

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO “STRICTO SENSU” EM  
BIOENERGIA – NÍVEL DE MESTRADO**

RAYANA SAMEK

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE BIOMETANO DE RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS PARA USO EM TRANSPORTE URBANO:  
CASO DE FOZ DO IGUAÇU**

CASCADEL – PR – BRASIL

JULHO DE 2017

RAYANA SAMEK

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE BIOMETANO DE RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS PARA USO EM TRANSPORTE URBANO:  
CASO DE FOZ DO IGUAÇU**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Bioenergia, área de concentração em Bioenergia.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Andreia Cristina Furtado

CASCADEL – PR – BRASIL  
JULHO DE 2017

# TERMO DE APROVAÇÃO

RAYANA SAMEK

## AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE BIOMETANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA USO EM TRANSPORTE URBANO: CASO DE FOZ DO IGUAÇU

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Bioenergia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza  
(Orientador)

Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira

Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Cascavel, 20 de julho de 2017.

# **AValiação DO POTENCIAL DE BIOMETANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA USO EM TRANSPORTE URBANO: CASO DE FOZ DO IGUAÇU**

**Autora:** Rayana Samek

**Orientador:** Samuel Nelson Melegari de Souza

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Bioenergia; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Rua Universitária, 2069 - Jardim Universitário, Cascavel - PR, CEP: 85819-110, defendida em 20 de julho de 2017. 108 p.

## **RESUMO**

O aumento acelerado da produção de resíduos sólidos pela humanidade tem sido alvo de preocupação mundial. Porém, com o gerenciamento adequado destes resíduos, torna-se possível a geração do biogás, recuperado como fonte energética e podendo inclusive ser utilizado como combustível. A utilização do biogás como combustível veicular é uma realidade no Brasil e no mundo tendo em vista as iniciativas desta natureza que já estão sendo implantadas e praticadas. Dentro deste cenário, o presente estudo se propôs a avaliar o potencial do biometano produzido na cidade de Foz do Iguaçu, estado do Paraná, para o uso em transporte urbano de passageiros: ônibus e taxis. Para isso, obteve-se a quantificação do biogás gerado no aterro da cidade, seu potencial de geração e emissão de metano, a estimativa do fluxo de resíduos conforme número de habitantes e consumo combustível das frotas de ônibus e taxis. A partir do levantamento destes dados, buscou-se o potencial de substituição de veículos a diesel (ônibus) e a gasolina (taxis) por veículos movidos a biometano e a viabilidade econômica envolvida neste processo. Conclui-se que o aterro possui capacidade de fornecimento para as frotas de ônibus (50% por 17 anos) e de taxis (100% por 19 anos) e que o custo de produção do biometano em Foz do Iguaçu é baixo. Por outro lado, a conversão dos veículos para o uso do biometano é onerosa. Obteve-se a seguinte situação: a conversão dos ônibus é mais custosa que dos taxis, sendo recomendável inicialmente que a frota de taxis seja convertida para o uso do biometano como combustível, o que acarretará em um fluxo de caixa positivo e menor tempo de retorno do investimento, indicando a viabilidade e a economia deste processo.

Palavras-chave: Biometano. Combustível. Veículos. Transporte urbano.

# EVALUATION OF THE POTENTIAL OF BIOMETHANE OF SOLID WASTE TO USE URBAN TRANSPORT

**Author:** Rayana Samek

**Advisor:** Samuel Nelson Melegari de Souza

Master thesis; Postgraduate programme in Bioenergy; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Universitária Street, 645; Cascavel -PR, Brazil, ZIP CODE: 85819-110, defended in March 20, 2017. 108 p.

## ABSTRACT

The several increase of solid waste production by humanity has become a worldwide concern. Nevertheless, with the appropriate solid waste management the possibility of biogas generation arise, recovered as an energy source then can be applied as even as fuel. The use of biogas as a vehicle fuel is a reality in Brazil and in the world, bearing in mind the initiatives and actions of this nature were already impleaded and practiced. Within this scenario, the current project aimed to evaluate the biomethane potential production in the city Foz do Iguassu, state of Paraná, for usage in urban transport: Buses and cabs. To that end, the biogas, which was produced in the city's landfill, was quantified, also was its potential for methane emission and generation, the estimate of the waste flux according to the number of citizens and the fuel consumption of the bus and taxi fleets. Due to these data, was sought the potential of replacing diesel vehicles (buses) and gasoline (taxis) by biomethane fuelled-vehicles and the economic viability involved in this process. It is concluded that the landfill has capacity for the bus fleets (50% for 17 years) and for taxis (100% for 19 years) and that the production cost of the biomethane in Foz do Iguassu is low. On the other hand, the vehicles conversion to the use of biomethane is expensive. Therefore, the result obtained was the following situation: the conversion of buses is more costly than cabs, and it is initially recommended that the taxi fleet turn to the use of biomethane as fuel, which one will react in a positive cash flow and a shorter return investment time, demonstrating the feasibility and economy of this process.

Keywords: Biomethane. Fuel. Vehicles. Urban transport.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - Balanço Energético Nacional - 2016 .....	18
<b>FIGURA 2</b> - Aterro Sanitário.....	24
<b>FIGURA 3</b> - Lixão .....	28
<b>FIGURA 4</b> - Aterro Controlado .....	29
<b>FIGURA 5</b> - Geração de RSU no Brasil em 2015 .....	31
<b>FIGURA 6</b> - Coleta de RSU no Brasil em 2015.....	31
<b>FIGURA 7</b> - Disposição final de RSU no Brasil em 2015 .....	32
<b>FIGURA 8</b> - Disposição final de RSU no Brasil em relação à adequação do destino em 2015 .....	32
<b>FIGURA 9</b> - Usina de biogás Könnern, Alemanha. ....	52
<b>FIGURA 10</b> - Número de veículos movidos a gás natural (GNV) na Suécia (de 1995 a 2012). ....	54
<b>FIGURA 11</b> - Usina de Biodigestão de Sacramento, Califórnia, EUA. ....	56
<b>FIGURA 12</b> - Município de Foz do Iguaçu (PR) .....	65
<b>FIGURA 13</b> - Células de Acondicionamento de Resíduos. ....	67
<b>FIGURA 14</b> - Produção estimada de biometano em Foz do Iguaçu / PR durante 35 anos .....	79
<b>FIGURA 15</b> - Disponibilidade de biometano (%) em função da produção .....	80
<b>FIGURA 16</b> - Disponibilidade de biometano (%) em função do número de ônibus atendidos.....	81
<b>FIGURA 17</b> - Relação entre número de ônibus atendidos e tempo de atendimento (em anos) .....	82
<b>FIGURA 18</b> - Relação entre número de táxis atendidos e tempo de atendimento (em anos) .....	83
<b>FIGURA 19</b> - Participação de cada etapa do processo de captação e tratamento do biometano no custo total .....	85
<b>FIGURA 20</b> - Custo do biometano produzido no aterro de Foz do Iguaçu, em comparação com diesel e gasolina .....	86
<b>FIGURA 21</b> - Custo unitário por ônibus versus valor presente líquido (15 anos), substituição 72 ônibus.....	88
<b>FIGURA 22</b> - <i>Payback</i> e VPL em função do preço do diesel, substituição de 72 ônibus.....	88

<b>FIGURA 23</b> - Custo unitário por ônibus versus valor presente líquido (15 anos), para substituição de 20 ônibus .....	89
<b>FIGURA 24</b> - <i>Payback</i> e VPL em função do preço do diesel, substituição de 20 ônibus.....	90
<b>FIGURA 25</b> - VPL versus valor de substituição de cada taxi .....	91
<b>FIGURA 26</b> - <i>Payback</i> e VPL em função do preço da gasolina, substituição de 100% da frota de taxi.....	92
<b>FIGURA 27</b> - <i>Payback</i> e TIR em função do custo do ônibus .....	93
<b>FIGURA 28</b> - <i>Payback</i> e TIR em função do custo de um taxi .....	93

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Exemplos básicos de cada categoria de resíduos sólidos urbanos.....	26
<b>Tabela 2:</b> Limite máximo de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros.....	50
<b>Tabela 3:</b> Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo.....	69
<b>Tabela 4:</b> Fator de correção de metano segundo os tipos de aterro (MFC) .....	70
<b>Tabela 5:</b> Dados de índices de consumo de biometano por frotas de ônibus. ....	72
<b>Tabela 6:</b> Custo capital específico desde o tratamento até compressão do biometano em aterro. ....	84
<b>Tabela 7:</b> Dados econômicos (VPL, Payback e TIR) em função do custo com conversão de um ônibus, para substituição de 72 ônibus.....	89
<b>Tabela 8:</b> Dados econômicos (VPL, Payback e TIR) em função do custo com conversão de um ônibus. ....	90
<b>Tabela 9:</b> Dados econômicos (VPL, Payback e TIR) em função do custo com conversão de um taxi, para substituição de 100% da frota de taxi.....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ABRELPE</b>	- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
<b>ANEEL</b>	- Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>ANP</b>	- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e B combustíveis
<b>CEG</b>	- Companhia Estadual de Gás
<b>CETESB</b>	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
<b>CTR</b>	- Central de Tratamento de Resíduos Sólidos
<b>DA</b>	- Digestão Anaeróbia
<b>EUA</b>	- Estados Unidos da América
<b>GDL</b>	- Gás de Lixo
<b>GEE</b>	- Gases de Efeito Estufa
<b>GNV</b>	- Gás Natural Veicular
<b>IPPC</b>	- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
<b>IPT</b>	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
<b>LOGA</b>	- Logística Ambiental de São Paulo S.A.
<b>OCDE</b>	- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
<b>ONU</b>	- Organização das Nações Unidas
<b>PGRS</b>	- Programa de gerenciamento de resíduos sólidos
<b>PNAER</b>	- Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
<b>Proclima</b>	- Programa Estadual de Mudanças Climáticas Globais
<b>PROCONVE</b>	- Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
<b>RSO</b>	- Biomassa Residual
<b>RSU</b>	- Resíduos Sólidos Urbanos
<b>SVMA</b>	- Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente de São Paulo
<b>USEPA</b>	- Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
<b>USP</b>	- Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	<b>Objetivo Geral</b>	<b>14</b>
1.2.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	VISÃO GLOBAL DA ENERGIA	16
2.1.1	<b>Combustíveis fósseis e as fontes renováveis</b>	<b>17</b>
2.2	CIDADES SUSTENTÁVEIS	19
2.2.1	<b>Resíduos Sólidos</b>	<b>22</b>
2.3	ATERRO SANITÁRIO	23
2.4	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	29
2.5	O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA E O BIOMETANO	33
2.6	COLETA DE BIOMETANO NOS ATERROS SANITÁRIOS	41
2.7	A IMPORTÂNCIA DO REFINO DO BIOGÁS PARA BIOMETANO	43
2.8	BIOMETANO: ENERGIA COMBUSTÍVEL PARA O USO VEICULAR	46
2.9	PAÍSES QUE UTILIZAM O BIOMETANO	51
2.9.1	<b>Alemanha</b>	<b>52</b>
2.9.2	<b>Suécia</b>	<b>53</b>
2.9.3	<b>Holanda</b>	<b>54</b>
2.9.4	<b>Estados Unidos</b>	<b>55</b>
2.9.5	<b>China</b>	<b>57</b>
2.9.6	<b>Inglaterra</b>	<b>58</b>
2.9.7	<b>Argentina</b>	<b>58</b>
2.9.8	<b>Brasil</b>	<b>58</b>
2.10	EMISSÃO DE CO <sub>2</sub>	61
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>65</b>
3.1	OBJETO DE ESTUDO	65
3.2	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	68
3.2.1	<b>Quantificação do biogás gerado</b>	<b>68</b>

3.2.2	Índice de Recuperação de Biogás (IRB 50%, 75% e 100%).....	71
3.2.3	Potencial de substituição da frota de ônibus coletivo de Foz do Iguaçu de diesel por biometano .....	71
3.2.4	Potencial de substituição da frota de taxis de Foz do Iguaçu de gasolina por biometano .....	72
3.2.5	Viabilidade de uso de biometano como combustível.....	73
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	76
4.1	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM FOZ DO IGUAÇU.....	76
4.2	POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DA FROTA ÔNIBUS E TAXI DE FOZ DO IGUAÇU COM BIOMETANO.....	81
4.3	AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DA FROTA DE ÔNIBUS URBANO E DE TAXI EM FOZ DO IGUAÇU POR BIOMETANO CAPTADO EM ATERRO SANITÁRIO .....	83
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	94
6	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	96
	<b>ANEXO I - Planilhas Substituição frotas de ônibus e taxis em Foz do Iguaçu</b>	

## 1 INTRODUÇÃO

A ciência vem estudando intensamente os gases poluentes e propondo uma nova matriz energética, com predominância de fontes renováveis de energia, para atenuar os efeitos danosos dos combustíveis fósseis.

Hefner III (2006 apud BLEY JR., 2015) demonstrou como a matriz energética mundial vem progredindo desde a predominância dos combustíveis sólidos (biomassa da madeira), passando pela era atual dos combustíveis líquidos (derivados do petróleo) e alcançando a era dos gases, que terá seu apogeu no mundo movido a Hidrogênio (H<sub>2</sub>).

No Brasil, a maior parte dos derivados de petróleo é utilizada no setor de transporte (veículos leves, transporte de cargas e transporte de passageiros). No transporte de passageiros, o combustível mais utilizado é o diesel mineral, sendo este um combustível não renovável e poluente (SILVA; SOEIRO, 2014).

Com o objetivo de diminuir a dependência relacionada ao uso do diesel, seria necessário o uso de combustíveis alternativos. Dentre os combustíveis alternativos, estão os biocombustíveis líquidos e gasosos: etanol, biodiesel, bio óleos, gás de síntese e o biogás de resíduos urbanos rurais (COSTA, 2002).

Segundo Silva e Soeiro (2014), uso do biogás vem destacando-se e ganhando espaço no mundo, sendo utilizado como fonte elementar de energia na geração de eletricidade e também como combustível veicular na forma de biometano, o qual tem as mesmas características do GNV (Gás Natural Veicular).

A conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano, ao mesmo tempo em que produz energia, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos devido à diminuição de compra da energia consumida (COSTA, 2002). Cidades de médio e grande porte poderiam utilizar o biogás produzido nos aterros para geração do biometano e uso do mesmo como combustível em substituição ao diesel na frota de transporte urbano de passageiros.

O biogás gerado nos aterros sanitários, chamado de gás de aterro, é produzido por meio de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos depositados no mesmo. O processo biológico depende de vários fatores, tais como temperatura,

umidade, composição do resíduo disposto e a diversidade dos substratos para a degradação microbiológica (MULLER, 2013).

O biogás é composto basicamente de metano (50% – 70%) e dióxido de carbono (50% - 30%). O biometano é obtido a partir da purificação do gás mediante a remoção do dióxido de carbono e outros gases presentes na mistura que compõe o biogás (OLIVEIRA, 2004).

No Brasil, existem alguns estudos que mostram o potencial de uso de biogás/biometano para esse fim (KUWAHARA et al., 1999 apud NADALETTI et al., 2014). No entanto, tais estudos baseiam-se em dados operacionais de referências internacionais de consumo de biometano por ônibus urbanos, tornando interessante, a partir de dados operacionais reais de ônibus a biometano, realizar uma avaliação mais consistente do potencial em uma cidade de porte médio.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Valendo-se de diversas tecnologias, a Itaipu Binacional, operadora da Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada no Rio Paraná, na fronteira entre o Brasil e o Paraguai, é a líder mundial em produção de energia limpa e renovável, tendo produzido mais de 2,4 bilhões de MWh desde o início de sua operação (BLEY JR., 2015).

Para o autor, tal instituição estimula a geração de energia por meio do biogás; o aproveitamento do gás metano liberado pela matéria orgânica em decomposição permite o desenvolvimento sustentável a partir da transformação da biomassa residual (RSO) em energia elétrica e o aumento da receita por meio da utilização do biometano na frota veicular das cidades com mais de 300.000 habitantes no estado do Paraná, gerando economia e eficiência energética.

Como todo produto, o biogás também constitui e sustenta uma cadeia de demandas e suprimentos relativamente complexa, ou seja, o biogás é centro gerador e mantenedor de economias que se constituem em seu torno. A produção de biogás demanda, consome e gera resultados econômicos e, como se encontra pulverizada nos ambientes urbanos e rurais, favorecê-la significa também distribuir localmente os resultados poupadores produzidos por esta economia (SILVA; SOEIRO, 2014).

São resultados diretos, como a geração de energia elétrica, térmica e automotiva, com redução de emissões de Gases do Efeito Estufa e, por isso, a obtenção de Créditos de Carbono, além de resultados econômicos indiretos, como as demandas por serviços de planejamento, implantação, operação e manutenção dos processos que produzem o biogás e das energias que com ele podem ser geradas (BLEY JR. et al., 2009).

Com o objetivo de incentivar a utilização de biometano em veículos de transporte de passageiro, a Itaipu Binacional possui em suas dependências um ônibus (Scania EURO 6), movido a biometano de resíduos agrícolas, veículo este que atende as especificações exigidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e B combustíveis – ANP (BLEY JR., 2015).

Com base em todas estas considerações, justifica-se a importância do presente estudo, onde torna-se interessante avaliar a possibilidade/potencial de substituição do diesel utilizado na frota urbana de médias ou grandes cidades por um combustível renovável e limpo, onde o biometano encaixa-se perfeitamente. Para esta pesquisa, optou-se pela realização da avaliação do potencial de uso do biometano de aterro sanitário na frota urbana da cidade de Foz do Iguaçu - PR, região de abrangência da Itaipu Binacional.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial do biometano produzido a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) da cidade de Foz do Iguaçu para o uso em transporte urbano de passageiros: ônibus e taxis.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Obter o potencial de substituição do ônibus a diesel por ônibus movido a biometano de RSU na cidade de Foz do Iguaçu;

- b) Obter o potencial de substituição do taxi a gasolina por taxi movido a biometano de RSU na cidade de Foz do Iguaçu;
- c) Verificar a viabilidade econômica do uso de biometano do aterro sanitário de Foz do Iguaçu em transporte urbano de passageiros: ônibus e taxis.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 VISÃO GLOBAL DA ENERGIA

O alicerce da matriz energética mundial está sustentado nos combustíveis fósseis, porém este cenário mundial vem sofrendo alterações devido a três amplas preocupações da humanidade: meio ambiente, energia e economia global (SILVA; SOEIRO, 2014).

As extensões distintamente caracterizadas, mas que estão intimamente conectadas, são resultados dos problemas causados pelo uso desequilibrado dos combustíveis fósseis. Relativo à economia, unicamente o tempo tem capacidade de desvendar quais as consequências que este conflito no sistema financeiro internacional terá sobre o domínio energético e o seu reflexo no meio ambiente (VICHI; MANSOR, 2009).

Os maiores consumidores mundiais de energia são os países desenvolvidos que compõem a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), uma organização de nível internacional formada por 34 países em concordância com os princípios da democracia representativa e da economia de livre mercado que busca soluções para problemas comuns e visa sistematizar políticas domésticas e internacionais. Contudo essa cooperação vem abrandando num longo período. Os países que a compõem são diferenciados por uma economia relativamente estável, onde não acontecem aumentos exacerbados na produção industrial ou no consumo de bens que carecem de um processo energético para seu desenvolvimento, visto que a maior parcela do desenvolvimento ocorreu ao longo da segunda metade do século XX (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2008).

De acordo com a ANEEL (2008), nas localidades ainda em pouco desenvolvimento, como Ásia, África, América Latina, Oriente Médio, entre outros, o gasto de energia aumentou nos últimos tempos, sendo o elemento principal, a melhoria da economia. A América Latina alcançou avanço superior a 100% na utilização da energia, devido ao acréscimo no conjunto de veículos, bens eletroeletrônicos, nascimento ou progresso de indústrias energointensivas.

Estima-se que para este século, as reservas mundiais de combustíveis fósseis padecerão a diminuição, tornando essencial a evolução de tecnologias fundamentadas em recursos renováveis e que, gradualmente, substituirão os combustíveis primários, vistos como os grandes responsáveis pelo avanço da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (ZANATTA, 2012).

Desta forma, a mais nova proveniência energética ficará pendente de várias ações e subsídios que são complexos de presumir. Decisivamente, existirá uma diversidade nas fontes de origem de energia elétrica para que não exista o atrelamento de uma fonte específica. Em meio a preocupação e em tempos de respeito ao meio ambiente, as empresas passarão a operar com seus produtos e serviços de forma mais clara e eficiente, buscando um consumo de energia racional e sustentável (FARIAS; SELLITTO, 2011 apud MALAGGI, 2014).

Nesta concepção de conhecimentos que apontam os autores citados, é bem provável o enfrentamento de um grande desafio no campo energético, onde poderá ocorrer uma trajetória de novos usos de nascentes renováveis, fornecendo energias sem poluentes.

### **2.1.1 Combustíveis fósseis e as fontes renováveis**

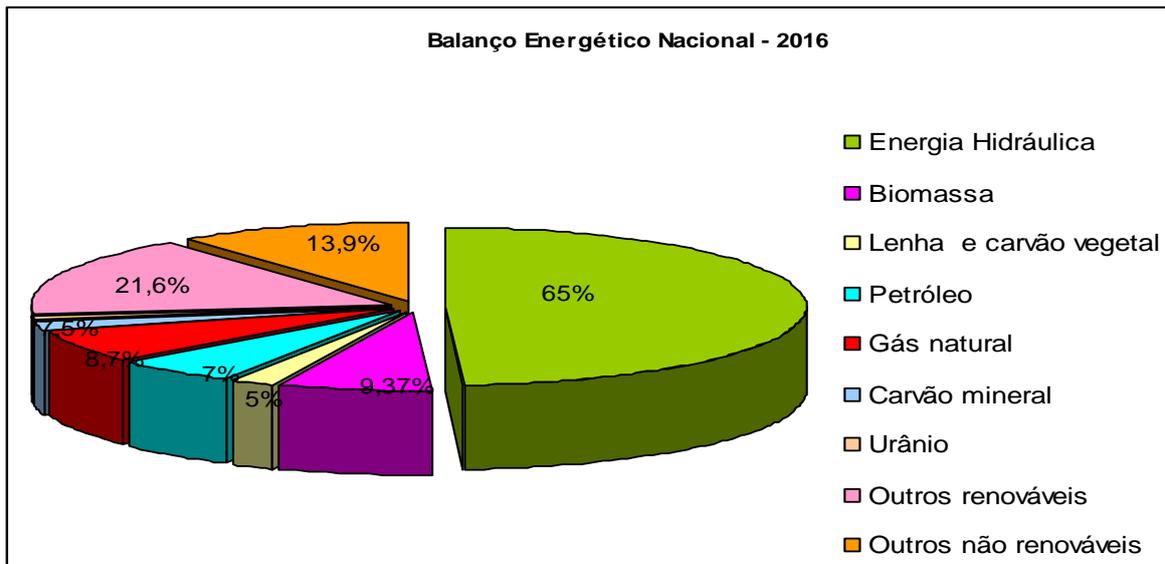
Nos anos de 1850, com a Revolução Industrial iniciou o emprego de combustíveis de origem fóssil (carvão, petróleo e gás) em todo o mundo. Desde então, a utilização de combustíveis fósseis vem progredindo rapidamente, o que coopera para a crescente emissão dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (ZANATTA, 2012).

De acordo com o quarto relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPPC), uma organização científico-política criada pela Organização das Nações Unidas (ONU) destinada a estudar e divulgar o conhecimento atualizado sobre as mudanças climáticas que permeiam o mundo, com foco no aquecimento global, a maior parte do planeta sofreu um acréscimo nas temperaturas desde meados do século XX, devido provavelmente ao avanço antropogênico nas concentrações de GEE (CHRISTOPHERSON, 2012).

Na concepção de Marques (2012 apud AQUINO, 2013), a energia proveniente da biomassa tem sido eixo maior nos biocombustíveis, para a geração

de energia proveniente de matéria-prima biológica, como o bioetanol ou etanol, o biodiesel e o biogás na forma de biometano.

Sendo assim, o Brasil se distingue de outros países, devido a proporção da matriz energética nacional, que já é constituída na totalidade de 84,6% de energia renovável, comparada à média mundial de 18,9%, conforme mostra Figura 1 (BRASIL, 2016).



**FIGURA 1** – Balanco Energético Nacional - 2016  
 FONTE: Brasil (2016).

A diversidade de fontes que compõem o modelo energético de um país ou região é designada matriz energética. No Brasil, existem dois amplos sistemas de energia, o sistema de mobilidade (transporte) de cargas e pessoas, amparado predominantemente por combustíveis líquidos derivados de petróleo, e particularmente de uma fração renovável concebida pelo Etanol, com principiante dos gases, no feito de Gás Natural e o conjugado de aproveitamento que aponta o abastecimento de energia elétrica para vasto e diversos fins, no qual se enfatiza a hidroeletricidade (BLEY JR., 2015).

A prática de energias renováveis no mundo tem evoluído ligeiramente nos últimos tempos e atividades governamentais tem sido propostas com a finalidade de promover esse desenvolvimento. A desvalorização de muitas tecnologias, as alterações no preço dos combustíveis fósseis, o avanço no processo de energia, entre outros fatores, tem estimulado o crescente uso de energias alternativas (CHRISTOPHERSON, 2012).

## 2.2 CIDADES SUSTENTAVEIS

A tendência mundial, devido ao aumento da população, é o crescimento dos resíduos em aterros sanitários e em contrapartida, nascem as cidades sustentáveis, que acompanham o desenvolvimento da globalização, mudando os seus conceitos para a necessidade do aproveitamento dos lixos produzidos nas cidades (BLEY JR., 2015).

Neste sentido, de acordo com o autor, descobre-se a eficácia dos gases retirados dos aterros das cidades rumo à contribuição, de forma qualitativa, para as atividades da população.

Neste panorama, é visto que todos os tipos de resíduos tornam-se bem aproveitados. De acordo com Henriques (2004), até o ano de 2003 não existiam projetos de aproveitamento de gás de lixo em operação no Brasil, somente algumas em estado final de montagem, como é o caso do Aterro Bandeirantes, em São Paulo, desativado em 2007.

Segundo Henriques (2004), no ano de 1997, através da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), da Diretoria de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia, do Programa Estadual de Mudanças Climáticas Globais (Proclima) e da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, foi elaborado o relatório de Emissões de Metano Gerado no Tratamento e Disposição de Resíduos no Brasil, e teve começo o Programa de Recuperação de Metano de Aterros Sanitários no Estado de São Paulo, presumindo a criação de uma planta de geração com base no gás de lixo (GDL) em São Paulo.

De acordo com a autora, ao mesmo tempo, a Prefeitura de São Paulo, em parceria com a Universidade de São Paulo (USP), organizou um documento como desígnio de examinar a opção de uso de tecnologia nova, em termos nacionais, para a aplicação da energia contida nos gases dos resíduos sanitários.

Na concepção de Henriques (2004), ao término do processo de seleção do subconcessionário para a produção de energia elétrica, com base no biogás, a Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente de São Paulo (SVMA) deu um passo importante no que tange à amenização dos problemas diversos ocorridos através da geração do gás proveniente dos aterros.

Natal e Rio de Janeiro também tiveram suas marcas no aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários. Na década de 1970, no aterro de Caju,

Rio de Janeiro, o projeto consistia no transporte do biogás por um gasoduto até a da Companhia Estadual de Gás (CEG), em São Cristóvão. Lá, biogás era adicionado ao nafta e posteriormente craqueado em gás natural, para ser distribuído para uso residencial no Rio de Janeiro. Esta unidade funcionou de 1935 à 1977 (LANDIM; AZEVEDO, 2008).

Na década de 1980, em Natal, produzia-se aproximadamente 500 toneladas de lixo urbano por dia, que eram arranjados em um depósito controlado, localizado nas proximidades de uma grande duna de areia. Tendo em vista a alta percentagem de matéria orgânica, as altas taxas pluviométricas e a temperatura da região, detectou-se o grande potencial de produção de GDL. No ano de 1983, a administração da cidade optou pela criação de três projetos para utilização desse gás: em uma cozinha comunitária para moradores de baixa renda da comunidade próxima ao aterro, em uma rede de distribuição de gás conectada diretamente a uma comunidade próxima de 150 habitantes e em uma ligação para alimentação de uma caldeira de uma indústria de castanha-de-caju (LANDIM; AZEVEDO, 2008).

