



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Câmpus Experimental de Itapeva

**MATHEUS HENRIQUE ROSSINI**

**ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO NA  
CIDADE DE ITAPEVA/SP**

Itapeva - SP  
2018

**MATHEUS HENRIQUE ROSSINI**

**ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO NA  
CIDADE DE ITAPEVA/SP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus Experimental de Itapeva, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna

Itapeva - SP  
2018

R835a Rossini, Matheus Henrique  
Análise da potencialidade de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário na cidade de Itapeva/SP / Matheus Henrique Rossini. -- Itapeva, 2018  
82 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de Itapeva, Itapeva  
Orientador: Carlos Manuel Romero Luna

1. Resíduos sólidos. 2. Gás de aterro. 3. Modelos de previsão. 4. Aproveitamento energético. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**MATHEUS HENRIQUE ROSSINI**

**ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO NA  
CIDADE DE ITAPEVA/SP**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

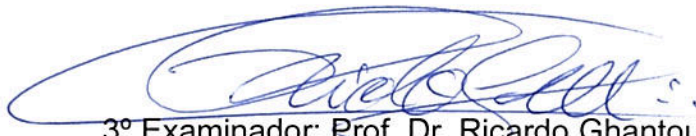
**BANCA EXAMINADORA**



Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.



2º Examinador: Prof.ª Dr.ª Adriana Miralles Schleder  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.



3º Examinador: Prof. Dr. Ricardo Ghantous Cervi  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

Itapeva, 30 de novembro de 2018.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Carlos Romero, pela paciência, pelo comprometimento e pelos conselhos e ensinamentos que levarei pela vida toda.

Agradeço à minha família, que sempre me deu as melhores condições possíveis para crescer pessoal e profissionalmente.

Agradeço à minha namorada e meus amigos pela paciência, compreensão e apoio.

Agradeço a todos os professores que um dia fizeram parte da minha formação como aluno e pessoa.

Enfim, agradeço a todos que fizeram parte dessa etapa da minha vida.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

## RESUMO

O aumento da população e do consumo de bens e serviços, estimulado pelas inovações tecnológicas, impacta diretamente a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a utilização de recursos para geração de energia, aumentando as emissões de gases do efeito estufa, além de outros problemas associados aos RSU. Mesmo com o estabelecimento da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, a disposição dos RSU na cidade de Itapeva/SP é classificada como inadequada segundo a CETESB, assim como grande parte dos municípios no Brasil. Assim, o estudo consistiu na aplicação dos modelos de previsão de geração de biogás da USEPA (1998 e 2005) e do Banco Mundial (Scholl Canyon), para estimar a produção de metano proveniente dos RSU de Itapeva/SP. Os parâmetros de entrada foram os mesmos para cada modelo. Os valores obtidos para o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) e para a taxa de geração de metano ( $k$ ) foram  $99,33 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton. RSU}$  e  $0,06$ , respectivamente. Foram aplicados 9 casos distintos com relação ao tempo de recepção de resíduos no aterro e ao incremento na taxa de geração de RSU. Para cada um dos 9 casos foi obtida a produção total de  $\text{CH}_4$  ( $\text{m}^3$ ), a quantidade média de energia elétrica disponível por ano e a parcela da população atual de Itapeva/SP que poderia ser beneficiada com tal energia. Para o caso mais conservador (caso 1), seria possível beneficiar  $0,46\%$  da população, enquanto  $1,55\%$  seria beneficiada pela previsão mais otimista (caso 9). Adicionalmente, foram aplicados casos especiais para a obter a quantidade de RSU necessária para beneficiar  $50\%$  da população. Por fim, obteve-se a parcela da população beneficiada em cada um dos casos iniciais, considerando a taxa de geração de RSU como sendo o acumulado entre Itapeva/SP e alguns municípios vizinhos. Para este caso, aumentou-se a quantidade de energia disponível e a parcela da população beneficiada. No geral, foram adotadas premissas conservadoras que podem ser melhor ajustadas, mas forneceram resultados razoáveis, de forma a abrir frente para estudos mais detalhados acerca da implantação de projetos de aproveitamento energético dos RSU na cidade de Itapeva/SP.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos. Gás de aterro. Modelos de previsão.

Aproveitamento energético

## ABSTRACT

The increase in population and in consumption of goods and services, stimulated by technological innovations, directly influences on generation of municipal solid waste (MSW) and the use of resources for generating energy, increasing greenhouse gas emissions, as well as other problems associated with MSW. Even with the establishment of the National Policy on Solid Waste, the disposal of MSW is classified as inadequate according to CETESB, not only in Itapeva/SP but in most of the municipalities in Brazil. Thus, the study consisted in applying USEPA's (1998 and 2005) and World Bank (Scholl Canyon) biogas generation models to estimate the methane production from Itapeva/SP MSW. The input parameters were the same for each model. The values obtained for the methane generation potential (L0) and for the methane (k) generation rate were 99.33 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> / ton. RSU and 0.06, respectively. It was considered 9 different cases in relation to the time of reception of residues in the landfill and the increase in the MSW generation rate. For each of the 9 cases, the total production of CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>), the average amount of electric energy available per year and the percentage of Itapeva's population that could benefit from such energy were obtained. For the more conservative case (case 1), it would be possible to benefit 0.46% of the population, while 1.55% would benefit from the more optimistic forecast (case 9). In addition, special cases were applied to obtain the amount of RSU needed to benefit 50% of the population. Finally, the portion of the benefited population was obtained in each of the initial cases, considering the RSU generation rate as being the sum of Itapeva's and some of the neighboring municipalities' RSU generation rate. In this case, the amount of available energy and the share of the beneficiary population were increased. Although some assumptions were conservative and can be better refined, the results were reasonable and can be used as a base for more detailed studies on the implementation of energy recovery projects in the city of Itapeva/SP.

**Keywords:** Solid waste. Landfill gas. Forecast models. Energy use.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da matriz energética brasileira ao longo dos anos .....	18
Figura 2 – Evolução da demanda total de energia por setor até 2050 .....	19
Figura 3 – Participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira e mundial.....	20
Figura 4 - Oferta de energia por fonte no Brasil entre 2016 e 2017 (em Mtep) e sua variação percentual. ....	21
Figura 5 - Panorama da geração de RSU no Brasil .....	28
Figura 6 - Perfil da disposição dos RSU no Brasil.....	29
Figura 7 - Hierarquia adotada no manejo de RSU .....	31
Figura 8 - Esquema ilustrativo do preparo de terreno, funcionamento e finalização de um aterro sanitário .....	38
Figura 9 - Fases do processo de formação dos gases em aterro sanitário .....	39
Figura 10 – Índices pluviométricos mensais da cidade de Itapeva/SP .....	52
Figura 11 – Evolução da geração de RSU na cidade de Itapeva/SP ao longo dos últimos anos .....	54
Figura 12 – Evolução do PIB per capita da cidade de Itapeva/SP .....	55
Figura 13 – Produção de biogás ao longo da vida útil do aterro, considerando 5 anos de recepção de RSU (Casos 1, 2 e 3).....	59
Figura 14 – Produção de biogás ao longo da vida útil do aterro, considerando 10 anos de recepção de RSU (Casos 4, 5 e 6).....	60
Figura 15 – Produção de biogás ao longo da vida útil do aterro, considerando 15 anos de recepção de RSU (Casos 7, 8 e 9).....	61
Figura 16 – Estimativa da geração de energia elétrica ao longo da vida útil do aterro, considerando 5 anos de recepção de RSU (Casos 1, 2 e 3) .....	64
Figura 17 – Estimativa da geração de energia elétrica ao longo da vida útil do aterro, considerando 10 anos de recepção de RSU (Casos 4, 5 e 6).....	65
Figura 18 – Estimativa da geração de energia elétrica ao longo da vida útil do aterro, considerando 15 anos de recepção de RSU (Casos 7, 8 e 9).....	66
Figura 19 – Linha de tendência da produção total de CH <sub>4</sub> e da quantidade média de energia disponível durante a vida útil do aterro, conforme a aplicação dos casos....	67
Figura 20 – Parcela da população beneficiada para cada taxa de geração.....	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fatores que influenciam o volume e a composição dos RSU .....	25
Quadro 2 – Modelos de diferentes ordens e suas características.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de L0 sugeridos em função da biodegradabilidade do resíduo ..	46
Tabela 2 – Valores de k sugeridos em função da precipitação anual .....	46
Tabela 3 - Composição físico-química dos RSU da cidade de São Paulo incluindo o conteúdo médio de cinza e umidade .....	50
Tabela 4 - Biodegradabilidade dos componentes dos RSU .....	50
Tabela 5 - Comparação da composição do biogás obtida com a de outros países e fórmula química dos RSU.....	56
Tabela 6 - Comparativo dos valores de L0 adotados em diferentes estudos com o valor obtido para os RSU de Itapeva/SP e a faixa de valores recomendada pelo Banco Mundial.....	57
Tabela 7 - Diferenciação dos casos de estudo.....	58
Tabela 8 - Parâmetros gerais adotados pelos modelos .....	58
Tabela 9 - Parâmetros utilizados nos cálculos da geração de energia .....	63
Tabela 10 - Resultados gerais obtidos e número de pessoas que seriam beneficiadas em cada caso .....	68
Tabela 11 - Parcela da população que seria beneficiada pela energia obtida a partir do biogás.....	68
Tabela 12 - Casos especiais de estudo .....	69
Tabela 13 - Resultados gerais obtidos para os casos especiais, considerando o beneficiamento de 50% da população atual.....	69
Tabela 14 - Razão entre a taxa atual e as taxas mínimas de geração de RSU, considerando o beneficiamento de 50% da população atual .....	70
Tabela 15 - Taxa de geração de RSU dos municípios localizados em um raio de 70 km de Itapeva/SP .....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases do Efeito Estufa
GJ	Gigajoule
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MME	Ministério de Minas e Energia
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SIGRS	Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
SWANA	Solid Waste Association of North America
USEPA	United States Environmental Protection Agency
WTE	Waste-to-Energy

## LISTA DE SÍMBOLOS

CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
C	Carbono
H	Hidrogênio
H <sub>2</sub>	Gás hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
O <sub>2</sub>	Gás oxigênio
S	Enxofre

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1 Objetivos</b> .....	16
1.1.1 Objetivo geral .....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	17
<b>2.1 Matriz energética brasileira</b> .....	17
<b>2.2 Resíduos sólidos urbanos (RSU)</b> .....	21
2.2.1 Definições e classificação .....	21
2.2.2 Problemas associados aos RSU .....	24
2.2.2.1 Contribuição dos RSU para a intensificação do efeito estufa .....	26
2.2.3 Panorama dos RSU no Brasil.....	27
2.2.3.1 Legislação pertinente aos RSU no Brasil .....	27
2.2.3.2 Geração e destinação final dos RSU no Brasil.....	28
2.2.3.2.1 Estado atual dos RSU em Itapeva/SP .....	30
2.2.4 Gestão de RSU .....	30
<b>2.3 Aproveitamento energético dos RSU</b> .....	32
2.3.1 Tecnologias para o aproveitamento energético dos RSU .....	33
<b>2.4 Aterro sanitário com geração e aproveitamento de biogás</b> .....	35
2.4.1 Princípio construtivo de um aterro sanitário .....	36
2.4.2 Mecanismo de formação do biogás no aterro sanitário .....	38
2.4.3 Formas de aproveitamento do biogás .....	40
<b>2.5 Modelos para previsão da produção de biogás em aterro sanitário</b> .....	40
2.5.1 Modelos de ordem zero.....	42
2.5.2 Modelos de primeira ordem.....	43
2.5.2.1 Parâmetros de entrada comuns aos modelos de primeira ordem .....	43
2.5.2.1.1 Potencial de geração de metano ( $L_0$ ) .....	44
2.5.2.1.2 Taxa de geração de metano (k) .....	45
2.5.2.2 Modelo do Banco Mundial - Scholl Canyon.....	45
2.5.2.3 Modelo da USEPA - 1998 .....	47
2.5.2.4 Modelo da USEPA - 2005 .....	47

