

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**LUCAS DANIEL FRANCO**

**ESTUDO DE CASO: ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS DO ATERRO  
SANITÁRIO DA CIDADE DE ARCOS**

**FORMIGA – MG**  
**2018**

LUCAS DANIEL FRANCO

ESTUDO DE CASO: ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS DO ATERRO  
SANITÁRIO DA CIDADE DE ARCOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Química do UNIFOR-MG, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.  
Orientador: Prof. Me. Emerson Paulino dos Reis.

FORMIGA – MG

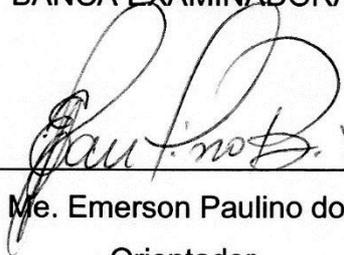
2018

Lucas Daniel Franco

ESTUDO DE CASO: ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS DO ATERRO  
SANITÁRIO DA CIDADE DE ARCOS

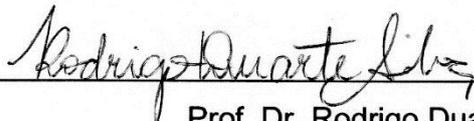
Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao curso de Engenharia  
Química do UNIFOR-MG, como requisito  
parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA



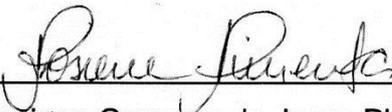
---

Prof. Me. Emerson Paulino dos Reis  
Orientador



---

Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva  
UNIFOR-MG



---

Profa. Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta  
UNIFOR-MG

Formiga, 9 de novembro de 2018.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca UNIFOR-MG

F825 Franco, Lucas Daniel.  
Estudo de caso: estimativa da geração de biogás do aterro sanitário da cidade de Arcos / Lucas Daniel Franco. – 2018.  
46 f.

Orientador: Emerson Paulino dos Reis.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)-  
Centro Universitário de Formiga-UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Biogás. 2. Aterro sanitário. 3. Cidade de Arcos. I. Título.

CDD 665.776

Catalogação elaborada na fonte pela bibliotecária  
Rosana Guimarães Silva – CRB6-3064

## RESUMO

Atualmente, a gestão dos resíduos sólidos urbanos é um grande problema para a sociedade e para a administração pública. Em decorrência da intensificação das atividades humanas, a geração de resíduos vem aumentando consideravelmente cada dia mais, o que acaba dificultando a destinação adequada dos mesmos. O aterro sanitário é a alternativa mais interessante para a disposição final dos resíduos sólidos. A decomposição anaeróbia desses resíduos gera o biogás, um gás constituído em sua maior parte por metano e dióxido de carbono. O metano faz parte dos gases de efeito estufa e é inflamável, podendo ser utilizado como combustível. Este trabalho buscou estimar a geração de biogás do aterro sanitário da cidade de Arcos-MG, com base na metodologia desenvolvida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que leva em consideração a composição, fluxo anual de resíduo, tempo de operação do aterro e constante de decaimento. Foi encontrado através da metodologia uma geração estimada de  $95 \times 10^3 \text{ m}^3$  de biogás para o ano de 2017. Considerando a equivalência energética do gás, esse volume corresponde a mais de 136.000 KWh ou ainda 52.000 litros de óleo diesel. Caso 100% do gás fosse captado e utilizado para a geração de energia elétrica, seria possível abastecer aproximadamente 66 residências durante todo o ano.

Palavras-chave: Biogás. Aterro sanitário. Cidade de Arcos.

## ABSTRACT

Currently, the management of Urban Solid Waste is a large problem for society and public administration. Due to intensification of human activities, the generation of waste has been increasing considerably over time, which makes it difficult to properly dispose of them. The landfill is the most interesting alternative for the final disposal of solid waste. The anaerobic decomposition of these residues create the biogas, a gas mainly constituted of methane and carbon dioxide. The methane is part of greenhouse gases and is flammable. So it can be used as fuel. The objective of this work was to estimate the biogas generation of the landfill of the city Arcos-MG, based on the methodology developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), which takes into account the composition, annual waste flux, landfill's operation time and decay constant. For the year 2017, was found through the methodology an estimated generation of  $95 \times 10^3 \text{ m}^3$  of biogas. Considering the energy equivalence of the gas, this volume corresponds to more than 136.000 KWh or even 52.000 liters of Diesel Oil. If 100% of the gas was collected and used for the electricity generation, it would be possible to supply approximately 66 homes throughout the year.

Keywords: Biogas. Landfill. Arcos city.

## LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico da geração de RSU no Brasil .....	13
Figura 2 - Representação das etapas da digestão anaeróbia .....	21
Figura 3 - Fases de decomposição de RSU.....	22
Figura 4 - Gráfico da relação entre o poder calorífico do biogás e porcentagem de metano .....	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento qualitativo do lixo (estimativo) em %.....	14
Tabela 2 - Propriedades físico-químicas .....	24
Tabela 3 - Equivalência de 1 m <sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis .....	25
Tabela 4 - Empreendimentos de geração de eletricidade com biogás de RSU .....	29
Tabela 5 - Fator de correção de metano para as condições do aterro.....	32
Tabela 6 - Teor de COD para cada componente do RSU.....	33
Tabela 7 - Composição gravimétrica do RSU em Lagoa da Prata .....	35
Tabela 8 - Equivalência de 95.297,59833 m <sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOGÁS	Associação Brasileira de Biogás e Biometano
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpezas Públicas e Resíduos Especiais
ANNEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CETESB	Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COD	Carbono Orgânico Degradável
COD <sub>F</sub>	Fração de COD dissociada
COT	Carbono Orgânico Total
C/N	Carbono/Nitrogênio
<i>E<sub>CH4</sub></i>	Emissão de metano
<i>F</i>	Fração de metano presente no biogás
<i>FCM</i>	Fator de Correção do Metano
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HA	Hectare
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> S	Ácido Sulfídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
J	Joule
<i>K</i>	Constante de decaimento
Kcal	Quilocaloria
KG	Quilo
kWh	Quilowatt-hora
L	Litro
<i>L<sub>o</sub></i>	Potencial de geração de metano
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
MW	Megawatt

N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira aprovada
NH <sub>3</sub>	Amônia
O <sub>2</sub>	Oxigênio
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RSU	Resíduo Sólido Urbano
RSD	Resíduo Sólido Depositado
R <sub>x</sub>	Fluxo de resíduo do ano
SI	Sistema Internacional de Unidade
T	Ano de deposição do resíduo no aterro (início de operação)
T	Temperatura
t/ano	Tonelada por ano
t/m <sup>3</sup>	Tonelada por metro cúbico
tonRSD	Tonelada de Resíduo Sólido Depositado
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
X	Ano atual
W	Watts

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.</b>	<b>Resíduos sólidos urbanos: definição e geração .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.</b>	<b>Características e classificação dos resíduos.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1.</b>	<b>Características físicas .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2.</b>	<b>Características químicas.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.3.</b>	<b>Características biológicas .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.4.</b>	<b>Classificação dos resíduos sólidos .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.</b>	<b>Biogás.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.1.</b>	<b>Energia.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2.</b>	<b>Geração do biogás.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.3.</b>	<b>Fatores que influenciam na formação do biogás .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.4.</b>	<b>Aproveitamento do biogás.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.5.</b>	<b>Extração e tratamento do biogás .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.6.</b>	<b>Geração de energia elétrica .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.7.</b>	<b>Venda de créditos de carbono.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.8.</b>	<b>Metodologias de mensuração e geração de biogás .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.9.</b>	<b>Biogás no Brasil .....</b>	<b>29</b>
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.</b>	<b>Características da área de estudo.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.</b>	<b>Estimativa do potencial de geração de metano .....</b>	<b>30</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>34</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O modo de vida da população atual aliado ao desenvolvimento econômico criou a necessidade de um abastecimento adequado e confiável de energia. Porém, a preocupação com as questões ambientais relacionadas às mudanças climáticas e o anseio da diversificação da matriz energética do país favorecem e incentivam a busca por fontes alternativas na geração de energia. O processo de urbanização formou uma elevada concentração populacional em determinadas cidades, elevou a produção e o consumo de produtos menos duráveis que por sua vez geraram um aumento expressivo na quantidade e na qualidade dos resíduos depositados nos aterros sanitários (BARROS, 2013).

Nesse contexto, uma alternativa é o aproveitamento energético do biogás gerado pela decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos que são descartados nos aterros sanitários. O biogás é um gás composto por uma mistura de metano, dióxido de carbono e outros gases em quantidades inferiores (KARLSSON et al., 2014).

O aproveitamento do biogás para geração de energia torna-se imprescindível uma vez que aproveita um resíduo que não teria mais valor agregado, além de propiciar a geração energia elétrica nas proximidades das cidades onde ocorre a maior demanda por essa energia. Essa proximidade das fontes geradora e consumidora aumenta a eficiência do sistema como um todo e reduz significativamente as perdas na transmissão e distribuição da energia (CEMPRE).

No Brasil está localizada a maior planta de aproveitamento de biogás de aterro sanitário do mundo. Situada na cidade de Caieiras em São Paulo, foi inaugurada em 2016 com uma geração média de energia de 26 *megawatts* por hora. Somente essa energia gerada em Caieiras é capaz de sustentar uma cidade de 300 mil habitantes (AGÊNCIA BRASIL, 2016).

Alguns fatores como a composição e a quantidade de resíduos, tipo de resíduo, umidade, temperatura, pH, além da forma de construção e operação do aterro influenciam na qualidade e na quantidade de biogás gerado. Existem algumas metodologias e *softwares* que auxiliam no estudo da mensuração da quantidade de biogás que é gerado em um aterro (VAN ELK, 2007).

Atualmente, existem plantas de aproveitamento energético de biogás de aterro em funcionamento e projetos ainda em desenvolvimento para geração de

energia elétrica. Essa alternativa, ao mesmo tempo em que se apresenta como uma fonte renovável e inesgotável de energia contribui na diminuição das emissões de metano na atmosfera (BARROS, 2013).