Na cidade de São Paulo, também há registro de programas para aproveitamento do GDL, como o Programa de Recuperação de Metano de Aterros Sanitários no Estado de São Paulo (LANDIM; AZEVEDO, 2008).

Em São Paulo, há grande produtividade de gás metano, gerado espontaneamente nos depósitos de lixo, o que afeta negativamente o destino da estufa e que também pode acarretar explosões, com consequências mórbidas em decorrência da presença de catadores nos lixões (MUYLAERT, 2000).

Voltando ao Aterro Bandeirantes, um dos maiores da América Latina, que funcionou de 1979 até 2007, quando recebia metade de todo o lixo produzido em São Paulo, Calixto (2013) aponta que em seu território de 140 hectares há cerca de 40 milhões de toneladas de lixo.

A Logística Ambiental de São Paulo S.A. (LOGA), empresa responsável pelas atividades de vigilância, manutenção, monitoramento e destinação do chorume gerado no Aterro Bandeirantes, aponta que o gás metano da unidade é captado e comercializado como crédito de carbono, também gerando energia elétrica através de usina termoelétrica (CALIXTO, 2013).

Para capturar esse gás, o aterro Bandeirantes tem 400 pontos de captura, que retiram o metano que se forma com a putrefação do lixo, debaixo da terra, e leva para a Usina Termelétrica Bandeirantes. A usina, administrada

pela empresa Biogás, aproveita esse metano, transformando o gás do lixo em eletricidade: a usina tem capacidade de fornecer energia elétrica para até 300 mil pessoas (CALIXTO, 2013, p. 1).

Ou seja, se estas ações não fossem realizadas, o metano estaria sendo liberado na atmosfera, contribuindo para a poluição do ar e para o aquecimento global. A atividade realizada entre a usina e a prefeitura de São Paulo, portanto, oferecem benefícios financeiros para a cidade e para as empresas envolvidas, bem como ambientais. Nas palavras de Anderson Alves da Silva, coordenador da Biogás, “sem a usina, 80% do metano do aterro simplesmente sairiam para a atmosfera. Com a usina, apenas 0,01% polui o ar” (CALIXTO, 2013, p. 1).

Neste panorama, é visível que a geração de energias, oriundas de gases gerados através dos resíduos nos aterros sanitários, pode contribuir e muito para as atividades da sociedade em geral, como é o caso das cidades que já estão aderindo ao aproveitamento desses gases, evitando que cheguem até a atmosfera.

Em Nova Iguaçu, por exemplo, o lixão de Marambaia tornou-se a Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTR) Nova Iguaçu S. A. a partir do ano de 2003, onde, por meio do reflorestamento da área afetada, evita-se os malefícios ao meio ambiente e à população. Esta CTR, formada por um aterro sanitário, uma unidade de tratamento de resíduos, outra de tratamento de chorume e aproveitamento energético do biogás, entre outras unidades, já tornou-se modelo de referência na área, sendo capaz de receber diariamente 5 mil toneladas de resíduos (MAGALHÃES, 2012).

Outro exemplo é a CTR Candeias, situada no município do Jaboaão dos Guararapes, Pernambuco, que possui uma estação de tratamento de chorume, reciclagem de entulhos e geração de energia através do biogás, com comercialização de créditos de carbono (JUNIOR, 2012).

Atualmente, no Brasil, é crescente a expansão das cidades sustentáveis através de projetos diversos. Segundo o Jornal da Bioenergia (2016), em matéria publicada ao final do ano de 2016, hoje o país possui 22 projetos voltados ao aproveitamento energético do biogás, segundo dados publicados no Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos, o que corresponde a uma capacidade instalada de 254 MW e redução de emissões de GEE na ordem de 12 milhões de toneladas de gás carbônico por ano. Mais uma vez atenta-se para a importância destes projetos para o meio ambiente.

### 2.2.1 Resíduos Sólidos

Segundo a Norma Técnica NBR 10004:04, que trata da classificação dos resíduos sólidos em relação aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, entende-se estes resíduos como aqueles que encontram-se:

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 inviável em face à melhor tecnologia disponível (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2004, p. 1).

Quanto à sua classificação, a mesma norma aponta as seguintes: classe I (Perigosos) e classe II (Não perigosos), sendo esta segunda classe subdivida em classe II A (Não inertes) e classe II B (Inertes).

Os resíduos sólidos perigosos, como o próprio nome já diz, são aqueles que apresentam fatores que envolvem periculosidade, tais como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (ABNT, 2004).

Por sua vez, os resíduos não perigosos, classificados como não inertes, são aqueles que podem ter propriedades tais como a biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. Já os entendidos como inertes não possuem constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água (ABNT, 2004).

Seguindo uma linha aproximada de raciocínio, Philippi (1999) afirma que os resíduos sólidos podem ser considerados qualquer mistura de materiais ou restos destes, oriundos das atividades humanas, os quais são descartados por não apresentarem utilidade à sociedade. Eles podem ser classificados de acordo com a sua natureza física (seco ou molhado), sua composição química (matéria orgânica ou inorgânica) e os riscos potenciais que oferecem ao meio ambiente e à saúde pública (perigoso, não inerte e inerte).

A abordagem da classificação dos resíduos sólidos contribui para reconhecer os resíduos de acordo com suas características e procedência. Desse modo, a

correta caracterização dos resíduos sólidos urbanos é de suma importância para o gerenciamento dos mesmos, auxiliando sua adequada destinação (PHILIPPI, 1999).

Valle (1995) assegura que o ato de reciclar significa refazer o ciclo, e permite trazer de volta a origem, sob a forma de matéria-prima aqueles materiais que não se degradam facilmente, mas que podem ser reprocessados, mantendo suas características básicas. Essa prática, não apenas reduz a quantidade de resíduos, como também recupera produtos já produzidos, economiza matéria-prima, energia e desperta nas pessoas hábitos conservacionistas, além de reduzir a degradação ambiental.

Segundo Dias (2000), deve-se oferecer a máxima importância à questão do destino correto aos lixos de resíduos sólidos, onde a globalidade dos problemas ambientais tende a ocultar as relações causa-efeito destes, como, a concentração de dióxido de carbono, o problema da camada de ozônio ou a geração de resíduos. Por outro lado, as estatísticas globais ocultam uma realidade de diferenças regionais crescentes e diferentes capacidades de inserção no sistema econômico mundial.

A saúde do ambiente planetário depende de práticas que conduzam a mudanças de comportamento e de hábitos da humanidade, buscando através de atos simples a proteção do meio ambiente, resgatando alternativas e soluções simples, como o tratamento dos resíduos sólidos para a obtenção de energia através do metano, contribuindo com diversas atividades do homem (VALLE, 1995).

### 2.3 ATERRO SANITÁRIO

Primeiramente, é importante salientar que a Constituição Federal de 1988 preconiza em seu Artigo 23, inciso VI, que “compete à União, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer das suas formas”. Já no Artigo 24, aponta a competência da União, dos Estados e do Distrito Federal em legislar concorrentemente sobre “[...] proteção do meio ambiente e controle da poluição” (inciso VI) e, no Artigo 30, incisos I e II, determina que é de responsabilidade do poder público municipal “legislar sobre os assuntos de interesse local e complementar a legislação federal e a estadual no que couber” (BRASIL, 1988).

De acordo com o Governo Federal, define-se aterro sanitário como um tipo de depósito onde os resíduos sólidos produzidos pela população em geral (residências, indústrias, hospitais e construções) são alocados, ressaltando-se que a maior parcela destes resíduos é composta de materiais não recicláveis (PORTAL BRASIL, 2014).

Deve-se levar em consideração a importância dos aterros sanitários uma vez que suas atividades resolvem grande parte dos problemas oriundos pelo excesso de lixo gerado nas cidades, ainda que a manutenção dos aterros seja custosa para os municípios (PORTAL BRASIL, 2014).

A seguir, apresenta-se o esquema de um aterro sanitário através da Figura 2.



**FIGURA 2 – Aterro Sanitário**  
 FONTE: Martins (2011).

Conforme Rodrigues (2009), uma das principais configurações de acomodação final dos resíduos são os aterros sanitários. De acordo com a ABNT, em sua NBR 8419:1984, que aborda a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, entende-se por aterro sanitário de RSU:

Técnica de arranjo final de resíduos sólidos urbanos no solo, sem ocasionar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar

os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 1984, p. 1).

O desígnio dos aterros sanitários tem como finalidade gerenciar o resíduo e seguir um conjugado articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento, com base em discernimentos sanitários, ambientais e econômicos para coletar, tratar e dispor os resíduos sólidos, tendendo a enquadrar o conhecimento delineado do ciclo completo do resíduo, desde a sua origem até o destino final, apontando a conservação do meio ambiente, a recuperação dos materiais potencialmente recicláveis (RODRIGUES, 2009).

O departamento de coleta seletiva de cada cidade deve possuir uma divisão responsável pelo acompanhamento dos programas de gerenciamento de resíduos recicláveis com base na Lei Estadual 12.493/99, que estabelece princípios, procedimentos, normas e critérios referentes a geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos no Estado do Paraná, visando controle da poluição, da contaminação e a minimização de seus impactos ambientais e adota outras providências, e em conformidade com a Lei Federal 12.305/10, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, documentos nos quais funda-se princípios, métodos, normas e critérios indicativos à geração de identificação, segregação, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte e destinação final de todos os resíduos produzidos nos empreendimentos, visando controle da poluição (ESTADO DO PARANÁ, 1999; BRASIL, 2010).

Sendo assim, nos aterros sanitários institui-se o programa de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS), que consiste na adoção de instrumento que permita reduzir ou minimizar dos resíduos na fonte, acomodar à segregação na origem, dominar e restringir os riscos ao meio ambiente e garantir o adequado manuseio e instalação final em concordância com a legislação vigente (BRASIL, 2010).

São ações como esta que permitem a crescente da vida útil de aterros sanitários, alimentando o ambiente natural e urbanizado, cultivando e aprimorando o conceito da cidade, tanto para os cidadãos habitantes como para os visitantes que mobilizam a economia da região, aplicando ao máximo todos os materiais que possam ser conduzidos para a reciclagem, indicando opção de emprego e renda

para a população de maneira a afiançar a vida digna com a coleta de materiais recicláveis.

Algumas são as vantagens da instalação final de resíduos em aterros sanitários: baixo custo de manutenção e operação, coleta do biogás produzido durante a decomposição e seu aproveitamento energético, controle do lixiviado e após anos de fechamento tem-se a reutilização do local de aterramento para a construção de áreas de lazer (construção de parques, campos esportivos, etc.) (ALVES, 2005 apud RODRIGUES, 2009).

Por outro lado, há também desvantagens, tais como a necessidade de transportar o resíduo a longas distâncias, a desvalorização do terreno ao redor do aterro, o risco de contaminação do lençol freático se mal operado, produção de percolados e lixiviados além da necessidade de manutenção e vigilância após o fechamento do aterro. Outro fator limitante para adoção de aterros sanitários é a disponibilidade de grandes áreas próximas aos centros urbanos que não empenham a garantia e o conforto da população (VANZIN, 2006 apud RODRIGUES, 2009).

Com alicerce na periculosidade dos resíduos a serem amontoados e nas coerências das exigências de projeto e operação, os aterros sanitários são classificados em aterros de resíduos perigosos conforme a NBR 10157:87, que aborda critérios para projeto, construção e operação de aterros de resíduos perigosos, e aqueles de resíduos não perigosos, pautados na NBR 13896:97 que traz as mesmas informações, porém para esta classificação (ABNT, 1987; 1997).

Segundo Pessin et al. (2012), a intervenção de um aterro sanitário deve ser sucedida por meio do processo de seleção de áreas, licenciamento, projeto executivo e implantação. Nestes locais, é encontrada uma diversificação de resíduos expelidos pela população, como apresenta a Tabela 1.

**Tabela 1:** Exemplos básicos de cada categoria de resíduos sólidos urbanos.

<b>Exemplos básicos de cada categoria de resíduos sólidos urbanos.</b>	
<b>Matéria orgânica</b>	Restos alimentares, flores, podas de árvores.
<b>Plástico</b>	Sacos, sacolas, embalagens de refrigerantes, água e leite, recipientes de produtos de limpeza, esponjas, isopor, utensílios de cozinha, látex, sacos de rafia.
<b>Papel e papelão</b>	Caixas, revistas, jornais, cartões, papel, pratos, cadernos, livros, pastas. Copos, garrafas de bebidas, pratos, espelho, embalagens de

<b>Vidro</b>	produtos de limpeza, embalagens de produtos de beleza, embalagens de produtos alimentícios.
<b>Metal</b>	Palha de aço, alfinetes, agulhas, embalagens de produtos alimentícios, latas de bebidas, restos de cobre, restos e chumbo, fiação elétrica.
<b>Madeira</b>	Caixas, tábuas, palitos de fósforos, palitos de picolé, tampas, móveis, lenha.
<b>Tecidos</b>	Panos, trapos, couro e borracha Roupas, panos de limpeza, pedaços de tecido, bolsas, mochilas, sapatos, tapetes, luvas, cintos, balões.
<b>Contaminante químico</b>	Pilhas, medicamentos, lâmpadas, inseticidas, raticida, colas em geral, cosméticos, vidro de esmaltes, embalagens de produtos químicos, latas de óleo de motor, latas com tintas, embalagens pressurizadas, canetas com carga, papel carbono, filme fotográfico.
<b>Contaminante biológico</b>	Papel higiênico, cotonetes, algodão, curativos, gazes e panos com sangue, fraldas descartáveis, absorventes higiênicos, seringas, lâminas de barbear, cabelos, pêlos, embalagens de anestésicos, luvas.
<b>Diversos</b>	Velas de cera, restos de sabão e sabonete, carvão, giz, pontas de cigarro, rolhas, cartões de crédito, lápis de cera, embalagens longa vida, embalagens metalizadas, sacos de aspirador de pó, lixas, e outros materiais de difícil identificação.

---

**FONTE:** adaptado de PESSIN et al. (2002)

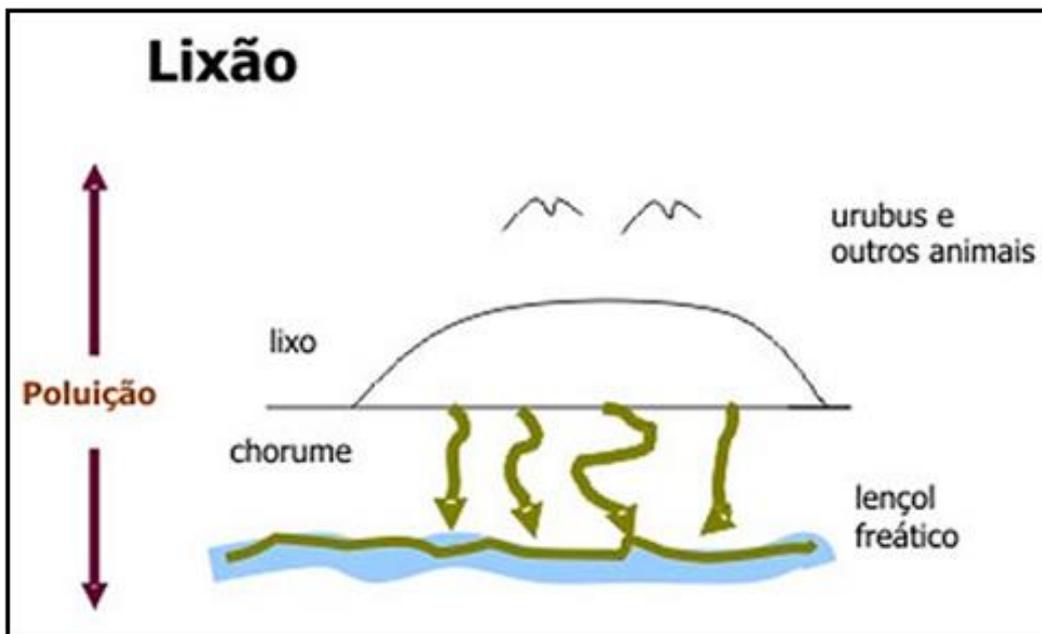
São muitos tipos de resíduos que se acumulam ao longo dos anos em aterros sanitários, tendo com isso a procedência dos gases, muitos para o efeito estufa, outros para a solução de usos diversos, sendo descobertos há poucos anos (SILVA; SOEIRO, 2014).

Cabe apresentar também breves definições de lixões e aterros controlados para que se possa obter uma análise comparativa entre estes e os aterros sanitários, revelando a importância destes últimos.

Segundo O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1995), o lixão, também denominado Vazadouro, pode ser entendido como uma forma inadequada de depósito de resíduos sólidos, onde estes são simplesmente dispostos sobre o solo a céu aberto, ação esta ausente de qualquer mecanismo de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Nestes locais não há controle e separação em relação aos resíduos que são alocados juntos, tais como resíduos

domiciliares e comerciais com industriais e hospitalares, representantes de altas taxas de poluição.

Nos lixões, frequentemente há a presença de animais diversos em meio a pessoas que ali realizam coleta de resíduos, além de altos riscos de incêndios que podem ser ocasionados pelos gases advindos do processo de decomposição do lixo, entre outros problemas (IPT, 1995). A Figura 3 representa um lixão.



**FIGURA 3 – Lixão ou Vazadouro**  
 FONTE: Martins (2011).

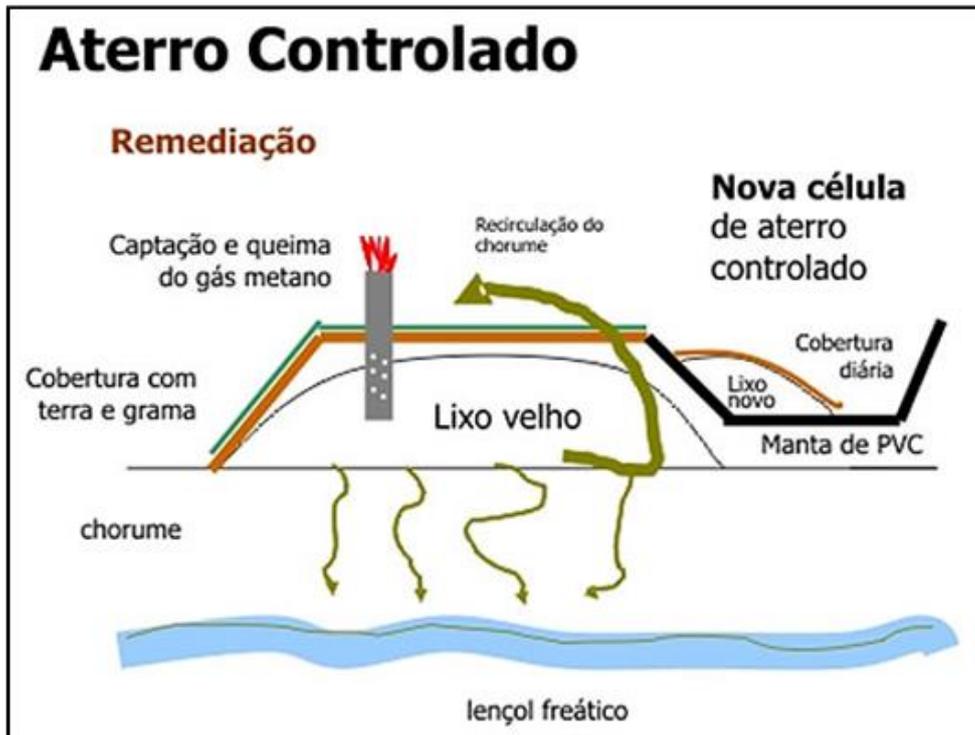
O aterro controlado, por sua vez, pode ser definido através da NBR 8849:1985, que aborda sobre a apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Nesta norma, entende-se por aterro controlado:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Esse método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho (ABNT, 1985, p. 2).

Tal técnica, afirma Machado (2013), provoca um tipo de poluição limitada, pois não há impermeabilização do solo, o que danifica a qualidade do solo e do lençol freático, e também não possui sistema de tratamento de percolado<sup>1</sup> ou de

<sup>1</sup> Líquido que passou através de um meio poroso (ABNT, 1985, p. 2).

extração e queima monitorada de gases. O autor aponta que o aterro controlado, nomenclatura utilizada para os aterros ditos não sanitários, é preferível ao lixão, mas apresenta muitas falhas, levando especialistas no assunto a pactuarem sobre a ideia de que deve-se melhorar os aterros controlados a curto ou médio prazo até que se tornem sanitários. A Figura 4 representa um aterro controlado.



**FIGURA 4 - ATERRO CONTROLADO**  
 FONTE: Martins (2011)

Comparando-se os três tipos de destino de RSU, percebe-se facilmente que o aterro sanitário apresenta maior importância e eficiência em termos de proteção ao meio ambiente e saúde pública. É a técnica mais adequada tendo em vista que minimiza a contaminação via chorume, um líquido poluente, e gás, principalmente metano, que, segundo Calixto (2013), polui e é 20 vezes pior para as condições climáticas mundiais do que o gás carbônico.

## 2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Nos últimos anos, é crescente a preocupação com a questão da produção e destino dos RSU tanto a nível nacional quanto internacional. Mediante a complexidade das necessidades ambientais, sociais e econômicas, uniram-se as

esferas governamentais, a iniciativa privada e a sociedade civil em prol de uma responsabilidade compartilhada pela gestão adequada dos RSU.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Nº 12.035/2010, congrega princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações assumidos pelo Governo Federal, isoladamente ou em colaboração com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, visando a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

No seu Artigo 3º, inciso XVI, define resíduos sólidos como sendo:

material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

No mesmo artigo, inciso IX, a referida lei aponta que os geradores de resíduos sólidos são “pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que geram resíduos sólidos por meio de suas atividades, nelas incluído o consumo” (BRASIL, 2010).

Com base nestas colocações, cabe afirmar que os RSU são consequências naturais das atividades resultantes do cotidiano da sociedade atual, onde a produção dos resíduos está ligada aos bens de consumo, desde a elaboração de matéria prima, fabricação, transporte, uso e descarte.

Para Castilhos Junior et al. (2003), os resíduos sólidos apresentam atributos quali-quantitativos que variam de acordo com os diferenciais de cada comunidade, tais como aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos.

Jardim et al. (1995 apud OLIVEIRA, 1999), corroboram com tal afirmação apontando que as características dos RSU sofrem alterações dependendo do número de habitantes, poder aquisitivo, hábitos e costumes e condições climáticas, bem como a política econômica de cada país.

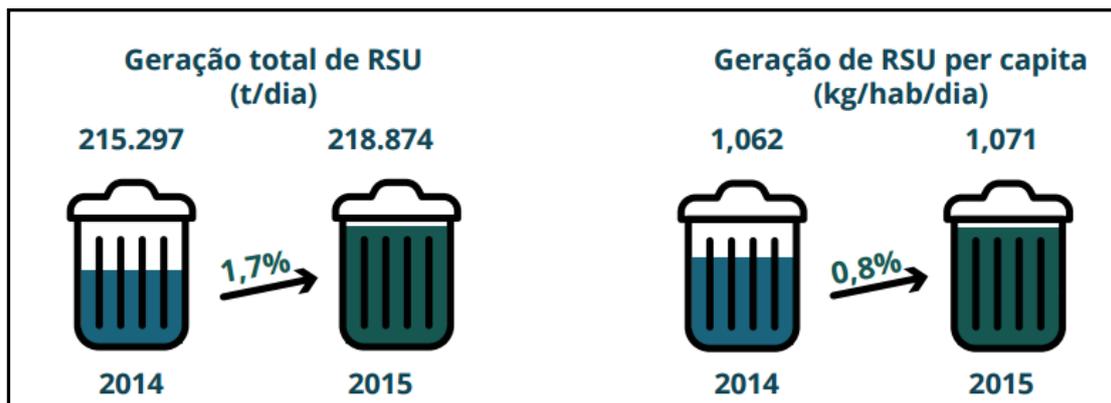
Os componentes principais dos resíduos brasileiros são orgânicos, como plásticos e papel, os quais contribuem com aproximadamente 78% do peso total de resíduos originado. O potencial de produção de energia, deriva da quantidade e a qualidade do RSU. Como indicado na Tabela 1, o RSU brasileiro tem uma elevada

carga de compostos orgânicos, favorecendo uma maior a produção de biogás (LEME, 2010 apud NADALETTI et al., 2014).

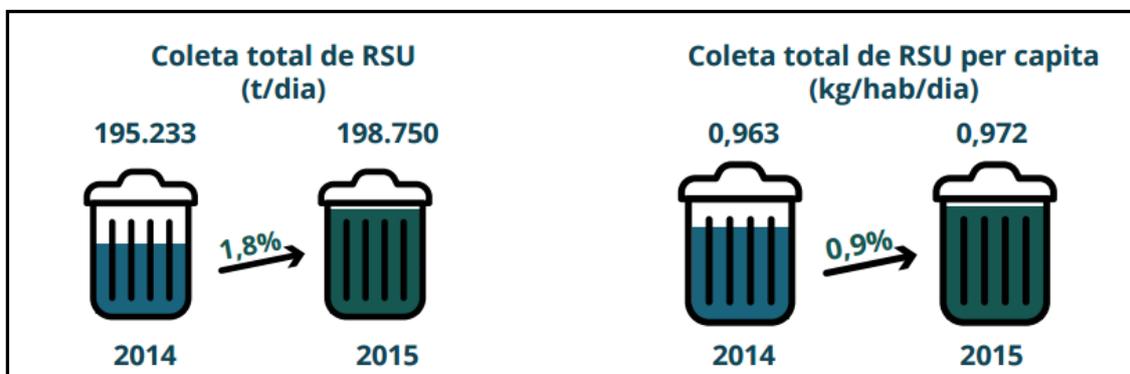
Dados recentes em relação aos RSU no Brasil, publicados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2015), revelam o panorama nacional relacionado aos RSU.

Em 2015, foram gerados no país 79,9 milhões de toneladas de RSU. Comparando-se a quantidade gerada e coletada de RSU em 2015, ou seja, 72,5 milhões de toneladas, percebe-se um índice de 90,8% de cobertura de coleta, porém, 7,3 milhões de toneladas ainda estão sem coleta e, conseqüentemente, sendo destinadas inadequadamente.

A Figura 5 demonstra a produção de RSU no Brasil em toneladas/dia, bem como sua geração per capita em quilos por dia; e a Figura 6 apresenta a coleta de RSU no país em 2015, nas mesmas condições, comparando-se a 2014.