<b>3 METODOLOGIA</b> .....	49
<b>3.1 Caracterização dos RSU de Itapeva/SP</b> .....	49
<b>3.2 Estimativa da geração per capita de resíduo</b> .....	51
<b>3.3 Cálculo da previsão da produção de biogás no aterro sanitário</b> .....	51
3.3.1 Determinação dos parâmetros de entrada dos modelos .....	51
3.3.1.1 Determinação da fórmula química do RSU e seu potencial de geração de metano ( $L_0$ ).....	51
3.3.1.2 Determinação da taxa de geração de metano (k) .....	52
<b>3.4 Dimensionamento da recuperação de energia a partir da previsão do biogás de aterro</b> .....	52
<b>3.5 Ferramenta utilizada para os cálculos</b> .....	53
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	54
<b>4.1 Geração de RSU na cidade de Itapeva/SP</b> .....	54
<b>4.2 Parâmetros de entrada dos modelos de previsão</b> .....	56
<b>4.3 Previsão da produção de CH<sub>4</sub> dos RSU de Itapeva/SP</b> .....	59
<b>4.4 Estimativa da energia elétrica disponível pelo aproveitamento do biogás de Itapeva/SP</b> .....	62
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	73
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	75

## 1 INTRODUÇÃO

O cenário mundial dos últimos 50 anos mostra um aumento contínuo da população e do consumo de bens e produtos, estimulado pelas inovações tecnológicas, resultando na geração de enormes quantidades de resíduos sólidos nos centros urbanos. Além da crescente geração de resíduos, há um aumento correspondente na produção e utilização de energia, levando ao aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE) (IEA, 2018).

A matriz energética da maioria dos países do mundo é constituída principalmente de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), que possuem um potencial de emissão de GEE elevado. Paralelamente, as emissões de GEE provenientes dos resíduos sólidos urbanos (RSU) vem se tornando uma grande preocupação. Segundo uma estimativa do World Bank (2012), atualmente 3.000 milhões de residentes urbanos no mundo geram 1.300 milhões de toneladas de RSU por ano. Para o ano 2025 a população urbana será de 4.300 milhões e os RSU gerados serão de 2.200 milhões de toneladas.

Dessa forma, as autoridades públicas, especialmente nos países em desenvolvimento, se deparam com um desafio de demanda sanitária enorme que é a disposição adequada dos RSU gerados diariamente (LINO; ISMAIL, 2017).

Diante da necessidade por fontes renováveis de energia e da redução das emissões de GEE, o aproveitamento energético dos RSU se apresenta como uma alternativa para resolver o problema da sua disposição e, ao mesmo tempo, torna-se uma fonte suplementar de energia renovável. Assim, diferentes estratégias vêm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas, envolvendo processos de conversão termoquímica, processos de conversão bioquímica e processos de conversão físico-química (PAVAN, 2010).

Recentemente o Brasil implementou sua primeira política para gerenciamento dos RSU, com a criação da Lei nº 12.305 / 2010 (BRASIL, 2010), estabelecendo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que define os princípios, objetivos e instrumentos para o gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo as responsabilidades dos produtores e dos governos locais, o guia para a gestão de resíduos perigosos e os instrumentos econômicos a serem aplicados. No entanto, essa política não especifica ações obrigatórias, com metas e cronogramas,

nem para o gerenciamento de RSU, nem para a recuperação de energia ou dos gases gerados, causando uma ineficiência na disposição dos RSU. Embora o cenário esteja melhorando no Brasil, a maioria dos municípios ainda despeja os RSU a céu aberto (lixões ou aterros controlados). Em geral, ainda não há nenhum controle dos gases gerados pelos RSU no Brasil (ABRELPE, 2018).

Um reflexo da não aplicação dos princípios da PNRS é o que ocorre na cidade de Itapeva-SP, que sofre há tempos com os problemas gerados pela disposição do RSU, tendo recentemente seu aterro sanitário interditado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) devido às condições ambientais inadequadas apresentadas pelo local, acarretando em prejuízos para a população dependente dessa atividade e gerando incertezas sobre o futuro da gestão de RSU na cidade.

Diante da situação preocupante na qual a cidade de Itapeva-SP se encontra em relação à disposição dos RSU, é importante avaliar o potencial à disposição dos RSU da cidade ao estimar sua produção de biogás em aterro sanitário por meio de modelos de previsão, e analisar o potencial de ganho energético pelo uso de tal tecnologia.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar a potencialidade da geração de biogás de aterro sanitário para aproveitamento energético na cidade de Itapeva/SP.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Estimar a geração de RSU na cidade de Itapeva-SP;
- Estimar a produção de biogás por meio de modelos de previsão;
- Determinar o potencial de aproveitamento energético dos RSU na cidade de Itapeva/SP.
- Simular cenários da geração de energia elétrica de forma a atender a população do município.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

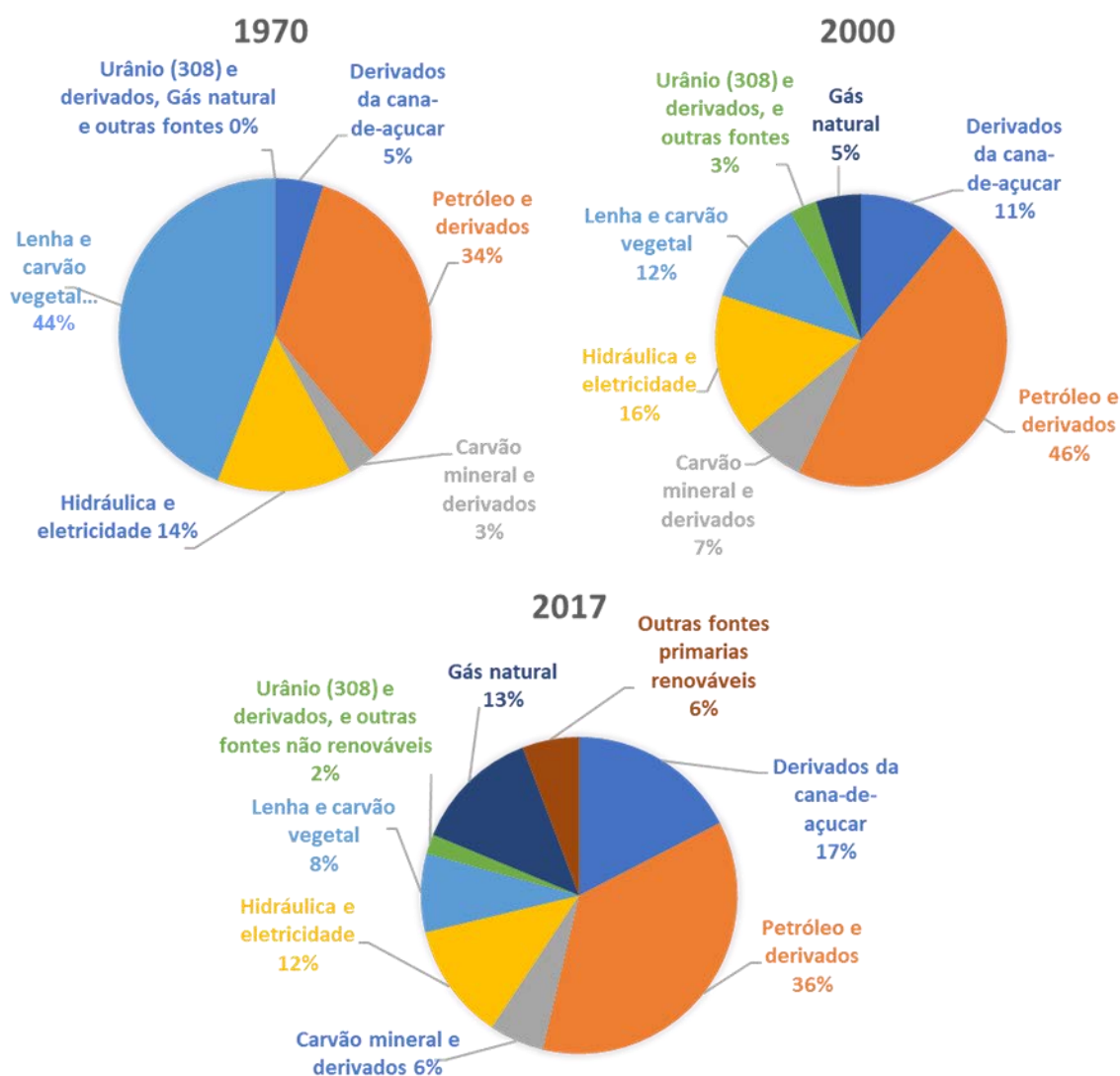
Esta seção apresenta uma revisão contextual e conceitual do problema de investigação do presente trabalho. Primeiramente, será apresentado o panorama da matriz energética brasileira seguido da definição dos conceitos e problemas associados aos RSU. Em seguida, serão revisadas as possibilidades de tratamento e aproveitamento dos RSU. Por fim, serão detalhadas a tecnologia escolhida e os métodos utilizados para estimar o potencial energético de tal tecnologia.

### 2.1 Matriz energética brasileira

Segundo o mais recente Balanço Energético Nacional (EPE, 2018) realizado pelo Ministério de Minas e Energia, as principais fontes de energia que compõem a matriz energética brasileira atualmente são: o petróleo e derivados, o gás natural, o carvão mineral e outras, que representam a oferta de energia não renovável (56,8% da oferta total); e a biomassa da cana-de-açúcar, a energia hidráulica (produção própria e importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica), a lenha e o carvão vegetal e outras, que representam a oferta de energia renovável (43,2% da total).

Embora a representatividade da parcela renovável da oferta de energia esteja em um patamar elevado, nem sempre a estrutura da matriz energética brasileira esteve configurada de tal maneira. A Figura 1 apresenta a evolução da matriz energética brasileira entre os anos 1970, 2000 e 2017.

Figura 1 – Evolução da matriz energética brasileira



Fonte: Adaptado de TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007.

O primeiro recurso energético crucial na história do Brasil foi a lenha, sendo responsável por impulsionar a produção da cana de açúcar e a extração de ouro. Com o crescimento da produção de café, a lenha foi substituída pelo carvão mineral. Até o final do século XIX, havia pouca ou nenhuma participação da eletricidade como fonte de energia devido à predominância da atividade agrária sobre a atividade econômica do país (BNDES, 2002).