De acordo com Associação Brasileira de Biogás e Biometano ABIOGÁS (2018), o Brasil poderia gerar 115 mil GW hora de energia elétrica se houvesse o aproveitamento do biogás proveniente dos rejeitos urbanos, da pecuária e da agroindústria. Essa quantidade de energia equivale à de uma Itaipú e meia e seria capaz de suprir 25% de toda energia elétrica consumida no país em 2015 ou seria capaz de alimentar 25% da frota nacional de veículos com o biometano que é extraído da purificação do biogás, assim justificando mais estudos sobre o tema de aproveitamento do biogás.

Diante do apresentado, este trabalho objetivou estimar a quantidade de biogás gerada em 2017 pelo aterro sanitário da cidade de Arcos-MG. A estimativa foi feita através da coleta de dados junto à prefeitura da cidade e à empresa terceirizada responsável pela manutenção e operação do aterro. Foi utilizada uma metodologia já existente e aceita para o levantamento e tratamento dos dados.

O trabalho focou apenas em encontrar o volume de gás gerado, sendo possível que futuros trabalhos estudem a viabilidade técnica econômica.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Partindo da necessidade de estudo e conhecimento acerca dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) para melhor disposição e aproveitamento dos mesmos, são apresentados a seguir a definição e geração, classificação e principais características, além da possibilidade de diminuição dos impactos ambientais e obtenção de renda a partir da queima do biogás gerado.

### 2.1. Resíduos sólidos urbanos: definição e geração

A Norma Brasileira aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10.004 (ABNT, 2004), que trata de classificação dos resíduos sólidos, traz como definição:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, 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 técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (NBR 10.004, ABNT, 2004, p. 7).

De acordo com a revista Sebrae (2012), a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) determina a responsabilidade compartilhada entre o poder público, as empresas e os consumidores. Cada um tem que fazer a sua parte, transformando a forma como a sociedade se relaciona com seus resíduos. Os resíduos descartados todos os dias podem ter um destino muito mais nobre, servindo como matéria-prima para empresas e com destinações mais adequadas. Pode-se, por exemplo, produzir adubo e energia, resgatando o valor econômico desses resíduos. A reciclagem gera emprego e renda, diminui a quantidade de recursos naturais que processamos para nossas atividades e ainda reduz a necessidade de ocupar espaços para descartar os materiais que cumpriram uma única vez sua função socioeconômica.

Segundo Santaella et al. (2014), a definição de resíduos sólidos mudou ao longo do tempo, devido aos avanços tecnológicos, da conscientização ambiental, e da necessidade financeira de reaproveitamento de materiais que não são mais úteis para uma determinada finalidade, mas podem ser empregados como matéria-prima

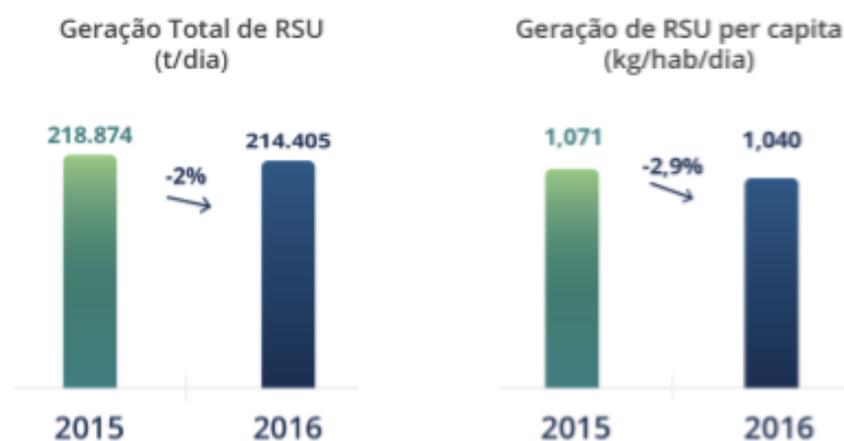
para outro. Esta definição pode variar conforme a época, o lugar, o clima, a cultura, os hábitos e a condição socioeconômica de uma sociedade.

De acordo com o Sebrae (2012, p. 8) “o que antes era genericamente tratado como “lixo”, agora tem valor e deve servir como base para a construção de novas cadeias de valor e novos negócios”. Santaella et al. (2014, p. 21) afirma que “[...] o que é inservível para determinada comunidade ou indivíduo, pode não ser para outros”.

Sebrae (2012), afirma que a palavra lixo não serve mais para definir o que é descartado todos os dias pelas residências, empresas e órgãos públicos. Tudo o que no passado era chamado de lixo deve ser chamado hoje de “resíduo sólido”. Atualmente, os especialistas afirmam que independente de qual seja o resíduo, sempre haverá uma destinação mais correta para ele do que simplesmente descartar. Da reutilização e reciclagem à geração de energia, tudo tem valor e pode inclusive tornar-se fonte de renda e oportunidade de novos negócios.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016), “a população brasileira apresentou um crescimento de 0,8% entre 2015 e 2016, enquanto a geração *per capita* de RSU registrou queda de 2,9% no mesmo período”. Através da FIG. 1 comparou-se a geração de RSU per capita e total, entre os anos de 2015 e 2016.

Figura 1 - Gráfico da geração de RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE; IBGE (2016).

Nos anos de 2015 e 2016 houve um decréscimo tanto na geração de RSU *per capita*, quanto na geração de RSU total. Decréscimo bem modesto, mas que se mantido ano a ano pode trazer bons resultados.

De acordo com a revista Abrelpe (2016), o montante gerado de RSU em 2016 foi de 78,3 milhões de toneladas no país e apresentou uma queda de 2% no montante em relação ao gerado em 2015. Desse montante 71,3 milhões de toneladas foram coletadas, indicando um índice de coleta de 91% para o país. Cerca de 7 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta, tendo assim um destino impróprio. Apenas 58,4% dos RSU coletados foram destinados a aterros sanitários, o que demonstra que 29,7 milhões de toneladas de resíduos, correspondente a 41,6% do coletado em 2016 tiveram destino inadequado, sendo encaminhado para lixões ou aterros controlados.

São empregados dados específicos sobre as características quali-quantitativas que podem ser vistas na TAB. 1. Os valores apresentados na tabela são valores médios partindo-se de parâmetros equivalentes de alguns municípios de porte médio do estado de São Paulo (CETESB, 2006).

Tabela 1 - Detalhamento qualitativo do lixo (estimativo) em %.

Componente	Categoria	Massa (base úmida)	Umidade Típica	Massa (base seca)	C	H	O	N	S	Cinzas
Restos de alimento	R	55,0	70,0	16,50	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel, papelão	R	21,0	6,0	19,74	44,0	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Têxteis	L	5,0	10,0	4,50	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Madeira	L	1,1	20,0	0,88	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Plástico	N	8,9	2,0	8,72	60,0	7,2	22,8	0	0	10,0
Vidro	N	2,6	2,0	2,55	-	-	-	-	-	-
Metais	N	5,4	2,0	5,29	-	-	-	-	-	-
Outros	N	1,0	5,0	0,95	-	-	-	-	-	-

Nota: R–Rapidamente degradável; L–Lentamente degradável; N–Não degradável (ou dificilmente); C–Carbono; H–Hidrogênio; O–Oxigênio; N–Nitrogênio; S–Enxofre.  
Fonte: CETESB, 2006.

Os componentes que apresentam maior massa base úmida que são os restos de comida, papel e papelão também são os que se degradam mais rapidamente.

## 2.2. Características e classificação dos resíduos

De modo a facilitar e otimizar as etapas de gerenciamento, os resíduos sólidos são caracterizados física, química e biologicamente. A classificação se subdivide em perigosos e não perigosos.

### 2.2.1. Características físicas

Segundo Barros (2012, p.19) “as características físicas têm sido amplamente usadas entre os gestores de resíduos sólidos não apenas para o dimensionamento e escolha das unidades de tratamento e disposição final, mas para todas as etapas do gerenciamento”.

Segue as características físicas destacadas por Barros (2012):

- Geração *per capita*: consiste na quantidade diária de resíduos gerada por habitante;
- Teor de umidade: revela o percentual de água existente. Essa característica interfere diretamente na velocidade de degradação aeróbia e anaeróbia dos resíduos sólidos;
- Composição gravimétrica: traduz os valores percentuais (em peso) dos componentes do resíduo. As categorias mais usadas são: resíduos orgânicos, plásticos, papel, papelão, vidro, metais e têxteis. Essas categorias ainda podem passar por subdivisões dependendo do grau de detalhamento desejável;
- Peso específico aparente: é dado relacionando-se o peso de resíduo em quilo (Kg) e o volume que ocupa em metro cúbico (m<sup>3</sup>). Para essa característica considera-se o resíduo não compactado e é de extrema importância para o dimensionamento de equipamentos de coleta e transporte;
- Compressividade: traduz o potencial de reduzir o volume de determinado resíduo sob pressão. Importante para o dimensionamento da vida útil do aterro sanitário.

### 2.2.2. Características químicas

Quanto às características químicas, Barros (2012) considera quatro principais:

- **Proporção Carbono/Nitrogênio (C/N):** essa proporção revela o grau de decomposição da massa de resíduo, tanto em condições aeróbias quanto em condições anaeróbias. “Isso se dá em razão do fato de que as magnitudes de Carbono e Nitrogênio são metabolizadas em proporções diferentes pelos micro-organismos, e existem proporções ótimas para cada fase no processo biológico de tratamento”;
- **Poder Calorífico Inferior (PCI):** consiste na quantidade de energia (na forma de calor) que determinada quantidade de resíduo poderá fornecer ao ser submetido a um processo térmico;
- **Potencial hidrogeniônico (pH):** indica se o ambiente é ácido, neutro ou alcalino. É importante para as espécies de micro-organismos que o pH seja ideal para o seu desenvolvimento. Essa característica química varia durante as diversas fases de compostagem, mostrando-se próxima da neutralidade no final do processo;
- **Composição química:** a composição química é de fundamental importância para os processos biológicos de tratamento, uma vez que compreende as análises da presença de macro e micronutrientes, fundamentais para o metabolismo dos micro-organismos durante a degradação da matéria orgânica. Esta degradação pode se dar por processos oxidativos, em que os aceptores de elétrons como oxigênio, nitrato ou sulfato e dióxido de carbono são usados para oxidação da matéria orgânica, ou por processos fermentativos, nos quais ocorre rearranjo de elétrons. Inclui também, entre outros, a determinação de gorduras, Carbono Orgânico Total (COT), teores de metais pesados (chumbo, cádmio e mercúrio, etc.) e teores de cinzas.