**FIGURA 5** - Geração de RSU no Brasil em 2015  
 FONTE: ABRELPE (2015).

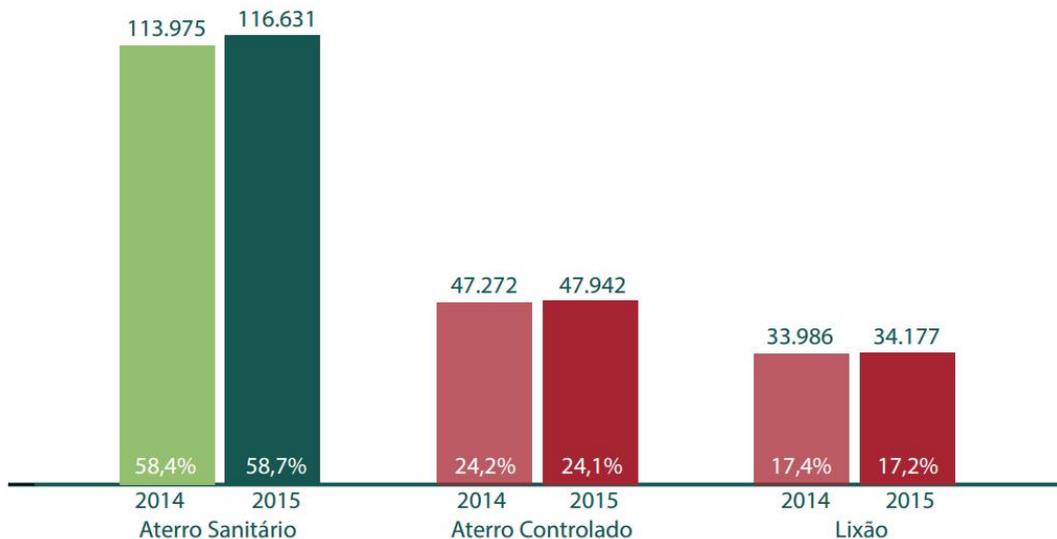


**FIGURA 6** - Coleta de RSU no Brasil em 2015  
 FONTE: ABRELPE (2015).

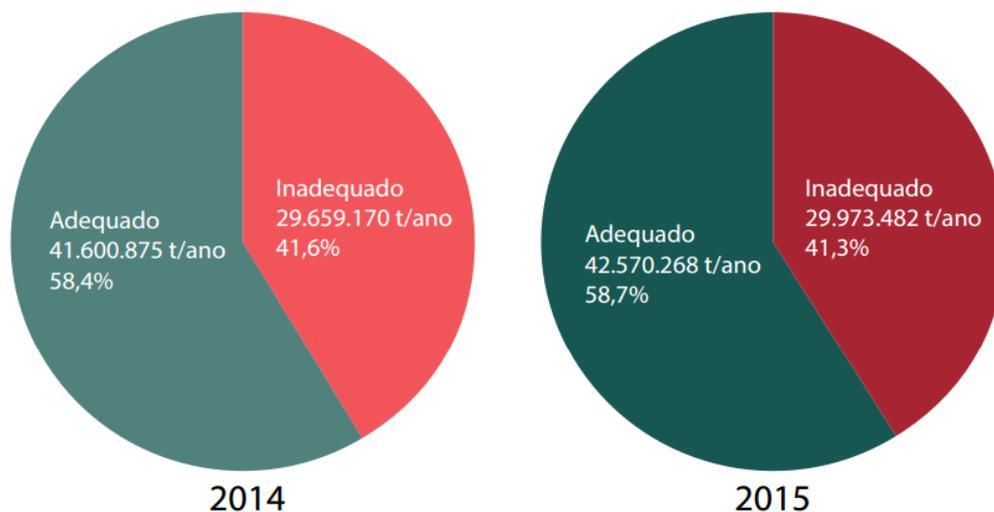
Em relação à disposição final dos RSU, 58,7% foram coletados e direcionados a aterros sanitários. Um dado preocupante revelado pelo estudo é que

30 milhões de toneladas de RSU ainda estão sendo levadas para lixões ou aterros controlados, os quais não possuem medidas de proteção ao meio ambiente. A prática da disposição final inadequada de RSU ainda ocorre em todas as regiões e estados brasileiros, e 3.326 municípios ainda fazem uso desses locais impróprios (ABRELPE, 2015).

A Figura 7 apresenta a disposição final dos RSU no Brasil em 2015 e a Figura 8 apresenta a disposição final em relação à adequação do destino.



**FIGURA 7** - Disposição final de RSU no Brasil em 2015  
 FONTE: ABRELPE (2015).



**FIGURA 8** - Disposição final de RSU no Brasil em relação à adequação do destino em 2015  
 FONTE: ABRELPE (2015).

Ainda no relatório da ABRELPE (2015), foi possível levantar que a quantidade de RSU coletada em 2015 cresceu em todas as regiões, em comparação ao ano anterior e que a região Sudeste continua respondendo por quase 53% do total e apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta do país.

Nas conclusões sobre o estudo, a ABRELPE (2015) afirma que:

a disposição final de RSU apresenta sinais de evolução e aprimoramento, com a maioria dos resíduos coletados (58,7%) sendo encaminhados para aterros sanitários, que se constituem como unidades adequadas. As unidades inadequadas, porém, ainda estão presentes em todas as regiões do país e recebem mais de 82.000 toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental (ABRELPE, 2015, p. 88).

A partir dos resultados apresentados neste relatório, é possível afirmar que o país tem avançado do quesito gestão de RSU, porém ainda são visíveis e prejudiciais as deficiências existentes neste contexto, o que envolve questões de proteção ao meio ambiente e saúde pública.

O que se percebe é que a produção de RSU vem crescendo a cada ano, aumentando em 1,7% de 2014 a 2015, quando a população obteve um crescimento de 0,8%. É de extrema importância que o país invista em sistemas de gestão de RSU eficientes e adequados para atender a esta crescente demanda.

## 2.5 O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA E O BIOMETANO

A digestão anaeróbia (DA) vem se apresentando como alternativa viável e promissora para o tratamento da fração orgânica dos RSU com aproveitamento energético do biogás proveniente desta ação. Tal opção já tem sido utilizada há séculos neste tipo de tratamento (REICHERT, 2005).

A DA concebe um sistema ecológico ligeiramente balanceado, onde cada microrganismo tem um desempenho fundamental na decomposição dos resíduos sólidos. Segundo Leite (2009), trata-se de um processo bioquímico decorre na inexistência de oxigênio molecular livre, onde uma variedade de espécies de microrganismos interage para transformar compostos orgânicos complexos em CH<sub>4</sub>, compostos inorgânicos como CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S e traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

Para Reis (2012), a DA também pode ser chamada de biogaseificação ou biometanização dos RSU, e é compreendida como o sistema de tratamento realizado na ausência de oxigênio, onde micro-organismos deterioram o material orgânico e produzem o biogás, que se compõe em maior proporção de metano e dióxido de carbono.

De acordo com Reichert (2005), os parâmetros essenciais de controle do processo da DA são:

a composição dos resíduos, em especial os sólidos voláteis; a taxa de alimentação; pH; temperatura (sistemas mesofílicos e termofílicos); relação C/N; tempo de residência da massa no reator; a mistura no interior do reator. A DA é um processo de dois estágios: hidrólise/acetogênese e metanogênese (REICHERT, 2005, p. 1).

Para Braber (2003 apud REICHERT, 2005), a DA ocorre em quatro estágios: o pré-tratamento, a digestão dos resíduos, a recuperação do biogás e o tratamento dos resíduos.

A DA, assim como outros sistemas, necessita de um pré-tratamento dos resíduos para que se possa alcançar uma massa homogênea. Tal processo compreende a etapa de desmembramento e triagem dos materiais não biodegradáveis, onde são removidos materiais reaproveitáveis (vidros, metais ou plásticos) e aqueles considerados não desejáveis (pedras e madeira, por exemplo), e posterior trituração (REICHERT, 2005).

Tendo a massa homogênea dentro do digestor, ela é diluída com água da torneira, lodo de esgoto, esgoto doméstico ou a recirculação do líquido efluente do reator, para que se consiga a obtenção dos conteúdos sólidos. Então, biogás adquirido através da DA é purificado e armazenado em gasômetros e o biossólido que resultou do processo deve ser curado aerobiamente para obter um composto de qualidade (REIS, 2012).

A digestão anaeróbia controlada de RSU produz 2-4 vezes mais metano do lixo em aterros sanitários. Uma digestão anaeróbia na planta piloto na Índia origina  $51\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t}^{-1}$  RSU. Duas plantas anaeróbicas industriais foram estudadas por Moraes Junior (2012), a primeira na Suécia, causou  $49\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t}^{-1}$  de resíduos sólidos urbanos tratados, enquanto a outra na Alemanha produziu  $81\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t}^{-1}$ RSU (NADALETTI et al., 2014).

Desta forma, a taxa de geração de metano na digestão anaeróbia industrial por reatores varia de 80 a 120m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t<sup>-1</sup> RSU, onde a produção de metano pelo tratamento de resíduos sólidos urbanos, no sistema anaeróbio, pode ser estimada usando: ADCH<sub>4</sub> = M.EF (SCHOLZ; MELIN; WESSLING, 2013).

Estima Chernicharo (1997) que a digestão anaeróbia com formação de metano seja a responsável pela completa mineralização de 5 a 10% de toda a matéria orgânica disponível na terra.

Atuam sobre estes resíduos as bactérias metanogênicas, que são responsáveis pela maior parte da degradação do resíduo, a sua baixa taxa de crescimento e de utilização dos ácidos orgânicos normalmente representa o fator limitante no processo de digestão como um todo (CHERNICHARO, 1997).

As bactérias metanogênicas desempenham duas funções primordiais: elas produzem um gás insolúvel (metano), possibilitando a remoção do carbono orgânico do ambiente anaeróbio, além de utilizarem o hidrogênio, favorecendo o ambiente para que as bactérias acidogênicas fermentem compostos orgânicos com a produção de ácido acético, o qual é convertido a metano (SPERLING, 2005).

Afirmam Cavalcante e Viana (2012) que, em aterros sanitários, a etapa final do processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelas bactérias metanogênicas. Estas, por sua vez, utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono.

Para Sperling (2005), embora apenas poucas espécies de metanogênicas sejam capazes de formar metano a partir do acetato, estas são normalmente os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia. São responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano, a partir do grupo *metil* do ácido acético.

Tanto as bactérias metanogênicas *acetoclásticas* quanto as *hidrogenotróficas* são muito importantes na manutenção do curso da digestão anaeróbia, uma vez que estas são responsáveis pela função essencial de consumir o hidrogênio produzido nas fases anteriores (CHERNICHARO, 1997).

Uma vez que as bactérias metanogênicas são responsáveis pela maior parte da degradação do resíduo, a sua baixa taxa de crescimento e de utilização dos ácidos orgânicos normalmente representa o fator limitante no processo de digestão

como um todo (COSTA et al., 2014).

Os microrganismos que participam do processo de decomposição anaeróbia podem ser divididos em três importantes grupos de bactérias, com desempenhos fisiológicos distintos, conforme descreve Chernicharo (1997):

- O primeiro grupo é composto de bactérias fermentativas, que transformam, por hidrólise, os polímeros em monômeros, e estes em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e outros produtos como glicose;
- O segundo grupo é formado pelas bactérias acidogênicas produtoras de hidrogênio, o qual converte os produtos gerados pelo primeiro grupo (aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois) em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- Os produtos finais do segundo grupo são os substratos essenciais para o terceiro grupo, que por sua vez constitui dois diferentes grupos de bactérias metanogênicas. Um grupo usa o acetato, transformando-o em metano e dióxido de carbono, enquanto o outro produz metano, através da redução do dióxido de carbono.

Avalia-se que a digestão anaeróbia, através do contato com o metano, seja responsável pela conclusão da mineralização de 5 a 10% de toda a matéria orgânica disponível no ambiente terrestre. Assim, a compreensão da microbiologia do tratamento dos resíduos sólidos é, portanto, fundamental para a realização do projeto e operação dos princípios de tratamento biológico (COSTA et al., 2014).

Para Sperling (2005), o tratamento inicial objetiva apenas a retirada dos sólidos grosseiros, enquanto o tratamento elementar aponta a extração de sólidos sedimentáveis e, em efeito, parte da matéria orgânica. Desta forma, em ambos prevalecem os mecanismos físicos de retirada de poluentes. Já no tratamento secundário, no qual predominam mecanismos biológicos, o objetivo é principalmente a retirada de matéria orgânica e, precisamente, de nutrientes (nitrogênio e fósforo). O tratamento terciário é designado pela remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) ou ainda, a remoção integrante de poluentes não extraídos no tratamento secundário.

Em relação às fases do desenvolvimento das bactérias, as quais produzem biogás, estão descritas a seguir com base em Chernicharo (1997).

Fase da Hidrólise. Uma vez que as bactérias não são capazes de assimilar a

matéria orgânica particulada, a primeira fase no processo de degradação anaeróbia consiste na hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros), em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores), os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Estas conversões de materiais particulados em dissolvidos são conseguidas através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Na anaerobiose, a hidrólise dos polímeros usualmente ocorre de forma lenta, sendo vários os fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado (LETTINGA et al., 1996).

Fase da Acidogênese. Os produtos solúveis oriundos da fase da hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são o principal produto dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas (CHERNICHARO, 1997).

Fase da Acetogênese. As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Dessa forma, as bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário, que produz substrato para as metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato (CHERNICHARO, 1997).

Fase da Metanogênese. A etapa final do processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelas bactérias metanogênicas. As metanogênicas utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono (LETTINGA et al., 1996).

Embora apenas poucas espécies de metanogênicas sejam capazes de formar metano a partir do acetato, estas são normalmente os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia. São responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano, a partir do grupo metil do ácido acético (LETTINGA et al., 1996). Desse modo, tanto as bactérias metanogênicas acetoclásticas, quanto as

hidrogenotróficas são muito importantes na manutenção do curso da digestão anaeróbia.

Conforme observado por Fogliatti (2004), para reatores atuando de modo estável, o arranjo do biogás produzido é razoavelmente uniforme. No entanto, a proporção do gás carbônico em relação ao metano pode variar substancialmente, dependendo das peculiaridades do composto orgânico a ser degradado. Para a digestão de esgotos domésticos, as proporções típicas de metano e dióxido de carbono no biogás, são: CH<sub>4</sub>: 70 a 80%; CO<sub>2</sub>: 20 a 30%.

O biometano originado na técnica de digestão anaeróbia é ligeiramente separado da etapa líquida, precisamente pela sua baixa solubilidade em água, brotando num alto grau de deterioração dos despejos líquidos, uma vez que este gás deixa o reator para a etapa gasosa. O dióxido de carbono, ao contrário, é bem mais misturado em água que o metano, retirando-se do reator parcialmente como gás e diluído no efluente líquido (CHERNICHARO, 1997).

Na teoria de Motta (2002), os resíduos sólidos habitualmente contêm polímeros orgânicos que precisam ser transformados em substância mais simples, (como monômeros), antes que possam ser fermentados. Assim, estes elementos orgânicos, compõem a parcela de DQO hidrolisável, sendo que a porcentagem de DQO é insolúvel essencialmente hidrolisada.

Geralmente os resíduos sólidos apresentam todos os tipos apropriados de nutrientes em concentrações adequadas, provendo dessa forma o ambiente ideal para o surgimento de fermentação, e sem limitações para o processo de digestão anaeróbia (MOTTA, 2002).

Na concepção de Chernicharo (1997), uma possível exceção é a disponibilidade de ferro em lodos gerados no tratamento de esgotos domésticos, o que pode restringir a ação metanogênica durante a deterioração destes. Desse modo, os efluentes industriais, ao contrário, são mais exclusivos em composição, e usualmente carecem uma suplementação de nutrientes para uma degradação ótima, sendo os nutrientes: em ordem decrescente de importância, necessários à estimulação nutricional de bactérias metanogênicas: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, manganês, selênio, riboflavina e vitamina B12.

Do ponto de vista operacional, se a alcalinidade for determinada a partir da ligação de esgoto afluente, é importante que a manutenção de elevados graus de alcalinidade no preceito de elevadas concentrações de ácidos voláteis, que capacita

ser fechadas, sem gerar a queda substancial do pH (FOGLIATTI, 2004).

Entretanto, se for necessária a suplementação de alcalinidade, então a seleção dos compostos químicos passa por uma avaliação de aplicabilidade e de economia. A obrigação mínima admissível de alcalinidade depende do agrupamento do esgoto, fator decisivo do potencial de geração de ácidos no sistema, (CHERNICHARO, 1997).

Da mesma forma que em qualquer outro sistema de tratamento de esgotos, imprescindível que o tanque séptico seja precedido de uma unidade de tratamento preliminar destinada à remoção de sólidos grosseiros. Tal unidade pode ser constituída de um gradeamento, ou simplesmente de um cesto coletor, dependendo do porte do sistema e da quantidade de material grosseiro presente nos esgotos (CHERNICHARO, 1997).

Para Dias (2000), a não incorporação de unidades de remoção de sólidos grosseiros, antecedendo os tanques sépticos, tem contribuído para a ocorrência de problemas operacionais, a exemplo de entupimento de tubulações e consequente extravasamento dos esgotos a montante do local obstruído.

Segundo Azevedo, Kiperstok e Moraes (2006), o sucesso da aplicação dos processos anaeróbios é dependente de uma série de condições, os quais relacionam-se especialmente à reunião e à ação da biomassa atual, e igualmente ao regime e padrão de fluxo do reator, isso se todos os agentes ambientais (temperaturas, pH, alcalinidade etc.) estiverem na faixa ótima.

No mesmo sentido, Chernicharo (1997) diz que os objetivos mais comuns a serem alcançados na operação dos processos anaeróbios são: a alta taxa de fermentação e o controle do tempo de detenção de sólidos. Esses objetivos são alcançados a partir do projeto e operação do sistema.

Não se pode esquecer que todos os processos de tratamento anaeróbico com o tempo resultam em fortes odores, tornando-se o principal impeditivo para um maior emprego das técnicas anaeróbias para o tratamento de efluentes líquidos.

Com esta preocupação, Andreoli (2001) afirma serem crescentes os estudos e as pesquisas desenvolvidos na área, especialmente a partir da década de 1970, incidido um maior conhecimento da microbiologia e bioquímica da prática anaeróbia e, portanto, dos conceitos a serem seguidas para o êxito do controle do mesmo.

Em relação à parcela de H<sub>2</sub>S extraída pelo coletor de gases, juntamente com o metano e o gás carbônico, existem algumas alternativas de tratamento que pode

ser aplicadas, de acordo com Chernicharo (1997).

- Adsorção, através da passagem do gás por um material poroso, a exemplo do carvão ativado;
- Absorção, através do contato do gás com um líquido pouco volátil (solvente), a exemplo do que ocorre em torres empacotadas e em torres com bandejas. Nestas o gás é aplicado em contra corrente com o solvente, favorecendo o máximo contato entre gás e líquido;
- Tratamento biológico, a exemplo dos filtros biológicos e dos biofiltros. Nos filtros biológicos, o fluxo de biogás passa através de uma torre empacotada, contendo elevada quantidade de biomassa aderida a um meio suporte. Com relação aos biofiltros, o biogás é introduzido em um tanque contendo material biologicamente ativo (composto) e os microrganismos se encarregam da descontaminação, gerando produtos inócuos como gás carbônico, água, sais minerais e biomassa microbiana;
- Precipitação química, através da passagem por um selo hídrico contendo algum elemento precipitante, por exemplo, precipitação química do sulfeto como FeS.

Portanto, observa-se que a adequada degradação dos esgotos orgânicos por qualquer processo biológico depende da conservação de um ambiente adequado para os microrganismos, abrangendo a influência ou o cancelamento dos materiais tóxicos, uma vez que qualquer composto quando presente em agrupamento é satisfatoriamente alto e pode ser tóxico, e a toxicidade deve ser discutida em termos de níveis tóxicos ao invés de materiais tóxicos.

Assim, na concepção de Eddy (2003 apud ZANETTE, 2009), o processo anaeróbio oferece grandes benefícios quando analisa-se o método anterior com o da atualidade. Entre as vantagens, confere o balanço energético favorável, a menor produção de biomassa, menor empenho de nutrientes, maior carga volumétrica e a probabilidade de tratamento da maioria dos compostos orgânicos.

Themelis (2008 apud NADALETTI et al., 2014) complementa que os números apresentados foram calculados com base na União Européia e nos Estados Unidos. Assim, é interessante notar que  $0.02\text{mgNm}^{-3}$  de dioxinas acomodado a uma taxa de emissão de 0.2 grama por milhão de toneladas de resíduos sólidos urbanos combustão.

De acordo com Gohlke e Martin (2007 apud NADALETTI et al., 2014), a destruição da dioxina pode ser mais do que 90% com um novo sistema WTE enriquecido com oxigênio.

Reichert (2005) apresenta algumas vantagens da digestão anaeróbia: aumento da vida útil dos aterros sanitários; retirada da fração orgânica dos RSU (fração que gera odores desagradáveis e lixiviados de alta carga); possibilita a coleta de todo o biogás gerado (em aterros, o índice de recuperação chega a 30 ou 40 %); diminuição da emissão de gases que afetam o efeito estufa (CH<sub>4</sub> é 23 vezes maior que o CO<sub>2</sub>); criação de produtos valorizáveis, tais como o biogás (energia e calor) e composto.

O autor também aponta alguns problemas desta prática: a composição dos resíduos pode variar dependendo da localização (zona de geração) e da estação do ano; mistura ineficiente de RSU e lodo de esgoto pode afetar a eficiência do processo; e podem ocorrer obstruções de canalização por pedaços maiores de resíduos, principalmente em sistemas contínuos.

Por fim, Reis (2012) versa que os processos de digestão anaeróbia usado no tratamento de RSU ainda não foram muito difundidos como uma prática viável, e isso ocorre porque há ausência de configurações de sistemas de tratamento e cuidados operacionais essenciais para esta ação.

## 2.6 COLETA DE BIOMETANO NOS ATERROS SANITÁRIOS

Após longa digestão anaeróbica dos resíduos expostos em decantamento de aterros sanitários, vem a produção do biogás, sendo importante o seu processo de coleta para que possa ser devidamente utilizado como fonte de energia renovável (REIS, 2017).

Para Murphy et al. (2013), gases que saem do gaseificador e que podem estar sujos, contendo alcatrões em níveis de 1500 e 2000mg por m<sup>3</sup> e outras partículas em níveis de 5000 e 10, 000 mg/m<sup>3</sup>, carecem ser retirados antes da metanação. Ou seja, o gás metano é rico para o uso combustível, mas para o seu emprego em transportes, é necessário remover CO<sub>2</sub>e H<sub>2</sub>O por meio de purificação e atualização. Esta tecnologia é avançada na indústria de digestão anaeróbia e abrange, por lavagem com água, absorção de oscilação de pressão e tecnologia de

membranas (PETERSSON, 2009 apud MURPHY et al., 2013).

Segundo Van Elk (2007 apud RODRIGUES 2009, p. 51), o planejamento de recuperação energética do biogás em aterros sanitários carece obter os seguintes sistemas:

a) **Sistema de impermeabilização superior:** destinado a evitar a fuga do biogás para atmosfera. A cobertura superior dos aterros sanitários normalmente é feita apenas com argila compactada;

b) **Poços de drenagem de biogás:** sistema obrigatório em aterros sanitários. No caso de aproveitamento do biogás, deverá ser dada atenção especial para otimizar a coleta e o tratamento dos gases;

c) **Rede de coleta e bombas de vácuo:** a rede de coleta leva o biogás drenado dos poços para a unidade de geração de energia elétrica. Normalmente é constituída por tubos de polietileno de alta densidade e deve ser aterrada para evitar acidentes. As bombas de vácuo são importantes para compensar as perdas de carga nas tubulações e garantir uma vazão regular de biogás para a unidade de geração de energia elétrica;

d) **Grupos geradores:** esses equipamentos utilizam normalmente motores de combustão interna desenvolvidos especialmente para funcionar utilizando o biogás como combustível. A geração de energia elétrica também pode ser feita através da utilização de turbinas.

Ainda segundo o autor, o implante de unidades de geração de biogás em aterros sanitários deverá ser precedido de estudo de viabilidade técnica e econômica, o qual necessita, obrigatoriamente, recomendar o potencial de geração de biogás no aterro sanitário, em emprego da quantidade e do arranjo dos resíduos prostrificados, e desta forma analisar os devidos processos de coleta de biogás. As canalizações são fechadas, onde o biogás produzido pode ser aglomerado num gasômetro, aceitando o aproveitamento do alto potencial energético concebido pelo gás metano.

Os gases constituídos concentram-se na parte superior interna do reator, de onde, transversalmente de um tubo, podem ser descartados ou reaproveitados para fins energéticos. O líquido segue para o decantador periférico e é despejado para uma canaleta que coleta todo o efluente tratado e o dirige para o núcleo receptor, podendo enviar o efluente para um corpo receptor ou para um pós-tratamento, como refinamento do biogás (ANDRADE NETO, 1997 apud ZILOTTI, 2012).

O padrão mais simples de colheita de gás de resíduos ajusta-se por três elementos principais: poços de coleta, tubos condutores e, para o sistema de tratamento, basta um compressor. Assim, a maioria dos aterros sanitários com princípio de captação de gás terá um *flare* para queima do excesso de gás ou para uso durante a ocasião de manutenção dos aparelhamentos (MUYLAERT et al., 2000; OLIVEIRA, 2000; OLIVEIRA et al.; 2006 apud RODRIGUES, 2009).

Na concepção de Tolmasquim (2003 apud RODRIGUES, 2009), outros sistemas capturarão de biogás por meio de duas configurações de aparelho de coleta: poços verticais e trincheiras horizontais, sendo os poços verticais largamente aproveitados em planos no campo de coleta de gás. Independente do princípio de coleta empregado, o próprio carece ser integrado a uma tubulação lateral que conduzirá o gás para um coletor principal.

Preferencialmente, o conjunto de coleta deve ser esquematizado para que o operante tenha o domínio de monitorar e assentar o fluxo de gás, quando necessário (MUYLAERT et al., 2000 apud RODRIGUES, 2009).

O biogás é succionado do aterro por bombas ou transportado pelo compressor até o plano de emprego por meio de pressão nos tubos de transmissão. A conexão do poço de coleta com a bomba e demais unidades do sistema de geração de energia pode ser disposta de vários jeitos, consistindo na a união a um tubo principal que atravessa todo o aterro (HENRIQUES, 2004 apud RODRIGUES, 2009).

Verifica-se então que, há variedades de procedimentos para a coleta de biogás, vendo que para retirar qualquer tipo de gás, poderá ser usado os mesmos arranjos compostos no projeto, somente será concebido o uso mais eficiente de cada tubulação, podendo minimizar a quantidade de condensado que se acumula no sistema de coleta.

## 2.7 A IMPORTÂNCIA DO REFINO DO BIOGÁS PARA BIOMETANO

As características do biogás provêm da pressão, temperatura, umidade, centralização de metano e reunião de gases inertes e/ou ácidos (COSTA, 2006).

O biometano lançado em aterros sanitários possui potencialidade de aquecimento global 21 vezes maior que o dióxido de carbono. Tal importância faz

com que o mesmo seja identificado como um cooperador expressivo na crescente emissão de GEE na atmosfera terrestre (RODRIGUES, 2009).

Pode ser usado nas condições em que é gerado e, dependendo da aplicação, pode ser necessária a moderação da concentração de  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ , redução da umidade ou mesmo a elevação da pressão (ZILOTTI, 2012).

Em termos gerais, o biogás é composto especialmente por metano e gás carbônico, sendo outros gases, como o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), e nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), constituintes em baixas concentrações (COSTA, 2006).

O metano ( $\text{CH}_4$ ) é um gás que tem um potencial de efeito estufa 21 vezes maior que o do dióxido de carbono, contribuindo substancialmente para o agravamento do efeito estufa e conseqüentemente do aquecimento global.

O metano originado na ação de digestão anaeróbica pode ocasionar grande impacto ambiental se for liberado diretamente na atmosfera. Por isso, há a necessidade da sua queima, convertendo o  $\text{CH}_4$  para  $\text{CO}_2$ , a fim de diminuir o impacto causado ao meio ambiente. Trata-se de um gás incolor, inodoro, altamente combustível. Sua combustão proporciona uma chama azul-lilás e, às vezes, com 12 pequenas manchas vermelhas. Não produz fuligem e seu índice de poluição atmosférico é inferior ao do butano, existente no gás de cozinha (ZILOTTI, 2012).

Quanto maior a quantidade de metano encontrada no gás, melhor a qualidade do gás gerado. Vale ressaltar que o biogás pode ser utilizado para a geração de energia elétrica, além de aquecimento das instalações de aves e de suínos. No entanto, seu uso depende da sua qualidade, ou seja, a quantidade de metano presente na sua composição (COSTA, 2006).

O refino de biogás em biometano ocorre em duas etapas. A primeira incide no método de limpeza do gás para a remoção de componentes nocivos; a segunda é o ajuste do poder calorífico e densidade relativa, por meio de um processo de remoção do  $\text{CO}_2$ . Esta modificação é necessária em prol da adequação às normas de uso do biometano como combustível veicular (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

De acordo com os autores, são empregados distintos processos para o refino do biogás para biometano, que diferem no seu funcionamento e nas condições de qualidade de entrada do gás, além da eficiência.

Segundo Bove e Lunghi (2006), métodos como o de condensação e de secagem são utilizados para remover a água presente no gás e na remoção do

sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S). Durante a digestão, aplica-se a dosagem de ar e adição de cloreto de ferro no tanque digestor. Já para a remoção após a digestão, técnicas como adsorção em pastilhas de óxido de ferro são usadas.

Após estas técnicas, podem ser necessárias etapas de remoção extra, ou seja, alguma etapa para remoção de traços de alguns componentes, como hidrocarbonetos, amônia, oxigênio, monóxido de carbono e nitrogênio (OLIVEIRA; ROSA, 2003).

Por fim, o metano (CH<sub>4</sub>) deve ser separado do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), utilizando processos de pressão oscilante, separação por membrana (RYCKEBOSCH; DROUILLOM; VERVAEREN, 2011).