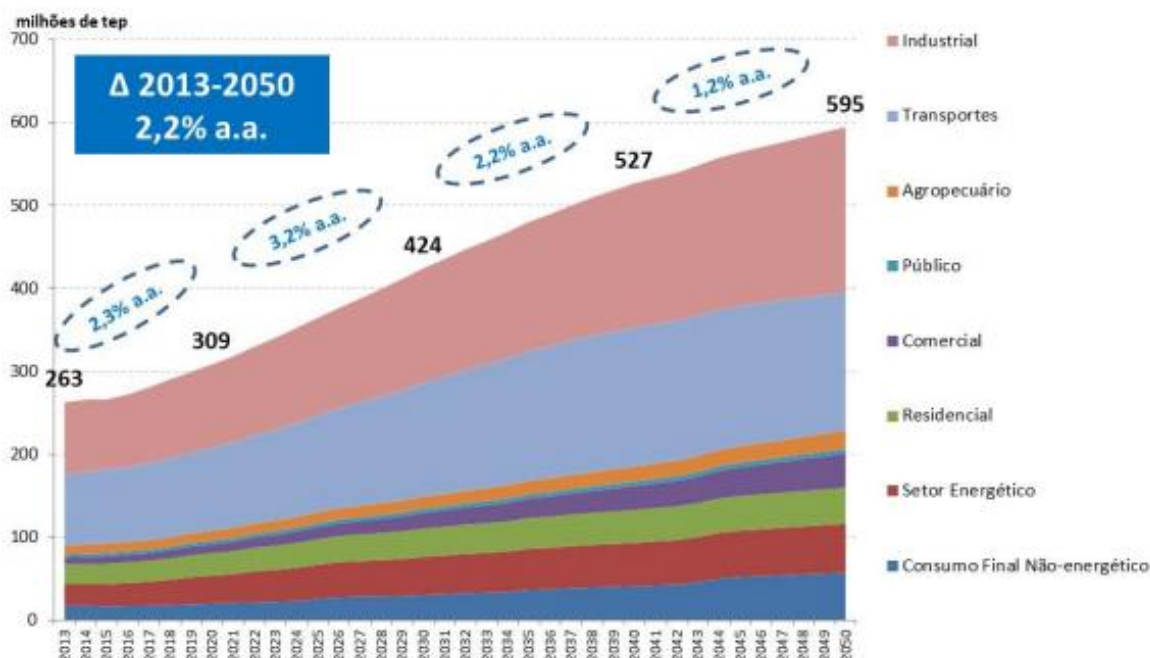
No entanto, no início do século XX, com a economia se voltando para a industrialização e o crescimento das cidades, aliado à dificuldade de importação do carvão após a Primeira Guerra Mundial, intensificaram-se os investimentos

(predominantemente provenientes de capital estrangeiro) na geração de energia, com o estabelecimento de inúmeras usinas hidrelétricas e a importação do petróleo, que viria a ser produzido internamente anos depois (BNDES, 2002).

As mudanças de configuração na matriz energética brasileira ao longo da história apontam para uma intensificação dos investimentos em energia, seja no âmbito de aumentar a eficiência das fontes conhecidas ou de buscar novas fontes, na medida em que o país se desenvolve economicamente.

Por conta da Revolução Industrial, a competitividade econômica dos países e a qualidade de vida de seus cidadãos são intensamente influenciadas pela questão da energia, ou seja, as economias que melhor se posicionam quanto ao acesso a recursos energéticos de baixo custo e impacto ambiental obtêm importante vantagem competitiva, principalmente por conta das previsões de aumento da demanda de energia ao longo dos próximos anos (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007). A Figura 2 apresenta as previsões de demanda total de energia entre os anos de 2013 e 2050.

Figura 2 - Evolução da demanda total de energia por setor até 2050



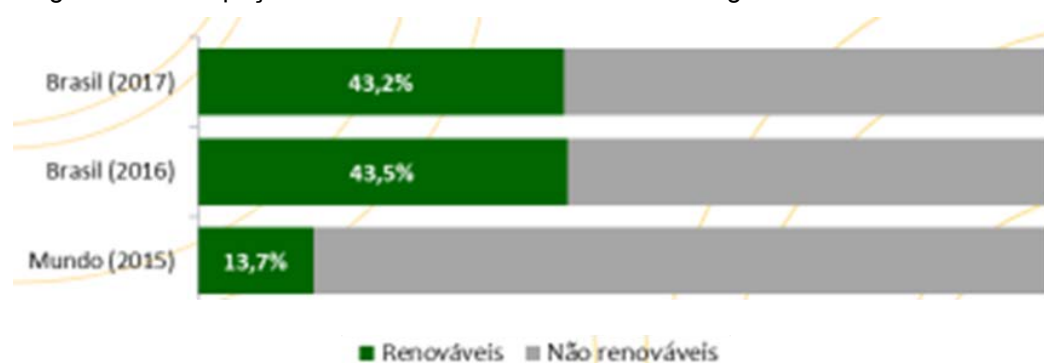
Fonte: EPE, 2016.

Além disso, uma das mais relevantes preocupações da atualidade se dá com relação à sustentabilidade desse desenvolvimento econômico, diretamente associada à disponibilidade de energia, em função das graves crises de energia vividas e das constantes previsões de esgotamento das fontes não renováveis.

Entretanto, ao passo que a questão da energia se apresenta como um grande desafio para o Brasil, também se apresenta como uma grande oportunidade, uma vez que o país possui potencial e condições ímpares de recursos energéticos renováveis e de tecnologia para transformar seus recursos naturais em energia e, dessa forma, agregar valor à sua produção de riqueza. Assim, a busca por fontes renováveis vem se intensificando na medida em que crescem a demanda energética e as restrições ambientais com relação à geração de energia (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007; RODRIGUES, 2008).

O modelo energético brasileiro apresenta um forte potencial de expansão, resultando em uma série de oportunidades de investimento de longo prazo, além de ser já ser considerada uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo industrializado com 43,2% (Figura 3) de sua produção proveniente de fontes como recursos hídricos, biomassa e etanol, além das energias eólica e solar (BRASIL, 2010; EPE, 2018).

Figura 3 - Participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira e mundial.



Fonte: EPE, 2018.

O Brasil possui um potencial hidrelétrico elevado, que é responsável pela geração da maior parte da eletricidade do país, muito em virtude do grande número de usinas hidrelétricas já instaladas no país e de sua geografia privilegiada. Porém, o aumento da preocupação com questões ambientais esbarra ou impossibilita a

construção de novas usinas, induzindo ao aproveitamento de novas fontes renováveis de energia. Nesse sentido, o Brasil vem demonstrando certa evolução na medida em que novas fontes renováveis de energia foram desenvolvidas e/ou aprimoradas, e tiveram um aumento considerável na sua oferta (Figura 4), com destaque para as energias solar, eólica e provenientes do biogás que tiveram um aumento de 875,6%, 26,5% e 39,5%, respectivamente, em suas ofertas de energia (EPE, 2018).

Figura 4 - Oferta de energia por fonte no Brasil entre 2016 e 2017 (em Mtep) e sua variação percentual.

Fonte (Mtep)	2016	2017	$\Delta 17 / 16$		2016	2017	$\Delta 17 / 16$
<b>RENOVÁVEIS</b>	<b>125,3</b>	<b>126,7</b>	<b>1,1%</b>	<b>Lixívia e outras renováveis (mil tep)</b>			
Energia hidráulica <sup>1</sup>	36,3	35,0	-3,4%	Lixívia	8.447	8.658	2,5%
Biomassa da cana	50,3	51,1	1,6%	Biodiesel	3.009	3.366	11,8%
Lenha e carvão vegetal	23,1	23,4	1,4%	Outras biomassas <sup>1</sup>	1.103	1.117	1,3%
Eólica	2,9	3,6	26,5%	Biogás	137	191	39,5%
Solar	0,007	0,072	875,6%	Gás industrial de carvão vegetal	83	74	-10,4%
Lixívia e outras renováveis	12,8	13,4	4,9%	Eólica	2.880	3.644	26,5%
<b>NÃO RENOVÁVEIS</b>	<b>163,0</b>	<b>166,8</b>	<b>2,4%</b>	Solar	7	72	875,6%
Petróleo e derivados	105,4	106,3	0,9%	<b>Total</b>	<b>15.667</b>	<b>17.122</b>	<b>9,3%</b>
Gás natural	35,6	37,9	6,7%				
Carvão mineral	15,9	16,6	4,1%				
Urânio (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	4,2	4,2	-0,4%				
Outras não renováveis	1,9	1,8	-4,7%				

<sup>1</sup> Inclui importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica

<sup>1</sup> Inclui casca de arroz, capim-elefante e óleos vegetais

Fonte: EPE, 2018.

## 2.2 Resíduos sólidos urbanos (RSU)

### 2.2.1 Definições e classificação

Quando se fala em resíduo, geralmente associa-se o termo a um material sem valor ou que não tem mais utilidade, logo, deve ser descartado. Entretanto, essa visão não considera seu potencial socioeconômico e de geração de energia.

Segundo um estudo realizado pela EPE (2014), o termo resíduo engloba os diversos artefatos utilizados pelo homem que tenham perdido sua utilidade para

cumprir o fim a que foram destinados inicialmente. Dessa forma, podemos associar o resíduo a uma matéria prima fora do lugar capaz de ser utilizada para outros fins.

A Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (2011) afirma que não existe uma única definição para o lixo, ou seja:

[...] há diversos modos de entender o lixo. Para alguns, lixo pode ser todo e qualquer material sólido que sobra das atividades humanas, ou provenientes da natureza, como folhas, terra, areia e galhos de árvores. Para outros, lixo pode ser tudo aquilo que, do nosso ponto de vista, perdeu a utilidade, o valor, ou que não queremos mais usar, nem guardar. Lixo pode ser qualquer coisa velha. Essas são maneiras relativas de entender o lixo, relativas porque dependem do valor que diferentes pessoas atribuem ao que sobra, ao que se joga fora, ao que é sujo, inútil, velho, e que julgam não ter mais qualquer valor (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011).

De forma normativa, através da norma NBR 10.004/2004, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define os resíduos sólidos como:

[...] aqueles resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Consideram-se também resíduos sólidos 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 inviáveis seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções tecnicamente e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

Essa definição de resíduos sólidos, que foi estabelecida pela NBR 10.004 de 1987, é considerada muito ampla por Teixeira *et. al.* (1997), uma vez que pode compreender uma quantidade significativa de resíduos, tanto sólidos como líquidos. Além disso, Faria (2002) avalia como equivocada a classificação do lodo e outros líquidos como resíduos sólidos. Contudo, o conceito de resíduo sólido definido pela ABNT é o mais comumente utilizado.

Segundo a ABNT (2004), a classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

De acordo com o PNRS (BRASIL, 2010), os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à sua origem e periculosidade. As classificações quanto à origem

podem ser: resíduos domiciliares, resíduos de limpeza pública, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, resíduos do serviço público de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrossilvopastoris, resíduos de serviços de transportes, resíduos de mineração.

As classificações quanto à periculosidade podem ser: resíduos perigosos e resíduos não perigosos. O resíduo é definido como perigoso quando este apresenta significativo risco à saúde pública e à qualidade ambiental (inflamabilidade, toxicidade, patogenicidade, entre outros), enquanto o resíduo é definido como não perigoso quando este não apresenta as características de um resíduo perigoso.

De acordo com a norma NBR 8.419:1992 da ABNT, os resíduos sólidos destinados aos aterros sanitários são os classificados como resíduos sólidos urbanos (RSU), ou seja, aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas e de atividades de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana. Os resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços podem ser incluídos, se caracterizados como não-perigosos em função de sua natureza, composição ou volume (ABNT, 1992; BRASIL, 2010).

Um estudo realizado pela EPE (2008) ainda classifica os resíduos sólidos quanto às suas características físicas, que podem ser: materiais inertes, que compreende os vidros, metais, terras e cinzas e restos inertes; ou materiais combustíveis, que compreende os papéis, cartões, plásticos, madeira, gomas, couro, alimentos e outros.

As tecnologias de aproveitamento energético dos RSU utilizam diferentes componentes dos mesmos. Dessa forma, uma adequada caracterização dos RSU permite conhecer melhor sua composição e é de extrema importância para auxiliar na definição de qual tipo de tecnologia apresenta a melhor viabilidade técnica e econômica para um determinado fluxo de materiais em uma região. A partir da identificação desse fluxo de materiais, pela caracterização do resíduo, é possível: analisar o potencial de reciclagem e de viabilidade das tecnologias de tratamento; promover a destinação adequada para os resíduos; e ainda identificar as mudanças de hábito da população (TATARNIUK, 2007; BASTOS, 2013).