### 2.2.3. Características biológicas

Segundo Barros (2012) as características biológicas são responsáveis por traduzir as espécies microbiológicas que estão presentes em determinada quantidade de resíduo.

“Nesse sentido, há que se ressaltar novamente a importância do conhecimento de fundamentos da microbiologia, e, portanto, as reações microbiológicas em ambientes na presença de oxigênio (aeróbios), na ausência de oxigênio e na presença de nitratos (anóxicos) e na ausência de oxigênio (anaeróbios). Em tais ambientes, a degradação da matéria orgânica pode se dar por oxidação, em que a matéria orgânica perde elétrons e quem os recebe é o aceptor de elétrons, passível de ser, em função do ambiente, o oxigênio (aeróbio), o nitrato (anóxico) ou o dióxido de carbono e o sulfato (anaeróbio). Em ambientes anaeróbios, além das vias de oxidação da matéria orgânica, ocorre a fermentação da mesma, sendo que ambas as vias produzem o metano em proporções diferentes.” (BARROS, 2012. p. 25).

“[...] a presença e o metabolismo dos micro-organismos estão intimamente relacionados com as condições desses ambientes e as afinidades naturais pelos ambientes. Portanto, as espécies microbiológicas que irão desempenhar papel fundamental nas diversas fases da compostagem são distintas das que irão ser relevantes para as diversas fases da digestão anaeróbia. Por exemplo, para compostagem, bactérias, fungos e actinomicetos são fundamentais, cada qual em seu papel. Já na digestão anaeróbia, deve ocorrer à simbiose entre as espécies hidrolíticas, acidogênicas, acetogênicas, metanogênicas e sulfetogênicas, para que a produção de biogás com o teor adequado de metano possa acontecer.” (BARROS, 2012. p. 26).

### 2.2.4. Classificação dos resíduos sólidos

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) os resíduos são classificados como:

- Resíduos Classe I – Perigosos  
Apresentam periculosidade, como riscos a saúde pública, ao meio ambiente ou uma das características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.
- Resíduos Classe II – Não perigosos  
Estes são subdivididos em não inertes e inertes.
  - ✓ Resíduo classe II A – Não inertes

São os resíduos que não se enquadram em perigosos nem em inertes. Apresentam propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;

✓ Resíduo classe II B – Inertes

São os resíduos que quando amostrados e submetidos a um contato estático e dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não apresentam nenhum constituinte solubilizado a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excluindo aspecto como cor, turbidez, dureza e sabor.

A norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) que trata da classificação dos resíduos sólidos ainda traz algumas definições importantes.

- Periculosidade de um resíduo: característica apresentada por um resíduo, em decorrência de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podendo apresentar risco a saúde pública e/ou ao meio ambiente;
- Toxicidade: propriedade potencial que o agente tóxico possui de provocar um efeito adverso em decorrência de sua interação com o organismo;
- Agente tóxico: substância ou mistura que através da inalação, ingestão ou absorção cutânea tenha comprovação científica de efeito adverso;
- Toxicidade aguda: característica que o agente possui de provocar efeito adverso grave, ou até morte, em decorrência de interação com o organismo, depois de uma dose elevada ou repetidas doses em curto prazo;
- Agente teratogênico: qualquer substância, mistura, organismo, agente físico ou estado de deficiência, que estando presente durante a fase de vida embrionária e fetal, produz uma alteração na estrutura ou função do indivíduo dela resultante;
- Agente mutagênico: substância, mistura, agente físico ou biológico cuja inalação, ingestão ou absorção cutânea possa elevar as taxas espontâneas de danos ao material genético e ainda provocar ou aumentar a frequência de defeitos genéticos;

- Agente carcinogênico: qualquer substância, mistura, agentes físicos ou biológicos que através da inalação, ingestão e absorção cutânea possa desenvolver câncer ou aumentar sua frequência. O câncer é o resultado de processo anormal, não controlado, da diferenciação e proliferação celular, podendo ser iniciado por alteração mutacional;
- Agente ecotóxico: característica de apresentar riscos para um ou vários compartimentos ambientais.

## 2.3. Biogás

Nesta seção, serão abordados de forma ampla questões e assuntos relacionados ao biogás de aterro sanitário. Desde a definição de energia, à geração de biogás, fatores que influenciam em sua formação, formas de extração, aproveitamento, tratamento, transformação em energia elétrica, metodologias de mensuração e geração de biogás além da possibilidade de venda de créditos de carbono através da sua queima.

### 2.3.1. Energia

Energia, que deriva do grego *enérgeia* e do latim *energia*, significa trabalho. A palavra energia pode ser definida como a capacidade de realizar trabalho e transferir calor ou alterar a matéria. A palavra apareceu pela primeira vez em 1807, sugerida pelo médico e físico inglês Thomas Young (BUCUSSI, 2006). Vecchia (2010) definiu trabalho como resultado de uma força sobre o deslocamento de um corpo.

No Sistema Internacional de Unidade (SI), a unidade usada para medir energia é o *Joule* (J). *Watts* (W) é usado para medir a potência, que é a taxa que a energia é usada ou convertida (VECCHIA, 2010).

Palz (2002) afirma que apenas duzentos anos atrás, o homem utilizava basicamente o sol como recurso energético. Por um longo período a força endossomática (própria força muscular) foi a única forma de energia utilizada pelo homem (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2012).

Para Vecchia (2010) a energia mantém-se constante em quantidade, porém pode mudar rapidamente. As formas de energia são: luminosa, química, nuclear,

térmica, elétrica e mecânica. Os combustíveis fósseis possuem energia química. Um barril de petróleo, por exemplo, equivale a 6,1 bilhões de Joules.

### 2.3.2. Geração do biogás

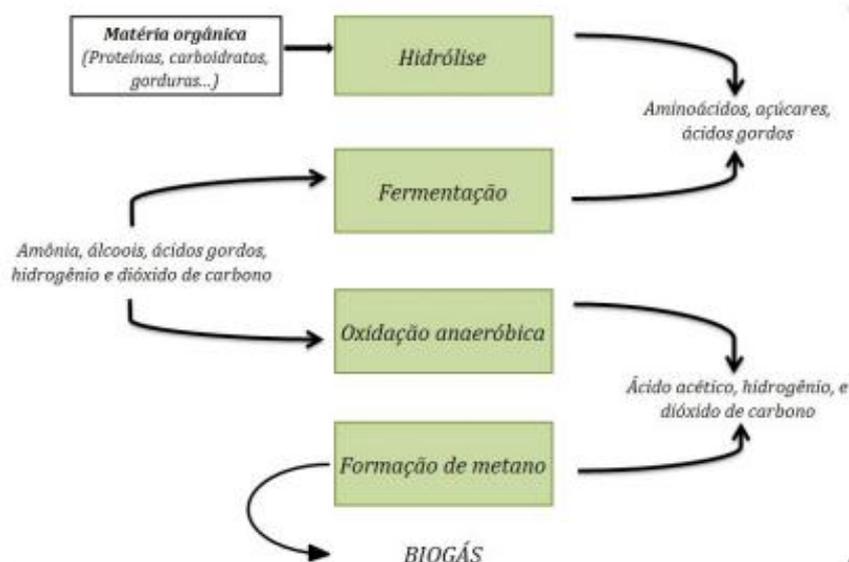
Apesar de se tratar de uma fonte de energia não renovável (esgotável) e afetar negativamente o ambiente emitindo gases do efeito estufa, os combustíveis fósseis são os mais utilizados atualmente. Além disso, a crise do petróleo dos anos 70 levou a busca de fontes alternativas de energia. No final do século XIX e início do século XX o biogás se apresentou como fonte de energia substituta dos combustíveis fósseis. A China e a Índia foram países pioneiros na utilização desse gás como fonte de energia (KARLSSON et al., 2014).

No Brasil, a utilização do biogás proveniente de aterro sanitário pode ser uma alternativa de diversificação da matriz energética. Embora o biogás não seja a solução aos desafios de suprimento de eletricidade, constitui uma opção para tentar descentralizar a matriz energética brasileira, aproveitando um recurso que seria subutilizado (QUADROS; TAVERES; BAJAY, 2016).

Karlsson (2014) descreveu que o biogás é formado por meio da decomposição anaeróbia de matéria orgânica, aproveitando o potencial de energia que está armazenada na matéria orgânica. Essa matéria utilizada como substrato para a produção do gás pode ser proveniente da agricultura, resíduos de atividade agrícola, dejetos suínos, bovinos, aves, ovinos, caprinos, além de resíduos industriais e resíduos sólidos urbanos.

Foi descrito por Karlsson (2014), que o biogás é constituído por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e outros gases como: ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ). Para que a matéria orgânica possa dar origem ao biogás, são necessários diversos tipos de microrganismos, que atuam juntamente com uma série de fatores, como: pH, temperatura, tipo de substrato e ausência de oxigênio. Normalmente é denominado biogás ou biogás bruto o gás que ainda não passou pelo processo de purificação. Após este processo, ele pode ser utilizado para a geração de energia e como combustível veicular. Segundo Karlsson (2014) o processo de digestão anaeróbia da conversão da matéria orgânica em gases é dividido em quatro etapas (FIG. 2).

Figura 2 - Representação das etapas da digestão anaeróbia



Fonte: KARLSSON, 2014, p. 10.

**Hidrólise:** essa primeira etapa é muito importante para o processo. Consiste na quebra do material orgânico em pequenas moléculas para que os microrganismos consigam se alimentar, absorver as pequenas partes do material orgânico e tirar proveito da energia que nelas estão contidas. Ocorre à segregação de enzimas que rompem as moléculas de proteína e as transformam em aminoácidos, hidratos de carbono em açúcares simples e álcoois e graxas em ácidos graxos (KARLSSON, 2014).