Após estas alterações, o produto final é o biometano, o qual contém tipicamente 95-97% de CH<sub>4</sub> e 1-3% de CO<sub>2</sub> (RYCKEBOSCH; DROUILLOM; VERVAEREN, 2011).

Na concepção de Cortez, Lora e Gomes (2008), o metano (CH<sub>4</sub>) com elevado poder de combustão é originado do biogás filtrado, que em conceito de combustível automotivo, se assemelha ao GNV (Gás Natural Veicular), podendo ser utilizado como combustível em veículos de transporte de passageiros ou de carga.

Esta pode se conformar em uma escolha importante quando o biogás é produzido pela própria cadeia de fornecimento que o empregará, pela autonomia combustível e pela diminuição de custos que isto concebe a uma reta de coleta diária de leite, por exemplo, ou uma linha de distribuição de rações. Pela filtragem, aparta-se do metano (CH<sub>4</sub>) do gás carbônico (CO<sub>2</sub>), que trabalha como anti-chama ou não combustível. É afastado igualmente o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), que é corrosivo e mesmo em pequenas porções, e provoca a corrosão de peças eficazes dos motores (IGONI et al., 2008).

Segundo Zanette (2009), com base nos dados sobre a composição média dos RSU no Brasil, a potencialidade de fabricação de metano avaliado para os RSU é de 150 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t resíduo. Ponderando as informações de acomodação de lixo em aterros sanitários apresentados pelo IBGE, poderiam ser produzidos 12,4 milhões de m<sup>3</sup> de metano por dia nos aterros brasileiros. E empregando a taxa de geração de lixo de 0,26 t/hab/ano proporcionada pelo IPCC e apreciando o arranjo de todo o lixo em aterros com coleta de biogás, este potencial chega a 15,8 milhões de m<sup>3</sup>/dia.

De acordo com Murphy et al. (2013), para a utilização como combustível para transportes ou para a injeção na rede de gás do biogás, o biometano deve ser limpo

e atualizado. O biogás não só contém metano, dióxido de carbono e água, mas outros compostos em pequenas quantidades.

Para os autores, estes compostos incluem sulfureto de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, amônia, siloxanos e partículas. A remoção do dióxido de carbono é denominada melhoramento e é levada a cabo depois de limpá-lo. A limpeza é empregada para remover os outros compostos.

Peterson (2003 apud MURPHY et al., 2013) apresenta métodos para limpeza de biogás, tais como: remoção biológica de H<sub>2</sub>S; a compressão e o arrefecimento para remover a água; a secagem para remover a amônia; e o carvão ativado para remover siloxanos. Delineia outras técnicas para atualizar biogás limpo para biometano, incluindo: pressão balanço adsorção; depuração da água; e de separação por membrana.

Segundo Koornneefa et al. (2013), o biometano pode ser produzido por meio de vários caminhos. A gaseificação combinada com metanação e biogás melhorado, produzido pela digestão anaeróbica, parece ser tecnologia promissora que pode ser combinada com CCS. Nestas rotas, a remoção de CO<sub>2</sub> já é uma parte essencial dos artifícios para consentir às especificações da rede de gás natural.

Dessa forma, verifica-se que há muitos métodos que podem ser usados para o refino do Biometano até chegar ao seu destino necessário.

## 2.8 BIOMETANO: ENERGIA COMBUSTIVEL PARA O USO VEICULAR

O Biometano é um sistema mais benéfico da modernidade tecnológica, contribuindo com a sociedade e com o meio ambiente.

Na Resolução ANP Nº 8 de 31/01/2015, a ANP detalha a definição de biometano como sendo o “biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do Biogás” e aponta em seu Art. 1º, parágrafo único que tal resolução se aplica “ao Biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações residenciais e comerciais” (ANP, 2015, p. 2).

Em seu Art. 2º, traz a seguinte redação:

O uso veicular ou em equipamentos residenciais e comerciais de Biometano obtido a partir de resíduos sólidos urbanos ou resíduos de esgotamento

sanitário, ainda que atenda a especificação contida no Regulamento Técnico, parte integrante desta Resolução, deve obedecer ao disposto na Resolução ANP nº 21, de 11 de maio de 2016. Redação do artigo dada pela Resolução ANP Nº 21 DE 11/05/2016 (ANP, 2015, p. 2).

É importante salientar que a referida Resolução traz consigo o Regulamento Técnico ANP Nº1/2015, que propôs a criação de Resolução que estabelece a especificação do Biometano de origem nacional a ser comercializado em todo o território nacional (ANP, 2015).

O Biometano deve ser isento de partículas sólidas ou líquidas devendo ser usado um filtro de 0,2 um no produtor e 1,0 um no revendedor varejista. A adoção do Biometano quando necessária deverá atender a norma ABNT NBR 15616:2008, descreve as atividades de odorização e os controles adotados para garantir a entrega do gás natural (GN) para consumo, em níveis olfativos seguros. Esta Norma não se aplica a outros gases combustíveis (ANP, 2015).

Segundo Bley Jr. (2015), estabelecidos os parâmetros de qualidade para o biometano e reforçando o conceito das definições da ANP com relação ao biogás, como sendo um gás bruto e o biometano o gás combustível derivado da purificação, ou refino do biogás, tem-se então o cenário para o desenvolvimento do Biogás de 2ª Geração, que inclui o Biometano, que é o seu derivado da qualidade do biogás para uso combustível, sendo o mais tecnológico uso possível do biogás.

Para Singh, Smyth e Murphy (2010), o biogás para produção CHP é uma tecnologia confiável. Nesta mesma confiança, o biogás pode ser atualizado para biometano, por remoção de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e outras impurezas para deixar 97% de metano ( $\text{CH}_4$ ) no gás. O Biometano pode ser utilizado como um combustível para transportes ou injetado a uma rede de gás em qualquer lugar.

Os autores afirmam que o biogás e a produção de biometano a partir de recursos agrícolas, silagem de capim, resíduos de compostos diversos, tem potencialidade em países de clima temperado.

Outros usos, como em motores estacionários para geração de energia elétrica e em caldeiras para geração de vapor ainda deverão ter regulações específicas; porém, por dedução a partir das definições para combustível veicular, pode-se chegar às características de qualidade também para essas situações (EPE, 2008).

Por exemplo, pelo refino parcial, é essencial a remoção do gás sulfídrico e a retirada da água e particulados para uso em motores estacionários, que podem rodar bem com gás carbônico ainda misturado ao biometano (BLEY JR., 2015).

Assim, no mesmo conceito, Bley Jr. (2015) aponta mais um aspecto a se considerar quanto à qualidade do biometano, que são os parâmetros da ANP que servem para regular o mercado oficial, ou seja, referem-se ao biometano a ser ofertado em postos de abastecimento ou injetado em gasodutos de gás natural.

A EPE (2008) aponta também a real probabilidade de evolução da produção descentralizada de biogás como combustível veicular, que pode se formar conjugando no grande potencial de biomassa residual e a versatilidade do biogás causado com esse potencial, com o interesse na redução de emissões de gases do efeito estufa com a queima de combustíveis fósseis e com o impacto de custos desses combustíveis (BLEY JR., 2015).

A competitividade do biometano em relação aos combustíveis líquidos, destacando o diesel e gasolina, e mesmo em relação ao gás, é avaliada pela EPE (2008) como mais vantajosa, visto a produção descentralizada daquele biocombustível. Além disso, o biometano prescinde da logística de transporte e distribuição essencial aos combustíveis convencionais.

No entanto, entra em sobreaviso o fato de que, assim como no caso da geração distribuída de eletricidade, a produção de biometano também necessita que questões institucionais (regulações) sejam estabelecidas para a criação de ambiente mais adequado ao investimento. A penetração projetada, no cenário de referência, em 2050 atinge o volume de 36 milhões de m<sup>3</sup> por dia (BLEY JR., 2015).

Afirma Martini (2009) que tanto a geração distribuída de energia elétrica quanto a produção descentralizada de combustíveis prescindem de custos de transporte e distribuição. Como os setores produtivos se localizam em regiões remotas do território nacional, longe das refinarias, esses setores deverão optar pelos subsídios energéticos acessíveis em seus territórios.

Deve-se buscar campo no mercado, pautando-se na importância de que a geração estendida de energia elétrica, a cogeração de energia térmica e a produção descentralizada de combustíveis devem incidir juntas (BLEY JR., 2015).

Para conduzir o transporte de produção, já há veículos preparados entre as diferentes práticas das linhas produtivas, que carecem independê-lo, a curto prazo,

dos combustíveis convencionais, pois o biometano produzido nas próprias empresas produtivas possa substituí-los (BOATENG; LEE; MENSAH, 2013).

Entretanto, biogás é a fonte de energia renovável que mais se assemelha à hidráulica, pois pode ser armazenado e a energia gerada pode ser expedida de modo durável, não lançando impactos no cabeamento de distribuição (BLEY JR., 2015).

Esse desenvolvimento ordena também que os domínios produtivos se combinem ambientalmente, o que sugere o processamento de resíduos, dejetos e efluentes, sendo que originar energia com eles é a única probabilidade de causar ativos econômicos para a produção e diminuição dos investimentos em meio ambiente (BLEY JR., 2015).

A ANP (2015) fortifica a regulamentação do uso do biometano, combustível adquirido por meio do processamento do biogás gerado em método de decomposições de resíduos, através de suas resoluções e regulamentos técnicos.

Tais medidas consentem a comercialização e a distribuição do combustível, permitindo que seja empregado em vários aproveitamentos, como no transporte coletivo de passageiros e explicita itens, como a concentração de gás carbônico no combustível, regras de transporte e comercialização, além das fontes de resíduos, pois o biometano, por ser de características semelhantes, deve obedecer a várias deliberações conjecturadas para o gás natural (ANP, 2015).

Nesta concepção, de que o biogás não pode e não tem competência para ser aproveitado em estado bruto, pode-se garantir que o mesmo não poderá ser comercializado nesse grau bruto. É necessária a recuperação de mais de 95% do metano, com alta eficácia e alta tecnologia para completar um produto de alto valor agregado, aponta Schittini (2004 apud BLEY JR, 2015). Assim, a determinação pelo novo método é utilizar o lixo, reduzindo a elevada disposição deste no meio ambiente, e com essa atitude, reduzir expressivamente a quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) liberado na atmosfera.

Vale lembrar que os veículos considerados pesados foram mencionados pelo Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), qual estabeleceu fases de limites de emissões poluentes e, conseqüentemente, tiveram a sua implantação de forma gradativa. Ou seja, veículos com massa superior a 3.856 kg, também apresentaram suas etapas definidas (MELO, 2011 apud PROCONVE, 2013).

Os veículos leves (com massa total igual ou menor que 3.856 kg e capacidade máxima de 12 passageiros) tiveram as seguintes fases, conforme mostra Tabela 2.

**Tabela 2:** Limite máximo de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros

Poluentes	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6
Monóxido de Carbono (CO em g/km)	24,0	12,0	2,0	2,0	2,0	1,3
Hidrocarbonetos (HC em g/km)	2,1	1,2	0,3	0,3 <sup>2</sup>	0,3 <sup>2</sup>	0,3 <sup>2</sup>
Hidrocarbonetos não metano (NMHC em g/km)	NE	NE	NE	0,16	0,05	0,05
Óxidos de nitrogênio (NOx em g/km)	2,0	1,4	0,6	0,25 <sup>3</sup> ou 0,6 <sup>4</sup>	0,12 <sup>3</sup> Ou 0,35 <sup>4</sup>	0,08
Material particulado (MP em g/km)	NE	NE	0,05	0,05	0,05	0,025
Aldeídos (CHO em g/km)	NE	0,15	0,03	0,03	0,02	0,02
Emissão evaporativa (g/ensaio)	6,0	6,0	2,0	2,0	2,0	1,5 <sup>6</sup> ou 2,0 <sup>5)</sup> (6)
Emissão de gás no cárter	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula	nula

FORNTE: PROCONVE (2013).

Esta demonstração do PROCONVE apresentou uma ação fundamental na diminuição das emissões de poluidores atmosféricos de automóveis, pois, em 1988, um veículo gerava em torno de 54 g/km de CO; já em 2010, a emissão caiu para 0,7 g/km. Isso aconteceu porque, com estes parâmetros formados, junto os fabricantes de automotivos, cada vez mais procuraram as tecnologias, para se acomodar aos parâmetros constituídos pelo PROCONVE (MELO, 2011 apud PROCONVE, 2013).

Neste panorama de dados da PROCONVE (2013), verifica-se que o Biometano é adequado, pois supre a energia combustível para o uso veicular, trazendo esperança para a diminuição da poluição atmosférica em nossa cidade.

Ressalta-se também sobre a valorização Econômica do Biometano, onde produção de biometano terá o domínio de ser valorizado em três vertentes: valorização energética (calor, eletricidade, volume injetado na rede ou aplicação veicular), valorização do composto final e valorização econômica por meio da diminuição de emissão de GEE (PROCONVE, 2013).

A redução de GEE, conforme Koorneefa (2013 apud JARDIM, 2013), indica-se que a produção de biometano com captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> (CCS – *Carbon Capture and Storage*) poderá abranger um enorme potencial econômico.

Segundo este autor, a afinidade destes métodos, tem capacidade de reduzir cerca de 3,5 Gton de emissão de GEE para atmosfera até 2050.

Seguindo a compreensão de Koorneefa (2013 apud JARDIM, 2013), levando na apreciação que a retirada de CO<sub>2</sub>, é essencial à metodologia de produção de biometano; a sua valorização por meio do resgate ou emprego para o uso industrial local é cada vez mais uma alternativa viável, pois o potencial econômico da produção de biometano ajustada com CCS será maior em locais de preços mais acentuados de GN e de CO<sub>2</sub>.

Segundo Singh, Smith e Murphy (2009), o emprego do biogás como combustível para os transportes está se tornando cada vez mais popular em todo o mundo. Veículos movidos a gás natural (GNV) também podem ser operados em biogás, onde o biogás é atualizado para a qualidade do gás natural. Mas a modernização de bioenergia veicular é o Biometano, sendo o primordial quando inserido como um combustível de transporte, sem níveis de contaminantes, podendo destruir um motor de carro.

Neste cenário de afirmações e recomendações sobre o produto Biometano, está visível que o mundo, num futuro bem próximo, se moverá sobre rodas com o biometano.

## 2.9 PAÍSES QUE UTILIZAM O BIOMETANO

Este tópico tem a relevância de mostrar os países que mais se destacam em projetos de biodigestores e de utilização do biometano, evidenciando os avanços que esta tecnologia obteve nas últimas décadas.

Segundo Murphy et al. (2013), o recurso global de biometano em vários países que usam este a partir do biogás obtém fontes como: os resíduos de matadouros, pastas agrícolas, resíduos de processamento de alimentos.

O biometano é um dos elementos do grupo de combustíveis, uma vez que é originário de matéria orgânica petrificada e diante do aspecto “limpo”, o biometano pode ser adquirido de matéria orgânica com alta ação química de oxigênio, de esgotos cloacais e de resíduos orgânicos urbanos. O emprego deste gás demanda equipamentos e compressores exclusivos sem os quais não é aceitável conseguir a

conversão da energia térmica em mecânica para a utilização em veículos (LINO; ISMAIL, 2011).

Atualmente, há algumas estações de produção de biometano tanto na Europa como nos Estados Unidos, empregando tecnologias convencionais, basicamente acomodadas em indústrias químicas (SCHOLZ; MELIN; WESSLING, 2013). Estas estações oferecem determinadas desvantagens, sobretudo referentes à grandeza dos equipamentos e ao elevado consumo energético.

As tecnologias de membrana surgem como uma opção aos processos convencionais e com várias vantagens se comparada a outras tecnologias, tais como: processo contínuo, baixo gasto energético e baixo valor da regeneração das membranas (YI HE, 2012 apud JARDIM, 2013).

Para Murphy et al. (2013), o biometano é um combustível de transporte, um excelente recurso tanto em termos econômicos quanto em relação a prevenção de poluição ambiental.

### 2.9.1 Alemanha

No continente europeu, a Alemanha é legitimada, entre outros países, como uma potência mundial em termos de produção de energia oriunda do biogás originado de biodigestores. Na sua região leste, encontra-se a usina Könnern, representada pela Figura 9, pioneira neste contexto com capacidade tecnológica para distribuir o biometano em locais distantes de seu berço de produção. Tendo iniciado suas atividades no ano de 2009, tal usina garante a rede nacional de gás da Alemanha produzindo 15 milhões de metros cúbicos ( $m^3$ ) de biometano ao ano, que são redistribuídos para residências e indústrias do país (BGS, 2013).



**FIGURA 9** - Usina de biogás Könnern, Alemanha.  
FONTE: BGS (2013).

Para que se tenha uma noção da importância da Könnern, na sua ausência, a Alemanha teria que construir uma usina com potência de 17MW para suprir a demanda existente (BGS, 2013).

No ano de 2013, já existiam na Alemanha aproximadamente 3,7 mil usinas de biogás em funcionamento, o que possibilitou ao país o desligamento de três reatores nucleares. A meta é que até o ano de 2022, sejam desligadas todas as usinas nucleares a partir de sua substituição por usinas que operem com fontes mais seguras e renováveis, tal como o biogás (BGS, 2013).

Ainda em relação à Alemanha, cabe salientar que seu governo instituiu uma lei que solicite a injeção de biometano na rede de Gás Natural. O desígnio é trocar em 10% o Gás Natural para consumir por biometano até o ano de 2030, o que concebe cerca de 10 BCM (FERREIRA; MARQUES; MALICO, 2012).

### **2.9.2 Suécia**

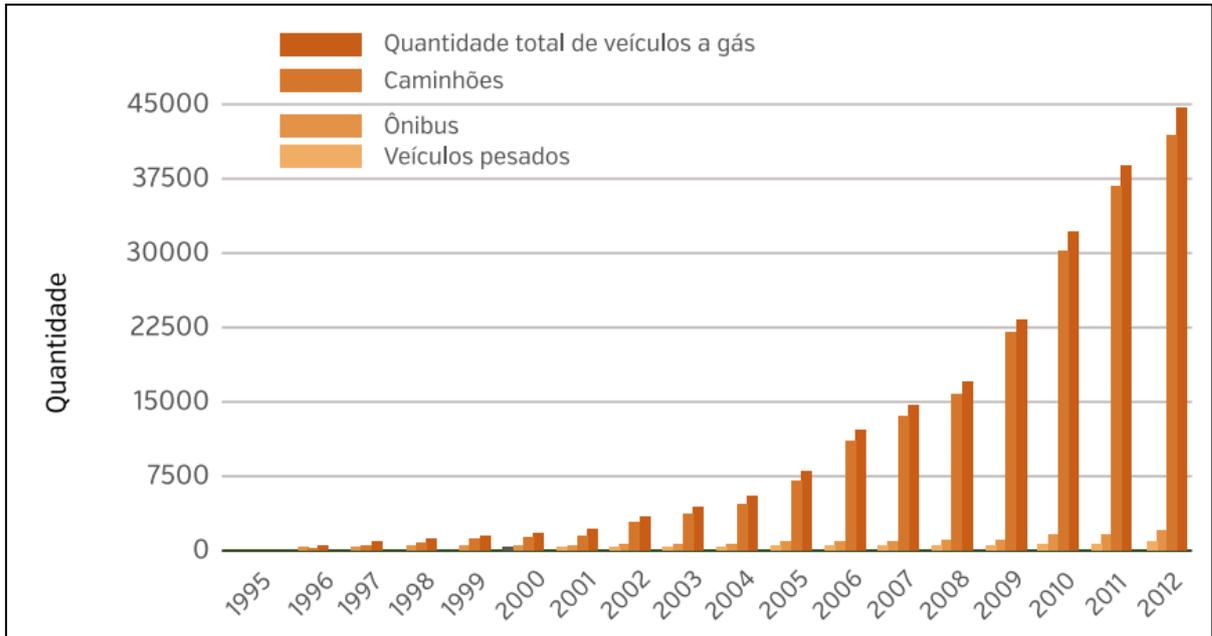
Na Europa, a Suécia é reconhecida como um dos países pioneiros na utilização do biometano como combustível. Esta ação teve seu início na década de 1990, quando em 1999 passaram a valer as normas de qualidade para a injeção de biometano na rede, trazendo também regulamentação relacionada à utilização do biometano como combustível. Preconizou-se que o teor de metano deveria atingir no mínimo 96% e o teor de enxofre deveria ser inferior a 23 mg/m<sup>3</sup> (MURPHY et al., 2013; BRASIL, 2016).

O ano de 2006 também representou mais um grande avanço para o país neste contexto, pois tratou-se do primeiro ano em que as vendas do biometano foram maiores que as vendas do gás natural para utilização em veículos, o que acarretou uma representatividade de 54% do faturamento total de metano para veículos. Em outras palavras, o volume de 24 milhões de Nm<sup>3</sup> de biometano que moveu veículos no país, substituiu aproximadamente 25 milhões de litros de gasolina que teriam sido usados para este fim (BRASIL, 2016).

A utilização do biometano como combustível é cada vez mais crescente no país, como mostra a Figura 10. Atualmente, é possível afirmar que o biometano

corresponde a mais de 60% do metano total utilizado nos veículos movidos a gás natural na Suécia.

Salienta-se, ainda, que em mais de doze cidades suecas, as frotas de ônibus são totalmente movidas a biometano, ação incentivada através de subsídios municipais e regionais (MURPHY et al., 2013; BRASIL, 2016).



**FIGURA 10** - Número de veículos movidos a gás natural (GNV) na Suécia (de 1995 a 2012).

Fonte: BRASIL (2016)

### 2.9.3 Holanda

A Holanda também é encarada como uma das pioneiras no cenário da utilização do biometano. No ano de 1987, a concessionária Tilburger Gasversorger criou uma estação de tratamento de gás no terreno do antigo aterro sanitário, onde o “gás do aterro sanitário é tratado junto com o gás oriundo de uma estação de incineração de lixo e uma estação de biogás para resíduos orgânicos da indústria alimentícia e residências privadas” (BRASIL, 2016, p. 61).

Estima-se que são coletadas 52.000 toneladas de matéria-prima ao ano para a produção de biogás, onde mais de 70% do biogás bruto vem da usina de biogás.

Na usina de biogás de Well, na Holanda, no ano de 2006, foram instituídos dois biodigestores de biogás com uma capacidade elétrica de 2,5 MW, com

ampliação realizada em 2011. Atualmente, produz-se ao ano 2,2 milhões de metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de biometano, que é injetado na rede de gás natural conforme as especificações nacionais (BRASIL, 2016).

Os incentivos à injeção de biometano são oferecidos pela empresa Stimulering Duurzame Energie Scheme (SDE +), no valor da diferença entre os custos de produção e as receitas geradas, por exemplo, com o preço de energia (BRASIL, 2016).

A meta para o ano de 2020, previsto pelo National Renewable Energy Action Plan (NREAP) da Holanda, é de 24.000 Terajoules (TJ) de produção de energia de biometano, gerado a partir de qualquer tipo de matéria-prima (BRASIL, 2016).

#### **2.9.4 Estados Unidos**

Segundo Knight (2006), os Estados Unidos da América (EUA) contam com uma série de programas voltados à prevenção e à minimização da poluição atmosférica, sendo possíveis através de incentivos governamentais e recursos financeiros federais. Tais programas possuem supervisão de agências especializadas que são encarregadas de monitorar o seu desenvolvimento e por divulgar e sensibilizar a respeito das informações indispensáveis para se ter acesso aos benefícios oferecidos pelas leis que envolvem estas questões.

Uma destas legislações trata-se do Clean Air Act ou, em português, Ato do Ar Limpo, definido no ano de 1963 que reúne leis diversas voltadas ao tema da poluição do ar em geral. Através deste ato, os EUA tornam-se capazes de impor políticas, regras de financiamentos, multas e afins (AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS - USEPA, 1996 apud ZANETTE, 2009; KNIGHT, 2006).

No ano de 1970, o congresso norte-americano criou a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) com a finalidade de resguardar aspectos relacionados ao meio ambiente. Esta agência, por sua vez, instaurou “Padrões Nacionais de Qualidade do Ar Ambiente (NAAQS – National Ambient Air Quality Standards) que são conferidos e revisados para seis poluentes atmosféricos: dióxido NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, MP e chumbo (Pb)”, e ainda estabeleceu metas de emissão para todos os veículos, entre outras medidas (KNIGHT, 2006, p. 32).

Foi a partir destas medidas que o emprego do biogás evoluiu nos EUA e quando teve início a exigência de que a coleta e queima ou uso do biometano em aterros com competência superior a 2,5 milhões de toneladas (USEPA, 1996 apud ZANETTE, 2009).

Já no ano de 1990, o Ato do Ar Limpo recebeu novas emendas, estabelecendo um mecanismo de permissões de emissão dos poluentes dióxido sulfúrico (SO<sub>2</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (USEPA, 1996 apud ZANETTE, 2009).

Recentemente, mesmo com todas as medidas sendo tomadas, os EUA estimaram que no ano de 2013, as emissões de metano aumentaram o equivalente a 721,5 milhões de toneladas métricas através da indústria petrolífera que ocupou o primeiro lugar no ranking, deixando o setor da pecuária, antes o maior vilão, em segundo plano (NICHOLSON, 2016).

No mesmo ano, 2013, destaca-se a inauguração da usina de biodigestão de Sacramento, na Califórnia, representada pela Figura 11, que recebe 25 toneladas ao dia de resíduos e sobras de alimentos provenientes de supermercados, restaurantes e indústrias, convertendo-os em gás natural, eletricidade e fertilizante agrícola (BGS, 2013).



**FIGURA 11** - Usina de Biodigestão de Sacramento, Califórnia, EUA.

Fonte: BGS (2013)

Um dado interessante é que a usina de Sacramento emprega o sistema de Biodigestão Anaeróbica de Alto Teor Sólido (ADB, em inglês), que não demanda da adição de água para funcionar; trata-se de uma tecnologia que permite reduzir o tamanho do biodigestor e o custo de operação, sem prejudicar a eficácia da geração de biogás (BGS, 2013).

A usina de Sacramento é autossuficiente em relação ao consumo de energia elétrica e ainda abastece uma frota de caminhões das empresas parceiras com gás natural. Ou seja, há o benefício ambiental e também econômico, já que gera U\$ 1,1 milhão ao ano em arrecadação de impostos para o governo local (BGS, 2013).

Em maio de 2016, ainda diante da preocupação com o aumento das emissões de metano, o governo dos EUA anunciou novas maneiras para conter a emissão de 11 milhões de toneladas métricas de gás metano até 2025, regulação esta que pretende ampliar. Para isso, a USEPA divulgou uma série de regulamentações para que tais emissões sejam controladas de maneira mais eficaz (NICHOLSON, 2016).

### **2.9.5 China**

Em meio à preocupação com a questão da energia sustentável, em 2006 a China lançou uma lei voltada para a adoção de alternativas renováveis como a energia eólica, de biomassa e de geração de biometano. Destaque nas soluções criativas em relação à utilização de resíduos, o país construiu um grande número de geradores que transformam lixo em metano nas áreas rurais. O resultado desta ação, medido em 2006, foi o suprimento das necessidades energéticas de 17 milhões de famílias (MANAHAN, 2013).

Uma das usinas em evidência na China, funcionando desde 2010, é a usina Aning Starch CNG, na cidade de Nanning. Ela gera biogás para 120 táxis da cidade que foram adequados para usar este tipo de combustível.

O biogás é gerado a partir do efluente do processamento de amido e fécula da Aning Starch Co., que é tratado por processos anaeróbicos na ETE da indústria. Antes da implantação do projeto, o biogás era queimado e lançado na atmosfera. Além de contribuir para o meio ambiente, o projeto mostrou-se rentável: segundo dados da empresa, o lucro anual com a comercialização do biogás é de U\$ 4 milhões (BLOG BGS, 2013, p. 08).

Ressalta-se que o projeto contribuiu na diminuição de dois grandes problemas que afetavam a região: os altos índices de poluição atmosférica e a eutrofização dos corpos de água próximos, já que o amido possui alto teor de matéria orgânica. Nesta usina, a produção diária é de 30.0000 m<sup>3</sup> de biogás, que posteriormente à etapa de purificação, transformam-se em 21.000 m<sup>3</sup> de biocombustível. Ainda, a água tratada

no decorrer do processo é empregada para fins de irrigação por produtores locais (BGS, 2013).

Por fim, o resultado é que nos táxis, cada 1 m<sup>3</sup> de bicomcombustível equipara-se a 1,2 L de gasolina, ou seja, uma economia de U\$ 0,03 por quilômetro rodado, o equivalente a U\$ 5.500 por ano (BGS, 2013).

