno máximo de R\$ 963.352,13 (Tabela 9). Estes valores são calculados baseados em valores atuais, desconsiderando as correções tarifárias futuras e os ajustes dos modelos inflacionários.

**Tabela 9 - Rendimento econômico anual de energia elétrica**

<b>Ano</b>	<b>Valor comercializável de energia por ano em Minas Gerais(R\$/ano)</b>
2015	735786,66
2016	742355,16
2017	748987,34
2018	755683,85
2019	762445,33
2020	769272,45
2021	776165,87
2022	783126,25
2023	790154,28
2024	797250,63
2025	804416,01
2026	811651,11
2027	818956,64
2028	826333,31
2029	833781,84
2030	841302,97
2031	848897,43
2032	856565,97
2033	864309,34
2034	872128,30
2035	880023,62
2036	887996,08
2037	896046,47
2038	904175,58
2039	912384,22
2040	920673,19
2041	929043,32
2042	937495,44
2043	946030,38
2044	954648,99
2045	963352,13
<b>Após fechamento do aterro</b>	
2046	907250,87
2047	854416,69
2048	804659,34
2049	757799,63
2050	713668,81
2051	672107,97
2052	632967,45
2053	596106,30
2054	561391,77
2055	528698,86



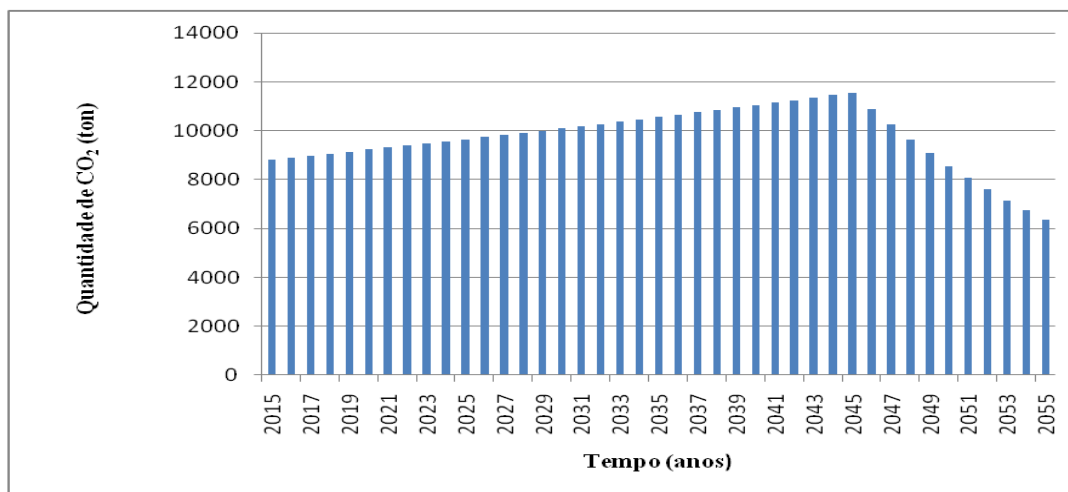
O gás metano captado em aterros sanitários pode ser queimado em *flares*, sendo convertido em dióxido de carbono, 21 vezes menos poluentes, ou ainda, pode ser convertido em energia elétrica. As duas ações contribuem para a redução de emissão de gases na atmosfera, gerando certificados de emissões, que posteriormente poderiam ser comercializados como crédito de carbono (ANDRADE; COSTA, 2008)

Os mecanismos de flexibilização previsto pelo Protocolo de Quioto permite que países desenvolvidos que não conseguem atingir suas metas de redução de emissões, adquiram créditos de carbonos de países em desenvolvimento que possuem projetos de MDL. Essa possibilidade ajuda a fortalecer a economia de países como o Brasil, que além de incentivar o desenvolvimento de projetos sustentáveis, aumentaria a sua participação em mercados financeiros (REZENDE; DALMÁCIO; RIBEIRO, 2012).

O Brasil possui importante atuação no cenário internacional em relação a projetos de MDL. Em termos de reduções de emissões, ocupa a terceira posição mundial, sendo responsável pela redução de 375.889.172 tCO<sub>2</sub> para o primeiro período de obtenção de créditos (ARCADIS Tetraplan, 2010).

Em relação ao potencial de créditos de carbono da Microrregião de Teófilo Otoni, a quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente inicial seria 8.822,67 toneladas de CO<sub>2</sub> no ano de 2015, tendo seu pico em 2045 com 11.551,36 toneladas de CO<sub>2</sub> (Gráfico 7). Economicamente teria um retorno máximo de R\$ 418.995,71 (Tabela 10), considerando os valores atuais do mercado de crédito de carbono que flutuam de acordo com o crescimento econômico dos países desenvolvidos.