**Fermentação:** nessa etapa, ácidos orgânicos (acético, butírico e láctico), álcoois e amoníaco, hidrogênio e dióxido de carbono são formados por meio das reações. Os produtos formados nesta etapa dependem dos microrganismos disponíveis, do tipo de material orgânico e dos fatores ambientais (KARLSSON, 2014).

**Oxidação anaeróbia:** também conhecida como acetogênese, esta etapa antecede a formação do gás metano. As moléculas rompidas durante as fases anteriores rompem-se em moléculas ainda menores pela oxidação anaeróbia. As bactérias acetogênicas convertem o material degradado em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono (KARLSSON, 2014).

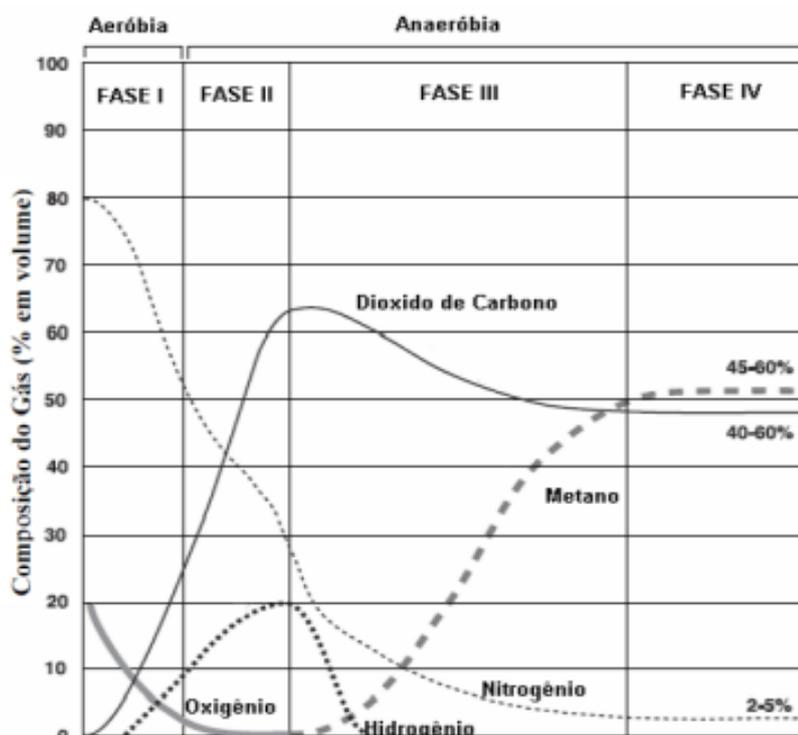
**Formação do metano:** é conhecida também como metanogênese e é a etapa do processo que mais interessa. Os microrganismos metanogênicos necessitam do ácido acético, dióxido de carbono e mais alguns produtos de menor importância das

fases anteriores. São os produtos da fase metanogênica o dióxido de carbono, água e o metano. Os microrganismos metanogênicos são sensíveis e não resistentes às perturbações de alteração no pH e substâncias tóxicas (KARLSSON, 2014).

O gás metano é considerado um gás combustível e também faz parte do grupo de gases do efeito estufa (GEE). A produção natural de metano é responsável por 20% das emissões desses gases na atmosfera, sendo que os 80% que restam, são de responsabilidade da produção antropogênica (JUNIOR, 2009). O metano está entre os gases mais prejudiciais do efeito estufa, apresentando-se 21 vezes mais danoso que o dióxido de carbono (ALVES, 2008).

A composição dos gases durante a decomposição do RSU pode variar de acordo com a fase que estiver a massa de resíduos (FIG. 3).

Figura 3 - Fases de decomposição de RSU



Fonte: BARROS, 2013.

Para a formação do gás em aterro sanitário, quatro fases são identificadas e listadas conforme Barros (2012):

- Fase I – fase aeróbia: ocorre o consumo do oxigênio contido no resíduo depositado pela decomposição aeróbia e formação de dióxido de carbono. A duração desta fase pode compreender entre algumas horas até algumas

semanas. Segundo Lima (2004) a temperatura do meio nessa etapa pode variar entre 45°C e 68°C;

- Fase II – anaeróbia não metanogênica: com a ausência de oxigênio a atividade anaeróbia torna-se dominante. Nesta fase ocorre uma alta concentração de dióxido de carbono e a produção de hidrogênio. A produção de metano ainda não é iniciada e esta fase pode durar desde algumas horas podendo chegar a seis meses. Lima (2004) denomina como fase ácida, onde o pH varia entre 5,2 e 6,8 e a temperatura cai para uma faixa entre 29°C e 45°C;
- Fase III – anaeróbia metanogênica instável: caracteriza-se pela redução na concentração de CO<sub>2</sub> e nitrogênio (N<sub>2</sub>) e desaparecimento de hidrogênio (H<sub>2</sub>). Inicia-se a geração de metano e no final desta fase já existe uma alta concentração de metano. Pode durar de três meses a três anos. De acordo com Lima (2004) o pH sobe para a faixa de 6,8 a 7,2 e a temperatura tende a se estabilizar em 30°C;
- Fase IV – anaeróbia metanogênica estável: a tendência nessa fase é que a composição dos gases produzidos e as taxas de geração permaneçam constantes. Exceto por alterações nas condições ambientais ou esgotamento de nutrientes. Esta fase pode durar de oito a quarenta anos. Segundo Lima (2004) nesta fase o pH estabiliza-se entre 7,0 e 7,2 e a temperatura mantém-se inferior a 30°C (próxima do ambiente).

Van Elk (2007), ainda considera a existência de uma quinta fase denominada fase final. Nela ainda ocorre a produção de metano, porém em declínio até chegar a níveis desprezíveis. Essa fase pode durar de um a quarenta anos.

De acordo com Pecora (2006), um fator importante que se deve considerar em relação ao biogás quando se deseja armazená-lo é o volume específico, que é representado pelo peso específico. Outro parâmetro importante é a umidade do gás, que diminui o poder calorífico afetando a temperatura da chama, limitando a inflamabilidade e solubilização do gás sulfídrico. Comprovadamente, o poder calorífico do biogás aumenta de acordo com a quantidade de metano presente. Algumas propriedades físico-químicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico podem ser observadas na TAB. 2.

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas

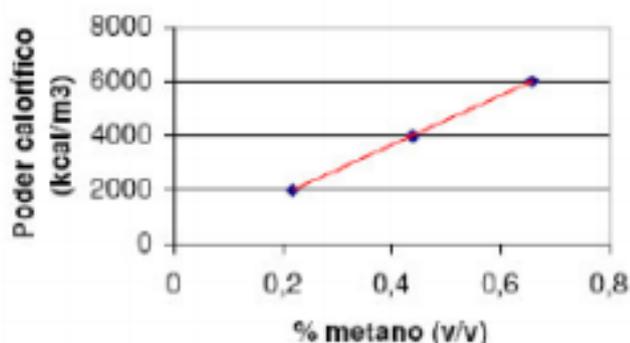
Propriedades	Metano	Dióxido de carbono	Gás sulfídrico
Peso molecular	16,04	44,01	34,08
Peso específico	0,555 (a)	1,52 (a)	1,189 (b)
Volume específico	1473,3 cm <sup>3</sup> /g (a)	543,1 cm <sup>3</sup> /g (a)	699,2 cm <sup>3</sup> /g (a)
Capacidade calorífica	0,775 Kcal/kg°C	0,298 Kcal/kg°C	0,372 Kcal/kg°C
Relação CP/CV	1,307	1,303	1,320
Poder calorífico	13,268 Kcal/kg	0 Kcal/kg	4,633 Kcal/kg
Limite de inflamabilidade	5-15% por volume	nenhum	4-46% por volume

Fonte: PECORA, 2006.

Nota: (a) -60°C, 1 atm; (b) -70°C, 1 atm.

Na FIG. 4 pode ser observada a relação entre o poder calorífico do biogás (kcal/m<sup>3</sup>) e a porcentagem de metano, em volume.

Figura 4 - Gráfico da relação entre o poder calorífico do biogás e porcentagem de metano



Fonte: ALVES, 2000.

É possível perceber que a porcentagem de metano no biogás e o poder calorífico do mesmo são grandezas diretamente proporcionais. Ocorre um aumento do poder calorífico à medida que se aumenta a porcentagem de metano.

Comparando o biogás com outros combustíveis a eficiência energética deve ser determinada levando em conta o poder calorífico e a eficiência média de combustão (BARROS, 2013). É possível observar através da TAB. 3 a equivalência de 1 metro cúbico (m<sup>3</sup>) de biogás em relação a outros combustíveis.

Tabela 3 - Equivalência de 1 m<sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis

<b>Combustível</b>	<b>Quantidade equivalente a 1 m<sup>3</sup> de biogás</b>
Carvão vegetal	0,8 Kg
Lenha	1,5 Kg
Óleo diesel	0,55 L
Querosene	0,58 L
Gasolina amarela	0,61 L
GLP (Gás liquefeito de petróleo)	0,45 L
KWh (Quilowatt-hora)	1,43
Álcool carburante	0,8 L
Carvão mineral	0,74 Kg

Fonte: BARROS, 2013.

O biogás pode ser utilizado na indústria como alternativa a outros combustíveis. Com 1 m<sup>3</sup> de biogás obtêm-se energia equivalente à de 0,55 litros de óleo diesel ou ainda à 0,8 quilos de carvão vegetal, por exemplo.