### **2.9.6 Inglaterra**

Na Inglaterra, mais especificamente em Bristol, um dos projetos que chamou a atenção global foi o Bio-Bus. Lançado no ano de 2014, é um ônibus que usa como combustível o gás biometano, gerado a partir da decomposição de fezes humanas, esgoto e lixo orgânico. O Bio-Bus, um coletivo com capacidade para 40 passageiros, pode rodar até 300 quilômetros com seu motor movido a gás biometano, bem menos poluente do que o diesel e a gasolina. Antes que possa ser usado para movimentar o ônibus, o gás recebe metano e tem o CO<sub>2</sub> do gás é removido. Outras impurezas também são retiradas para que o gás fique sem odores (GARCIA, 2014).

### **2.9.7 Argentina**

Na Argentina, em 2016, estava em fase final de implantação uma usina em Huinca Renancó, que recebe RSU de 11 municípios cordobeses. Tal usina será responsável pela fração orgânica dos RSU para gerar eletricidade a partir do biogás, além de conter o impacto ambiental. A princípio, a unidade foi projetada para gerar 300KW partindo da utilização de 6 toneladas de RSU ao dia (GUBINELLI, 2014).

A usina é a terceira deste tipo no país, porém, mais tecnológica que as outras já existentes, implantadas em San Luis e Río Cuarto. É a primeira que terá capacidade de tratar somente RSU (REPETTO, 2016).

Em relação à Argentina, o que se percebe é que o país faz o uso do biogás, mas não tem muita evolução com o gás biometano.

### **2.9.8 Brasil**

No Brasil, o uso do biometano como combustível aparenta ser uma boa pedida, levando-se em consideração a grande frota de veículos movidos a gás natural. No cenário mundial de 2012, dos aproximados 16,7 milhões de veículos a

gás natural quase 1,74 milhões estão no Brasil, o que equivale a um percentual de 11,2%. Ainda, salienta-se que existem 1.756<sup>2</sup> postos de abastecimento no Brasil, principalmente em grandes cidades, que oferecem gás natural veicular (GNV) como opção de combustível (BRASIL, 2016).

No Estado do Rio Grande do Sul, a Cooperativa de Citricultores do Vale do Caí (Ecociturs) e a empresa Natuvoros, com o apoio da Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul (Sulgás), formaram o Consórcio Verde Brasil, o primeiro no país a produzir e distribuir uma série de produtos renováveis, mais especificamente o GNVerde, um gás inteiramente natural e renovável, auxiliando na diversificação da matriz energética e apresentando uma solução ao meio ambiente (MULLER, 2013).

Após anos de pesquisas, o projeto implantado em Montenegro / RS tem por objetivo:

a produção de um gás com alto teor de metano (acima de 96%), que atenda a especificação técnica exigida pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) [...] O GNVerde gerado a partir de dejetos de aves poedeiras e de resíduos agroindustriais alcançou o índice de 98% de metano em sua composição química (RAUBER, 2013, p. 1).

Segundo Jornal do Comércio (2015), o sistema de GNVerde é instigado a produção de gás a partir de resíduos orgânicos, buscando o emprego de biometano para combustível de ônibus. Mesmo que o ônibus tenha motor movido a GNV, por ter características semelhantes, o GNV pode ser substituído pelo biometano

Em maio de 2015 o projeto com o ônibus movido a GNVerde foi apresentado no Rio Grande do Sul, sendo o primeiro ônibus a funcionar a partir de excremento de aves poedeiras e de detritos agroindustriais (JORNAL DO COMÉRCIO, 2015).

Esta responsabilidade está sob a coordenação da Sulgás, onde a mesma efetiva testes com o biometano em motores de veículos leves, já há alguns anos. O desenvolvimento do projeto tem como objetivo evidenciar a viabilidade de uso desse gás ecológico como combustível veicular (MULLER, 2013).

Neste contexto, a Sulgás tem como alternativa o biometano para o transporte coletivo nas grandes cidades, como os ônibus Scania Euro 6, que apresentam tecnologia e motor específicos, acionados a gás, e que vem sendo abastecidos com o GNVerde procedido pelo Consórcio Verde Brasil, em Montenegro. Assim o veículo

---

<sup>2</sup> Dados atualizados em 01/01/2017, disponíveis em [http://www.gasnet.com.br/postos\\_gnv.asp](http://www.gasnet.com.br/postos_gnv.asp).

Scania Euro 6, desempenha uma rota oferecida no Polo Petroquímico de Triunfo, com ajuda da Braskem. O projeto conta com o subsídio da *Univates*, que faz a investigação da condição do gás e do desempenho do veículo, e da *Janus & Pergher*, empresa confiável pelo equipamento de purificação do biogás para biometano (JORNAL DO COMÉRCIO, 2015).

O diretor de vendas de Ônibus da Scania no Brasil, Silvio Munhoz, ressalta que o ônibus já desempenhou avaliação com biometano, nos meses de outubro e novembro, no Paraná, em um desempenho da empresa com a Itaipu Binacional, qual teve como resultado das demonstrações, averiguou que o valor por quilômetro rodado com biometano é 56% menor na checagem com um veículo semelhante à diesel (BLEY JR., 2015).

Recentemente, em dezembro de 2016, foi publicada uma matéria que trouxe a notícia de que já encontra-se em fase de teste no Brasil o T6 Methane Power, da New Holland, sendo primeiro trator, a nível mundial, equipado com motor movido somente a biometano. E na mesma matéria, recebeu destaque o trabalho realizado pelo Centro de Energias Renováveis da Hidrelétrica Itaipu Binacional, na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, que já conta com uma frota de 53 automóveis movidos a biometano (MONARI, 2016).

Além de ônibus e tratores, também existem no Brasil iniciativas para o abastecimento de veículos leves com biometano. De acordo com Cunha (2016), qualquer veículo que seja adequadamente adaptado pode ser movido a biometano e cita o exemplo do Parque Tecnológico de Itaipu, no município de Foz do Iguaçu, onde o Projeto CIBiogás (Centro Internacional de Biogás) abastece uma frota de aproximadamente 40 veículos e pretende dobrar este número, utilizando o biometano produzido em uma granja com mais de 80 mil aves não distante dali, na cidade de Santa Helena, também no estado do Paraná. Marcelo Souza, gerente do CIBiogás estima que em alguns anos o gás poderá ser comercializado em postos no interior do país, sem necessitar de infraestrutura específica ou construção de gasodutos pelo fato de poder ser comprimido e transportado em cilindros. Ressalta-se ainda que segundo o CIBiogás, o biometano pode reduzir em até 90% as emissões de poluentes na comparação com a gasolina (MONARI, 2016).

Outro exemplo é a Sabesp (Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo) que em parceria com a Fraunhofer, da Alemanha, será a primeira do país a produzir biometano advindo do lodo resultante do tratamento de esgoto na unidade

de Franca. A Sabesp já possui uma frota de 20 veículos adaptados para esta nova realidade (REIS, 2017).

## 2.10 EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>

A globalização força o aumento das atividades industriais e substancialmente as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa vem intensificando o efeito estufa natural e resultando no aquecimento da superfície planetária, o que afeta os ecossistemas naturais e a população (BLEY JR., 2015).

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um "gás de efeito estufa." Ele absorve energia do Sol, e depois a devolve à atmosfera. Esse "efeito estufa" mantém a Terra mais quente do que seria se esse processo não ocorresse (SEED, 2015). As emissões de CO<sub>2</sub> são consideradas a parcela das emissões totais em razão da ação final, do consumo interindustrial e dos resíduos dos indivíduos no planeta.

O maior problema causado pelo homem é a poluição, poluição esta que vem do ar e que é bastante grave, tanto nas grandes cidades como nas pequenas cidades industriais do interior. Um exemplo triste e famoso é a cidade de Cubatão (SP), que produzia mensalmente mais de 30 mil toneladas de poluentes do ar (SEED, 2015).

O lixo é outro componente causador para a degradação ambiental, elevando-se para a consequência do aquecimento global, onde em vários pontos de qualquer cidade do planeta podem ser detectados montantes de lixo jogados nas ruas, onde toneladas de sujeira são depositadas nas zonas costeiras e nas cabeceiras de rios, lagos e mares, ocasionando a mortandade de vidas marinhas (DIAS, 2007).

Segundo Savia (2014), os danos também podem ser causados à camada de ozônio, a qual faz parte da estratosfera (atmosfera superior) e protege a superfície terrestre da radiação nociva dos raios ultravioleta (UV) do sol. Algumas substâncias químicas manufaturadas pelo homem, contendo cloro e bromo, flutuam até a estratosfera e destroem o ozônio.

Uma camada de ozônio mais fina deixa passar mais radiação UV para a troposfera (baixa atmosfera); algumas dessas substâncias são também gases de efeito estufa que aumentam o aquecimento e ocasionando ainda mais danos à camada de ozônio (GUIMARÃES, 2001).

Um dos principais causadores do aquecimento global é o chamado impacto

dos feedbacks (respostas a um estímulo - positivos aumentam a temperatura, enquanto os negativos diminuem), onde, no século XXI, a duplicação da quantidade de dióxido de carbono na atmosfera aumentará a temperatura global em 1° C.

Segundo Pearce (2002), a atmosfera, a fina camada de gases que envolve o planeta Terra, é composta especialmente por Nitrogênio ( $N_2$ ) e Oxigênio ( $O_2$ ) que unidas compõem cerca de 99% da atmosfera. Dessa forma, outros gases encontram-se em pequenas quantidades, compreendendo os conhecidos como gases de efeito estufa.

Esses gases, são eficazes para a sustentação do equilíbrio do clima e dos ecossistemas terrestres. Entre estes, estão o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), o metano ( $CH_4$ ), o óxido nitroso ( $N_2O$ ) e, além disso, o vapor d'água ( $H_2O$ ), gases batizados de gases de efeito estufa por apresentarem a competência de armazenar o calor na atmosfera, da mesma maneira que o revestimento de vidro de uma estufa para o cultivo de plantas o faz (TOMMASI, 1993).

No apontamento de Gore (1993), os gases de efeito estufa, com dióxido de carbono ( $CO_2$ ), são um eficiente filtro que protege a atmosfera de receber calor do sol, permitindo a passagem de parte da radiação (os raios ultravioletas), absorvendo parte e também refletindo outra parte, são eles que proporcionam o balanço da temperatura do planeta.

Segundo o autor, este é um processo que vem acontecendo há milhares de anos; os gases passaram a ser os responsáveis pelo aquecimento global porque a sua concentração na atmosfera aumentou, o que amplia a capacidade natural de absorção de calor desses gases. E é o homem o maior causador dessa degradação biológica no planeta.

Assim, o principal problema da emissão de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), no planeta é devido aos tempos modernos, em que vive a humanidade, pois várias são as fontes antropogênicas que cooperam para as emissões de gases de efeito estufa (GORE, 1993).

De acordo com Fogliatti (2004), estas fontes são problemas ambientais que costumam serem maiores nos grandes centros urbanos do que nas cidades menores e no meio rural, pois é nos centros urbanos que se concentra o maior o número de indústrias, maior contingente populacional, com aterros sanitários expandido seus resíduos em quarteirões.

Os gases da estufa (Dióxido de Carbono,  $\text{CO}_2$ ) são responsáveis por cerca de 50% do efeito estufa. Por ano, a humanidade joga na atmosfera 6 bilhões de toneladas destes gases, sendo 1,5 bilhões só nos EUA (SILVANO, 2006).

São atenuantes do efeito estufa a queima do combustível, como o petróleo, carvão mineral, gás natural, e o aniquilamento das matas, acontecendo a liberação de  $\text{CO}_2$  pelo incêndio das árvores e também quando são serradas, como cita Pearce (2002, p. 45).

Cloro fluorcarbonos (CFCs) é um gás que contém flúor e carbono, responsável por 15 a 20% do superaquecimento total e ainda pela destruição da camada de ozônio que envolve a terra. Em relação ao metano, 18% do efeito estufa é produzido pelo estrume de gado nas plantações de arroz e pela adubagem do solo. Os Óxidos de Nitrogênio representam 10% do efeito estufa, formados pela queima de combustíveis fósseis, por micro-organismos e pela decomposição de fertilizantes químicos. O Ozônio é o resultado da poluição provocada por veículos a motor e usinas e refinarias (PEARCE, 2002).

Sobre a questão dos veículos, estes apresentam uma série de ameaças à ecologia no Brasil, porém os agravantes tratam-se dos tipos de combustível comercializados, que ajudam na poluição. Realça Guimarães (2001) que a gasolina que usada no Brasil contém chumbo, o que concebe um terrível risco para o meio ambiente, pois espalhando-se na atmosfera pelo escapamento dos veículos, o chumbo pode acarretar disfunções no fígado, rins e cérebro.

O monóxido de carbono, que também é expelido pelo escapamento veicular, pode causar problemas respiratórios, assim carros a álcool produzem 50% menos monóxido de carbono (CO) do que os carros a gasolina. Mas os carros a álcool produzem os aldeídos, que em longo prazo produzem câncer. Já os carros movidos a diesel expelem dióxido de enxofre, que pode provocar coriza, catarro e problemas pulmonares (PEARCE, 2002, p. 114).

Uma redução de 2 a 4% no teor alcoólico da gasolina, para o automóvel, aumenta em 50% a emissão de monóxido de carbono. Nesta concepção, Dias (2002) diz que se todos os carros a álcool da cidade de São Paulo fossem transformados para gasolina, a poluição ambiental alcançaria grau críticos e possivelmente seria inviabilizado viver nesta cidade, mesmo se toda a frota paulista fosse de carros a álcool, São Paulo permaneceria poluída.

Preocupado com a poluição, o governo brasileiro criou em 1986 o PROCONVE (Programa de Controle de Poluição de Ar por Veículos Automotores). A meta é que veículos passem a emitir menos gramas de CO<sub>2</sub> por quilômetro rodado, forçando os fabricantes a trocarem peças de regulagens dos motores em vistas à diminuição da poluição.

Uma notável fonte de gases de efeito estufa, decorrente das atividades humanas, está inteiramente ligada à produção diária de lixo, a qual tem adicionado muito nos últimos anos o impacto ambiental do lixo tóxico, potencialmente poluidor (SILVANO, 2006).

Na concepção de Pearce (2002), não existem maneiras seguras de se livrar do lixo tóxico, por isso, este necessita ser reduzido drasticamente em relação às suas quantidades.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 OBJETO DE ESTUDO

O presente estudo contempla a cidade de Foz do Iguaçu (Figura 12). O município, com área territorial de 618.352 Km<sup>2</sup>, está geograficamente situado a 25° 32' 55" de latitude sul e 54° 35' 17" de longitude oeste, com altitude média de 173 metros, no extremo oeste do Estado do Paraná e faz fronteira com o Paraguai e com a Argentina. Sua população estimada em 2016 foi de 263.915 habitantes (IBGE, 2015) e abriga 80 das 192 nacionalidades existentes no mundo. Além dos brasileiros, paraguaios e argentinos (componentes da tríplice fronteira), há residentes japoneses, chineses, coreanos, franceses, bolivianos, chilenos, árabes, marroquinos, portugueses, indianos, ingleses, israelenses entre outros.

O clima na região é temperado subtropical úmido, sem estação seca, verões quentes com tendência de concentração das chuvas (temperatura média superior a 22°C), invernos com geadas pouco frequentes (temperatura média inferior a 18°C). Temperatura média anual de 40°C para as máximas e 0°C para as mínimas. Há chuvas em todos os meses do ano e a precipitação média anual é de 1.798,72 mm. A média anual da umidade relativa do ar é de 73,92%, sendo constante ao longo do ano. A região sofre influência dos dois grandes rios, Paraná e Iguaçu, e do lago de represamento da Hidrelétrica de Itaipu, que provoca o aumento desta umidade.



**FIGURA 12** - Município de Foz do Iguaçu (PR)

Fonte: Google Maps

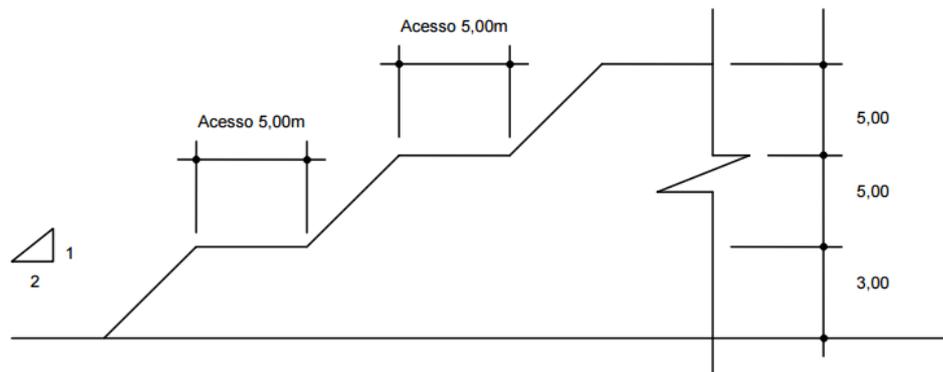
Acompanhando a tendência mundial de preocupação com o destino do lixo produzido pela humanidade, a cidade elaborou o Plano Municipal de Gestão Integrado de Resíduos Sólidos (PMGIRS) como ferramenta de ação onde o poder público municipal se porta como um interventor ativo no que diz respeito a esta questão mundial: redução na geração e destinação adequada de resíduos sólidos (PMFI, 2012).

O objetivo é buscar uma adequação à política ambiental nacional, atrelando-a ao desenvolvimento industrial e econômico da cidade, aliado a necessidade da universalização dos serviços de saneamento básico e tornando o desenvolvimento do plano uma das principais necessidades em curto prazo, sobretudo no que se refere às questões relacionadas à sustentabilidade sócio-ambiental, a geração e destinação final dos resíduos gerados (PMFI, 2012).

A coleta de lixo no município de Foz do Iguaçu teve início na década de 60, sendo destinado ao lixão localizado no Bairro Arroio Dourado, que possuía uma área total de 145.981,94 m<sup>2</sup>, sendo encerrado oficialmente no ano de 1992. O encerramento do lixão do Arroio Dourado deu-se em virtude da implantação do Aterro Sanitário Municipal, inicialmente operado como aterro controlado, porém, readequado e recuperado tornando-se um aterro sanitário em 2001. Em 1992 o lixo do município passou a ser destinado à área do então denominado “aterro controlado”. Em 1997 inicia-se a adequação do espaço para aterro sanitário, recebendo o licenciamento ambiental no ano de 2001.

Nos últimos 10 anos, a média de geração de resíduos domésticos do município de Foz do Iguaçu foi de 5.369,17 toneladas/mês (VITAL, 2011), contabilizando apenas os resíduos coletados pela coleta convencional. Neste período, a coleta, transporte e disposição final destes resíduos foram terceirizados (PMFI, 2012).

O destino final dos resíduos domésticos é o Aterro Sanitário Municipal, localizado no Bairro Porto Belo, com 389.737,44 m<sup>2</sup> de área disponível, dividida em células preparadas para tal finalidade. O sistema de aterramento utilizado é de células em camadas de 5 metros, (conforme Figura 13). Estas são impermeabilizadas com argila compactada. Rede de drenos para a coleta do chorume, que é encaminhado para o processo de recirculação nas células de resíduos. Em tal método escolhe-se a procedência do veículo ou veículos coletores de acordo com critérios de representatividade (PMFI, 2012).



**FIGURA 13 – Células de Acondicionamento de Resíduos**

Fonte: PMFI, 2012

As células do aterro apresentam drenos de biogás, constituídos por uma coluna de tubos de concreto armado perfurados e envoltos por uma camada de pedras, fixadas à coluna por meio de uma tela metálica, que estão interligados à rede de drenos de chorume. O sistema de coleta de biogás é constituído por drenos passivos, sendo a pressão gerada no interior da massa de resíduos a promotora da exaustão do biogás através dos drenos (PMFI, 2009).

Um dado recente revela que de janeiro até setembro de 2016, foram coletadas 62.500 toneladas de lixo doméstico em Foz do Iguaçu, segundo informação é da Vital Engenharia, responsável pelo serviço no município. Este número, dividido por pelos 263.915 habitantes conforme estimativa populacional do IBGE, resultaria em 236 quilos de dejetos por pessoa em 9 meses. Toda essa coleta é referente a resíduos sólidos não recicláveis que tem como destino o aterro sanitário (MACHADO, 2016).

Como o aterro sanitário de Foz do Iguaçu, foi projetado com uma vida útil prevista até 2017, recentemente, o município passou a contar com uma nova área do aterro ampliada, compreendendo cerca de 80 mil metros quadrados todo espaço destinado a receber os resíduos sólidos da cidade. O terreno que atualmente funciona o aterro vai deixar de operar, recebendo argila e plantio de grama e uma área anexa foi preparada para realizar esta função. A ampliação previu ainda receber resíduos sólidos por mais 19 anos, com capacidade de operar aproximadamente 11 mil toneladas de lixo por mês, que será separado, processado, passado por tratamento e tendo correta destinação final, sem agredir e poluir o meio ambiente (AGÊNCIA MUNICIPAL DE NOTÍCIAS, 2016).

A nova área funciona com geomembrana, uma forma de manta que fica entre parte interna e externa do solo, operando como um isolante do chorume, evitando que a decomposição da matéria orgânica infiltre no solo e chegue aos lençóis freáticos (AGÊNCIA MUNICIPAL DE NOTÍCIAS, 2016).

## 3.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Tendo como objetivo principal avaliar o potencial do biometano produzido a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) da cidade de Foz do Iguaçu para o uso em transporte urbano de passageiros, é necessário determinar a quantificação do biogás gerado no aterro objeto da presente pesquisa, levando em consideração o potencial de geração de metano do resíduo, a estimativa de número de habitantes, a estimativa do fluxo de resíduos e o cálculo da emissão de metano.

### 3.2.1 Quantificação do biogás gerado

Para o cálculo de quantificação do biogás gerado nos aterros sanitários, foi utilizada a metodologia sugerida pelo IPCC (1996). Esta metodologia compreende uma série de equações, separadas em etapas, onde diversas variáveis são consideradas. Este método é o mais empregado neste tipo de estudo uma vez que é mundialmente aceito.

A primeira etapa consiste no cálculo da fração de carbono orgânico no lixo (DOC), utilizando a composição gravimétrica dos resíduos, conforme a Equação 1.

$$\text{DOC} = (0,40.A) + (0,17.B) + (0,15.C) + (0,30.D) \quad (1)$$

Onde:

DOC: Fração de carbono orgânico degradável no lixo.

A: Fração de papel e papelão no lixo (%).

B: Fração de resíduos de parques e jardins no lixo (%).

C: Fração de restos de alimentos no lixo (%).

D: Fração de tecidos no lixo (%).

Nos casos em que a composição gravimétrica dos resíduos não é conhecida, foram adotados dados fornecidos pelo IPCC (1996) para a América do Sul, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3:** Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo

Componente	Porcentagem DOC (em massa)	Composição gravimétrica (%)
A) Papel e papelão	40	17,1
B) Restos de alimentos	15	46,9
C) Resíduos de parques e jardins	17	-
D) Tecidos	40	2,6
E) Madeiras	30	4,7

Fonte: IPCC, 1996.

A fração de carbono orgânico do lixo que pode se decompor de forma anaeróbia ( $DOC_f$ ) considera entre outros fatores, a temperatura, o pH, a umidade e a composição dos resíduos na zona de degradação anaeróbia e foi calculada pela Equação 2:

$$DOC_f = 0,014.T + 0,28 \quad (2)$$

Onde:

T: Temperatura na zona anaeróbia dos resíduos ( $^{\circ}C$ ).

$DOC_f$ : Fração do DOC que pode se decompor.

O potencial de geração de metano do resíduo ( $L_0$ ) considera o DOC,  $DOC_f$ , fração de metano no biogás (F) e o fator de correção de metano (MCF), de acordo com o gerenciamento do aterro foi calculada pela Equação 3:

$$L_0 = MCF.DOC.DOC_f.F.16/12 \quad (3)$$

Onde:

$L_0$ : Potencial de geração de metano do resíduo ( $m^3 \text{ metano.kg}_{RSD}^{-1}$ ).

MCF: Fator de correção de metano (%).

DOC: Fração de carbono orgânico degradável no lixo ( $kg_c.kg_{RSD}^{-1}$ ).

$DOC_f$ : Fração do DOC que pode se decompor ( $kg_c.kg_{RSD}^{-1}$ ).

F: Fração de  $CH_4$  no biogás.

16/12: Relação de massas atômicas na conversão de carbono (C) para metano (CH<sub>4</sub>).

A Tabela 4 apresenta os valores de correção de metano para os tipos de aterro.

**Tabela 4:** Fator de correção de metano segundo os tipos de aterro (MFC)

Tipos de aterros	Valores de correção de metano
Gerenciamento – anaeróbico	1,0
Gerenciamento – semi-aeróbico	0,5
Não gerenciado – profundidade (> 5 m de resíduos) e ou camada freática elevada	0,8
Não gerenciado – pouco profundo (< 5 m de resíduos)	0,4
Aterro não categorizado (sem controle)	0,6

Fonte: IPCC, 1996

O cálculo da quantidade de metano gerado (LFG) foi realizado para cada ano, uma vez que a vazão deste gás varia principalmente com fluxo de resíduos e tempo de deposição, conforme Equação 4.

$$LFG = K.Rx.L_0.(1-e^{-K.T}) \quad (4)$$

Onde:

LFG: Quantidade de metano gerado (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>).

K: Constante de decaimento.

Rx: Fluxo de resíduo no ano (t<sub>RSD/ano</sub>).

L<sub>0</sub>: Potencial de geração de metano (m<sup>3</sup>metano.t<sub>RSD</sub><sup>-1</sup>).

T: Ano de deposição dos resíduos no aterro (início de operação).

A constante de decaimento (K) varia com a disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e umidade, sendo o último o fator principal. De acordo com (IPCC, 2006 apud ICLEI, 2009), o valor de K para clima tropical – resíduo úmido – é de 0,115.

Para estimar o fluxo de resíduos anual foi utilizada a Equação 5 e, para isso, calcula-se a população em cada ano, pela Equação 6:

$$Rx = [(RSD).(N_{hab}).(dias\ no\ ano).(\% \text{ aterro})] \quad (5)$$

Onde:

RSD: Resíduos sólidos gerados por habitante por dia (Kg).

$N_{hab}$ : Número de habitantes estimado para cada ano.

% aterro: Porcentagem de resíduos destinados no aterro.

$$P = P_0 \cdot e^{r \cdot t} \quad (6)$$

Onde:

P: População prevista para um determinado ano.

$P_0$ : População atual.

r: Taxa de crescimento (%).

t: Número de anos de extrapolação.

### 3.2.2 Índice de Recuperação de Biogás (IRB 50%, 75% e 100%)

Do volume total de biogás gerado nos aterros sanitários, apenas uma parte consegue ser captada e canalizada para aproveitamento. Estudos demonstram que o índice de recuperação de biogás varia entre 50 e 75% de eficiência, quando se realiza a cobertura de terra adequadamente, podendo chegar a 100% quando for utilizada cobertura com camadas de solo argiloso ou mantas de polietileno de alta densidade (PEAD) (ABREU, 2009; ENSINAS, 2003).

### 3.2.3 Potencial de substituição da frota de ônibus coletivo de Foz do Iguaçu de diesel por biometano

O levantamento foi realizado por meio de solicitação dos dados operacionais da frota de transportes urbano à Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu e à Empresa Sorriso Concessionária, responsável pela frota de ônibus coletivo da cidade.

Os dados operacionais requisitados à concessionária, que foram empregados para determinação da demanda de biometano nos veículos de transportes urbano de Foz do Iguaçu, foram:

- a) Passageiros que utilizam a frota;
- c) Quilometragem mensal (km) das linhas de ônibus da cidade de Foz do Iguaçu.

Para a obtenção do potencial de conversão da frota de ônibus a diesel em biogás foi necessário estimar o consumo médio de biometano em ônibus.