A composição dos RSU também é um dos principais fatores que influenciam a emissão de GEE, uma vez que as frações de carbono orgânico biodegradável são diferentes para cada componente do lixo (IPCC, 2006). Assim, a preocupação com o tratamento correto dos resíduos engloba, além de questões técnicas e econômicas, questões ambientais relevantes.

### 2.2.2 Problemas associados aos RSU

Os problemas associados aos RSU são relacionados, principalmente, à sua composição e volume de geração e à destinação final dos mesmos. A composição dos resíduos, conforme citado na seção anterior, é um dos principais fatores que influenciam a emissão de GEE. Dessa forma, de acordo com o aumento da produção de resíduos e a indisponibilidade de alternativas para destinação adequada, por conta da falta de recursos (financeiros e espaciais, por exemplo), existem riscos ambientais, sociais e econômicos associados ao RSU.

O Quadro 1 apresenta alguns fatores que geralmente exercem influência sobre a composição e volume de produção dos RSU.

Quadro 1 - Fatores que influenciam o volume e composição dos RSU.

Fatores		Influência
Demográficos	População urbana	Quanto maior a população urbana, maior a geração per capita
Socioeconômicos	Nível cultural	Quanto maior o nível cultural, maior a incidência de materiais recicláveis e menor incidência de matéria orgânica
	Nível educacional	Quanto maior o nível educacional, menor a incidência de matéria orgânica
	Poder aquisitivo	Quanto maior o poder aquisitivo, maior a incidência de materiais recicláveis e menor a incidência de matéria orgânica
	Poder aquisitivo (no mês)	Maior consumo de supérfluos perto do recebimento do salário (fim e início do mês)
	Poder aquisitivo (na semana)	Maior consumo de supérfluos no fim de semana
	Desenvolvimento tecnológico	Introdução de materiais cada vez mais leves, reduzindo o valor do peso específico aparente dos resíduos
	Lançamento de novos produtos	Aumento de embalagens
	Promoções de lojas comerciais	Aumento de embalagens
	Campanhas ambientais	Redução de materiais não biodegradáveis (plásticos) e aumento de materiais recicláveis e/ou biodegradáveis (papéis, metais e vidros)
Climáticos	Chuvas	Aumento do teor de umidade
	Outono	Aumento no teor de folhas
	Verão	Aumento do teor de embalagens de bebidas (latas, vidros e plásticos rígidos)
Datas especiais	Carnaval	Aumento do teor de embalagens de bebidas (latas, vidros e plásticos rígidos)
	Natal, ano novo e páscoa	Aumento de embalagens (papel/papelão, plásticos maleáveis e metais) e aumento de matéria orgânica
	Dia dos pais/mães	Aumento de embalagens (papel/papelão, plásticos maleáveis e metais)
	Férias escolares	Esvaziamento de áreas da cidade em locais não turísticos e aumento populacional em locais turísticos

Fonte: Adaptado de MIRANDA, 2014.

Os problemas associados aos RSU podem ser classificados como locais ou globais, e podem ter caráter ambiental, econômico ou social. Entre os problemas locais destacam-se aqueles decorrentes da disposição final inadequada do RSU com elevado potencial de poluição do solo e lençóis freáticos. Outro problema é o mau

cheiro associado e a presença de animais vetores de doenças próximos às regiões de descarte. Dessa forma, as regiões próximas aos locais de descarte perdem sua atratividade, afetando o comércio e até as próprias condições de vida da população dessa região (EPE, 2008).

Os problemas de alcance global são decorrentes da decomposição da matéria orgânica presente no RSU, onde ocorre a liberação de gases com enorme potencial de aquecimento global, mais conhecidos como Gases do Efeito Estufa (GEE), com destaque para o metano (CH<sub>4</sub>) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (EPE, 2008).

#### 2.2.2.1 Contribuição dos RSU para a intensificação do efeito estufa

A maior preocupação quanto à disposição dos RSU, considerando um cenário global em longo prazo, é referente ao seu potencial de emissão de GEE, que são os principais responsáveis pelo aquecimento global.

O processo de digestão anaeróbia que ocorre com a matéria orgânica na ausência de oxigênio é responsável pelas emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, além de pequenas frações de outros gases, causadas pela disposição dos RSU. Esse processo ocorre tanto em aterros, onde o resíduo é depositado e coberto com material inerte, tendo seus gases drenados para a superfície, quanto em lixões, uma vez que o oxigênio está ausente nas camadas inferiores de resíduo depositado.

De acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 1998), as quatro principais formas de relação entre RSU e o efeito estufa são:

- **Emissão de CO<sub>2</sub>:** decorrente do consumo de energia para extração e produção dos bens (incluindo a extração e processamento dos combustíveis a serem usados);
- **Emissão de CO<sub>2</sub>:** oriunda do consumo não-energético de combustíveis no processo de produção dos bens;
- **Emissão de CH<sub>4</sub>:** a partir dos aterros sanitários em que os materiais acima e os restos de alimentos são depositados e se decompõem; e
- **Fixação de carbono (C):** das parcelas dos materiais que não se decompõem nos aterros sanitários.

Uma quinta relação que pode ser assumida é a emissão de CO<sub>2</sub> proveniente do transporte dos resíduos, desde a coleta até sua destinação final.

É importante salientar que, o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub> gerados, geralmente em concentrações de 40% e 60% respectivamente, são os principais GEE. No entanto, esses gases podem ser aproveitados de outra maneira. Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (1996), citado por EPE (2008), o CH<sub>4</sub> tem potencial de aquecimento global, para 100 anos, 21 vezes maior que o CO<sub>2</sub>, ou seja, a simples queima do CH<sub>4</sub>, mesmo sem o aproveitamento do calor gerado, reduziria o impacto em termos de aquecimento global.

Além disso, se o CH<sub>4</sub> fosse utilizado para a geração de energia, dependendo da rota tecnológica escolhida, cada MWh gerado a partir de RSU seria capaz de compensar a emissão decorrente de 3 a 15 MWh gerados a partir do gás natural em ciclo combinado (OLIVEIRA; ROSA, 2003).

### 2.2.3 Panorama dos RSU no Brasil

#### 2.2.3.1 Legislação pertinente aos RSU no Brasil

Após vários anos de tramitação no Congresso Nacional, devido às extensas discussões por conta do maior entendimento sobre os desafios e as temáticas relacionados ao manejo de RSU e limpeza urbana, foi instituída a lei nº12.305 / 2010 que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010).

Essa política reúne os princípios, as diretrizes, os objetivos, os instrumentos, as metas e as ações que devem ser adotados visando à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos RSU (BRASIL, 2010).

Entre os novos conceitos introduzidos por essa política, cabe ressaltar a ideia de Responsabilidade Compartilhada, que leva todos os participantes da cadeia produtiva e de consumo a se tornarem solidários quanto à etapa de pós-consumo. Além disso, também foi adotado o conceito de Logística Reversa, com o intuito de reduzir parte dos custos relacionados à tal exigência (EPE, 2008; BRASIL, 2010).

Além dos novos conceitos, também é importante ressaltar que essa nova política proíbe algumas formas de destinação final de RSU, como a disposição de

RSU em praias ou corpos hídricos, a disposição à céu aberto (com exceção para resíduos de mineração), ou ainda a queima de resíduos a céu aberto ou utilizando de recipientes, instalações e equipamentos sem licenciamento para este fim (BRASIL, 2010).

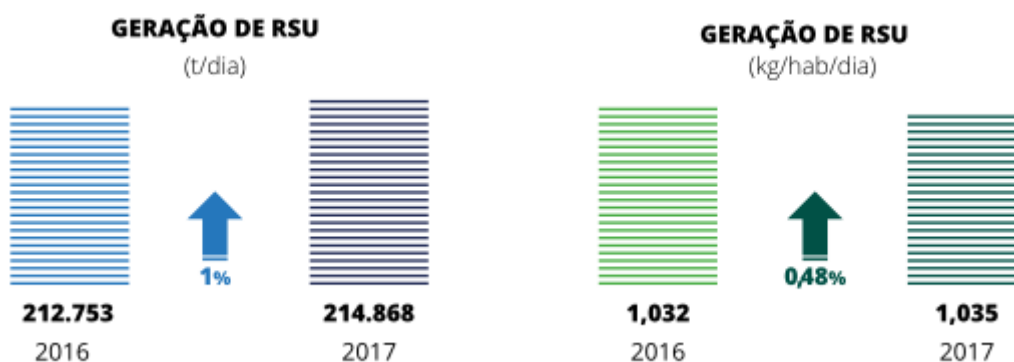
A gestão local dos RSU é de competência dos municípios, sendo determinado pela PNRS que os mesmos devem estabelecer seus próprios planos de gestão de RSU, contemplando o conteúdo mínimo descrito na PNRS. Esse plano é denominado Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) e deve ser compatível com a realidade local, de modo que destinação final dos RSU do município se dê de forma adequada (BRASIL, 2010; PwC, 2011).

### 2.2.3.2 Geração e destinação final dos RSU no Brasil

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2017 divulgado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a geração total anual de RSU em 2017 foi de 78,4 milhões de toneladas, que corresponde a um aumento de 1% com relação a 2016.

Assim, com um crescimento de 0,75% (entre 2016 e 2017) da população brasileira, a geração total de resíduos atingiu um total de 214.868 toneladas diárias no país. A geração per capita de RSU apresentou aumento de 0,48%. A Figura 5 apresenta o panorama de geração de RSU no Brasil entre 2016 e 2017.

Figura 5 - Panorama da geração de RSU no Brasil.



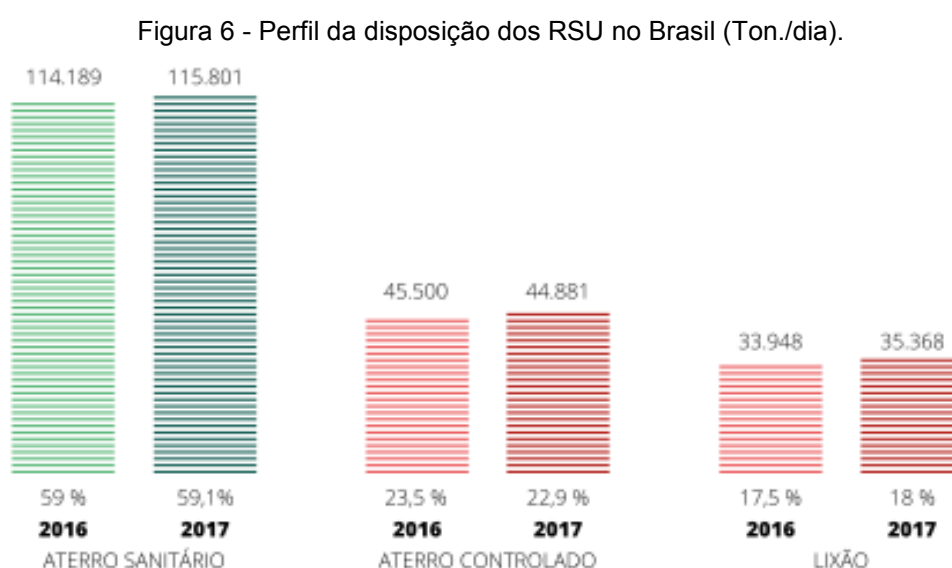
Fonte: ABRELPE, 2018.

Segundo tal panorama, a quantidade de RSU coletados em 2017 cresceu em todas as regiões do Brasil, em comparação com o ano anterior, registrando um índice de cobertura de coleta de 91,2%. No entanto, apesar de tal índice apresentar um valor elevado se considerada a extensão geográfica do Brasil, cerca de 6,9 milhões de toneladas de resíduos deixaram de ser objeto de coleta e, conseqüentemente, tiveram destinação final imprópria.