### **2.3.3. Fatores que influenciam na formação do biogás**

Diversos são os fatores que podem afetar a formação do metano em um aterro sanitário. Podem estar relacionada ao ambiente externo e interno das células de lixo, forma de operação e construção do aterro além das características iniciais dos resíduos. Apesar de todos terem um papel importante no processo, Van Elk (2007), cita os fatores mais relevantes:

- **Umidade:** é necessária em determinada quantidade para que a decomposição biológica da matéria orgânica possa ocorrer. A faixa ótima é entre 60 e 80% de umidade, porém, Maciel (2003) verificou altas taxas de decomposição de resíduos para umidade variando de 20 a 40%;
- **Temperatura:** quanto mais elevada, mais será a atividade microbiana e, conseqüentemente, a produção de metano. A faixa ótima é entre 30 e 40°C. Temperaturas abaixo de 15°C podem limitar a atividade metanogênica. Segundo Maciel (2003), a temperatura ambiente, apenas influência até 2,5 metros de profundidade na massa de resíduos;
- **pH:** as bactérias metanogênicas são muito sensíveis as suas variações, sendo que o pH ideal para o seu desenvolvimento é entre 6 e 8. Segundo Lima (2005), a faixa ótima para produção de metano situa-se entre 7,0 e 7,2;

- Composição dos resíduos: quanto maior a fração orgânica biodegradável, maior será a produção de biogás. Os nutrientes como carbono, nitrogênio e enxofre devem estar em níveis adequados aos microrganismos;
- Tamanho das partículas: ocorre um aumento na velocidade de degradação na massa de resíduos de partículas menores, o que tem motivado o uso de trituradores. O tamanho das partículas influencia tanto no processo aeróbio quanto no anaeróbio;
- Formas de construção e operação do aterro: aterros com altura elevada, impermeabilização da camada de cobertura e compactação dos resíduos favorecem a formação do metano.

A umidade, temperatura e a predominância de matéria orgânica na composição dos resíduos sólidos coloca o Brasil em condições favoráveis para produção de biogás em aterros sanitários (VAN ELK, 2007).

#### **2.3.4. Aproveitamento do biogás**

O metano é o gás de maior interesse da decomposição anaeróbia de resíduos em aterros sanitários. Devido à alta concentração de metano presente no biogás, este é utilizado com diversas finalidades de caráter energético, sendo a geração de energia elétrica a opção mais relevante (GALIZA; CAMPOS, 2015).

Concomitantemente à renda vinda pela venda da energia elétrica, existe a possibilidade de obtenção de renda a partir da comercialização de créditos de carbono a partir da queima do biogás (ICLE).

#### **2.3.5. Extração e tratamento do biogás**

A extração dos gases nos aterros sanitários é feita através de grandes dutos de ar dispostos a certa distância uns dos outros ao longo do aterro, capazes de drenar os gases da camada subterrânea e conduzi-los à superfície (LIMA et al., 2017).

A composição dos gases que compõem o biogás interfere diretamente em suas formas de uso. Quando a concentração de metano ultrapassa 95%, o biogás

passa então a ser chamado de biometano. Para um melhor aproveitamento, é necessário separar seus componentes. Para aumentar o poder calorífico do gás, é preciso retirar toda a umidade. Para a utilização do biogás como combustível em motores, o sulfeto de hidrogênio precisa ser retirado. E para a utilização do biogás como gás natural, é necessário retirar a umidade, o sulfeto de hidrogênio e o dióxido de carbono (PORTAL DO BIOGÁS).

### **2.3.6. Geração de energia elétrica**

A geração de energia elétrica a partir do biogás transforma um tipo de energia em outro, um processo conhecido como conversão energética. O biogás deve ser submetido a um processo de combustão controlada. Na combustão a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica. Essa energia mecânica por sua vez ativa um gerador que converte em energia elétrica. O Ciclo Rankini (caldeiras com turbinas a vapor) e os motores de combustão interna (Ciclo-Otto) são as tecnologias mais usadas para esse tipo de conversão energética (PALZ, 2002).

Mello e Grassi (2014) verificaram que os motores de combustão interna (Ciclo-Otto), são os mais viáveis tanto técnicos, quanto economicamente para conversão energética do biogás em energia elétrica nos aterros sanitários no Brasil.

### **2.3.7. Venda de créditos de carbono**

Esse tipo de negociação teve início a partir do Protocolo de Quioto, um acordo realizado na cidade de Quioto, Japão, em 1997, que estabeleceu desde então compromissos para redução das emissões de GEE, com o objetivo de mitigar os problemas advindos das ações antrópicas, acelerados desde a Revolução Industrial (LAMENZA; PEREIRA; JUNIOR, 2017).

Nesta convenção, os países desenvolvidos (maiores poluidores) concordaram em reduzir seus níveis de emissões dos GEE. Porém, caso ocorresse uma impossibilidade de efetuar tais reduções em seus próprios países, o protocolo autoriza investimentos em países em desenvolvimento (como o Brasil). A

comercialização de créditos de carbono foi prevista pelo protocolo (LAMENZA; PEREIRA; JUNIOR, 2017).

No mercado de crédito de carbono, cada tonelada de dióxido de carbono equivalente não emitida ou retirada da atmosfera, pode ser negociada no mercado mundial. No Brasil a comercialização é feita pela BM & FBOVESPA (ENERGY GREEN BRASIL).

O aterro sanitário do município de Manaus é um exemplo do comércio de créditos de carbono. O aterro elimina 40 mil toneladas de biogás por mês e obtém o retorno financeiro relativo a essa eliminação (PREFEITURA DE MANAUS).

### **2.3.8. Metodologias de mensuração e geração de biogás**

Mello e Grassi (2014) destacam a existência de vários modelos numéricos desenvolvidos para o cálculo da geração de biogás em aterros sanitários. No entanto, destacam as metodologias desenvolvidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), Banco Mundial, Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e a Companhia de Tecnologia e Saneamento do Estado de São Paulo (CETESB, 2006), como as mais usadas.

Ainda segundo Mello e Grassi (2014), a metodologia desenvolvida pela USEPA considera que os sistemas de captação de biogás não são 100% efetivos. Essa metodologia apresenta cálculos para aterros em funcionamento ou já desativados, com e sem sistema de controle.

O Banco Mundial apresenta sua metodologia em um manual. Considera a precipitação anual e a degradabilidade do resíduo para mensurar a geração de biogás. É considerado simples de compreender e aplicar. Já o método desenvolvido pelo IPCC é descrito como simplificado e obedece a uma cinética de primeira ordem, que sugere o processo de degradação ao longo do tempo. Esse método é aceito mundialmente por considerar diversas variáveis (MELLO; GRASSI, 2014).

A CETESB desenvolveu um *software* (Biogás, geração e uso energético - aterro 1.0) baseado nas metodologias da USEPA e do IPCC que utiliza algumas informações de entrada e cria uma planilha e um gráfico com estimativas e previsões (MELLO; GRASSI, 2014).

### 2.3.9. Biogás no Brasil

O aterro sanitário de Muribeca, localizado na região metropolitana do Recife, iniciou suas atividades em 1985. Possui uma área de 60 hectares e quantidade de lixo estimada em 8 milhões de toneladas. O aterro é dividido em 9 células de lixo. Apenas na célula 8 estimou-se uma emissão de 884 m<sup>3</sup> de biogás por dia, o que equivale a 570 quilos de metano. Se houvesse a comercialização do metano por meio dos Certificados de Créditos de Carbono, somente a célula 8 do aterro de Muribeca poderia gerar uma receita anual de 21 mil dólares (MACIEL, 2003).

Na cidade de Caieiras em São Paulo, foi inaugurada em setembro de 2016 a Termoverde Caieiras que considerando possíveis perdas, tem uma média para a geração de energia que chega a 26 megawatts (MW). Toda essa energia é gerada com biogás proveniente de aterro sanitário (AGÊNCIA BRASIL).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existiam em 2016 10 empreendimentos no país com uma potência instalada de 78,6 MW utilizando o biogás de aterro sanitário (TAB. 4).

Tabela 4 - Empreendimentos de geração de eletricidade com biogás de RSU

Usina	Cidade	Potência (kW)	Percentual do total
São João Biogás	São Paulo – SP	24.640	31,4 %
Salvador	Salvador – BA	19.730	25,1 %
Biotérmica Recreio	Minas do Leão – RS	8.556	10,9 %
Bandeirantes	São Paulo – SP	4.624	5,9 %
Asja BH	Belo Horizonte – MG	4.278	5,4 %
CTR Juiz de Fora	Juiz de Fora – MG	4.278	5,4 %
Curitiba Energia	Fazenda Rio Grande – PR	4.278	5,4 %
Tecipar	Santana de Parnaíba – SP	4.278	5,4 %
Uberlândia	Uberlândia – MG	2.852	3,6 %
Itajaí Biogás	Curitiba – PR	1.065	1,4 %
Total		78.579	100,0 %

Fonte: ANEEL, 2016.

### **3. METODOLOGIA**

O estudo foi desenvolvido considerando o aterro sanitário do município de Arcos, localizado na região centro-oeste do estado de Minas Gerais. Conforme dados do último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017), o município possui uma população de 39.811 habitantes. A estimativa teórica da geração de metano pelo aterro foi feita utilizando uma metodologia conhecida.

#### **3.1. Características da área de estudo**

O aterro nomeado de Amâncio Alves tem acesso por estrada não pavimentada conhecida como estrada da Prata (localidade Cristais) e fica distante cerca de 5 quilômetros da cidade. Ocupando uma área de 22,6 hectares (há), teve o início de suas atividades em 2003 e o projeto é operar até o ano de 2033. Atualmente o aterro recebe uma média de 30 a 35 toneladas de resíduos por dia, onde 3% desse total são destinados a reciclagem e o restante de 97% são aterrados (PREFEITURA MUNICIPAL DE ARCOS).

#### **3.2. Estimativa do potencial de geração de metano**

Existem vários métodos para estimar a quantidade de metano gerado em aterros sanitários. No entanto, o escolhido para este trabalho foi o desenvolvido pelo IPCC em 1996, pois ao mesmo tempo que é simples, o método leva em consideração vários parâmetros que aproximam a estimativa da real geração de metano. Utilizam-se dados característicos da quantidade de carbono orgânico degradável, fluxo de resíduo do ano em estudo, ano de início das operações do aterro, dentre outras características importantes (COELHO, 2011; MELLO, 2014; MENDES, 2007; NECKER, 2013).

As equações elaboradas pelo IPCC (1996) se fazem presentes no Módulo 5 (Resíduos) e Módulo 6 (Lixo) do Guia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa.