Assim por meio de consultas a referências bibliográficas, ou seja, estudos realizados com ônibus a diesel e gás natural comprimido (GNC), obteve-se a Tabela 5 a seguir. O biometano apresenta a mesma composição do GNC, pois os dois apresentam o metano em sua composição quase total. Com isso a referida tabela mostra o consumo médio de biometano (em MJ), o qual pode ser aproximado a 20 MJ/km rodado pelo ônibus. Com este índice e o poder calorífico do biometano nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), o qual é de 36,6 MJ/m<sup>3</sup> (POWER et al., 2009), tem que para percorrer 1 km um ônibus deverá gastar em média 0,549 m<sup>3</sup> de biometano nas CNTP, e o consumo de diesel seria de 0,41 Litros por km rodado, sendo que o PCI do diesel é de 44 MJ/kg e a densidade 0,853 kg/L, conforme a Tabela 5.

**Tabela 5:** Dados de índices de consumo de biometano por frotas de ônibus.

<b>Autor</b>	<b>Consumo de Biometano (MJ/km)</b>	<b>Consumo de Diesel (MJ/km)</b>
KUWAHARA <i>et. al</i> (1999)	15,3	14
ALLY & PRYOR (2007)	23	16
MACIÁN <i>et. al</i> (2015)	25,6	16,1
SÁNCHEZ <i>et. al</i> (2012)	14,2	13,4
LAJUNEN & LIPMAN (2016)	21,6	16,9
<b>Média</b>	<b>19,94</b>	<b>15,28</b>
	<b>Consumo em m<sup>3</sup>/km</b>	<b>Consumo em l/km</b>
	<b>0,55</b>	<b>0,41</b>

**FONTE:** Autora -2016.

### **3.2.4 Potencial de substituição da frota de taxis de Foz do Iguaçu de gasolina por biometano**

O levantamento foi realizado por meio de solicitação dos dados operacionais da frota de taxis ao Sindicato dos taxistas de Foz do Iguaçu – SINDITAXI.

Os dados operacionais requisitados ao referido sindicato, que foram empregados para determinação da demanda de biometano nos veículos de transportes urbano de Foz do Iguaçu, foram:

- a) Quantidade de veículos da frota de taxis em operação na cidade: 439;
- c) Quilometragem diária (km) por taxi (média de 150km/dia) e da frota (65.580km/dia).

Mesmo tendo o conhecimento de que a frota de taxis pode utilizar como combustível gasolina ou álcool, para este estudo assumiu-se hipótese de que a mesma utilize somente gasolina. Portanto, para a obtenção do potencial de conversão da frota de taxi a gasolina em biogás foi necessário estimar o consumo médio de biometano em taxis.

Considerando-se uma média de consumo de gasolina de 10 km/litro (KHAN & YASMIN, 2014; SINDITAXI, 2016), para um veículo leve (um taxi) e para um poder calorífico inferior da gasolina de 31,3 MJ/litro, tem-se que um veículo leve consome 3,13 MJ/km. Sabendo-se que o poder calorífico inferior do biometano é 36,6 MJ/m<sup>3</sup> nas CNTP, o índice de consumo de biometano seria de aproximadamente 0,09 m<sup>3</sup>/km para um veículo leve (taxi), esse valor pode ser utilizado para obter o consumo por um veículo leve (taxi) durante o dia, conhecendo-se a quilometragem total percorrida por um veículo durante um dia (km/dia), com isso tem-se um índice m<sup>3</sup>/taxi.dia.

### **3.2.5 Viabilidade de uso de biometano como combustível**

Em função do custo fixo de implantação do sistema de captação de biogás e transformação em biometano, com base no preço do dióxido de carbono e outras impurezas e levando em consideração o custo de manutenção do sistema, será calculado o custo de produção de 1 m<sup>3</sup> de biometano.

Segundo Singh, Smyth e Murphy (2009), a venda de biometano por m<sup>3</sup> pode ser equiparado a um litro de diesel ou gasolina como o conteúdo energético dos combustíveis é aproximadamente o mesmo na análise.

Portanto, o custo do biometano está sobre os investimentos da instalação de biometano, onde o capital abrange o digestor, modernização e compactação do sistema de distribuição e infraestrutura e o transporte.

Para calcular o custo de produção de biometano, será utilizada a seguinte

fórmula:

$$C_{bio} = \frac{CCA + COM}{P_{bio}}$$

Onde:

$C_{bio}$ , custo de produção do biometano (em R\$/m<sup>3</sup>);

CCA: Custo Capital Anualizado (R\$/ano);

COM: Custo de operação e manutenção (R\$/ano);

$P_{bio}$ : Produção anual de biometano adjacente a planta de conversão (m<sup>3</sup>/ano).

O COM, seria o gasto anual com operação e manutenção da planta, ou seja investimentos em monitoramento da qualidade do biometano, manutenção anual da planta, gastos com energia elétrica e mão de obra para operação do sistema e outros. Geralmente, estima-se este valor em 4% do investimento na planta (I).

O CCA é obtido pela equação

$$CCA = I \cdot FRC$$

Onde:

I: Investimento na planta de captação e transformação do biogás em biometano (R\$);

FRC: fator de recuperação do capital;

Para o cálculo do FRC foi utilizada a equação

$$FRC = \frac{d}{1 - (1 + d)^{-n}}$$

Onde:

d: taxa de desconto ou taxa de atratividade (%/100)

n: tempo de vida da planta ou do investimento (anos);

Outros parâmetros avaliados, a fim de determinar a viabilidade de uso do biometano de aterro sanitário como combustível em substituição ao diesel na frota de ônibus, são o Valor Presente Líquido (VPL), o Payback descontado e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

**VPL (Valor Presente Líquido):** Seria o ganho total com a implantação do projeto durante um determinado período. Nesta avaliação seria o ganho total durante 10 anos.

**TIR (Taxa interna de retorno):** Um índice que determina se o projeto é atraente ou não, ou seja, quando a TIR é maior que a taxa de atratividade (juros do mercado), vale muito a pena investir.

**Payback ou Tempo de Retorno:** Como o próprio nome diz, seria o tempo que se recupera o investimento feito. Valores abaixo de 4 anos são muito atraentes.

O Valor Presente Líquido foi obtido pela equação:

$$VPL = -I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{F_n}{(1+d)^n}$$

Onde:

$I_0$ : investimento no sistema de captação e tratamento do biogás e sua transformação em biometano (R\$);

$F_n$ : fluxo de caixa, ou o lucro obtido a cada ano com a substituição do diesel por biometano na frota (R\$);

$n$ : tempo do investimento (anos);

$d$ : taxa de desconto ou taxa de atratividade (%/100)

O Payback, ou tempo de retorno do investimento, seria o ano onde o VPL = 0, ou seja, o ano a partir do momento que o VPL torna-se positivo.

Para a obtenção da taxa interna de retorno basta igualar o VPL a zero.

$$0 = \sum_t^n = 1 \frac{Fn}{(1 + TIR)^n} - I_0$$

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A fim de avaliar o potencial do biometano produzido a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) da cidade de Foz do Iguaçu para o uso em transporte urbano de passageiros, determinou-se, conforme metodologia apresentada, a quantificação do biogás gerado no aterro objeto da presente pesquisa, considerando 15 anos de vida útil e levando em consideração o potencial de geração de metano do resíduo, a estimativa de número de habitantes, a estimativa do fluxo de resíduos e o cálculo da emissão de metano. A partir disso, calculou-se o potencial de substituição de veículos a diesel (ônibus) e a gasolina (taxis) por veículos movidos a biometano bem como a viabilidade econômica desta ação.

##### 4.1 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM FOZ DO IGUAÇU

Para a Equação 1, referente ao cálculo da fração de carbono orgânico no lixo (DOC), obteve-se  $DOC = 0,168745$ .

A - Fração de papel e papelão no lixo (%)	0,131	
B - Fração de resíduos de parques e jardins (%)		
C - Fração de restos de alimentos no lixo (%)	0,514	
D - Fração de tecidos no lixo (%)	0,167	B+D (media)

$$DOC = (0,4 * A) + (0,17 * B) + (0,15 * C) + (0,30 * D)$$

Para a Equação 2, referente ao cálculo da fração de DOC que pode se decompor ( $DOC_f$ ), obteve-se  $DOC_f = 0,77$ .

T - Temperatura na zona anaeróbia dos resíduos (°C)	35
---	----

$$DOC_f = 0,014 * T + 0,28$$

Para a Equação 3, referente ao cálculo do potencial de geração de metano do resíduo (L0), obteve-se  $L0 = 120,8460286$ .

L0 - Potencial de geração de metano do resíduo ( $m^3\text{biogás.kgRSD}^{-1}$ )	
MCF - Fator de correção de metano = 1 (aterro bem gerenciado)	1
DOC - Fração de carbono orgânico degradável no lixo	0,16875
DOC <sub>f</sub> - Fração de DOC que pode se decompor=0,5 (recomendação do IPCC, 2006)	0,77
F - Fração de metano no biogás (%)= 0,5 caso não se tenha o valor real	0,5
16/12 - Relação de massas atômicas na conversão de carbono para metano	1,33333

$$L0 = MCF * DOC * DOC_f * F * 16/12$$

Com esta equação,  $L0 = 0,086622433$ . A unidade do L0 calculado a partir da Equação 3 será  $kg\ CH_4/kg\ resíduo$ . Portanto, para que a unidade seja transformada para  $m^3\text{biogás}/\text{tonRSD}$ , deve-se dividir o valor de L0 obtido por 0,0007168  $\text{ton}/m^3$  (densidade do metano).

Para a Equação 5, referente à estimativa do fluxo de resíduos (R) (t), para auxiliar no cálculo da emissão do metano (LFG), considerou-se:

Dias por ano	365	
% que vai para o aterro	0,8	SNIS (2013)
kgRSD.hab/dia	1,01	SNIS (2013)

$$R = [(kgRSD.hab / dia) * (n^o hab) * (diasano) * (% vaiparaaterro)]$$

Para a Equação 6, referente à estimativa de número de habitantes (P), para auxiliar no cálculo da emissão do metano (LFG), considerou-se:

P0 - População atual	263915
r - Taxa de crescimento (%)	0,01122
ano - Número de anos de extrapolação	variável

$$P = P0 * e^{r*t}$$

Para a Equação 4, referente ao cálculo da emissão de metano (LFG), utilizou-se os dados abaixo e demais resultados obtidos para elaborar uma planilha considerando 15 anos de vida útil do aterro.

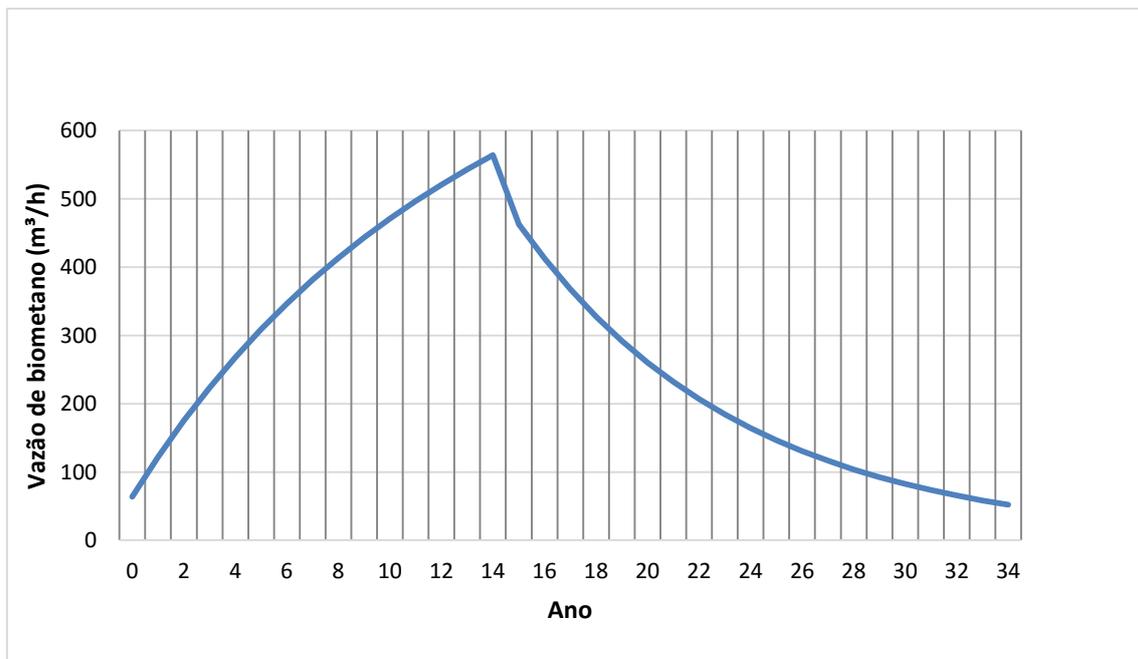
LFG = emissão de metano (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ano);	
k = constante de decaimento	0,115
Rx= fluxo de resíduos no ano (tonRSD)	
L0 - Potencial de geração de metano (m <sup>3</sup> biogás. t RSD-1)	120,8460286
x= ano atual	
T= ano de deposição do resíduo no aterro (início de operação)	1

$$LFG = k \times Rx \times L0 \times e^{-k(x - T)}$$

De posse destes dados, segue planilha com o cálculo do índice de emissão de biometano do aterro, considerando 15 anos de vida útil, e também a curva de vazão média do biometano (m<sup>3</sup>/h) no aterro de Foz do Iguaçu, demonstrada na Figura 14.

Ano	P	R (ton)	X	LFG (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ano)	LFG (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /h)
0	<b>285.137,00</b>	84.092,60	1	-	-
1	<b>288.354,25</b>	85.041,44	2	558.210,71	63,72
2	<b>291.607,81</b>	86.000,97	3	1.067.693,41	121,88
3	<b>294.898,07</b>	86.971,34	4	1.533.322,59	175,04
4	<b>298.225,46</b>	87.952,65	5	1.959.493,04	223,69
5	<b>301.590,39</b>	88.945,04	6	2.350.167,15	268,28
6	<b>304.993,29</b>	89.948,62	7	2.708.917,50	309,24
7	<b>308.434,58</b>	90.963,53	8	3.038.965,36	346,91
8	<b>311.914,70</b>	91.989,88	9	3.343.215,29	381,65
9	<b>315.434,09</b>	93.027,82	10	3.624.286,36	413,73
10	<b>318.993,19</b>	94.077,47	11	3.884.540,35	443,44
11	<b>322.592,45</b>	95.138,97	12	4.126.107,05	471,02
12	<b>326.232,32</b>	96.212,44	13	4.350.907,21	496,68
13	<b>329.913,26</b>	97.298,02	14	4.560.673,13	520,62
14	<b>333.635,73</b>	98.395,85	15	4.756.967,22	543,03
15	<b>337.400,20</b>	99.506,07	16	4.941.198,80	564,06
16		91.597,67	1	4.054.369,46	462,83
17		91.597,67	2	3.613.927,67	412,55
18		91.597,67	3	3.221.332,77	367,73
19		91.597,67	4	2.871.386,97	327,78
20		91.597,67	5	2.559.457,13	292,18
21		91.597,67	6	2.281.413,43	260,44
22		91.597,67	7	2.033.574,70	232,14
23		91.597,67	8	1.812.659,63	206,92

24		91.597,67	9	1.615.743,43	184,45
25		91.597,67	10	1.440.218,99	164,41
26		91.597,67	11	1.283.762,45	146,55
27		91.597,67	12	1.144.302,38	130,63
28		91.597,67	13	1.019.992,40	116,44
29		91.597,67	14	909.186,69	103,79
30		91.597,67	15	810.418,24	92,51
31		91.597,67	16	722.379,38	82,46
32		91.597,67	17	643.904,52	73,51
33		91.597,67	18	573.954,69	65,52
34		91.597,67	19	511.603,78	58,40
35		91.597,67	20	456.026,29	52,06
	<b>310.584,80</b>		Média	2.296.693,72	<b>262,18</b>

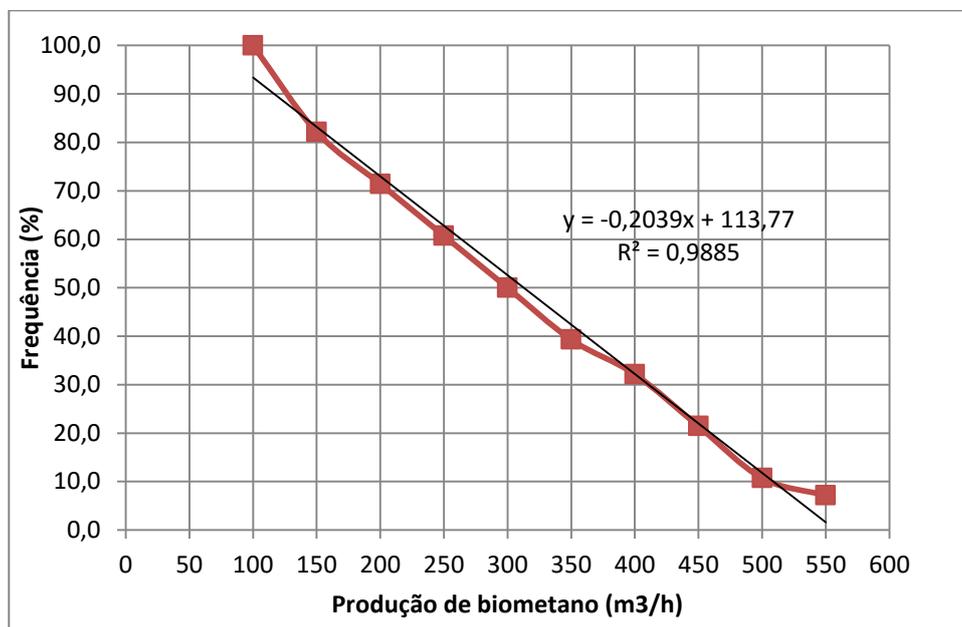


**FIGURA 14** - Produção estimada de biometano em Foz do Iguaçu / PR durante 35 anos

A Figura 14 apresenta a projeção da produção de biometano no aterro de Foz do Iguaçu / PR por um período de 35 anos. É possível observar que até o fechamento do aterro, o que deve ocorrer em 15 anos a partir do início da operação das células onde o lixo é armazenado, a produção de biogás atingirá um pico estimado em 564 m<sup>3</sup>/h e uma média de 262,2 m<sup>3</sup>/h. Após o fechamento, existe uma tendência de diminuição da produção de biogás e biometano, pois o lixo não será mais depositado no aterro, até que no final (no ano 35) a produção será praticamente muito baixa.

Analisando a Figura 14, nota-se que a produção de biometano não é constante, ou seja, dependendo da demanda de gás ela só poderia ser suprida e/ou garantida por um determinado número de anos. Com base no exposto, tal figura aponta a relação da produção projetada de biometano com frequência, ou seja, a disponibilidade de biometano no aterro ao longo dos 35 anos de produção. Durante 90% do período de 35 anos de operação, o aterro apresentará uma produção garantida de 113 m<sup>3</sup>/h de biometano. Mas se a demanda por biometano no município for maior, a garantia de suprimento tende a diminuir. A diminuição pode ser aproximada por uma regressão linear, onde por meio da equação de regressão exposta no gráfico torna-se possível estimar frequência de disponibilidade de biogás.

Para a utilização de biometano em frota de taxi ou ônibus, definiu-se um tempo de 15 anos de empreendimento de substituição, isto é, os veículos seriam supridos por 15 anos, ou seja, uma frequência de disponibilidade de gás de 43% da operação do aterro. Se a demanda máxima da frota for de 347 m<sup>3</sup>/h, ela irá ser garantida por 15 anos, como mostra a Figura 15.



**FIGURA 15** - Disponibilidade de biometano (%) em função da produção

Enfim, considerando-se o uso do biometano para geração de energia elétrica ou como biocombustível em veículos urbanos na cidade de Foz do Iguaçu - PR, o aterro poderá fornecer ao longo dos anos uma produção mínima para atender a um determinado uso final.

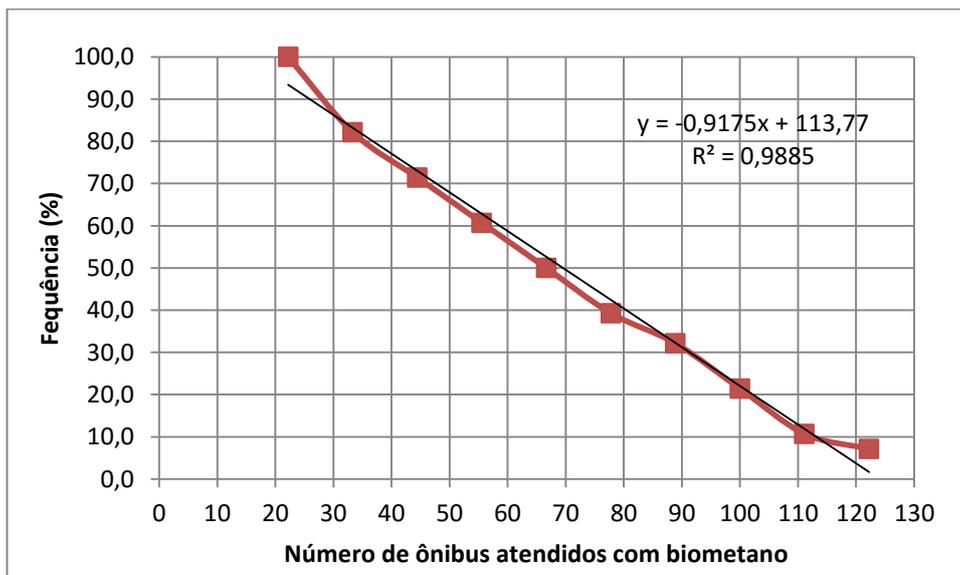
## 4.2 POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DA FROTA ÔNIBUS E TAXI DE FOZ DO IGUAÇU COM BIOMETANO

Em Foz do Iguaçu, no ano de 2016, segundo a empresa SORRISO (2016), foram transportados em média 1.355.606 passageiros por mês, com uma quilometragem mensal programada de 842.739,20 km, utilizando-se um total de 143 ônibus (ver Anexo I). Essa quilometragem representou um gasto estimado de 345.523 L/mês de diesel (0,41 L/km.ônibus).

Considerando-se que o consumo médio de biometano por ônibus urbano seja de 0,55 m<sup>3</sup>/km (Tabela 5, do item 3.2.3), tem-se para Foz do Iguaçu um consumo mensal de 463.506,6 m<sup>3</sup> nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), o que representaria uma demanda de 643,8 m<sup>3</sup>/h de biometano ou 4,5 m<sup>3</sup>/h.ônibus.

A demanda horária de biometano pela frota de ônibus de Foz do Iguaçu poderia ser suprida por biometano captado do aterro sanitário municipal. Segundo o item 4.1 do presente estudo, o potencial médio de captação de biometano do aterro de Foz do Iguaçu é da ordem de 262 m<sup>3</sup>/h.

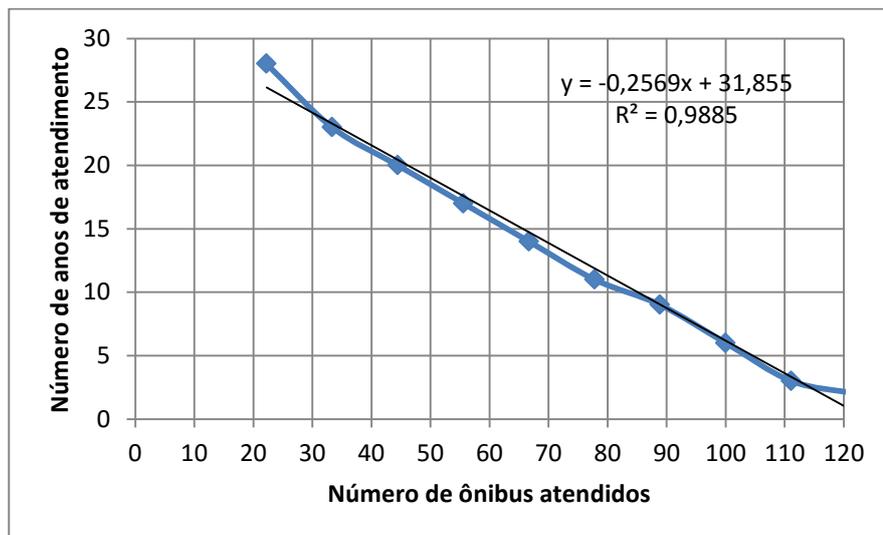
A Figura 16 apresenta a relação entre a frequência de atendimento com biometano durante os 35 anos de produção de biometano do aterro do município e número de ônibus de biometano que pode ser atendido.



**FIGURA 16** - Disponibilidade de biometano (%) em função do número de ônibus atendidos

Observou-se que se 20 ônibus da frota de 143 ônibus de Foz do Iguaçu, ou seja, 14% forem substituídos por biometano, os mesmos podem ser atendidos durante 95% do tempo de operação do aterro (35 anos).

Analisando a equação de correlação na Figura 17, verifica-se que ao substituir 50% da frota de ônibus de Foz do Iguaçu, o que equivale a 73 ônibus, percebe-se que estes poderão ser atendidos com biometano em 47,7% do tempo produtivo do aterro (17 anos).



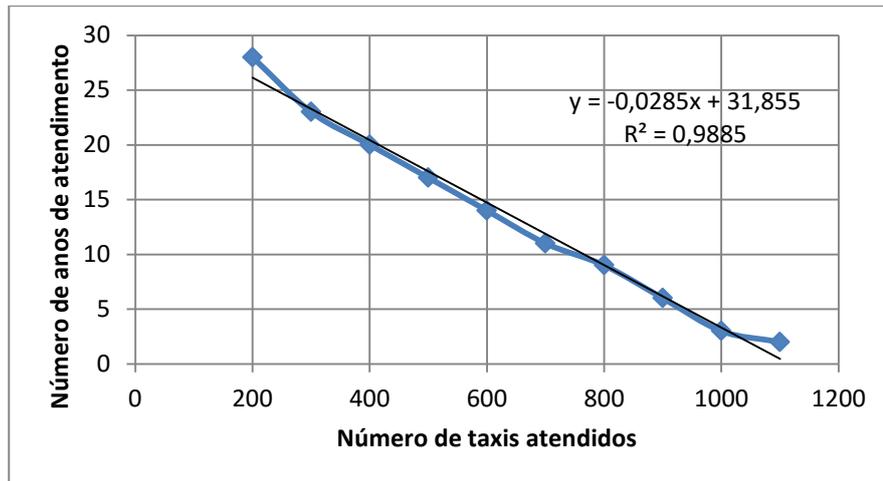
**FIGURA 17** - Relação entre número de ônibus atendidos e tempo de atendimento (em anos)

O biometano, que é similar ao gás natural comprimido (GNV), além de ser utilizado como combustível em ônibus pode também ser utilizado em taxis, ou seja, veículos leves. No Brasil, o GNV já é amplamente utilizado em locais onde há disponibilidade de postos de suprimento de GNV. Em Foz do Iguaçu não há fornecimento de GNV, mas com a possibilidade de obtenção de biometano de aterro sanitário vislumbra-se o uso do mesmo para substituição total ou parcial da frota de taxis.

De acordo com o SINDITAXI (2016), no ano de 2016 foram contabilizados 439 taxis em operação na cidade, onde estimou-se que os mesmos percorrem uma média de 150 km/dia.veículo, ou seja, um total 65.580 km por dia.

Considerando-se que o consumo médio de biometano por um taxi é de 0,09 m<sup>3</sup>/km (ver item .3.2.3), tem se para Foz do Iguaçu um consumo mensal de 5.926,5 m<sup>3</sup> nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), o que representaria uma demanda de 0,5 m<sup>3</sup>/h.taxi.

Analisando a Figura 18, determinou-se que os 439 taxis podem ser supridos com biometano do aterro durante 19 anos, o que corresponde a uma produção horária de 219,5 m<sup>3</sup>/h de biometano. Logo, toda a frota de taxi da cidade poderia ser substituída por biometano a partir do quarto ano de operação do aterro (ver Figura 14).



**FIGURA 18** - Relação entre número de táxis atendidos e tempo de atendimento (em anos)

Segundo Khan et al. (2015), as emissões de CO e CO<sub>2</sub> dependem da relação H:C no combustível, pois quanto maior o teor de hidrogênio em relação ao carbono, menor a emissão destes poluentes atmosféricos. O gás natural comprimido, o qual é similar ao biometano, mas não renovável, possui uma relação H:C de 4:1, quando comparado com a gasolina (2.3:1) e diesel (1.95:1). Com isso, o uso do biometano como combustível em substituição ao diesel e gasolina contribui para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Isso seria o ponto forte da proposição de substituição de diesel em ônibus e gasolina em taxi em Foz do Iguaçu, tornando-a cidade uma cidade com um transporte público sustentável.