No que diz respeito à disposição final dos RSU coletados, não foram obtidos avanços em relação ao cenário do ano anterior, sendo mantida praticamente a mesma proporção entre a disposição em locais adequados e inadequados, com cerca de 42,3 milhões de toneladas de RSU, ou 59,1% do coletado, dispostos em aterros sanitários.

O restante correspondente a 40,9% dos resíduos coletados, foi encaminhado para locais inadequados, como lixões e aterros controlados, por 3.352 municípios brasileiros, totalizando mais de 29 milhões de toneladas de resíduos com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde, e que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente, podendo causar danos diretos à saúde de milhões de pessoas (ABRELPE, 2018).

A Figura 6 apresenta o perfil da disposição dos RSU no Brasil para os anos de 2016 e 2017.



Fonte: ABRELPE, 2018.

Considerando que, segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2007 (ABRELPE, 2007), somente 39% dos municípios tratavam e destinavam seus RSU de forma adequada no ano em questão, pode-se afirmar que houve grande evolução relacionada ao tema, principalmente após o estabelecimento da Lei 12.305/2010. Contudo, apesar da queda significativa da parcela dos resíduos que é disposta de forma inadequada, muitos municípios ainda enfrentam dificuldades quanto ao manejo dos RSU, ficando sujeitos à riscos ambientais e sociais.

#### 2.2.3.2.1 Estado atual dos RSU em Itapeva/SP

Após a aprovação da Lei 12.305 / 2010 (BRASIL, 2010) que estabeleceu a PNRS, a cidade de Itapeva/SP passou a sofrer com a falta de um gerenciamento adequado de seus resíduos, de forma que seu aterro foi enquadrado na categoria “Inadequado” quanto às condições de tratamento e disposição dos RSU e, conseqüentemente, interditado pela CETESB (CETESB, 2017; ITAPEVA, 2017).

Buscando reverter esse cenário, a Secretária Municipal de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente deu início às obras do novo aterro sanitário da cidade e, mais recentemente, sediou uma audiência pública para apresentação de propostas para a elaboração de um Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (PMGIRS), previsto pela Lei 12.305 (ITAPEVA, 2018).

#### 2.2.4 Gestão de RSU

Gerir os RSU de forma adequada é fundamental para a organização e determinação dos fluxos de resíduos e de suas rotas de destino, em qualquer região. Com uma estratégia de gestão bem planejada e implementada é possível obter benefícios econômicos e energéticos, através da conservação de energia (e eliminação do desperdício), da geração de energia, da redução da poluição local e global, da geração de empregos, entre outros meios (BASTOS, 2013).

De acordo com Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), para um gerenciamento eficiente dos RSU, deve-se levar em consideração a sua geração, armazenamento, coleta, transferência, transporte, tratamento e disposição final, além de aspectos econômicos, de engenharia, ambientais e de saúde pública, entre outros fatores que estão envolvidos.

Segundo Hamada (2003), o manejo de RSU deve seguir uma hierarquia, que propõe uma ordem para as práticas de coleta, transbordo, prevenção, redução, reutilização, reciclagem, tratamento, reaproveitamento energético, recuperação e disposição final ambientalmente adequada de RSU em áreas urbanas. A Figura 7 apresenta a hierarquia normalmente adotada.

Figura 7 - Hierarquia adotada no manejo de RSU.



Fonte: HAMADA, 2003.

As diversas rotas existentes para destinação e disposição final dos RSU, quando hierarquizadas e baseadas no critério de resíduo final mínimo, fazem parte de um Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (SIGRS), que deve ser descrito no PMGIRS de cada município. Um SIGRS eficiente permite a identificação da melhor destinação para os resíduos (EPE, 2008).

Segundo EPE (2008), as principais alternativas de destinação são:

- **Reciclagem:** aproveitamento dos restos de papéis, vidros, plásticos e metais que não estejam contaminados, para servir de insumo na fabricação de novos materiais;
- **Compostagem:** aproveitamento dos restos alimentares e outros componentes orgânicos (papéis, madeiras, poda de árvores e jardins) para produção de adubo natural;
- **Recuperação energética:** aproveitamento energético dos resíduos; e

- **Aterro sanitário:** disposição final dos resíduos imprestáveis em local apropriado, com garantias sanitárias.

Conforme Serôa da Motta e Chermont (1996), citado por Oliveira (2000), as rotas do SIGRS devem ser priorizadas na ordem enunciada acima, convindo a utilização prévia de procedimentos que resultem na redução da geração de lixo na fonte e na reutilização do material produzido, com a premissa de resíduo final mínimo.

A hierarquia das práticas de gerenciamento integrado dos RSU apresenta a tendência das estratégias de gestão e atua como “guia” na escolha do melhor destino, levando em consideração a necessidade de desenvolvimento sustentável e conservação de recursos (MAIER, 2011).

De acordo Schübeler (1996), citado por Bastos (2013), o gerenciamento de RSU tem como principais objetivos: a proteção da saúde da população urbana, a promoção da qualidade ambiental e da sustentabilidade em regiões urbanas, o apoio à eficiência e produtividade da economia, e a geração de emprego e renda.

No Brasil, a hierarquia do gerenciamento de RSU segue a Lei 12.305/2010 que propõe, em ordem de preferência, as práticas de: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos, disposição final ambientalmente adequada de rejeitos (BRASIL, 2010).

### **2.3 Aproveitamento energético dos RSU**

O aproveitamento energético de RSU se apresenta como uma interessante alternativa para gerenciamento do RSU, uma vez que engloba a problemática da disposição adequada de resíduos e das emissões geradas e, além disso, propõe uma nova fonte renovável de energia. Através de tecnologias de geração de energia a partir dos RSU, seria possível expandir as fontes de matéria-prima e energia, pois o uso das tecnologias acarretaria em uma redução da demanda de recursos naturais para a produção de energia (OLIVEIRA, 2000).

Simultaneamente, a adoção destas tecnologias reduziria o volume de RSU enviado ao aterro, evitando os problemas relacionados à disposição final, aumentando a vida útil de aterros, reduzindo o uso de terra, diminuindo gastos de manejo e

transporte para os municípios, e diminuindo, por fim, a emissão de gases associados à decomposição anaeróbica dos RSU em aterros (BASTOS, 2013).

### 2.3.1 Tecnologias para o aproveitamento energético dos RSU

A geração de energia elétrica a partir dos RSU apresenta alternativas tecnológicas com um nível de maturidade já elevado. Desde a década de 80 do século passado já era possível ver as primeiras termelétricas acionadas por RSU implantadas nos Estados Unidos, na Europa e no Japão (EPE, 2008).

As tecnologias de aproveitamento energético dos RSU (chamadas, em inglês, de tecnologias waste-to-energy (WTE)) são essenciais para as estratégias de gerenciamento dos RSU e, quando integradas à outras práticas de gerenciamento, podem aumentar o valor energético dos RSU (BASTOS, 2013).

Embora existam muitas tecnologias WTE, são poucas as bem estabelecidas e em operação comercial. Elas, em sua definição básica, transformam os RSU em calor, vapor, eletricidade, ou em combustíveis gasosos ou líquidos (EPRI, 2011).

Williams *et. al.* (2003) e Turkenburg *et al.* (2000), citados por Pavan (2010), indicam em seus trabalhos que as tecnologias para conversão de resíduos de biomassa em energia podem ser classificadas em três grupos: processos de conversão termoquímica, processos de conversão bioquímica e processos de conversão físico-química.

A conversão termoquímica é caracterizada pela produção de uma quantidade significativa de calor durante o processamento, onde ocorre a mudança da composição dos resíduos pelas reações endotérmicas e exotérmicas que ocorrem no processo. Os produtos resultantes dessa conversão incluem gás de síntese (composto de hidrogênio gasoso, monóxido e CO<sub>2</sub>), resíduos sólidos inertes (cinzas) ou vitrificados (no caso do plasma) e, dependendo do processo, líquidos orgânicos. Esse tipo de conversão é típico dos processos de incineração, gaseificação, pirólise e plasma e liquefação.

A conversão bioquímica é caracterizada pela transformação dos resíduos mediante a decomposição por microrganismos, acompanhada da produção de líquidos e gases. Esse tipo de conversão é típico da digestão anaeróbia, sem a

presença de oxigênio (O<sub>2</sub>), e da fermentação. No caso da digestão anaeróbia, que ocorre em aterros sanitários ou biorreatores, o produto resultante da conversão é o biogás, composto predominantemente de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. No caso da fermentação, os açúcares são convertidos em álcool pela ação de microrganismos, geralmente fungos e leveduras, e os componentes finais são separados através de destilação.

Por fim, a conversão físico-química envolve a síntese física e química de produtos, como a transformação de óleos vegetais em biodiesel. Esse tipo de conversão ocorre em geral por meio de reações químicas realizadas pelo processo de transesterificação, empregando catalisadores alcalinos, ácidos ou enzimáticos, e metanol ou etanol.

Entre as rotas tecnológicas disponíveis para o gerenciamento de RSU, os tipos de conversão mais utilizados por esse tipo de biomassa são os processos de conversão termoquímica e bioquímica, por meio da combustão direta (incineração) e da digestão anaeróbia (aterros sanitários), respectivamente (PAVAN, 2010; BASTOS, 2013).

Para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se por analisar apenas a tecnologia de aterro sanitário, onde ocorre a conversão bioquímica por meio da digestão anaeróbia. Optou-se por esse tipo de tecnologia pois vem sendo desenvolvido há muito tempo e já está bem estabelecido do ponto de vista técnico, se tornando atrativo financeiramente por conta dos custos de instalação e operação mais baixos, além de possibilitar a mitigação de GEE. Cabe ressaltar que tal tecnologia é aplicável a resíduos com qualquer nível de heterogeneidade. Dessa forma, tem sido a alternativa mais utilizada para os RSU no Brasil, que apresenta elevada diversidade nos hábitos de consumos da população (FAAIJ, 2006; PAVAN, 2010).

Além disso, a digestão anaeróbica se mostra mais apropriada do que a combustão direta quando os RSU a serem tratados possuem alto conteúdo úmido – como é o caso do Brasil – o que tornaria a queima do material mais difícil (RAPPORT *et al.*, 2008; IPEA, 2012).

## 2.4 Aterro sanitário com geração e aproveitamento de biogás

Os métodos de acondicionamento e coleta adotados pela maioria das cidades resultam em uma mistura de materiais que dificilmente são separados pelas práticas comuns de gerenciamento apresentadas anteriormente. Assim, técnicas como a coleta seletiva e a destinação para compostagem ainda geram rejeitos que devem ser descartados em aterro, inclusive as técnicas que são posteriores a essas, como as cinzas no caso da incineração (CETESB, 2018).

Aos serem depositados em aterros, os resíduos permanecem em contato com o ar durante um período de tempo, até serem compactados e cobertos. Durante esse período já se observa a emissão de compostos voláteis que constituem a massa do resíduo. Com a cobertura do material, os RSU aterrados passam a gerar subprodutos através da digestão anaeróbia, na ausência de oxigênio, como o chorume e o biogás, que devem ser drenados e tratados antes de serem lançados no meio ambiente (PAVAN, 2010; BARROS *et. al.*, 2018).

O biogás gerado em aterros sanitários é constituído principalmente de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. O CH<sub>4</sub> que constitui o biogás pode ser capturado e usado como fonte de energia renovável, devido ao seu poder calorífico suficientemente alto para uso como combustível. Assim, é possível salvar uma certa quantidade de combustível fóssil ao passo que se obtém uma quantidade equivalente de energia (THEMELIS; ULLOA, 2007; BASTOS, 2013; GEWALD *et. al.*, 2012).