De acordo com o IPCC (1996), para o cálculo da emissão de gás metano utiliza-se a Equação 1:

$$E_{CH_4} = K \times R_x \times L_0 \times e^{-K(X-T)} \quad (1)$$

Onde:

$E_{CH_4}$  – Emissão de metano ( $m^3CH_4/ano$ );

$K$  – Constante de decaimento;

$R_x$  – Fluxo de resíduo do ano (tonRSD);

$L_0$  – Potencial de geração de metano ( $m^3CH_4/tonRSD$ );

$X$  – Ano atual;

$T$  – Ano de deposição do resíduo no aterro (início de operação).

De acordo com o IPCC (1996) para o clima tropical cada componente do resíduo úmido apresenta um valor de  $K$ . Esse valor representa a velocidade de degradação dos resíduos. Dessa forma tem-se:

- Para papel:  $K = 0,07$
- Para resíduos orgânicos:  $K = 0,17$
- Para têxteis:  $K = 0,07$
- Para madeira:  $K = 0,035$

Para calcular  $E_{CH_4}$  o potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ ) deve ser calculado anteriormente. Este pode ser usado tanto na própria metodologia do IPCC quanto em outras metodologias ou *softwares* para estimativa de metano gerado em aterros (IPCC, 1996).

O  $L_0$  pode ser calculado pela Equação 2:

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_F \times F \times \left(\frac{4}{3}\right) \quad (2)$$

Sendo que:

$L_0$  – o potencial de geração de metano dos resíduos ( $m^3CH_4/tonRSD$ );

$FCM$  – fator de correção de metano;

$COD$  – carbono orgânico degradável, dado em Kg de C/Kg de resíduo;

$COD_F$  – fração de  $COD$  dissociada;

$F$  – fração do metano presente no biogás em volume;

(4/3) – fator de conversão do carbono em metano, dado em Kg de CH<sub>4</sub>/Kg de C.

O Fator de Correção do Metano (*FCM*) considera o manejo, a disposição e a qualidade do aterramento do resíduo. O valor de *FCM* varia conforme a qualidade de compactação dos resíduos, uma vez que a maneira como os resíduos são depositados e manejados no aterro influencia na geração de metano. Se aterrados de forma inadequada, produzem menor quantidade de metano em relação aos bem aterrados (NECKER; ROSA, 2013). O valor de *FCM* pode ser de 0,4, 0,8, ou 1. O valor de 0,4 é usado para lugares de deposição inadequados e com profundidade de resíduo abaixo de 5 metros; 0,8 é o valor usado quando a deposição do resíduo é inadequada, porém com profundidades superiores a 5 metros; e 1 é o valor utilizado quando o resíduo é depositado em local adequado, com deposição controlada, material de cobertura, compactação mecânica e nivelamento do terreno (IPCC, 1996). A partir da TAB. 5 podem ser observados os valores de *FCM*.

Tabela 5 - Fator de correção de metano para as condições do aterro

<b>Tipo de aterro</b>	<b><i>FCM</i> (fator de correção de metano)</b>
Adequado – aterro bem gerenciado	1,0
Inadequado – profundo (>5 metros de lixo)	0,8
Inadequado – raso (<5 metros de lixo)	0,4

Fonte: IPCC, 1996.

A Fração de metano presente no biogás (*F*) pode variar entre um aterro e outro, porém, quando não se tem um valor real de metano presente no biogás, recomenda-se utilizar a estimativa de 0,5, já que a quantidade de metano presente no biogás de aterro é geralmente 50% (COELHO; ALENCAR; OLIVEIRA, 2011).

O Carbono Orgânico Degradável (*COD*) é obtido a partir da composição gravimétrica e da quantidade de carbono presente em cada componente dos resíduos sólidos urbanos (NECKER; ROSA, 2013). Brito (2006) apresenta o teor de *COD* dos principais componentes dos resíduos sólidos (TAB. 6).

Tabela 6 - Teor de COD para cada componente do RSU

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

Fonte: BRITO, 2006.

O valor de *COD* deve ser calculado pela Equação 3:

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,4 \times D) + (0,3 \times E) \quad (3)$$

Sendo que:

*A* – fração de papel e papelão dos resíduos;

*B* – fração de detritos de parques e jardins dos resíduos;

*C* – fração de restos de alimentos dos resíduos;

*D* – fração de tecidos dos resíduos;

*E* – fração de madeira dos resíduos.

A fração dissociada de Carbono Orgânico Degradável (*COD<sub>F</sub>*)

“É a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, varia em função da temperatura na zona anaeróbia do aterro sanitário. Assume-se que a temperatura na zona anaeróbia de um local de disposição de resíduos sólidos permanece constante por volta dos 35°C, não obstante da temperatura ambiente.” (BIRGEMER; CRUTZEN, 1987 apud NECKER; ROSA, 2013, p. 3419).<sup>1</sup>

O valor de *COD<sub>F</sub>* deve ser calculado pela Equação 4:

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

Sendo que:

*T* – temperatura.

<sup>1</sup> BIRGEMER, H. G.; CRUTZEN, P. J. **The production of metano from solid waste.** Journal of geophysical research. v. 92, n. D2. 1987. p. 2181- 2187.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente é calculado o valor de  $COD_F$  utilizando-se a Equação 4. Assim como Barros (2013) e a maioria dos trabalhos relacionados, assumiu-se que a temperatura na zona anaeróbia de disposição dos resíduos permanece constante em 35°C. Substituindo o valor na Equação 4, têm-se:

$$COD_F = 0,014 T + 0,28$$

$$COD_F = 0,014 (35) + 0,28$$

$$COD_F = 0,77$$

Portanto, 77% do carbono presente nos resíduos está disponível para a decomposição bioquímica.

Necker e Rosa (2013) quando calcularam a estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná também encontraram o valor de  $COD_F$  igual a 0,77. Uma vez que a equação está apenas em função da temperatura, e esta não sofre grande alteração de uma região do país para outra, possivelmente a fração de carbono orgânico degradável dissociada encontrada no cálculo de qualquer aterro utilizando a mesma metodologia terá o mesmo valor.

Para o cálculo do  $COD$  utilizou-se os resultados encontrados por Costa (2015), que determinou a composição gravimétrica dos resíduos da cidade vizinha Lagoa da Prata por meio do quarteamento de amostra.

Em seu trabalho, Costa (2015) além de determinar, comparou os resultados da composição gravimétrica dos resíduos da cidade de Lagoa da Prata com cidades menores, do mesmo porte, e maiores. O resultado apresentou pouca variação em porcentagem. A principal diferença foi em relação as cidades maiores que apresentaram maior porcentagem de plásticos em seus resíduos. As cidades menores e do mesmo porte que Lagoa da Prata apresentaram maior porcentagem de matéria orgânica.

Na TAB. 7 é apresentada a composição gravimétrica encontrada por Costa (2015).

Tabela 7 - Composição gravimétrica do RSU em Lagoa da Prata

<b>Componente</b>	<b>Fração presente nos resíduos</b>
Matéria Orgânica	60,56%
Plástico	1,94%
Vidro	2,74%
Papel e Papelão	8,80%
Metal não-ferroso	4,32%
Couro e Borracha	2,07%
Têxtil	2,79%
Madeira	3,55%
Outros	13,23%

Fonte: COSTA, 2015.

De acordo com a TAB. 6, Brito (2006) classifica os 5 componentes dos resíduos urbanos que possui Carbono Orgânico Degradável e quais as porcentagens de *COD* (em massa) para cada um dos componentes. Porém, Costa (2015) quando determinou a composição gravimétrica dos resíduos da cidade de Lagoa da Prata considerou que a fração de matéria orgânica continha dois dos componentes (restos de alimentos e resíduos de parques e jardins) antes separados por Brito (2006). Para tanto a Equação 3 sofreu uma pequena alteração onde a média da porcentagem de *COD* da TAB. 6 dos componentes *B* e *C* (0,16 Kg de C/Kg de resíduo) é multiplicado a fração de matéria orgânica (60,56%) encontrada por Costa (2015).

Da Equação 3 têm-se:

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,4 \times D) + (0,3 \times E)$$

$$COD = (0,4 \times A) + (0,16 \times (B + C)) + (0,4 \times D) + (0,3 \times E)$$

$$COD = (0,4 \times 0,0880) + (0,16 \times 0,6056) + (0,4 \times 0,0279) + (0,3 \times 0,0355)$$

$$COD = (0,0352) + (0,096896) + (0,01116) + (0,1065)$$

$$COD = 0,249756 \text{ Kg de C/Kg de resíduo}$$

Portanto, para cada quilo de resíduo que é depositado no aterro existem 0,249756 quilos de carbono.

O valor encontrado por Necker e Rosa (2013) de *COD* para o futuro aterro de Ji-Paraná foi de 0,1554 Kg de carbono por Kg de resíduo. Uma vez que os autores consideraram apenas dois dos cinco componentes dos resíduos para o cálculo, o valor encontrado se apresentou baixo quando comparado com o encontrado para o

aterro de Arcos (0,249756 Kg de carbono por Kg de resíduo), que considerou os cinco componentes dos resíduos que apresentam carbono em sua composição.

De acordo com o funcionário da prefeitura responsável, o aterro sanitário de Arcos conta com as medidas operacionais corretas para o confinamento dos resíduos, como a impermeabilização do solo, drenagem do biogás através de 6 dutos instalados, drenagem do chorume e cobertura dos resíduos com terra. Como o tratamento dos resíduos ocorre de forma correta, o fator de correção do metano ( $FCM$ ) utilizado para o cálculo do potencial de geração de metano ( $L_o$ ) é 1,0 (aterro bem gerenciado) (PREFEITURA MUNICIPAL DE ARCOS).

Como o aterro não possui a real quantidade de metano que está presente no biogás considera-se que essa quantidade seja 50%. Coelho, Alencar e Oliveira (2011) e Necker e Rosa (2013) também utilizaram a fração de metano presente no biogás ( $F$ ) como 0,5.