Após tratamento do biogás e sua conversão em biometano, o nível de enxofre cai e isso contribui para que não haja emissão de óxido de enxofre (SOx), um composto responsável pela produção de chuva ácida.

#### 4.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DA FROTA DE ÔNIBUS URBANO E DE TAXI EM FOZ DO IGUAÇU POR BIOMETANO CAPTADO EM ATERRO SANITÁRIO

Nesta etapa, buscou-se apresentar a viabilidade de substituição de diesel e gasolina por biometano da frota de ônibus e de taxi da cidade de Foz do Iguaçu. Verificou-se que a frota de taxi pode utilizar gasolina ou álcool, mas assumiu-se a hipótese aqui que a mesma utilize somente gasolina.

Os resultados da avaliação econômica tem por objetivo permitir que os gestores públicos tomem decisões sobre a possibilidade de implantação de frotas sustentáveis em Foz do Iguaçu. Tal modelo também pode ser estendido para outras cidades brasileiras.

Segundo dados de custo capital obtidos em por meio Jannus e Pherger (2016) e EPA (1997) foi montada a Tabela 6, onde obteve-se custos de coleta e tratamento de biogás e instalação do *flare* em aterro sanitário; custos de compressão do biogás antes do sistema de separação do metano do biogás; custos de separação do metano do biogás; custos de recompressão do biometano para uso veicular e custos de engenharia e contingenciamento. Para o custo de engenharia e contingenciamento foi adotado um valor de 9% em relação aos outros custos.

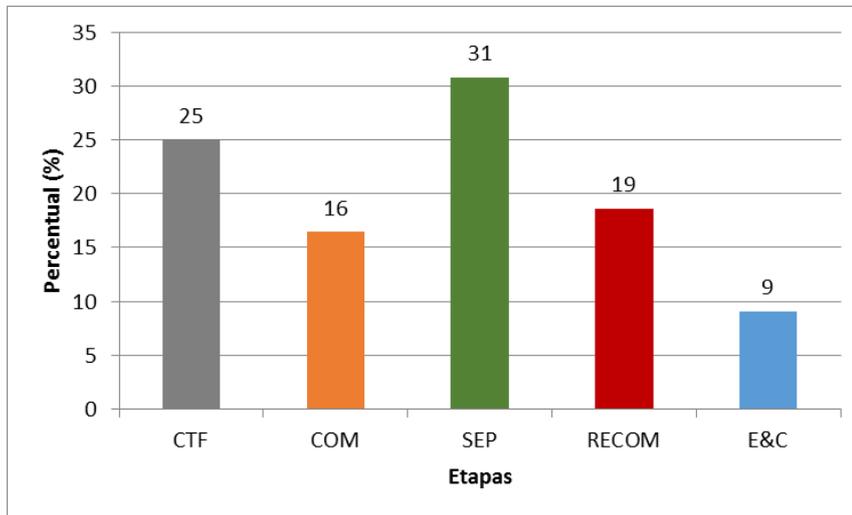
**Tabela 6:** Custo capital específico desde o tratamento até compressão do biometano em aterro.

<b>Custo por Etapa</b>	<b>R\$/<math>(m^3/h)</math></b>
Coleta, tratamento e flare (CTF)	1750,00
Compressão Biogás (COM)	1150,00
Separação CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> (SEP)	2150,00
Recompressão do biometano (RECOM)	1300,00
Engenharia e Contingencia (E&C), 9%	635
<b>Total</b>	<b>6985,00</b>

Fonte: Janus&Pergher (2016); EPA (1998)

A Figura 19 demonstra o percentual/participação do custo de cada etapa de tratamento no custo total. As etapas de separação do biometano do biogás e captação do biogás no aterro, respondem por mais de 50% do custo, pois há poucas empresas fornecedoras deste serviço no Brasil. Com o tempo e maior difusão do biometano como um combustível alternativo há uma tendência de queda nestes custos. O custo específico (R\$/ $(m^3/h)$ ) depende da escala da planta e do tipo de tecnologia de produção de biometano. De acordo com Gutierrez et al. (2016), o

custo específico para uma planta de biodigestão e produção de biometano, utilizando biodigestor de suinocultura tipo lagoa coberta, seria de 15.000 (R\$/m<sup>3</sup>/h)), sendo que esse valor é maior que o utilizado neste estudo, pois neste caso o biogás é de suinocultura e inclui o custo com biodigestor.



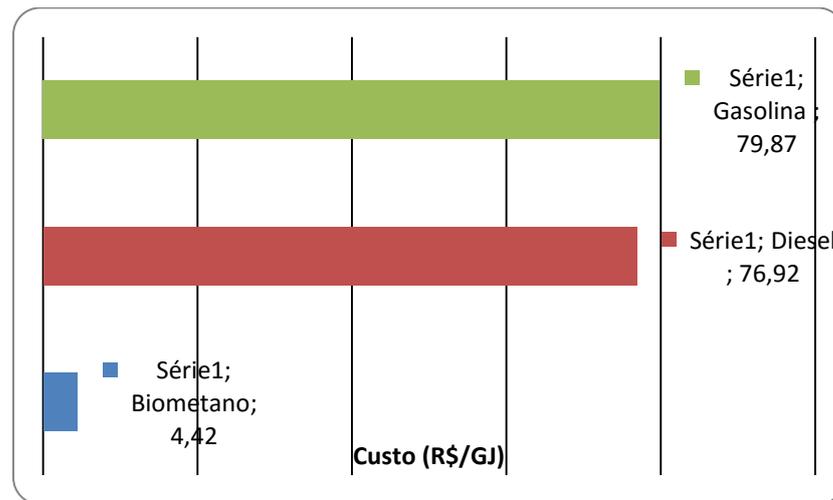
**FIGURA 19** - Participação de cada etapa do processo de captação e tratamento do biometano no custo total

O custo total desde a captação do biogás até a compressão do biometano, tornando-o próprio para o uso como um biocombustível veicular é estimado é R\$ 6.985,00/(m<sup>3</sup>/h), para a captação e tratamento de 1 m<sup>3</sup>/h de biometano de aterro. No biometano, resultante de resíduos animais e vegetais, há necessidade, além do investimento em captação e tratamento, da implantação do sistema de biodigestão, ou seja, seria mais oneroso o seu aproveitamento quando comparado ao biometano de aterro sanitário.

A Figura 20 mostra o custo do biometano produzido em Foz do Iguaçu quando comparado com o custo da gasolina e do diesel adquirido junto aos postos de combustíveis na região. Os valores do diesel e da gasolina são de 17 a 18 vezes maiores que o do biometano. Por outro lado, o biometano é um combustível renovável, apresentando menores índices de emissões quando comparado com o diesel e a gasolina, contribuindo menos com custos indiretos de seu uso como combustível, tais como custos socioambientais.

Segundo Browne et al. (2011) e Ahman (2010), os quais analisaram o custo de produção de biometano por diferentes processos de biodigestão, os custos de produção estão entre 33 e 123 R\$/m<sup>3</sup> na Europa, onde o maior custo seria o de

produção de biometano via biodigestão e grama com efluente de esgoto. O custo mostrado envolve desde a produção do biogás até o tratamento do biogás e conversão em biometano, compressão e estação de abastecimento. Quando comparado com o valor mostrado, conclui-se que o custo de produção de biometano em Foz do Iguaçu é baixo, o que vem viabilizar a sua utilização como biocombustível em veículos de transporte de passageiros (ônibus e taxis).



**FIGURA 20** - Custo do biometano produzido no aterro de Foz do Iguaçu, em comparação com diesel e gasolina

Ao propor o uso de biometano de aterro sanitário na frota ônibus urbano de uma cidade, deve-se levar em conta, além do investimento na logística de obtenção do biometano do aterro, o investimento na conversão da frota para uso do biometano ou a troca da frota por ônibus à biometano.

Segundo a Volvo (2016), um ônibus a biometano tem um custo unitário de R\$ 750.000,00, isto é, este valor pode inviabilizar a introdução do biometano no transporte público de uma cidade. Logo, este custo deve ser reduzido a um valor que viabilize economicamente a substituição de ônibus a diesel por ônibus a biogás. Ao longo deste subcapítulo, serão mostrados valores de ônibus que viabilizam a substituição.

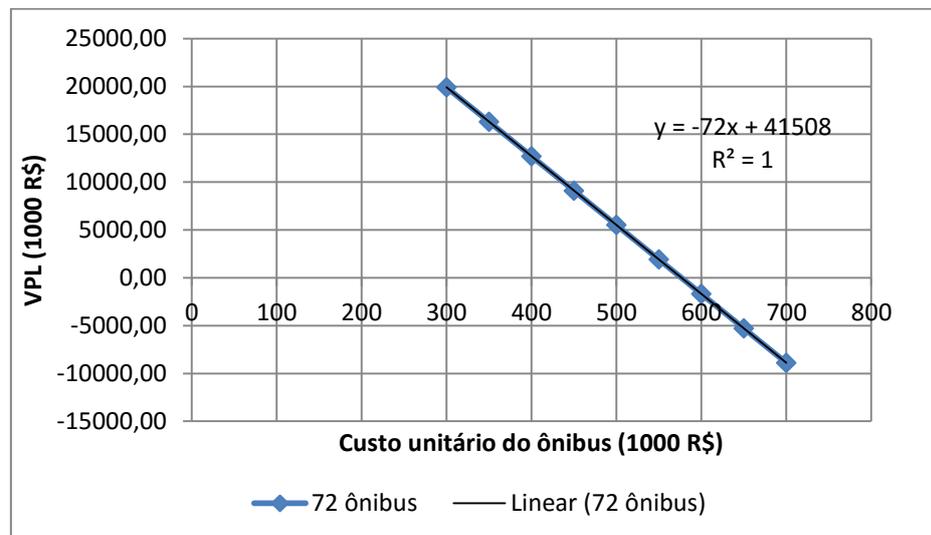
A partir disso foi feita uma avaliação econômica onde estimou-se o custo mínimo de conversão ou aquisição de um ônibus para a viabilização do uso do biometano, assim como o custo mínimo de um taxi convertido para viabilizar a substituição por biometano. Nesta avaliação considerou-se que o custo do diesel praticado pela empresa de ônibus é de R\$ 2,80/L, a taxa de juros do investimento

seria de 10%aa,a taxa de operação e manutenção de 4% aa do custo de investimento no aterro sanitário para captação do biometano e um tempo de vida do empreendimento de 15 anos. Com relação a avaliação econômica para substituição de taxi a gasolina, adotou-se os preço de R\$ 2,50/L para a gasolina. Cabe aqui salientar que os preços de combustível no Brasil variam de região para região, então procurou-se adotar um valor próximo ao real para gasolina e diesel.

Quanto a avaliação econômica de substituição de ônibus a diesel por biometano, adotou-se dois (02) cenários:

- a) Substituição de 50% da frota de 143 ônibus por biometano, ou seja, 72 ônibus;
- b) Substituição de 14% da frota de 143 ônibus por biometano, ou seja, 20 ônibus.

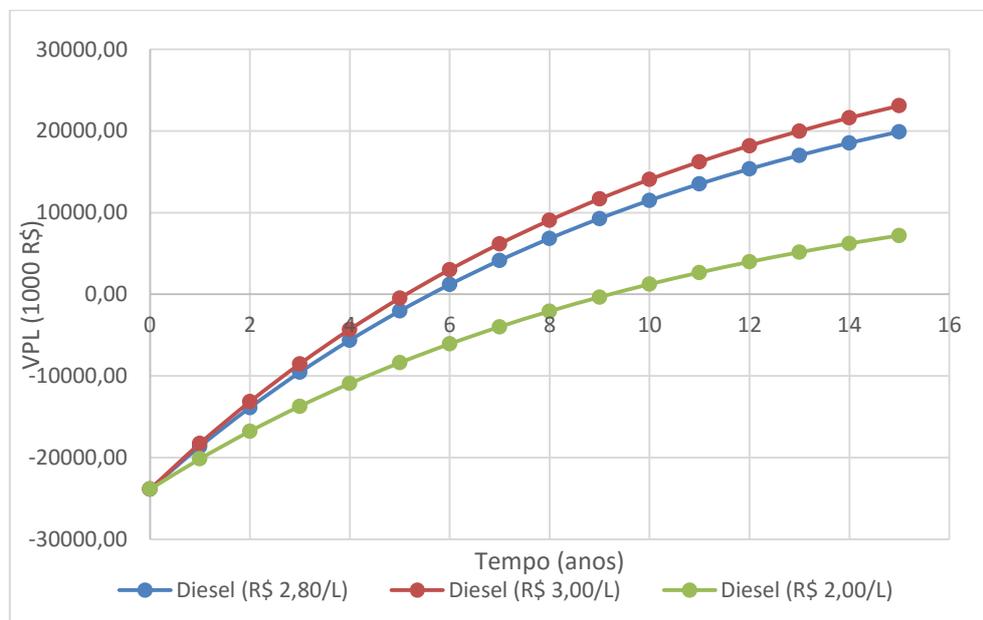
A Figura 21 mostra que substituindo 50% da frota de Foz do Iguaçu PR por biometano, o custo mínimo unitário de conversão ou aquisição de um ônibus, para que haja viabilidade ou VPL (Valor Presente Líquido) seja no mínimo zero, seria de R\$ 576.500,00 por unidade de ônibus. Hoje a Volvo vende um ônibus a biometano a R\$ 750.000,00. Logo, este valor tende a inviabilizar o investimento, ou seja, há necessidade de redução deste custo pelos fabricantes e empresas que fazem conversão de motores.



**FIGURA 21** - Custo unitário por ônibus versus valor presente líquido (15 anos), substituição 72 ônibus

Segundo Ahman et al. (2010), toda frota de ônibus urbano de Delhi-Índia, a qual operava com diesel, foi convertida para operar com metano (GNV), onde foi feita uma modificação na ignição, ou seja, os motores operam no modo dual, onde 10% de diesel é utilizado na ignição por compressão. Com base nisso, a empresa de ônibus não necessita adquirir novas unidades, basta converter os ônibus a diesel para biometano.

A Figura 22 mostra o fluxo de caixa ou VPL (Valor Presente Líquido) durante 15 anos do investimento na substituição de 50% da frota de ônibus por biometano. Observa-se que o *payback* e o VPL do investimento variam com o preço do diesel, para um investimento na conversão de um ônibus para biometano de R\$ 300.000,00.



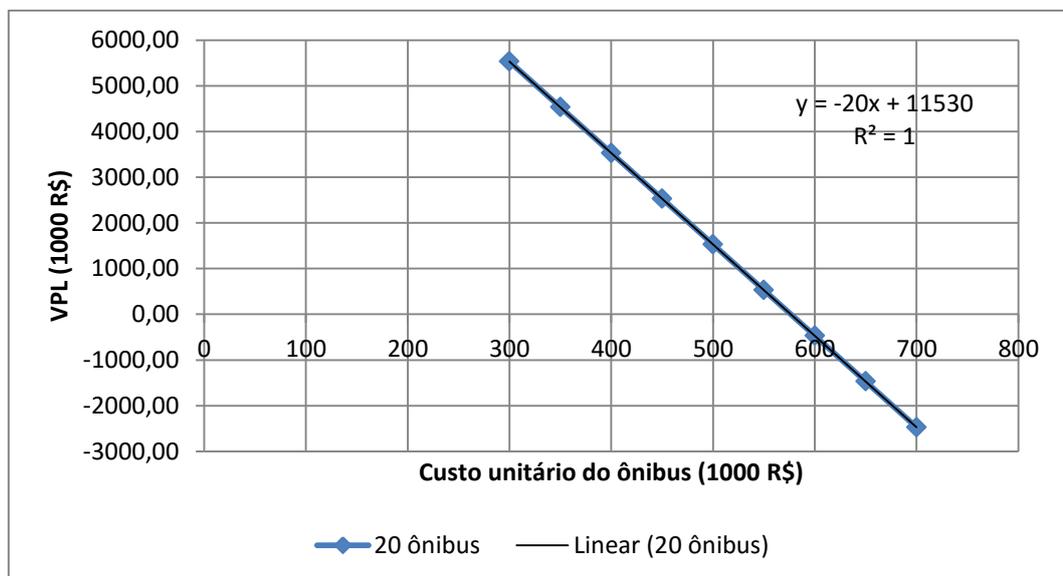
**FIGURA 22** - *Payback* e VPL em função do preço do diesel, substituição de 72 ônibus

A Tabela 7 mostra os principais dados econômicos (VPL, *Payback* e TIR), em função do custo com conversão de um ônibus (300.000 e 100.000R\$/unidade) e dos preços do diesel, para substituição de 72 ônibus. Observa-se que o aumento de 1 R\$ no preço do diesel, leva a um aumento no *payback* de 10 para 6 anos e na TIR de 15,02% para 24,95%, quando o investimento em conversão é de 300.000R\$. Isso mostra que o preço do diesel tem grande influência no cálculo de viabilidade. Por outro lado, quando o investimento em conversão cai para 100.000R\$/unidade, o *payback* cai consideravelmente para valores de até dois anos.

**Tabela 7:** Dados econômicos (VPL, Payback e TIR) em função do custo com conversão de um ônibus, para substituição de 72 ônibus.

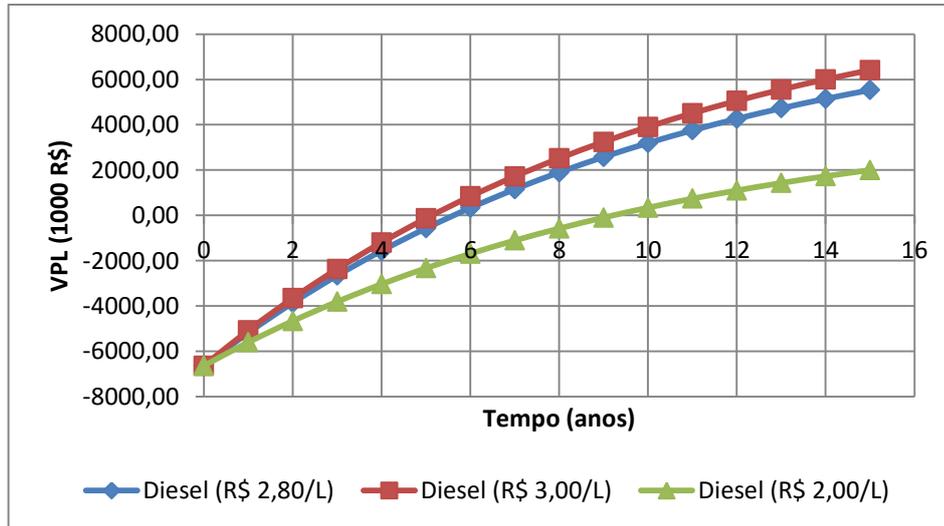
<b>Custo de conversão e substituição (R\$)</b>	<b>300.000,00</b>		
Preço do diesel (R\$/L)	2,00	2,80	3,00
VPL (1000 R\$)	7204,57	19907,55	23083,29
Payback (anos)	10	6	6
TIR (%)	15,02	23,04	24,95
<b>Custo de conversão e substituição (R\$)</b>	<b>100.000,00</b>		
Preço do diesel (R\$/L)	2,00	2,80	3,00
VPL (1000 R\$)	21604,57	34307,55	37483,29
Payback (anos)	3	2	2
TIR (%)	42,96	60,76	65,18

A Figura 23 mostra que substituindo 14% (substituição de 20 ônibus) da frota de Foz do Iguaçu por biometano, o custo mínimo unitário de conversão ou aquisição de um ônibus, para que haja viabilidade ou VPL (Valor Presente Líquido) seja no mínimo zero seria de R\$ 576.500,00, mesmo valor que para a substituição de 50% da frota.



**FIGURA 23** - Custo unitário por ônibus versus valor presente líquido (15 anos), para substituição de 20 ônibus

A Figura 24 mostra o fluxo de caixa ou VPL (Valor Presente Líquido) durante 15 anos do investimento na substituição de 20 ônibus da frota por biometano com um investimento de substituição de 300.000R\$/unidade.



**FIGURA 24** - *Payback* e VPL em função do preço do diesel, substituição de 20 ônibus

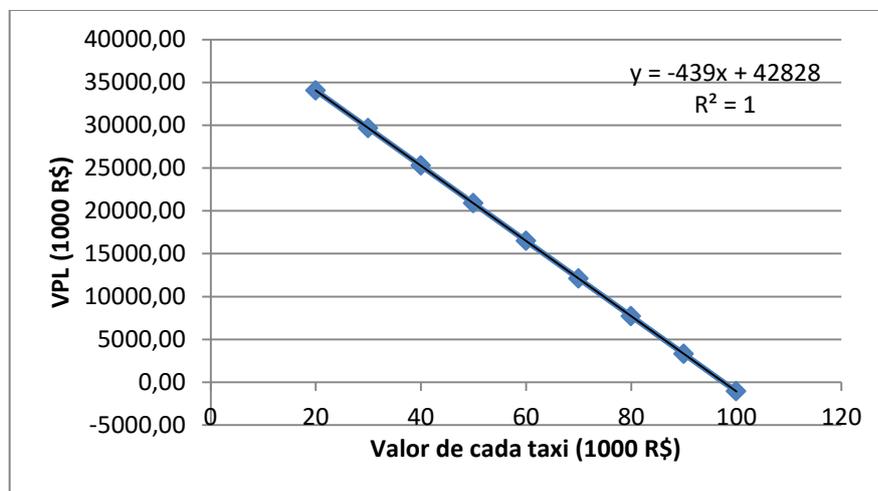
A Tabela 8 mostra os principais dados econômicos (VPL, *Payback* e TIR) em função do custo com conversão de um ônibus (300.000 e 100.000 R\$/unidade) e dos preços do diesel, para substituição de 20 ônibus. Observa-se que o *payback* e TIR são os mesmos valores obtidos quando se substitui 72 ônibus por biometano. Por outro lado o VPL é menor quando se substitui menos ônibus. Essa igualdade ocorre em decorrência da aplicação da metodologia de análise econômica, ou seja, a escala de substituição impacta somente no VPL, ao passo que o preço do diesel em escala impacta em todos os fatores econômicos.

**Tabela 8:** Dados econômicos (VPL, *Payback* e TIR) em função do custo com conversão de um ônibus.

Custo de conversão e substituição (R\$)	300000,00		
	2,00	2,80	3,00
Preço do diesel (R\$/L)	2,00	2,80	3,00
VPL (1000 R\$)	2001,27	5529,87	6412,03
<i>Payback</i> (anos)	10	6	6
TIR (%)	15,02	23,04	24,95

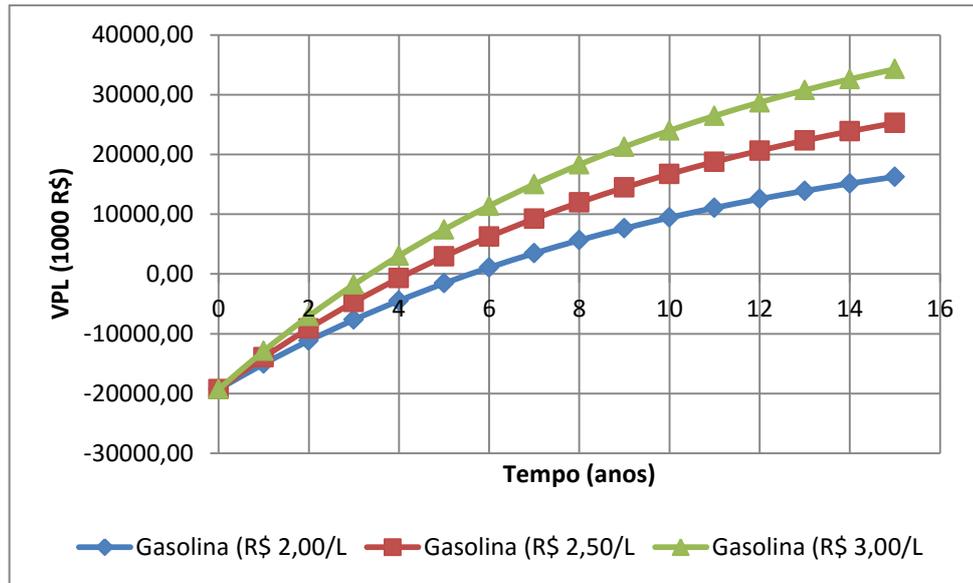
<b>Custo de conversão e substituição (R\$)</b>	<b>100000,00</b>		
Preço do diesel (R\$/L)	2,00	2,80	3,00
VPL (1000 R\$)	6001,27	9529,87	10412,03
<i>Payback</i> (anos)	3	2	2
TIR (%)	42,96	60,76	65,18

No caso de substituição da frota de taxis de Foz do Iguaçu para biometano, avaliou-se um cenário onde todos os 439 taxis sejam convertidos para unidades a biometano, ou seja, 100% de substituição da frota. Considerando-se o preço da gasolina a R\$ 2,50/L, uma taxa de desconto de 10%, taxa de operação e manutenção para a planta de biometano em 4% do investimento, obteve-se a Figura 25, que mostra a variação do VPL com o custo de substituição de uma unidade. Observa-se que o ponto de equilíbrio, no qual  $VPL = 0$ , é de aproximadamente 97.600R\$ por unidade, ou seja, a aquisição de unidades com valores inferiores a este tornam o investimento lucrativo para a associação de taxistas.



**FIGURA 25** - VPL versus valor de substituição de cada taxi

A Figura 26 mostra que um investimento em substituição de uma unidade em 40.000 R\$, leva a um retorno do investimento (*payback*) de 5 anos e um fluxo de caixa de 25.267.795,34 R\$ durante 15 anos. Isso mostra um investimento na substituição de uma energia não renovável numa renovável altamente lucrativo.



**FIGURA 26** - *Payback* e VPL em função do preço da gasolina, substituição de 100% da frota de taxi

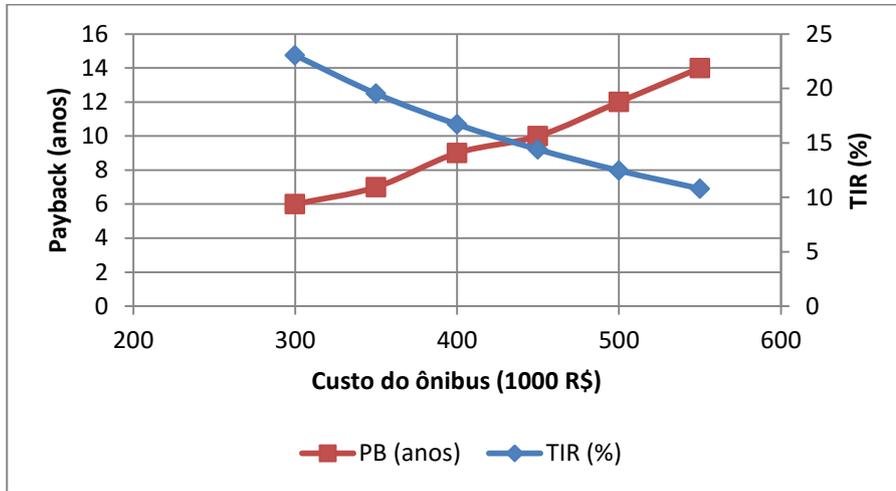
A Tabela 9 mostra os principais dados econômicos (VPL, *Payback* e TIR) em função do custo com conversão de um taxi.

**Tabela 9:** Dados econômicos (VPL, *Payback* e TIR) em função do custo com conversão de um taxi, para substituição de 100% da frota de taxi.