Por conta da crise do petróleo de 1970, provocou-se a busca por novas fontes de energia e assim, pela necessidade da adoção de medidas de controle das emissões de CH<sub>4</sub>, foram implantados nos Estados Unidos os primeiros projetos de aproveitamento de metano em aterros. Posteriormente, principalmente na Europa, surgiram novos projetos, sendo que em 2005 haviam mais de 1000 aterros, na Europa e EUA, os quais já tinham plantas de aproveitamento do gás metano, principal constituinte do biogás (USEPA, 2005 apud. PAVAN, 2010).

A destinação final dos RSU também depende da disponibilidade de área de cada região, além do índice de desenvolvimento do país. O Brasil, assim como os Estados Unidos, é um país de grande extensão territorial, ou seja, possui alta disponibilidade espacial para disposição de resíduos. Diferentemente do Japão, que é um país de pequena dimensão e possui leis rigorosas quanto ao uso do solo, onde

é necessária a redução do volume de resíduos antes da destinação, realizada em grande parte por meio da incineração (FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com Lino e Ismail (2011), aproximadamente 41,7 MW de energia poderiam ser produzidos a partir do biogás de aterro no Brasil, e a reutilização e reciclagem dos RSU poderiam beneficiar o sistema energético brasileiro com o fornecimento de 286 GJ adicionais de energia por mês.

A tecnologia de aterro sanitário consiste, basicamente, na compactação do resíduo na forma de camadas, que são periodicamente cobertas com uma camada de terra, ou outro material inerte. Embora seja o método mais simples de destinação final de RSU, sua implementação exige cuidados e técnicas especiais a serem seguidos, desde a seleção e preparo da área até sua operação e monitoramento (MIRANDA, 2014).

#### 2.4.1 Princípio construtivo de um aterro sanitário

De acordo com Paro, da Costa, e Coelho (2008), o princípio construtivo básico de um aterro sanitário com geração de biogás constitui-se nas seguintes etapas: impermeabilização de uma determinada área superficial do solo através de mantas plásticas para evitar a contaminação do solo pelo chorume; a disposição do lixo urbano sobre esta área, cobrindo com uma camada de terra, para garantir a decomposição anaeróbica da qual resulta a formação do biogás. Adicionalmente, no aterro devem ser dispostos coletores para a captura do biogás e drenos para a coleta do “chorume”, uma vez que estes resíduos são poluentes e devem ser tratados adequadamente.

Eles devem operar de modo a fornecer proteção ao meio ambiente, evitando a contaminação das águas subterrâneas pelo chorume (líquido de elevado potencial poluidor, de cor escura e de odor desagradável, resultado da decomposição da matéria orgânica), evitando o acúmulo do biogás resultante da decomposição anaeróbica do lixo no interior do aterro. O biogás pode sair do interior do aterro de forma descontrolada ou infiltrar pelo solo e atingir redes de esgotos, fossas e poços rasos podendo causar explosões (CETESB, 2018).

Dessa forma, durante a projeção de um aterro sanitário são realizados estudos geológicos e topográficos para selecionar a área ideal, de forma que não

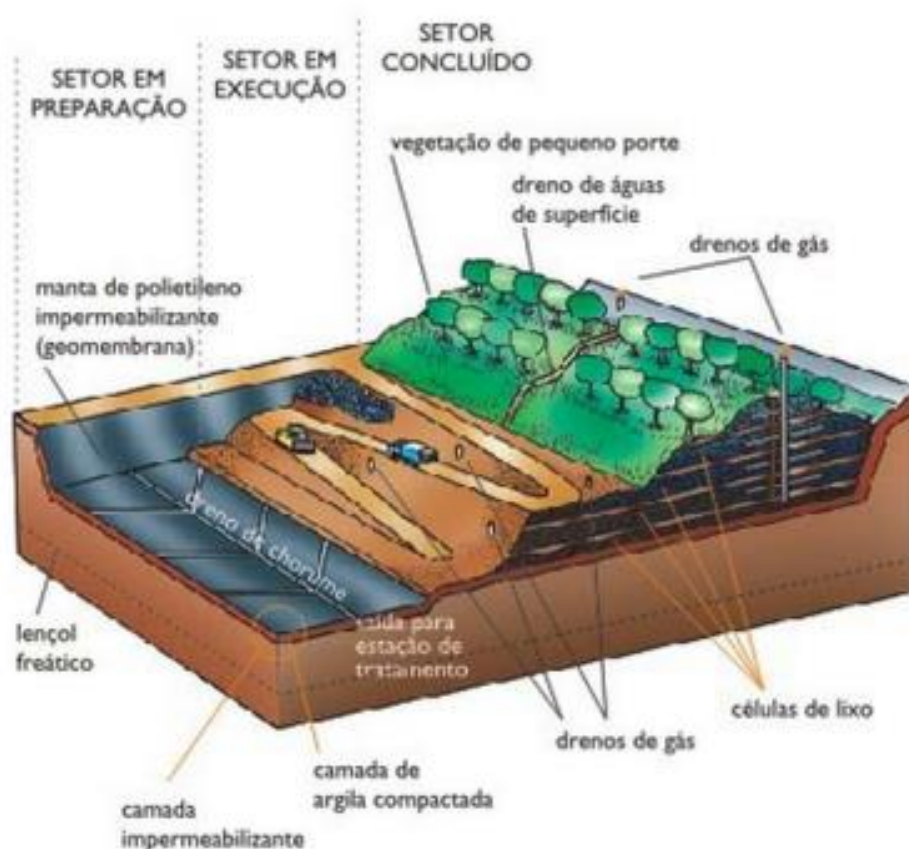
prejudique o meio ambiente e a população local. Adicionalmente, a preparação do terreno engloba: o nivelamento de terra, para o caso de aterros em valas; a impermeabilização do solo por meio de camadas de argila e geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), de forma a evitar a contaminação do solo e lençóis freáticos; e um sistema para drenagem de gases e líquidos, que são posteriormente aproveitados ou enviados a sistemas de tratamento de efluentes. Por fim, a operação do aterro sanitário prevê a cobertura diária dos RSU, evitando a proliferação de animais vetores de doenças, mau-cheiro e poluição visual (FIGUEIREDO, 2011; GONÇALVES; TANAKA; AMEDOMAR, 2013; MIRANDA, 2014).

De maneira geral, para que haja um efetivo controle e tratamento dos poluentes gerados pela decomposição dos RSU, os aterros sanitários devem possuir algumas características (CETESB, 2018), como:

- Impermeabilização da base do aterro;
- Instalação de drenos para o biogás;
- Sistema de coleta de chorume;
- Sistema de tratamento de chorume, podendo ser enviado a estações de tratamento especializadas; e
- Sistema de drenagem de águas pluviais.

A Figura 8 ilustra o processo de preparo, funcionamento e encerramento de um aterro sanitário.

Figura 8 - Esquema ilustrativo do preparo de terreno, funcionamento e finalização de um aterro sanitário.



Fonte: PEREIRA, 2010.

#### 2.4.2 Mecanismo de formação do biogás no aterro sanitário

Em um aterro sanitário, a decomposição da matéria orgânica ocorre tanto na presença de oxigênio quanto na ausência dele. Durante a deposição dos resíduos no solo ocorre a digestão aeróbica e, após a etapa de cobertura, com a redução do  $O_2$  presente inicia-se a digestão anaeróbica (FIGUEIREDO, 2011).

Os fenômenos, incluindo as reações químicas, envolvidos na formação do biogás são muito complexos, e a taxa de geração de seus constituintes é variável ao longo do tempo, seguindo várias fases distintas em função da biodegradabilidade dos resíduos (PAVAN, 2010; FIGUEIREDO, 2011).

As fases que compõem o processo de formação do biogás, segundo Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), são:

- **Fase I (Decomposição aeróbica):** Nesta fase a decomposição da matéria orgânica ocorre na presença de  $O_2$ , que é consumido e assim produz  $CO_2$  e

libera calor. Dependendo das condições, esse processo pode durar dias ou até um ano;

- **Fase II (Acidogênica):** Também conhecida como fase de transição, nesse período as condições anaeróbicas são estabelecidas. Em consequência, são produzidos ácidos orgânicos, gás hidrogênio (H<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub>, e água (H<sub>2</sub>O), com uma taxa de liberação de calor baixa. Por conta da formação de ácidos, o pH do chorume pode cair;

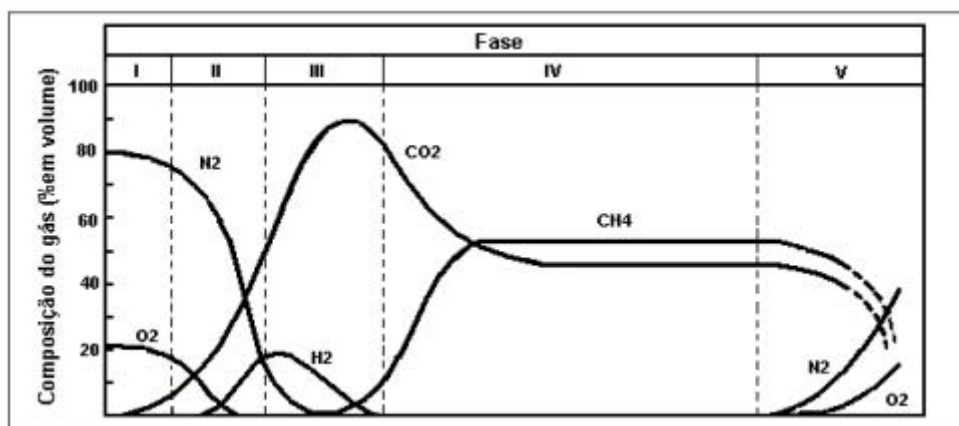
- **Fase III (Acetogênica):** Nesta fase ocorre a oxidação de ácidos e álcoois, formando ácido acético, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>;

- **Fase IV (Metanogênica):** Os produtos obtidos da fase anterior são convertidos em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, com consumo de H<sub>2</sub>; e

- **Fase V (Maturação):** Por fim, com a indisponibilidade de nutrientes e substratos, a produção de gás diminui e se encerra.

A Figura 9 ilustra graficamente cada uma das fases.

Figura 9 - Fases do processo de formação dos gases em aterro sanitário.



Fonte: TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993.

A duração de cada uma das fases depende da distribuição dos componentes orgânicos no solo, da quantidade de nutrientes disponível, da umidade dos resíduos e do seu grau de compactação, sendo que, após o encerramento da célula do aterro, a produção de biogás pode ser prolongada por cerca de 20 anos (FIGUEIREDO, 2011; SLEZAK; KRZYSZEK; LEDAKOWICZ, 2015).

Por conta da complexidade dos fenômenos que envolvem a digestão anaeróbia nos aterros, muitos podem ser os fatores que influenciam a capacidade de gerar biogás. Os principais fatores que influenciam a taxa de geração de gases são: a composição química do resíduo, as condições anaeróbicas do substrato, a umidade, a temperatura e o pH (USEPA 1991; USEPA 1996 apud PAVAN, 2010).

#### 2.4.3 Formas de aproveitamento do biogás

O biogás produzido pela digestão anaeróbica é usado principalmente para geração de energia elétrica, mas também pode ser purificado para ser empregado como gás natural (podendo ser, inclusive, enviado à rede de distribuição de gás), refinado para produção de biometano (combustível veicular), ou ainda queimado para aquecimento (HENRIQUES, 2004; DEFRA, 2011 apud BASTOS, 2013).