De posse de todos esses valores e do  $COD$  e  $COD_F$  já calculados é possível encontrar o potencial de geração de metano dos resíduos a partir da Equação 2.

Da Equação 2 têm-se:

$$L_o = FCM \times COD \times COD_F \times F \times (4/3)$$

$$L_o = (1) \times (0,249756) \times (0,77) \times (0,5) \times (4/3)$$

$$L_o = 0,12820808 \text{ Kg de CH}_4/\text{Kg de RSD}$$

Portanto, para cada quilo de resíduo depositado no aterro existe o potencial de gerar 0,12820808 quilos de metano ( $CH_4$ ).

Para que haja uma consistência nas unidades utilizadas, é aconselhável que se tenha  $L_o$  em  $m^3$  de  $CH_4$  por tonelada de RSD. Assim como no trabalho de Coelho, Alencar e Oliveira (2011) dividiu-se o resultado de  $L_o$  que estava em Kg de  $CH_4$ /Kg de RSD pela densidade do metano para se obter o requerido valor em  $m^3$  de  $CH_4$ /tonRSD. A densidade utilizada foi de  $0,0007168 \text{ t/m}^3$ . Portanto, tem-se o valor de  $L_o$  como  $178,861719 \text{ m}^3$  de  $CH_4$ /tonRSD.

Segundo o funcionário da prefeitura responsável pelo aterro, todo o resíduo produzido em Arcos é coletado (tanto da cidade como da zona rural) e enviado para o aterro. A prefeitura só começou a fazer um rígido controle da quantidade de resíduo que chega no aterro a partir do primeiro semestre de 2018. Portanto, o volume de resíduo de 2017 foi estimado (PREFEITURA MUNICIPAL DE ARCOS).

Ainda de acordo com Miller (responsável pelo aterro), nem todo o resíduo que é coletado é encaminhado para o aterramento. Existe uma associação de recicladores que atua em um galpão no próprio espaço físico do aterro, separando os materiais que podem ser vendidos e destinados a reciclagem. A associação é pequena, conta com poucos colaboradores e consegue separar apenas 3% do volume de resíduo que chega ao aterro, sendo o resto aterrado (PREFEITURA MUNICIPAL DE ARCOS).

Atualmente, o aterro conta com 6 drenos para captação e queima do biogás gerado. Porém não é feito nenhum controle da quantidade de gás que é queimado e nem um monitoramento caso alguma das chamas se apaguem (PREFEITURA MUNICIPAL DE ARCOS).

Costa (2015) encontrou com seu estudo uma geração *per capita* de 0,81 quilos de resíduo por dia por habitante na cidade de Lagoa da Prata. Como o valor de resíduo para o ano de 2017 será estimado, utilizou-se a mesma geração *per capita* de resíduo encontrada por Costa (2015) devido ao fato das cidades apresentarem várias características em comum. Multiplicando-se o valor de 0,81 Kg de resíduo gerado por dia por habitante, por 39811, que era o número de habitantes de Arcos em 2017, tem-se 32.246,91 Kg de resíduo que são gerados por dia na cidade. Multiplicando o valor encontrado por 365 (para achar a quantidade de resíduo gerada durante todo o ano), tem-se 11.770.122,15 Kg de resíduo gerado na cidade no ano de 2017. Transformando o valor para toneladas, obtém-se 11.771,12215 toneladas para o ano de 2017.

Como 3% do total de resíduo é absorvido pela associação de recicladores, apenas 97% é aterrado. Portanto, chegou-se a um total encaminhado para aterramento em 2017 de 11.417,98849 toneladas.

Na Equação 1, o valor de  $K$  utilizado, é a média da constante de decaimento de todos os componentes do resíduo. A média encontrada para  $K$  foi de 0,09.

Pela Equação 1, tem-se:

$$E_{CH_4} = K \times R_X \times L_0 \times e^{-K(X-T)}$$

$$E_{CH_4} = 0,09 \times 11.417,98849 \times 178,861719 \times e^{-0,09(2018-2003)}$$

$$E_{CH_4} = 47.648,79916 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ano}$$

Como utilizou-se a fração de metano presente no biogás com valor de 50% assim como Coelho, Alencar e Oliveira (2011) e Necker e Rosa (2013), a quantidade de biogás gerada no aterro é o dobro da quantidade de gás metano encontrada. Então basta multiplicar 47.648,79916 m<sup>3</sup> de metano por ano por 2, obtendo-se 95.297,59833 m<sup>3</sup> de biogás por ano. Desde que a fração de metano seja 50%, o volume de biogás será sempre o dobro do volume de metano.

Costa, Alencar e Oliveira (2011) encontraram em seu trabalho, com a mesma metodologia, um volume de 188.082,756 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> para o aterro sanitário de Palmas, no Tocantins, em 2010. Como o estudo também trabalhou com uma porcentagem de 50% de metano presente no biogás, o volume de biogás foi de 376.165,512 m<sup>3</sup>. O estudo considerou apenas os resíduos recebidos pelo aterro até o mês de setembro do mesmo ano.

A geração de biogás *per capita* anual na cidade de Arcos pode ser encontrada dividindo-se o volume total da geração de biogás (95.297,59833 m<sup>3</sup>) pelo total de habitantes (39.811 hab.), chegando assim a uma geração *per capita* do gás de 2,39 m<sup>3</sup>/hab.ano.

A fim de se comparar os resultados do trabalho de Costa, Alencar e Oliveira (2011) *per capita*, a mesma divisão foi feita para a cidade de Palmas. Sendo o total de biogás gerado 376.165,512 m<sup>3</sup>, e a população em 2010 (ano do estudo) de 217.056 habitantes (IBGE, 2017), chegou-se a uma geração de gás de 1,77 m<sup>3</sup>/hab. em 2010.

Alguns fatores contribuíram para essa diferença significativa da geração *per capita* de biogás das duas cidades. Um deles é a diferença de operação do aterro, que influencia diretamente na geração do gás, pois os resíduos aterrados de forma inadequada produzem menor quantidade de biogás do que aqueles bem aterrados. Além do aterro de Arcos apresentar maior qualidade no aterramento dos resíduos, também conta com maior tempo de atividade. Outro fator é que no aterro de Palmas considerou-se apenas os resíduos recebidos até o mês de setembro do ano estudado, o que acabou contribuindo para que o resultado *per capita* encontrado em Arcos fosse maior que em Palmas.

Com base na TAB. 3, é possível construir uma nova tabela comparando a eficiência energética do biogás gerado pelo aterro em 2017. Observa-se através da TAB. 8 a equivalência de 95.297,59833 m<sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis.

Tabela 8 - Equivalência de 95.297,59833 m<sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis

<b>Combustível</b>	<b>Quantidade equivalente a 95.297,59833 m<sup>3</sup> de biogás</b>
Carvão vegetal	76.238,08 Kg
Lenha	142.946,40 Kg
Óleo diesel	52.413,68 L
Querosene	55.272,61 L
Gasolina amarela	58.131,53 L
GLP (Gás liquefeito de petróleo)	42.883,92 L
KWh (Quilowatt-hora)	136.275,57
Álcool carburante	76.238,08 L
Carvão mineral	70.520,22 Kg

Fonte: AUTOR, 2018.

A TAB. 8 foi construída considerando-se uma captação e conversão energética de 100% do gás produzido, sem perdas durante nenhum dos processos.

Para a geração de energia elétrica a partir do biogás faz-se necessário a implantação de um sistema motogerador no qual o gás será o combustível. O objetivo do presente trabalho é estimar a quantidade e discorrer a respeito das possibilidades e alternativas de uso do gás, não dando importância a viabilidade, o que abre caminho para futuros trabalhos envolvendo o aterro de Arcos.

Considerando o consumo médio residencial no sudeste do país de 171 KWh/mês (EPE, 2017), uma residência consome em média 2052 KWh/ano. Como foi possível observar na TAB. 8, o biogás gerado no aterro de Arcos em 2017 foi equivalente a 136.275,57 KWh. Portanto, caso o gás proveniente da decomposição dos resíduos fosse totalmente captado e destinado a geração de energia elétrica, seria possível abastecer aproximadamente 66 residências durante todo o ano.

Arcos sedia inúmeras grandes empresas de calcinação e cimenteiras, que demandam altas quantidades de combustíveis para seus fornos. Uma outra alternativa seria utilizar o biogás como coprocessamento nessas indústrias.

Enfim, o biogás é um combustível, que está sendo gerado ininterruptamente no aterro e emitido para a atmosfera sem muito controle, as vezes é queimado e as vezes não. Infelizmente essa realidade de Arcos é também a de inúmeras cidades espalhadas pelo país.

O objetivo com esse trabalho foi estimar a quantidade, mostrar o potencial, e algumas das possíveis aplicações do biogás. A sua utilização demanda alguns investimentos, porém pode trazer benefícios econômicos, sociais e ambientais.

O método utilizado por este trabalho realiza uma estimativa teórica. É importante ressaltar que para avaliar a real geração de metano no aterro seria necessário fazer medições de campo tanto da quantidade de biogás, quanto da concentração de metano presente no mesmo, e a partir disso fazer um projeto específico para o aproveitamento.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Concluiu-se que o objetivo do trabalho foi alcançado, com a estimativa de geração de biogás para o ano de 2017 no aterro sanitário de Arcos chegando ao volume de  $95 \times 10^3 \text{ m}^3$ . Como exemplo, se esse volume de gás fosse utilizado em um motogerador para conversão em energia elétrica e não houvesse nenhuma perda no processo, seria possível abastecer aproximadamente 66 residências durante todo o ano. Esse volume de gás ainda equivale a mais de 52 mil litros de Óleo Diesel.

Já existem algumas plantas em funcionamento no Brasil para o aproveitamento energético do biogás de aterro, porém concluiu-se durante o trabalho que isso só ocorre quando o volume de resíduo do aterro é muito grande, provavelmente justificado pelo custo de investimento em sistemas de conversão energética.