Custo de conversão e substituição (R\$)	40.000,00		
Preço da gasolina (R\$/L)	2,00	2,50	3,00
VPL (1000 R\$)	16252,31	25267,80	34283,28
<i>Payback</i> (anos)	6	5	4
TIR (%)	23,16	29,76	36,16

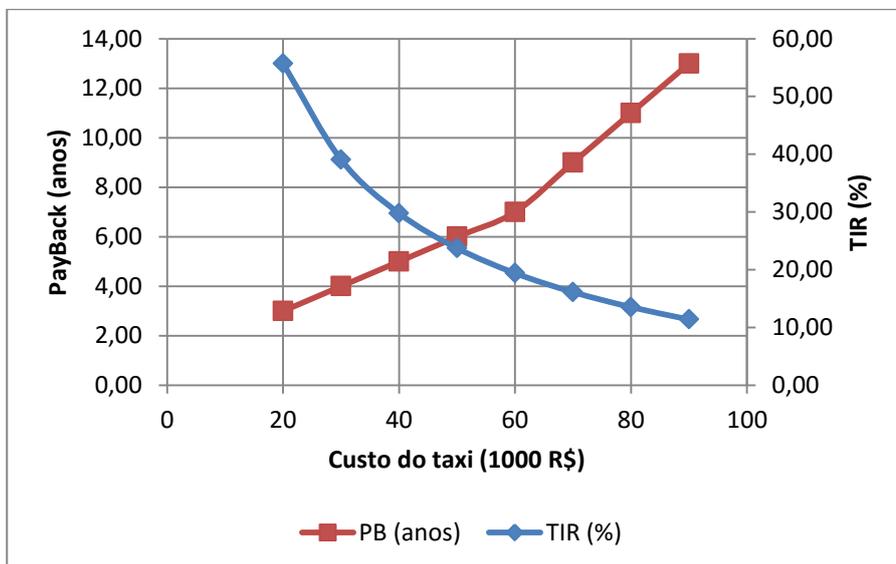
Comparando-se os dois casos: utilização do biometano em taxi e em ônibus urbano, verifica-se que a substituição da frota de taxi urbano por biometano poderia gerar um fluxo de caixa de 25.267.800,00R\$ ao longo de 15 anos, um tempo de retorno de 5 anos e uma TIR de 29,8% com economia de gasolina (2,5 R\$/L), quando comparado com a utilização de biometano para conversão da frota de ônibus, com um gasto de conversão de 300.000R\$ por ônibus e diesel a 2,8 R\$/L. Logo conclui-se ser mais vantajoso o processo de utilização de biometano em taxi urbano nua cidade do porte de Foz do Iguaçu.

A Figura 27 apresenta a variação do *payback* e da taxa interna de retorno em função do custo do ônibus, para os dois cenários de substituição (72 ou 20 ônibus).



**FIGURA 27 - Payback e TIR em função do custo do ônibus**

A Figura 28 mostra a variação do *payback* e da taxa interna de retorno em função do custo de cada taxi, para uma substituição de 100% da frota.



**FIGURA 28 - Payback e TIR em função do custo de um taxi**

Observando-se as Figuras 27 e 28, também é possível corroborar em função de análise realizada anteriormente que os tempos de retorno e as taxas de atratividade para o uso do biometano na substituição da frota de taxi a gasolina são melhores quando comparados com a substituição da frota de ônibus.

## 5 CONCLUSÕES

A preocupação com a destinação dos resíduos sólidos trata-se de uma questão que vem ganhando destaque nacional e internacional nas discussões acerca da consciência da humanidade em relação à prevenção do meio ambiente. Cada vez mais estão surgindo ao redor do mundo soluções sustentáveis, de gerenciamento e recuperação dos gases vindos dos resíduos sólidos como fonte diversificada de energia.

A utilização destes gases como combustível veicular, ou seja, o biogás tratado de forma apropriada, gerando o biometano e este substituindo os combustíveis veiculares mais comuns (gasolina e diesel), trata-se de uma ação sustentável que contribui de forma relevante para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Em meio a este cenário, evidenciando essa utilização do biogás gerado pela administração adequada dos resíduos sólidos como combustível veicular, a presente pesquisa teve por objetivo avaliar o potencial do biometano produzido a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) da cidade de Foz do Iguaçu para o uso em transporte urbano de passageiros: ônibus e taxis.

Para o alcance desta proposta, calculou-se a quantificação do biogás gerado no aterro da cidade, seu potencial de geração e emissão de metano, a estimativa do fluxo de resíduos conforme número de habitantes e consumo combustível das frotas de ônibus e taxis. Com os dados gerados através deste levantamento, buscou-se o potencial de substituição de veículos a diesel (ônibus) e a gasolina (taxis) por veículos movidos a biometano e a viabilidade econômica envolvida neste processo que envolve não apenas o tratamento adequado dos resíduos sólidos, mas também a conversão dos veículos para que possam receber o biometano como combustível.

Analisando de forma comparativa os resultados advindos destes cálculos, chegou-se à conclusão de que o aterro de Foz do Iguaçu possui capacidade de fornecimento de biometano para 50% da frota de ônibus por um período de 17 anos e para 100% da frota de taxi por um período de 19 anos. Ainda, foi possível

apurar que o custo de produção do biometano em Foz do Iguaçu é baixo, tornando a proposta viável por este viés.

Por outro lado, a proposta torna-se, em partes, inviável economicamente quando se trata conversão dos veículos para o uso do biometano, sendo esta a parte mais onerosa e menos atraente para os investidores, seja da esfera pública ou privada. Citou-se “em partes”, pois obteve-se a seguinte situação: a conversão dos ônibus é mais custosa que a dos taxis, sendo recomendável inicialmente que apenas a frota de taxis seja convertida para o uso do biometano como combustível, o que resultará em um fluxo de caixa positivo e menor tempo de retorno do investimento, indicando a viabilidade a economia deste processo.

Para a frota de ônibus, é recomendável aguardar mais um tempo na esperança de que este processo de conversão se torne mais popular e conseqüentemente tenha seus valores reduzidos.

## 6 REFERÊNCIAS

ABREU, F. V. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica da Geração de Energia Através do Biogás de Lixo em Aterros Sanitários**. Dissertação (Mestrado em Fenômenos de Transporte) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2009. Disponível em: < [http://www.ppgem.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2009/DISSERTACA\\_OPPG-EM-FabioVianadeAbreu.pdf](http://www.ppgem.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2009/DISSERTACA_OPPG-EM-FabioVianadeAbreu.pdf) > . Acesso em: 05 abr. 2017.

AGÊNCIA MUNICIPAL DE NOTÍCIAS. **Foz do Iguaçu conclui projeto de ampliação do aterro sanitário**. Jornal do Iguaçu, 14 dez. 2016. Disponível em: <<http://jornaldoiguassu.com.br/foz-do-iguacu/53-economia/16453-foz-do-iguacu-conclui-projeto-de-ampliacao-do-aterro-sanitario.html>>. Acesso em 10 jan. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BICOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP Nº 8 de 31/01/2015**. Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP Nº1/2015, parte integrante desta Resolução. Rio de Janeiro, 2015. Publicado no DO em 2 fev 2015.

AHMAN, M. Bimethane in the transport sector – an appraisal of the forgotten option. **Energy Policy**, n.38, p.208-247, 2010.

ANDREOLI, C. V. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final** – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. BIOMASSA. **Atlas da Energia Elétrica no Brasil**. Capítulo 4. 3 Ed. Brasília, 2008. Disponível em [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas\\_par2\\_cap4.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap4.pdf). Acesso: 03 out. 2013.

AQUINO, V. Ótima fonte de energia que é pouco aproveitada. **Revista TAE Biogás**, 05/12/2013. Disponível em:<<http://www.revistatae.com.br/noticialnt.asp?id=6942>>. Acesso em 05 mai. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2015**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>. Acesso em 05 fev. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004:2004**. Resíduos Sólidos – Classificação. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10157:1987**. Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13896:1997**. Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8419:1984**. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8849:1985**. Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

AZEVEDO, G. O. D; KIPERSTOK, A.; MORAES, L. R. S. Resíduos da Construção Civil. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. Vol. II Jan/Mar 2006.

BLEY JR, Cícero. **Biogás: a energia invisível**. 2. ed. Ver. ampl. São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2015.

BLEY JÚNIOR, C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M. **Agroenergia da Biomassa Residual**. Itaipu Binacional. Foz do Iguaçu: PR.2009. Disponível em:  
<[https://www.fao.org.br/download/agroenergia\\_biomassa\\_residual251109.pdf](https://www.fao.org.br/download/agroenergia_biomassa_residual251109.pdf)>. Acesso jul. 2015.

BGS. **Biodigestores ao redor do mundo**. Maio, 2013. *Disponível em:*  
<<http://bgsequipamentos.com.br/blog/biodigestores-ao-redor-do-mundo/>>. Acesso jul. 2015.

BOATENG C, Lee KT and MENSAH M (2013) **The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW)** in Ghana: A better waste management option. *Fuel Processing Technology* 110: 94–102.

BOVE, R.; LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative Technologies. **Energy Conversion and Management**, 47, 2006, pp. 1391–1401.

BRASIL, 1988. **Constituição Federal**. Brasília, 1998.

BRASIL. **Lei Federal Nº 12.035 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA SECRETARIA DE ENERGIA ELÉTRICA DEPARTAMENTO DE MONITORAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA SECRETARIA DE ENERGIA ELÉTRICA DEPARTAMENTO DE MONITORAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO. Janeiro/2016 **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Disponível em:

<<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3308684/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Janeiro-2016.pdf/5977c97c-c5bf-433c-9c0a-b92cb32df517>>. Acesso em 20 mai. 2016.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Biometano como combustível veicular / Probiogás**. Ministério das Cidades, Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. 101 p.

CALIXTO, B. **O lixo que vira energia e crédito de carbono**. Revista Época [Online]. 18 de agosto de 2013. Disponível em: <<http://revistaepoca.globo.com/Sociedade/o-caminho-do-lixo/noticia/2012/01/o-lixo-que-vira-energia-e-credito-de-carbono.html>>. Acesso em 10 fev. 2017.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. (Orgs.). **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

CAVALACANTE, R. F., VIANA, T. **Potencial de produção de biogás, para uso como energia, através de resíduos sólidos domiciliares no Sertão Central Cearense. 2012**. Disponível em: <<http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/3648/2323>>. Acesso em 15 set. 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento Biológico de águas Residuárias: Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Belo Horizonte: MG, 1997.

CHRISTOPHERSON, R. W. **Geossistemas: uma introdução à geografia física**. 7 ed. Bookman: Porto Alegre, 2012.

CORTEZ L. A. B.; LORA, E. E.; GOMEZ, E. O. **Biomassstoenergy**. São Paulo, Brazil: UNICAMP, 2008, pp.1–29.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 194p. 2006.

COSTA, D. F.; **Geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto**. São Paulo: 2002.

COSTA, M. C. et al. Impact of inocula and operating conditions on the microbial community structure of two anammox reactors. **Environmental Technology**, v. 35, 2014, pp. 1811-1822.

CUNHA, J. **Gás derivado de dejetos de animais começa a abastecer frotas no Brasil**. Folha de São Paulo [Online]. 20 fev. 2016. Disponível em:

<<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2016/02/1741225-gas-do-lixo-comeca-a-abastecer-frotas-de-veiculos-no-brasil.shtml>>. Acesso em 24 abr. 2017.

DIAS, J. **É Hora de Agir**. Revista Veja. 14 de fevereiro, 2007.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas – SP**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Pós-graduação na Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br>>. Acesso em 03 abr. 2017.

EPA – United States Environmental Protection Agency. Feasibility Assessment for Gas-to Energy at Selected Landfills in Sao Paulo, Brazil. Washington: **Report EPA 68-W6-0004**, January 1997.

EPE. Energy Research Company Energy. **Use of Urban Solid Waste in Campo Grande**. MS: MME/EPE, 2008, p.73.

ESTADO DO PARANÁ. **Lei Estadual Nº 12.493 de 22 de janeiro de 1999**. Curitiba, 1999.

FERREIRA, M, MARQUES, I. P.; Malico, I., Biogas in Portugal: Status and public policies in a European context, **Energy Policy**, Vol. 43, Janeiro 2012, pp. 267-274.

FOGLIATTI, Maria Cristina. **Avaliação de Impactos Ambientais**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2004.

GARCIA, G. **Cidade inglesa recebe ônibus movido a fezes humanas**. Exame.com, 21 de novembro de 2014. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/cidade-inglesa-recebe-onibus-movido-a-fezes-humanas/>>. Acesso em 01 fev. 2016.

GUBINELLI, G. **Planta de biogás de 2 MW se apresentará a licitações Del Programa RenovAr**. Energia Estratégica, 14 de julho de 2016. Disponível em: <http://www.energiaestrategica.com/planta-de-biogas-de-2-mw-se-presentara-a-licitacoes-del-programa-renovar/>>. Acesso em 07 jan. 2017.

GUTIERREZ, E. C.; XIAO, A; MURPHY, J. D. Can slurry biogas systems be cost effective without subsidy in Mexico? **Renewable Energy**, V. 95, 2016, pp. 22-30.

HENRIQUES, R. M. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica. 2004, 190 f. Tese (Pós-Graduação de Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

IGONI H.; AYOTAMUNO, M. J., EZE, C.L.; OGAJI, S. O.T.; PROBERT, S. D. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. **Applied Energy**, 2008, 85: 430–438.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Paraná. Foz do Iguaçu**. 2015. Disponível em:

<<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=410830>>. Acesso em 12 jan. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Lixo Municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, 1995.

IPCC - INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Inventories**: Reference Manual (Vol.3). 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>>. Acesso em 25 mar. 2017.

JANUS & PERGHER. **Empresa de produção e utilização de gases para uso médico ou industrial**. Dados econômicos e técnicos de purificação de biogás e conversão em biometano. Informação Pessoal por e-mail ao autor, 2016.

JARDIM, M. A. C. **Valorização Econômica do Biogás**: Geração Elétrica vs. Produção de Biometano para Injeção na Rede. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto Politécnico Setúbal, Portugal. Disponível em: <<http://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/7009>>. Acesso em 14 jul. 2015.

JORNAL DA BIOENERGIA. **O potencial da produção de biogás**. 13 dez. 2016. Disponível em: <<http://www.canalbioenergia.com.br/opcoes-de-materias-para-producao-de-biogas/>>. Acesso em 10 fev. 2017.

JORNAL DO COMÉRCIO. **Ônibus que utiliza biometano será apresentado no Estado no dia 29**. Jornal do Comércio, 22 de janeiro de 2015, Porto Alegre. RS: 2015. Disponível em: <<http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=185206>>. Acesso em 14 jul. de 2015.

JUNIOR, D. **CTR Candeias**: importância no tratamento dos resíduos sólidos. Conexão Meio Ambiente, 30 de janeiro de 2012. Disponível em: <<http://conexaomeioambiente.blogspot.com.br/2012/01/ctr-candeias-importancia-no-tratamento.html>>. Acesso em 24 fev. 2017.

KHAN, M. I.; YASMIN, T.; SHAKOOR, A. Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, P.785-797, 2015.

KHAN, M. I.; YASMIN, T. Development of natural gas as a vehicular fuel in Pakistan: Issues and prospects. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, V.17, P. 99-109, 2014.

KNIGHT, V. M. Análise custo benefício da substituição do diesel por gás natural veicular em ônibus na região metropolitana de São Paulo. 2006. 78 f. Monografia (Bacharelado em Economia). Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

KOORNNEEFA, J.; BREEVOORTA, P.; NOOTHOUTA, P.; HENDRIKSA, C. L. L. **Potencial global para produção de biometano com a captura de carbono, transporte e armazenamento até 2050**. 2013. Artigo disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213007765>>. Acesso em out. 2015.

LANDIM, A. L. P. F; AZEVEDO, L. P. O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-100, mar. 2008.

LEITE, V. D. et al. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.13, n.2, p.190–196, 2009.

LETTINGA, G., HULSHOF POL, L. W., ZEEMAN, G. **Biological Wastewater Treatment**. Part I: Anaerobic wastewater treatment. Lecture Notes. Wageningen Agricultural University, ed. January, 1996.

LINO, F. A. M; ISMAIL, K. A. R. Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. **Energy Policy**, n. 39, 2011, pp. 3496–3502.

MACHADO, G. B. **Aterro controlado**. Portal Resíduos Sólidos, maio de 2013. Disponível em: <<http://www.portalresiduossolidos.com/aterro-controlado/>>. Acesso em 05 fev. 2017.

MACHADO, V. **Município produziu mais de 62 mil toneladas de lixo doméstico este ano**. Gazeta Diário, Foz do Iguaçu, 07 de outubro de 2016. Disponível em: <<http://gazetanews.inf.br/06-28/>>. Acesso em 25 mar. 2017.

MAGALHÃES, R. R. **Entendendo a Central de Tratamento de Resíduos Sólidos – Nova Iguaçu**: TREMĂ Produções Criativas, 2012.

MALAGGI, M. **Potencial de Produção de Biogás e Energia na Indústria de Abate de Frangos no Brasil**. Toledo: PR, 2014.

MANAHAN, S. E. **Química ambiental**. 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MARTINI, P. R. R. Conversão Piro-lítica do Bagaço Residual da Indústria de Suco de Laranja e Caracterização Química dos Produtos 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Santa Maria, Santa Maria.

MARTINS, F. **Locais onde são depositados o lixo**. 2011. Disponível em: <[http://lixoacultural.blogspot.com.br/2011\\_04\\_01\\_archive.html](http://lixoacultural.blogspot.com.br/2011_04_01_archive.html)>. Acesso em 27 mar. 2017.

MONARI, P. **Primeiro trator no mundo movido a biometano está em teste no Brasil!** Marcas e Máquinas, 19 de dezembro de 2016. Disponível em: <<http://blogs.canalrural.com.br/marcasemaquinas/2016/12/19/primeiro-trator-no-mundo-movido-biometano-esta-em-teste-no-brasil/>>. Acesso em 14 fev. 2017.

MOTTA, Maria Luísa Alvim, **Experiências de Coleta Seletiva**. São Paulo: Petrópolis, 2002.

MULLER, J. C. **Biogás – GNVerde**: geração de biogás e produção de biometano. Ecocitrus, 2013. Disponível em: <<http://www.ecocitrus.com.br/index.php/produtos-e-servicos/biogas-gnverde-1>>. Acesso em 04 abr. 2015.

MURPHY, J. D.; BROWNE, J.; ALLEN, E.; GALLAGHER, C. **O recurso de biometano, produzido por vias biológicas, térmicas e elétricas, como um biocombustível de transporte**. 2013. Artigo disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/271561449\\_The\\_resource\\_of\\_biomethane\\_produced\\_via\\_biological\\_thermal\\_and\\_electrical\\_routes\\_as\\_a\\_transport\\_biofuel](http://www.researchgate.net/publication/271561449_The_resource_of_biomethane_produced_via_biological_thermal_and_electrical_routes_as_a_transport_biofuel)>. Acesso em 15 out. 2015.

MUYLAERT, M. S. (coord.). **Consumo de energia e aquecimento do planeta – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudos de Caso**. Rio de Janeiro: Coppe, 2000.

NADALETTI, W. C.; CREMONEZ, P. A.; SOUZA, S. N. M.; BARICCATTI, R. A.; BELLI FILHO, P.; SECCO, D. Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 41, jan. 2015, pp. 277-283

NICHOLSON, L. **EUA anunciam medidas para reduzir emissões de gás metano**. Diário de Notícias, 13 de maio de 2016. Disponível em: <<http://www.dn.pt/mundo/interior/eua-anunciam-medidas-para-reduzir-emissoes-de-gas-metano-5172469.html>>. Acesso em 14 fev. 2017.

NUVOLARI, Ariovaldo. **Esgoto Sanitário**: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. São Paulo: Edgard, 2003.

OLIVEIRA, S. Caracterização física dos resíduos sólidos domésticos (RSD) da cidade de Botucatu/SP. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental da Abes**, São Paulo, set. 1999.

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L. P. Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits. **Energy Policy**, V. 31, 2003, pp. 1481-1491.

OLIVEIRA, P. A. V. de. Produção e aproveitamento do biogás. In: OLIVEIRA, P.A.V. **Tecnologia para o manejo de resíduos na produção de suínos**: manual de boas práticas. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2004. Cap. 4, p.43-55.

PESSIN, N.; DE CONTO, S. M.; QUISSINI, C. S. Diagnóstico preliminar da geração de resíduos sólidos em sete municípios de pequeno porte da região do Vale do Caí, RS. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. 2002, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: [s.n.], 2002

PHILIPPI, A. Agenda 21 e resíduos sólidos. In: **Reside'99**. São Paulo: 1999.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FOZ DO IGUAÇU (PMFI). **Plano Municipal de Saneamento Básico – Município de Foz do Iguaçu / PR**. Coordenação Geral; Secretaria Municipal do Meio Ambiente e Obras. Foz do Iguaçu, 2012.

PMFI - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE FOZ DO IGUAÇU. Secretaria Municipal de Obras. **Departamento de Serviços Urbanos**. *Informações sobre o aterro sanitário de Foz do Iguaçu*. Foz do Iguaçu, 2009.

PORTAL BRASIL. **Aterros sanitários protegem ambiente de contaminação**. 29 de julho de 2014. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/04/aterros-sanitarios-protectem-meio-ambiente-de-contaminacao>>. Acesso em 05 fev. 2017.

PROCONVE: **Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores**. 2013. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_arquivos/proconve\\_163.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf)>. Acesso em jul. 2015.

RAUBER, L. F. **Gás natural renovável é testado no Rio Grande do Sul**. Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 27 de novembro de 2013. Disponível em: <[http://www.rs.gov.br/conteudo/8736/gas-natural-renovavel-e-testado-no-rio-grande-do-sul/termosbusca=\\*](http://www.rs.gov.br/conteudo/8736/gas-natural-renovavel-e-testado-no-rio-grande-do-sul/termosbusca=*)>. Acesso em 04 abr. 2015.

REICHERT, G. A. 2005. Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005, Campo Grande, Brasil. Artigos Técnicos, ABES.

REIS, A. S. Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio. 2012. 79 f. Dissertação de Mestrado (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

REIS, A. **Gás extraído de dejetos, biometano é 100% e tem custo 56% menor que o diesel**. UOL. 13 fev. 2017. Disponível em: <<https://carros.uol.com.br/noticias/redacao/2017/02/13/brasil-ja-testa-carros-abastecidos-com-esgoto-conheca-a-tecnologia.htm>>. Acesso em 24 abr. 2017.

REPETTO, J. M. **Um pueblo inspirado a volver al futuro**. Servicio de Prensa y Divulgación Científica y Tecnológica sobre Agronomía y Ambiente, 9 de junho de 2016. Disponível em: <<http://sobrelatierra.agro.uba.ar/un-pueblo-cordobes-inspirado-en-volver-al-futuro/>>. Acesso em 07 jan. 2017.

RODRIGUE, T. S. N. Estudo de Viabilidade do Aproveitamento energético do Biogás Gerado em Célula Experimental no Aterro Controlado da Muribeca Pernambuco (PE). Dissertação de Mestrado (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2009.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLOM, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, n. 35, 2011, pp. 1633-1645.

SCHOLZ, M.; MELIN, T.; WESSLING, M. Transforming Biogas Into Biomethane Using Membrane Technology, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 17, Janeiro 2013, pp. 199-212.

SILVA, R. J.; SOEIRO, E. C. Viabilidade da utilização de biogás como fonte alternativa de energia. **RUnPETRO**, ano 2, n. 1, mar. 2014, pp. 31-36.

SINDITAXI – Sindicato do taxistas de Foz do Iguaçu – PR, Dados sobre a frota de taxi urbano, Informação Pessoal, 2016.

SINGH A.; SMYTH, B.; M. MURPHY, J. D. A biofuel strategy for Ireland with an emphasis on production of biomethane and minimization of land take. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, nr. 14, v. 1, 2009, pp. 277-288.

SORRISO – Empresa de Transporte Público de Foz do Iguaçu – PR, Dados sobre a frota de ônibus urbano, Informação Pessoal, 2016.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.

TOLMASQUIM, M. T. **Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil**. 2012. Artigo. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142012000100017](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100017)>. Acesso em 10 ago. 2015.

VALLE, C. E. **Qualidade Ambiental: O desafio de Ser Competitivo Protegendo o Meio Ambiente**. São Paulo: Pioneira, 1995.

VAN ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. **Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial**. Química Nova, v. 32, n. 3, p. 757-767, 2009.

ZANATTA, E. R. Estudo Cinético da Pirólise das Biomassas: Bagaço de Mandioca, Casca de Soja e Bagaço de Cana. 2012. 132 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2012.

ZANETTE, L. A. Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. 2009, 101 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de Produção de Biogás em uma Estação de Tratamento de Esgoto de Cascavel para a Geração de Energia Elétrica**. Artigo. Cascavel: 2012. Disponível em: <[http://200.201.88.199/porta1pos/media/File/energia\\_agricultura/pdf/Dissertacao\\_Helcio\\_A\\_Zilotti.pdf](http://200.201.88.199/porta1pos/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Helcio_A_Zilotti.pdf)>. Acesso em ago. 2015.

### ANEXO I – Planilhas Substituição frotas de ônibus e taxis em Foz do Iguazu

Passageiros Transportados	Quilometragem Programada	Frequência Média (Minutos)	Quantidade de ônibus fixos	Quantidade de ônibus extras (Horário de Pico)	Total de Ônibus (Horário de Pico)
62.259	37.278,57	25	3	2	5
702	2.945,00	45	1	0	1
10.090	7.695,49	56	1	1	2
27.541	33.603,05	40	3	2	5
24.709	25.983,93	23	3	1	4
23.573	21.377,05	43	2	1	3
16.707	12.263,97	44	2	1	3
12.360	14.452,90	40	2	2	4
18.897	13.958,08	38	2	1	3
2.099	1.077,40	70	0	2	2
113.762	57.362,87	30	5	5	10
125.174	65.058,61	30	5	5	10
90.627	48.453,17	27	4	5	9
2.905	5.703,72	33	0	3	3
54.780	32.524,62	34	4	0	4
6.352	5.676,95	57	1	0	1
41.194	20.907,06	30	3	1	4
105.857	57.759,27	22	4	4	8
39.139	24.820,94	25	3	1	4
9.021	8.600,58	35	1	0	1
13.298	9.787,47	29	1	1	2
3.675	3.921,70	49	1	0	1
73.767	39.937,61	40	6	4	10
11.852	10.439,16	27	2	0	2
296	1.864,90	120	1	0	1
28.239	24.825,96	60	1	0	1
28.790	20.690,21	40	2	0	2
11.332	7.711,99	15	3	0	3
9.157	8.624,57	40	2	0	2
31.014	18.471,30	36	2	1	3
65.087	27.967,68	20	3	0	3
80.980	58.853,65	40	4	5	9
36.583	25.888,79	20	3	1	4
95.522	35.099,59	30	3	0	3
462	2.077,00	120	1	0	1
22.841	14.403,57	30	3	2	5
6.527	5.347,95	30	0	2	2
3.576	4.259,11	33	2	0	2
561	351,45		1	0	1
44.299	24.712,35	24	3	2	5
1.355.606	842.739,23				143
					5.893,28

CEO	0,55	m3/km
-----	------	-------

Consumo de Biometano em Foz do Iguaçu		
Biometano (m3/mês)	Biometano (m3/dia)	Biometano (m3/h)
20503,21	683,44	28,48
1619,75	53,99	2,25
4232,52	141,08	5,88
18481,68	616,06	25,67
14291,16	476,37	19,85
11757,38	391,91	16,33
6745,18	224,84	9,37
7949,10	264,97	11,04
7676,94	255,90	10,66
592,57	19,75	0,82
31549,58	1051,65	43,82
35782,24	1192,74	49,70
26649,24	888,31	37,01
3137,05	104,57	4,36
17888,54	596,28	24,85
3122,32	104,08	4,34
11498,89	383,30	15,97
31767,60	1058,92	44,12
13651,52	455,05	18,96
4730,32	157,68	6,57
5383,11	179,44	7,48
2156,93	71,90	3,00
21965,69	732,19	30,51
5741,54	191,38	7,97
1025,69	34,19	1,42
13654,28	455,14	18,96
11379,61	379,32	15,81
4241,59	141,39	5,89
4743,51	158,12	6,59
10159,22	338,64	14,11
15382,22	512,74	21,36
32369,51	1078,98	44,96
14238,83	474,63	19,78
19304,78	643,49	26,81
1142,35	38,08	1,59
7921,96	264,07	11,00
2941,37	98,05	4,09
2342,51	78,08	3,25
193,30	6,44	0,27
13591,79	453,06	18,88
463506,58	15450,22	643,76

4,50

Lo	61	m3 CH4/Ton RSU
----	----	----------------

<b>População (Habitantes)</b>	<b>Disposição de RSU (Ton/dia)</b>	<b>Biometano (m3/dia)</b>	<b>Biometano (m3/h)</b>	<b>Biometano (m3/h), IRM = 70%</b>
280000	280	0	0,0	0,00

<b>Substituição da frota</b>				
	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>
<b>Cons Metano (m3/h)</b>	64	129	193	258
<b>No Onibus</b>	14	29	43	57

	km/dia	km/h	m3/h . Taxi
Taxi	150	6,21	0,50