Assim, os projetos de recuperação energética do CH<sub>4</sub> presente no biogás de aterros objetivam a sua conversão em alguma forma útil de energia. Entre as possíveis formas de utilização do biogás, destacam-se a sua utilização direta, como combustível para caldeiras ou fogões, e sua utilização para geração de eletricidade, por meio de tecnologias como turbinas a gás ou motores de combustão interna (MCI) (PAVAN, 2010).

A captura e queima do biogás para geração de energia elétrica, além de ser uma alternativa economicamente viável por permitir o consumo próprio ou venda do excedente, possibilita a obtenção de créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, criado pelo Protocolo de Quioto, com a redução das emissões de CH<sub>4</sub>. Esses créditos são gerados pois, ainda que a queima do CH<sub>4</sub> acarrete na emissão de CO<sub>2</sub>, o potencial de contribuição do CO<sub>2</sub> para o aquecimento global é aproximadamente 21 vezes inferior ao do CH<sub>4</sub> (PARO; DA COSTA; COELHO, 2008).

### **2.5 Modelos para previsão da produção de biogás em aterro sanitário**

O biogás produzido no aterro sanitário tem como principal constituinte o CH<sub>4</sub>, que possui um elevado valor energético, permitindo a redução das emissões por sua simples queima. Dessa forma, para uma gestão mais eficiente dos aterros sanitários já estabelecidos e melhor dimensionamento de novos aterros, torna-se

fundamental uma previsão da produção de biogás de forma a rentabilizar energeticamente a sua queima (PARO; DA COSTA; COELHO, 2008; KAMALAN; SABOUR; SHARIATMAD, 2011).

O início da utilização de modelos de previsão para a produção de biogás se deu por volta da década de 80, ainda que não houvesse tanta compreensão acerca dos impactos da emissão de metano para a atmosfera. Entretanto, devido ao surgimento da possibilidade de se aproveitar o biogás como fonte de energia alternativa, os modelos de previsão apareceram como uma ferramenta importante para estimar a quantidade produzida ao longo de um período de tempo (OONK, 2010).

Dessa forma, os primeiros modelos de previsão de gás de aterro foram elaborados para auxiliar o dimensionamento de projetos de recuperação de gás de aterro, sendo possível obter, por exemplo, a quantidade de gás que seria formada, qual seria a previsão de produção para os próximos 10 anos e ainda que parte dele poderia ser recuperada (OONK, 2010).

Com o passar dos anos, modelos foram desenvolvidos e aperfeiçoados para obter resultados mais precisos, devido, em grande parte, à necessidade dos países de quantificarem as emissões de gases prejudiciais ao ambiente, ainda que cada país apresente características singulares que influenciam a resposta de cada modelo (OONK, 2010).

Para novos projetos de aproveitamento energético do biogás de aterro, a utilização de modelos matemáticos se torna importante na medida em que é uma ferramenta capaz de avaliar não só a capacidade, mas também quantificar o tempo de geração após o encerramento do aterro sanitário (CASTRO *et. al.*, 2013).

Devido à diferença nas características de cada modelo e também às condições de cada país, torna-se difícil seu uso de forma generalizada. Assim, embora existam diversos modelos de previsão, nenhum pode ser considerado o mais adequado. Dessa forma, o mesmo input para diferentes modelos pode gerar resultados diferentes (OONK, 2010).

Os modelos de previsão podem ser classificados de acordo com sua ordem, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Modelos de diferentes ordens e suas características.

ORDEM	CARACTERÍSTICAS
Modelos de ordem zero	<p>Assumem que a geração de biogás para uma massa de resíduos é constante ao longo do tempo, dessa forma, estes modelos presumem que a geração de metano é independente da quantidade de substrato restante e o biogás já produzido.</p> <p>É utilizado para estimar emissões em grandes escalas como níveis nacionais e internacionais, assumindo que não há alteração significativa na composição de resíduos ou na quantidade de material aterrado.</p>
Modelos de primeira ordem	<p>Incluem a idade do resíduo como uma variável na geração de biogás. Presume-se que a formação de gás de aterro a partir de um determinado montante de resíduos decaia exponencialmente com o passar do tempo.</p> <p>São os modelos mais comumente utilizados nos dias de hoje pelo fato de apresentar uma maior complexidade que os modelos de ordem zero, porém com variáveis de fácil acesso.</p>
Modelos multifásicos	<p>São modelos que combinam diferentes modelos de primeira ordem para expressar a geração a partir de diferentes frações do resíduo, sendo assim são modelos que devem representar mais precisamente o que ocorre em um aterro.</p> <p>As frações de resíduos são definidas conforme o nível de degradabilidade de vários componentes neles encontrados, tais como prontamente degradáveis, moderadamente degradáveis, lentamente degradáveis e inertes.</p>
Modelos de segunda ordem	<p>Estes modelos foram propostos para prever emissões de metano com base na química e na microbiologia complexas da decomposição dos resíduos sólidos urbanos e da geração do biogás de aterro. Como um grande número de reações estão envolvidos entre si, todos com diferentes taxas de reações, as cinéticas de segunda ordem são empregadas para prever a geração total de metano.</p>

Fonte: GONTOW, 2016.

Os modelos de previsão mais utilizados, segundo a literatura correspondente, são os de ordem zero e de primeira ordem, que consideram degradação constante no tempo e cinética de primeira ordem, respectivamente (MACIEL, 2009).

### 2.5.1 Modelos de ordem zero

Os modelos de previsão de ordem zero consideram uma produção constante de biogás ao longo do tempo, sem distinguir os tipos de resíduos que são depositados ou a sua idade no aterro, tornando sua sensibilidade baixa. Os cálculos desse tipo de modelo são mais simples e eram mais utilizados na década de 90, com

a intensificação dos cálculos para dimensionamento de sistemas de recuperação de biogás (HUITRIC; SONI, 1997; KAMALAN; SABOUR; SHARIATMAD, 2011).

### 2.5.2 Modelos de primeira ordem

Os modelos cinéticos de primeira ordem são os mais convencionais para estimar a produção de biogás. Eles levam vantagem sobre os de ordem zero pelos resultados mais precisos, devido ao fato de considerarem que haverá emissão de gases logo após a deposição em aterro, ou seja, os valores são elevados para os primeiros anos e sofrem um decaimento ao longo do tempo. A produção de biogás para cada ano segue uma tendência exponencial decrescente conforme o resíduo é depositado até sua completa decomposição (OONK, 2010; HUITRIC; SONI, 1997).

Existem vários modelos cinéticos de primeira ordem já consolidados, como os do Banco Mundial, da USEPA, do IPCC e até da CETESB. Embora os resultados obtidos possam sofrer variações, esses modelos possuem praticamente os mesmos parâmetros de entrada, com destaque para a quantidade de RSU aterrada, o tempo de atividade do aterro, o potencial de geração de CH<sub>4</sub> ( $L_0$ ) e a taxa de geração de CH<sub>4</sub> ( $k$ ) (SILVA, 2012).

#### 2.5.2.1 Parâmetros de entrada comuns aos modelos de primeira ordem

Diferentemente dos parâmetros  $L_0$  e  $k$ , a quantidade de RSU aterrada e o tempo de atividade do aterro são dados relativamente fáceis de serem obtidos, geralmente fornecidos pelo governo, nos âmbitos municipal, estadual e federal, por meio de relatórios técnicos.

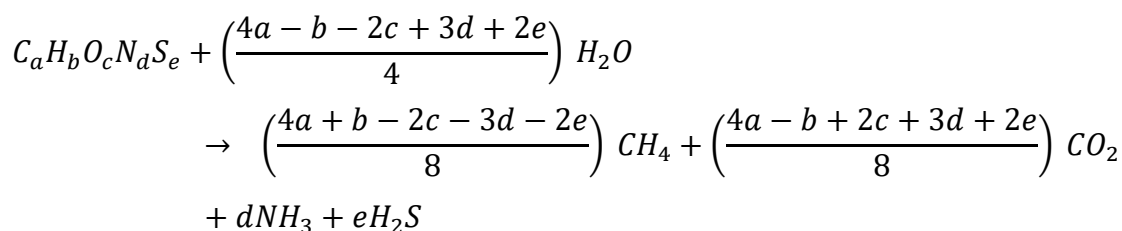
O tempo de atividade de um aterro vai depender de fatores como a área disponível para disposição dos RSU, da massa de RSU produzida, e os custos operacionais e de manutenção. A massa de resíduo despejada anualmente é variável e depende de fatores como a taxa de crescimento da população, a taxa de RSU produzido por habitante no ano, e da porcentagem de resíduos que é coletada e disposta no aterro (GONTOW, 2016).

Os parâmetros  $L_0$  e  $k$ , embora sejam de complexa definição, são fatores de grande influência no comportamento dos modelos de previsão, sendo de extrema importância a determinação adequada deles para se obter uma estimativa segura.

### 2.5.2.1.1 Potencial de geração de metano ( $L_0$ )

O potencial de geração de metano ( $L_0$ ) representa a quantidade de  $CH_4$  que uma massa de RSU gera até atingir a bioestabilização. Esse parâmetro é função do grau de biodegradabilidade dos RSU depositados no aterro, sendo que suas variáveis são o conteúdo de carbono do resíduo, a fração de carbono biodegradável e um fator de conversão estequiométrico (GONTOW, 2016; AUDIBERT, 2011).

O valor de  $L_0$  pode ser determinado teoricamente ou por meio de testes gerais de biodegradabilidade dos resíduos sob condições de temperatura, umidade, conteúdo de nutrientes e pH as quais os aterros são submetidos. De forma teórica, é possível determinar o valor de  $L_0$  a partir da equação estequiométrica (Eq. 1) proposta por Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), e de dados sobre a fração mássica dos elementos químicos constituintes dos RSU (SILVA, 2012; GONTOW, 2016).



Eq. (1)

Onde:

C = Carbono;

H = Hidrogênio;

O = Oxigênio;

N = Nitrogênio;

S = Enxofre;

a = quantidade de átomos carbono presente no resíduo;

b = quantidade de átomos hidrogênio presente no resíduo;

c = quantidade de átomos oxigênio presente no resíduo;

d = quantidade de átomos nitrogênio presente no resíduo;

e = quantidade de átomos enxofre presente no resíduo.

### 2.5.2.1.2 Taxa de geração de metano (k)

A constante de decaimento, ou taxa de geração de metano (k), é o fator que representa a velocidade da biodegradação dos RSU, incorporando variáveis como a umidade dos resíduos, o pH, a temperatura, e até a disponibilidade de nutrientes capazes de acelerar o processo de degradação (GONTOW, 2016; ABRELPE, 2013).

O valor de k pode ser obtido por meio de um método iterativo, onde se fixa o valor  $L_0$  e altera-se o valor de k até que o valor estimado pelo modelo se aproxime do valor obtido em campo. Outra forma de se determinar o valor k é utilizar valores sugeridos pelos próprios criados dos modelos (GONTOW, 2016).

Além dos parâmetros citados anteriormente, quando utilizado para estimar o potencial de geração de CH<sub>4</sub> para aproveitamento energético, é necessário considerar um fator referente às emissões fugitivas. O Banco Mundial recomenda a utilização de um fator de coleta de biogás de 75%, sendo utilizado o valor de 50% para estimativas mais conservadoras. A CETESB também recomenda um fator de coleta de 75% quando não há dados suficientes para uma estimativa de maior precisão (GONTOW, 2016; CETESB, 2006).