**Gráfico 7 – Quantidade de CO2 equivalente**



Fonte: AUTOR, 2018.

Tabela 10 - Rendimento anual dos créditos de carbono

Ano	Quantidade de CO <sub>2</sub> equivalente (ton.)(1)	Valor comercializável do crédito de Carbono em 2018 em reais
2015	8822,672	320019,4884
2016	8901,434	322876,3586
2017	8980,959	325760,9273
2018	9061,255	328673,4742
2019	9142,331	331614,2818
2020	9224,193	334583,6355
2021	9306,851	337581,824
2022	9390,312	340609,1389
2023	9474,583	343665,8748
2024	9559,674	346752,3296
2025	9645,593	349868,8044
2026	9732,348	353015,6033
2027	9819,947	356193,0338
2028	9908,399	359401,4067
2029	9997,713	362641,0361
2030	10087,897	365912,2392
2031	10178,961	369215,3371
2032	10270,913	372550,6538
2033	10363,762	375918,5171
2034	10457,518	379319,2583
2035	10552,189	382753,212
2036	10647,785	386220,7167
2037	10744,316	389722,1143
2038	10841,790	393257,7505
2039	10940,218	396827,9746
2040	11039,610	400433,1398
2041	11139,974	404073,6031
2042	11241,322	407749,7252
2043	11343,663	411461,8707
2044	11447,007	415210,4082
2045	11551,364	418995,7104
<b>Após fechamento do aterro</b>		
2046	10878,665	394595,2998
2047	10245,141	371615,8585
2048	9648,511	349974,6355
2049	9086,625	329593,6995
2050	8557,461	310399,6563
2051	8059,113	292323,3875
2052	7589,787	275299,7992
2053	7147,792	259267,5867
2054	6731,537	244169,0178
2055	6339,523	229949,7212

(1) Quantidade de CO<sub>2</sub> calculada pela Equação 5.  
 Fonte: AUTOR, 2018.

É importante ressaltar que a energia gerada pelo biogás pode ser consumida pelo próprio aterro ou caso exceda as quantidades necessárias para a manutenção, ainda poderá ser comercializada. Juntamente com os rendimentos em relação à geração da energia, o fato de captar o gás metano proveniente da decomposição da matéria orgânica e convertendo em energia contribuirá para uma geração adicional de receita, considerando também a venda de créditos de carbonos (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009).

Nesse contexto, onde há crescente demanda por energia no mundo e paralelo a essa demanda uma produção exacerbada de resíduos sólidos, o desenvolvimento de práticas que amenizem esse cenário se torna um desafio atual. O marco legal exige a correta disposição dos resíduos em locais considerados ambientalmente corretos, os aterros sanitários (MARTINS; SILVA; VELAME, 2016).

A implantação de um sistema de geração de energia em um aterro requer altos investimentos devido ao seu custo, porém seria uma solução para problemas gerados pela emissão do metano, além de gerar benefícios financeiros que posteriormente seriam consumidos pelo próprio aterro, sendo que em caso de haver excedente de energia elétrica, por exemplo, a mesma poderia ser vendida.

Em suma, a geração de energia por meio de fontes limpas, a redução da emissão de gases de efeito estufa e o aproveitamento de materiais até então inutilizáveis evidenciam a importância social e ambiental de estudos na área.

Além do fator financeiro, a conversão energética desse gás, proveniente dos grandes volumes de resíduos produzidos, contribui para a redução do seu potencial tóxico e pode ser visto como uma solução para a questão da ocupação de grandes áreas ocupadas por lixões nas quais resultam em contaminação de solos e corpos hídricos. Em virtude das vantagens que podem ser proporcionadas com a adoção do aterro sanitário, no quesito econômico, financeiro, social e ambiental, o governo local, prefeituras e empresas privadas devem investir e incentivar práticas sustentáveis como essas.

## 6 CONCLUSÕES

Por meio do presente estudo foi possível compreender 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 coletada na microrregião e principalmente para a obtenção dos valores de metano gerados anualmente mostraram o potencial deste futuro aterro na geração de energia.

A implantação do aterro sanitário na microrregião contribuiria com 767.496,821 m<sup>3</sup>/ano de metano no 30º ano de funcionamento gerando em média 5,063 MWh de energia nesse mesmo ano e um retorno econômico de aproximadamente R\$ 963.352,13. Após o seu fechamento, este ainda geraria cerca de 421.211,186 m<sup>3</sup>/ano de gás metano no 10º ano, com potencial energético de 0,133 MW e energia disponível de 2,778 MWh.