Portanto, é uma possibilidade para futuros trabalhos desenvolver projetos de aproveitamento energético do biogás para aterros sanitários de pequeno e médio porte assim como o de Arcos, pois existem inúmeros pelo país e na maior parte deles o gás simplesmente é lançado para a atmosfera.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGÁS. Associação Brasileira de Biogás e Biometano. Notícias. **A biogás participa do primeiro dia do fórum sul brasileiro de biogás e biometano**. 2018. Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/abiogas-participa-do-primeiro>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

AGÊNCIA BRASIL. Últimas notícias. **Maior termoelétrica com combustível renovável é inaugurada em São Paulo**. 2016. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2016-09/maior-termeletrica-com-combustivel-renovavel-e-inaugurada-em-sao-paulo>>. Acesso em: 22 mai. 2018.

ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. 2008. 134 p. Tese de mestrado em Engenharia Civil (Centro de tecnologia e Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. 2000. 164 p. Dissertação (Mestre em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração. **Usinas do tipo UTE em operação**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=3>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://www.abetre.org.br/estudos-e-publicacoes/publicacoes/publicacoes-abetre/classificacao-de-residuos>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: Gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

BARROS, T. F. de. **Geração de energia com biogás gerado em aterro sanitário**. 2013. 53 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/108487/000946361.pdf?sequencia=1>>. Acesso em: 14 mai. 2018.

BRITTO, M. L. C. P. S. **Taxa de emissão de biogás e parâmetros de biodegradação de resíduos sólidos urbanos no aterro metropolitano centro**. 2006. 187 p. Dissertação de mestrado (Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2006. Disponível

em:

<[http://www.teclim.ufba.br/site/material\\_online/dissertacoes/dis\\_maria\\_britto.pdf](http://www.teclim.ufba.br/site/material_online/dissertacoes/dis_maria_britto.pdf)>.

Acesso em: 13 ago. 18.

BUCUSSI, A. A. **Introdução ao conceito de energia**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Disponível em: <[https://www.if.ufrgs.br/tapf/v17n3\\_Bucussi.pdf](https://www.if.ufrgs.br/tapf/v17n3_Bucussi.pdf)>. Acesso em: 17 mai. 2018.

CEMPRE. Compromisso Empresarial para Reciclagem. **O alto potencial do biogás como fonte de energia e combustível**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://cempre.org.br/informa-mais/id/63/o-alto-potencial-do-biogas-como-fonte-de-energia-e-combustivel>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

CETESB. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. **Biogás: projetos e pesquisas no Brasil**. Governo de São Paulo; Secretaria do Meio Ambiente; e CETESB. Organização de Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer. Responsável técnico: João Wagner Silva Alves. São Paulo, SMA, 2006. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/livrobiogas.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2018.

COELHO, T. C.; ALENCAR, R.; OLIVEIRA, R. M. S. de. Estimativa da produção teórica do metano gerado no aterro sanitário de Palmas – TO. **Fórum ambiental da alta paulista**. São Paulo, v. 7, n. 12, p. 1458-1470, 2011. Disponível em: <[http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum\\_ambiental/article/viewFile/214/213](http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/viewFile/214/213)>. Acesso em: 13 ago. 18.

COSTA, P. R. P. **Estudo de caso sobre a produção quantitativa e qualitativa dos resíduos sólidos urbanos gerados na cidade de Lagoa da Prata**. 2015. 44 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Centro Universitário de Formiga-UNIFOR-MG, Formiga, 2015.

ENERGY GREEN BRASIL. Notícias. **Como funciona o mercado de créditos de carbono**. Disponível em: <<http://energygreenbrasil.com.br/?p=6512>>. Acesso em: 23 mai. 2018.

EPE. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico de energia elétrica**. Brasília DF, 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>>. Acesso em: 01 out. 18.

GALIZA, J. de J. M. de.; CAMPOS, A. F. **Regulação de resíduos sólidos urbanos para geração de energia a partir do biogás: estudo de viabilidade em regiões da grande Vitória/ES**. R. Rio de Janeiro, v. 20, n. 40, p. 56-69, jul./dez. 2015. Disponível em: <<http://apl.unisuam.edu.br/revistas/index.php/revistaaugustus/article/view/19811896.2015v20n40p56/579>>. Acesso em: 23 mai. 2018.

ICLEI. Conselho Internacional para as Iniciativas Ambientais Locais. **Manual para aproveitamento de biogás volume 1 - aterros sanitários**. São Paulo, 2009.

Disponível em: <[http://www.resol.com.br/cartilha12/manual\\_iclei\\_brazil.pdf](http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf)>. Acesso em: 08 mai. 2018.

ICLEI. Resíduos. **Energia e biogás**. Disponível em: <[http://www.iclei.org.br/residuos/site/?page\\_id=413#](http://www.iclei.org.br/residuos/site/?page_id=413#)>. Acesso em: 23 mai. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Por cidade e estado. **Estatísticas**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/por-cidade-estado-estatisticas.html?t=destaques&c=3104205>>. Acesso em: 13 ago. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Publications. **Volume 2 workbook**. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5.html>>. Acesso em: 13 ago. 2018.

JUNIOR, A. B. de C. Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. In: \_\_\_\_\_. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. São Paulo: Rimas Artes e Textos, 2009. cap. 2, p. 12-21. Disponível em: <[https://social.stoa.usp.br/articles/0016/2659/resenha1\\_trabalho\\_1\\_de\\_SMC\\_-\\_professor\\_Paulo\\_Almeida.pdf](https://social.stoa.usp.br/articles/0016/2659/resenha1_trabalho_1_de_SMC_-_professor_Paulo_Almeida.pdf)>. Acesso em: 09 mai. 2018.

KARLSSON, T. **Manual básico de biogás**. 1. ed. Lajeado: Univates, 2014. Disponível em: <[https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf\\_71.pdf](https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf)>. Acesso em: 07 mai. 2018.

LAMENZA, A.; PEREIRA, R. da S.; JUNIOR, S. B. Comercialização e gestão de projetos de créditos de carbono do Brasil. **Revista de administração da UNIMEP**. São Paulo, v. 15, n. 2, p. 100-127, jan./abr. 2017. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/2737/273750689005.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2018.

LIMA, A. de. et al. Análise da recuperação energética do biogás de aterros sanitários. **Revista InterfacEHS**. São Paulo, v. 12, n. 1, p. 68-81, jun. 2017. Disponível em: <[http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2017/06/6-188\\_Artigo\\_revisado.pdf](http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2017/06/6-188_Artigo_revisado.pdf)>. Acesso em: 21 mai. 2018.

LIMA, F. P. **Energia no tratamento de esgoto: análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás**. 2005. 142 p. Dissertação de Mestrado (Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Eletrotécnica e Energia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <[http://www.iee.usp.br/producao/2005/Teses/Tese\\_FelipeLima.pdf](http://www.iee.usp.br/producao/2005/Teses/Tese_FelipeLima.pdf)>. Acesso em: 14 mai. 2018.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003. Disponível em: <[https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5806/1/arquivo6638\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5806/1/arquivo6638_1.pdf)>. Acesso em: 14 mai. 2018.

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. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2014. Disponível em:

<[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2179/1/FB\\_COEAM\\_2013\\_2\\_04.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2179/1/FB_COEAM_2013_2_04.pdf)>. Acesso em: 23 mai. 2018.

MENDES, L. G. G. Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. **Revista biociência**. Taubaté, v. 13, n. 3-4, p. 134-142, jul./dez. 2007.

NECKER, H. S.; ROSA, A. L. D. da. Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná – RO. **Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental – REGET**. Santa Maria, v. 17, n. 17, p. 3416-3424, dez. 2013.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. [S.l.]: Hemus, 2002.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto residencial da USP – Estudo de caso**. 2006. 153 p. Dissertação (Mestre em Energia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em:

<[http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/tese\\_vanessapecora.pdf](http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/tese_vanessapecora.pdf)>. Acesso em: 15 mai. 2018.

PORTAL DO BIOGÁS. Tecnologia. **Formas de uso do biogás**. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/formas-de-uso-do-biogas/>>. Acesso em: 21 mai. 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ARCOS. Secretaria do Meio Ambiente. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <[miller.planejamento@arcos.mg.gov.br](mailto:miller.planejamento@arcos.mg.gov.br)>. Acesso em: 23 ago. 2018.

PREFEITURA DE MANAUS. Notícias. **Aterro de Manaus gera 40 mil toneladas de crédito de carbono**. Disponível em: <<http://www.manaus.am.gov.br/noticia/aterro-de-manaus-gera-40-mil-toneladas-de-credito-de-carbono/>>. Acesso em: 23 mai. 2018.

QUADROS, R.; TAVARES, A. N.; BAJAY, G. V. dos S. S. A importância do contexto industrial nacional na adoção de políticas para o aproveitamento energético do biogás oriundo dos resíduos sólidos urbanos. **Qualitas Revista Eletrônica**, v. 17, n. 2, p. 21-38, mai./ago. 2016. Disponível em:

<<http://revista.uepb.edu.br/index.php/qualitas/article/view/3055/pdf>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

REIS, L. B. dos; FADIGAS, E. A. F. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. Ver. E atual. Barueri: Manole, 2012.

SANTAELLA, S. T. et al. **Resíduos sólidos e a atual política ambiental brasileira**. Fortaleza: Labomar, 2014. Disponível em:  
<<http://www.repositoriobib.ufc.br/000011/00001121.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2018.

SEBRAE-MS. **Gestão de resíduos sólidos: uma oportunidade para o desenvolvimento municipal e para as micro e pequenas empresas**. São Paulo: Instituto Envolverde: Ruschel & Associados, 2012. Disponível em:  
<[http://www.resol.com.br/cartilhas/gestao\\_de\\_residuos\\_solidos-sebrae.pdf](http://www.resol.com.br/cartilhas/gestao_de_residuos_solidos-sebrae.pdf)>. Acesso em: 19 mar. 2018.

VAN ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro: Ibam, 2007. Disponível em:  
<[http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu\\_urbano/\\_publicacao/125\\_publicacao12032009023918.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_publicacao/125_publicacao12032009023918.pdf)>. Acesso em: 07 mai. 2018.

VECCHIA, R. **O meio ambiente e as energias renováveis: instrumentos de liderança visionária para a sociedade sustentável**. Barueri: Manole, 2010.