A partir dos cálculos realizados, observou-se que o aterro sanitário teria potencial energético suficiente, no ano de geração máxima de energia elétrica, de suprir as necessidades energéticas de 894 residências/mês.

A venda de créditos de carbono da Microrregião de Teófilo Otoni renderia em média R\$ 320.019,49 no primeiro ano, e em 2045 seu valor máximo estimado chegaria a R\$418.995,71.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012**. 10 ed. São Paulo, 2012. Disponível em:<  
<http://a3p.jbrj.gov.br/pdf/ABRELPE%20%20Panorama2012.pdf>>. Acesso em: novembro de 2017.

ALMEIDA, F. T. R.; SANTOS, G. O.; MOTA, F. B. S. **Metodologia do Banco Mundial na Estimativa da Geração de Gás Metano num Aterro Sanitário**: estudo de caso. *In*: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011, Porto Alegre.

ALVES, L.; COLARES, R.; UTURBEY, W. **As Atividades 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, 2008, Belo Horizonte.

ANDRADE, J. C. S.; COSTA, P. **Mudança Climática, Protocolo de Kyoto e Mercado de Créditos de Carbono**: Desafios à governança ambiental global. 2008. Disponível em:<  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1984-92302008000200002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-92302008000200002)>. Acesso em: fevereiro de 2018.

ANICIO, L. M. **O Imigrante Internacional de Retorno e sua Inserção no Mercado de Trabalho**: Um estudo entre as Microrregiões Teófilo Otoni e Poços de Caldas. 148 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

ARCADIS Tetraplan. 2010. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), Visando Incrementar o uso de biogás como Fonte Alternativa de Energia Renovável**. Disponível em:  
<[http://www.mma.gov.br/estruturas/164/\\_publicacao/164\\_publicacao10012011033201.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf)>. Acesso em: junho de 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos — Classificação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em:<<http://www.videverde.com.br/docs/NBR-n-10004-2004.pdf>>. Acesso em: março de 2016.

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL. **Consulta**. Disponível em:<  
<http://atlasbrasil.org.br/2013/>>. Acesso em: julho de 2017.

BANCO MUNDIAL. **Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe**. 2004. Disponível em:

<<http://documents.worldbank.org/curated/pt/954761468011430611/pdf/332640handbook.pdf>  
> Acesso em: dezembro de 2016.

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

BM&F BOVESPA. Bolsa de Valores, Mercadorias e Futuros. **Consulta – 2018**. Disponível em:< [http://www.bmfbovespa.com.br/pt\\_br/servicos/market-data/historico/mercado-de-derivativos/ajustes-do-pregao/](http://www.bmfbovespa.com.br/pt_br/servicos/market-data/historico/mercado-de-derivativos/ajustes-do-pregao/)>. Acesso em: janeiro de 2018.

BORBA, S. M. P. **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários**: estudo de caso. 2006. 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.

BRITO FILHO, L. F. de. **Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2005. 149 p.. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BROLLO, M. J.; SILVA, M.M. **Política e Gestão Ambiental em Resíduos Sólidos**: Revisão e Análise sobre a Atual Situação no Brasil. São Paulo. 2001. Disponível em:<[https://www.researchgate.net/profile/Maria\\_Brollo/publication/228885347\\_POLITICA\\_E\\_GESTO\\_AMBIENTAL\\_EM\\_RESDUOS\\_SLIDOS.\\_REVISO\\_E\\_ANLISE\\_SOBRE\\_A\\_ATUAL\\_SITUAO\\_NO\\_BRASIL/links/00b7d5387196a764fe000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Maria_Brollo/publication/228885347_POLITICA_E_GESTO_AMBIENTAL_EM_RESDUOS_SLIDOS._REVISO_E_ANLISE_SOBRE_A_ATUAL_SITUAO_NO_BRASIL/links/00b7d5387196a764fe000000.pdf)>. Acesso em: Março de 2016.

BUENROSTRO, O.; BOCCO, G. *Solid waste Management in Municipalities in Mexico: goals and perspectives. Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 39, p. 251-262, 2003.

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**. 2007. 254 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos- SP. 2007.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. **Informações**. 2018. Disponível em:< <http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/Informacoes.aspx>>. Acesso em: fevereiro de 2018.

CENBIO. **Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto.** JUNHO 2005. Disponível em: <[http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/7\\_purefa.pdf](http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/7_purefa.pdf)>. Acesso em: Novembro de 2017.

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.

ENSINAS, A. V. **Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas – SP.** 2003. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

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. 2007. 90 f. 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. **Cidades.** Disponível em:<<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=316860>>. Acesso em: abril de 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativa População 2015.** Disponível em:<[ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2015/estimativa\\_dou\\_](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_dou_)>. Acesso em: novembro de 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Resultados Censo 2010.** Disponível em:<<http://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Acesso em: julho de 2016.

INVESTING. **Crédito Carbono Futuro.** Consulta 2018. Disponível em:<<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>. Acesso em: janeiro de 2018.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 1995. **The Science of Climate Change - Summary for Policymakers.** Office Graphics Studio. Madrid In ALMEIDA, F. T. R.; SANTOS, G. O.; MOTA, F. B. S. **Metodologia do Banco Mundial na estimativa da**

**geração de gás metano num aterro sanitário:** estudo de caso. *In:* 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011, Porto Alegre.

JUCÁ, J. F. T. **Destinação Final dos Resíduos Sólidos no Brasil:** Situação Atual e Perspectivas. *In:* SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 10, 2002. Braga, Portugal *In* SOUZA, R. M.; SERRA, J. C. V.; JUNIOR, J. C. Z.; SANTOS, D. R. R. **Análise do Potencial Energético do Biogás Proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO para Geração de Energia Elétrica.** s.d.

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. 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.** 2014. 81 p. Francisco Beltrão. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - UTFPR, Câmpus Francisco Beltrão. Câmpus Francisco Beltrão.

MENEGUIN, F. **O que é o Mercado de Carbono e como ele Opera no Brasil?** Disponível em: <<http://www.brasil-economia-governo.org.br/2012/08/13/o-que-e-o-mercado-de-carbono-e-como-ele-opera-no-brasil/>>. Acesso em: abril de 2016.

MUCELIN, C. A.; BELLINI, M. Lixo e Impactos Ambientais Perceptíveis no Ecossistema Urbano. **Sociedade & Natureza.**Uberlândia, v.1, p. 111-124, 2008.

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.** 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.; SILVIA, M.S.; COELHO, S.T. **Aproveitamento do Biogás Proveniente dos Resíduos Sólidos Urbanos para Geração de Energia Elétrica.** Estudo de caso em São Paulo. *In:* Congresso Internacional de Bioenergia, 6, 2006, Curitiba.

PECORA, V.; VELÁZQUEZ, 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**. 2014.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLIVEIRA, M. A.; ORLY DENISSE CALLE ROALCABA, O. D. C.. Aterros Sanitários para Geração de Energia Elétrica a Partir da Produção de Biogás no Brasil: Comparação Dos Modelos Landgem (EPA) E Biogás (Cetesb). **Revista brasileira de Estudos Populacionais, Rio de Janeiro**, v.33, n.1, p.175-188, jan./abr. 2016.

PNSB- **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008**. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/>>. Acesso em: maio de 2017.

REZENDE, A. J.; DALMÁCIO, Z.; RIBEIRO, M. S. A Potencialidade dos Créditos de Carbono na Geração de Lucro Econômico Sustentável da Atividade de Reflorestamento. **Organizações Rurais & Agroindustriais**. Vol. 14, num 1, 2012, PP. 108-126. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais.

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

SANTOS, J. M. R; MARTINS, M. T. Coleta Seletiva de Lixo: Uma Alternativa Ecológica no Manejo Integrado Dos Resíduos Sólidos Urbanos. São Paulo. 1995. **Boletim Técnico**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

SNIS. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2015. Disponível em:<<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2015>>. Acesso em: novembro de 2016.

SCHALCH, V. *et al.* **Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. Disciplina do curso de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento. São Carlos (Apostila), 91 p., 2002. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

SOARES, H. A. **Captar Biogás dos Aterros de Resíduos e Transformar em Energia Elétrica**. Disponível em:<<http://livrozilla.com/doc/922683/--cened-cursos-ambientais>>. Acesso em: fevereiro de 2018.

SOUZA, R. M.; SERRA, J. C. V.; JUNIOR, J. C. Z.; SANTOS, D. R. R. **Análise do Potencial Energético do Biogás Proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO para Geração De Energia Elétrica.** s.d.

UNEP, United Nation Environment Program. 2011, **Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication** In 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.** 2014.

USEPA, United States United States Environmental Protection Agency. 1996. **Turning A Liability Into as Asset: A Landfill Gas-to-energy Project Development Handbook** In 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.** 2014.

VANZIN, E. **Procedimento para Análise da Viabilidade Econômica do Uso do Biogás de Aterros Sanitários para Geração de Energia Elétrica:** aplicação no aterro Santa Tecla. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2006.

WILLUMSEN, H. C. Energy Recovery From Landfill Gas in Denmark and Worldwide. LG Consultant, 2001 In  
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.** 2008.