### 2.5.2.2 Modelo do Banco Mundial - Scholl Canyon

O modelo Scholl Canyon é o modelo recomendado pelo Banco Mundial em seu manual sobre o aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários e é o mais comumente utilizado e aceito nas Américas do Sul e do Norte, por conta da sua facilidade de compreensão e aplicação. Ele parte do pressuposto de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo e considera a variação da produção de CH<sub>4</sub> ao longo do tempo, tornando-o mais confiável (SILVA, 2012; GONTOW, 2016).

O modelo é representado pela Equação 2.

$$Q_{(CH_4)_i} = k \cdot L_0 \cdot M_i \cdot e^{-k \cdot t_i} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

$Q_{(CH_4)_i}$  = Quantidade de metano produzido no ano i, (Nm<sup>3</sup>/ano);

$k$  = Taxa de geração de metano, ( $\text{ano}^{-1}$ );

$L_0$  = Potencial de geração de metano, ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ton. RSU}$ );

$M_i$  = Massa de resíduo despejada no ano  $i$ , ( $\text{ton. RSU}$ );

$t_i$  = Tempo após o fechamento, (anos).

O Banco Mundial sugere valores para os parâmetros  $L_0$  e  $k$ , conforme as características do local do aterro e dos RSU. As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores sugeridos pelo Banco Mundial.

Tabela 1 - Valores de  $L_0$  sugeridos em função da biodegradabilidade do resíduo.

<b>Categorização do resíduo</b>	<b>Valor mínimo para <math>L_0</math> (<math>\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{ton. de resíduo}</math>)</b>	<b>Valor máximo para <math>L_0</math> (<math>\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{ton. de resíduo}</math>)</b>
<b>Relativamente inerte</b>	5	25
<b>Moderadamente degradável</b>	140	200
<b>Altamente degradável</b>	225	300

Fonte: Adaptado de BANCO MUNDIAL, 2004.

Tabela 2 - Valores de  $k$  sugeridos em função da precipitação anual.

<b>Precipitação anual</b>	<b>Valores de <math>k</math></b>		
	<b>Relativamente inerte</b>	<b>Moderadamente degradável</b>	<b>Altamente degradável</b>
<b>&lt;250 mm</b>	0,01	0,02	0,03
<b>&gt;250 à &lt;500 mm</b>	0,01	0,03	0,05
<b>&gt;500 à &lt;1000 mm</b>	0,02	0,05	0,08
<b>&gt;1000 mm</b>	0,02	0,06	0,09

Fonte: Adaptado de BANCO MUNDIAL, 2004.

O Manual do Banco Mundial propõe a utilização de um valor pré-estabelecido de  $L_0$  de  $170 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$  /ton. de RSU aterrado, classificando a maioria dos RSU como moderadamente degradáveis. No entanto, é interessante refletir sobre esse valor devido à fração de matéria orgânica presente nos resíduos (AUDIBERT, 2011).

### 2.5.2.3 Modelo da USEPA - 1998

O modelo da USEPA de 1998 (Eq. 3) foi um dos primeiros concebidos com a finalidade de estimar a produção de metano nos aterros sanitários. Ele foi projetado para estimar a geração total de metano, e não as emissões de metano para a atmosfera. Dessa forma, ele supõe que alguma fração do metano gerado é oxidado nas camadas superficiais do resíduo depositado ou mesmo na camada de cobertura. Com isso, a emissão de gás metano pela superfície do aterro pode diminuir significativamente, estabelecendo uma diferença entre o que é gerado e o que é emitido (AUDIBERT, 2011).

A fórmula matemática que representa o modelo é descrita pela Equação 3.

$$Q_{(CH_4)} = L_0 \cdot R(e^{-kc} - e^{-kt}) \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  = Quantidade de metano produzida por ano, (Nm<sup>3</sup>/ano);

$L_0$  = Potencial de geração de metano, (Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton. RSU);

$R$  = Taxa média anual de RSU recebidos durante a vida ativa do aterro, (ton. RSU/ano);

$c$  = tempo desde o fechamento do aterro, (anos);  $c = 0$  para aterros ativos

$t$  = Tempo desde o início do depósito de RSU, (anos);

$k$  = Taxa de geração de metano, (ano<sup>-1</sup>).

### 2.5.2.4 Modelo da USEPA - 2005

Este modelo, representado pela Equação 4, é usado para estimar a geração de metano para um certo ano baseado em todos os resíduos despejados anualmente. Para múltiplos anos, as projeções são desenvolvidas variando o ano de projeção e reaplicando as equações. Segundo o modelo, o pico de geração de metano ocorre normalmente no ano de encerramento do aterro ou no ano seguinte, dependendo do índice de deposição do ano final (ABREU, 2009).

$$Q_{(CH_4)i} = \sum_{i=1}^n 2 \cdot k \cdot L_0 \cdot M_i(e^{-kt_i}) \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

$Q_{(CH_4)i}$  = Taxa total de emissão de metano, (Nm<sup>3</sup>/ano);

$k$  = Taxa de geração de metano, (ano<sup>-1</sup>);

$L_0$  = Potencial de geração de metano, (Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton. RSU);

$M_i$  = Massa de resíduo úmido despejado no ano  $i$ , (ton. RSU);

$t_i$  = Idade do aterro (anos).

A aplicação deste modelo requer o conhecimento do histórico da deposição dos resíduos ou, no mínimo, da quantidade de lixo depositado e da data de abertura do aterro sanitário. O modelo consiste em uma função exponencial de degradação de primeira ordem, que presume que a geração de biogás alcança o ponto máximo após um intervalo de tempo, que representa o período antes da formação de metano, ou seja, ele supõe um intervalo de um ano entre a deposição dos resíduos e a geração de biogás. Após atingir o pico, o modelo prevê que a geração de metano decresça exponencialmente à medida que é consumida a fração orgânica dos resíduos (ABREU, 2009).

### 3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia seguida para a obtenção de dados e avaliação do potencial de geração de biogás do RSU da cidade de Itapeva/SP. Para a realização do estudo foram levantados dados sobre a cidade em questão para estimar a geração de lixo per capita na cidade e, de acordo com três modelos de previsão, prever o potencial de geração de biogás e, consequente

mente, seu potencial energético, levando em consideração as características dos RSU e as condições ambientais às quais estão submetidos.

#### 3.1 Caracterização dos RSU de Itapeva/SP

Conhecer a composição física dos RSU é de extrema importância para seleção e operação de equipamentos e instalações, otimização de recursos e dimensionamento de aterros sanitários (HAMADA, 2003; BRAGA, 2011).

O RSU é constituído por diversos componentes, os quais podem ser misturas de restos alimentares, papel, papelão, plásticos, metais, vidros, madeira, entre outros, formando uma mistura extremamente heterogênea, que inclui substâncias combustíveis, umidade e cinzas. Tal mistura e sua quantidade gerada são influenciadas principalmente por fatores como a população local, as condições geográficas e climáticas da região, as características socioculturais e, principalmente, pelos níveis de renda familiar e hábitos de consumo. A fração combustível do RSU é constituída principalmente de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S), com a possibilidade da presença de outros elementos em quantidades menores como cloro, flúor e metais pesados. Se tratando de uma conversão biológica dos RSU, conhecer a proporção de cada nutriente se torna muito importante para manter o equilíbrio e eficiência da conversão (HAMADA, 2003; AUTRET *et.al.*, 2007; QIU; HAYDEN, 2009; AKINCI; GUVEN; GOK, 2012).

Devido à dificuldade em se encontrar informações sobre a composição gravimétrica dos RSU do município de Itapeva/SP, será considerada a composição típica da cidade de São Paulo, capital do Estado situada a aproximadamente 280 km de distância. Para os cálculos de conversão biológica, além do teor de umidade e cinzas, foram considerados os resultados obtidos por Tchobanoglous, Theisen e Vigil

(1993) para uma análise elementar em base seca, onde determinou-se a fração mássica dos elementos químicos constituintes do RSU.

Adicionalmente a essa análise elementar, também foi considerada a biodegradabilidade de cada componente do RSU, uma vez que essa está relacionada à taxa com que ocorre a degradação da matéria orgânica. Os dados de caracterização do RSU estão dispostos nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Composição físico-química dos RSU da cidade de São Paulo incluindo o conteúdo médio de cinza e umidade.

Componente	Composição gravimétrica em São Paulo (%)	Umidade (%)	Cinza (%)	Análise elementar - base seca (%)				
				C	H	N	S	O
Rejeitos Orgânicos	49,5	70,00	5	48	6,4	2,6	0,4	37,6
Papel	12	10,20	6	43,5	6	0,3	0,2	44
Papelão	6,8	5,20	5	44	5,9	0,3	0,2	44,6
Plásticos	22,9	0,20	10	60	7,2	0	0	22,8
Texteis	2,4	10,00	2,5	55	6,6	4,6	0,2	31,2
Borracha	0,3	10,00	-	10	2	0	0	10
Couro	0,3	10,00	60	8	10	0,4	11,6	10
Madeira	1,3	1,50	49,5	6	0,2	0,1	42,7	1,5
Vidro	1,5	2,00	98,9	0,5	0,1	0,1	0	0,4
Metais Ferrosos	1,9	2,00	90,5	4,5	0,6	0,1	0	4,3
Alumínio	0,9	2,00	90,5	4,5	0,6	0,1	0	4,3
Outros	0,2	3,20	68	26,3	3	0,5	0,2	2

Fonte: TCHOBANOGLOUS; THEISEN; VIGIL, 1993; MENDES; ARAMAKI; HANAKI, 2004.

Tabela 4 - Biodegradabilidade dos componentes dos RSU.

Componente	Biodegradabilidade (%)
Rejeitos Orgânicos	82
Papel	50
Papelão	30
Plásticos	0
Texteis	10
Borracha	0
Couro	30
Madeira	30
Vidro	0
Metais Ferrosos	0
Alumínio	0
Outros	20

Fonte: ZAMORANO *et. al.*, 2007.

### **3.2 Estimativa da geração de RSU em Itapeva/SP**

Os dados referentes à geração de resíduos na cidade de Itapeva/SP foram obtidos pelos relatórios do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos elaborados pela CETESB. Para discussão dos resultados, também foram utilizados dados referentes à cidade obtidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

### **3.3 Cálculo da previsão da produção de biogás no aterro sanitário**

Para estimar a produção de biogás, e conseqüentemente a produção de CH<sub>4</sub>, foram utilizados 3 modelos distintos, apresentados na Seção 2.5.2: os modelos da USEPA, nas versões de 1998 e 2005, e o modelo do Banco Mundial, também conhecido como Scholl Canyon. Embora distintos, os modelos foram alimentados com parâmetros de entrada de mesmo valor, de modo que as características dos RSU e as condições da região do aterro fossem levadas em consideração em cada um deles.

#### **3.3.1 Determinação dos parâmetros de entrada dos modelos**

3.3.1.1 Determinação da fórmula química do RSU e seu potencial de geração de metano (L<sub>0</sub>)

O Banco Mundial (2004) sugere a utilização de um parâmetro médio de 170 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton. de RSU para o potencial de geração de CH<sub>4</sub>. No entanto, por conta de tal parâmetro ser uma função da biodegradabilidade dos resíduos, os dados obtidos das características físico-químicas dos RSU foram utilizados para estimar o valor de L<sub>0</sub> por meio da equação estequiométrica global generalizada (Equação 1) da reação química de decomposição dos RSU, estabelecida por Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993) e apresentada na seção 2.5.2.1.1.

Tal equação deve ser desenvolvida considerando apenas a fração biodegradável da matéria orgânica. Da aplicação dessa equação obtemos a fórmula química geral do RSU da cidade de Itapeva/SP, baseada nos dados de composição e biodegradabilidade descritos nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. A partir da determinação da fórmula química do RSU, e da fração volumétrica de cada gás constituinte, obtêm-se o potencial global de geração de metano (L<sub>0</sub>), sendo possível

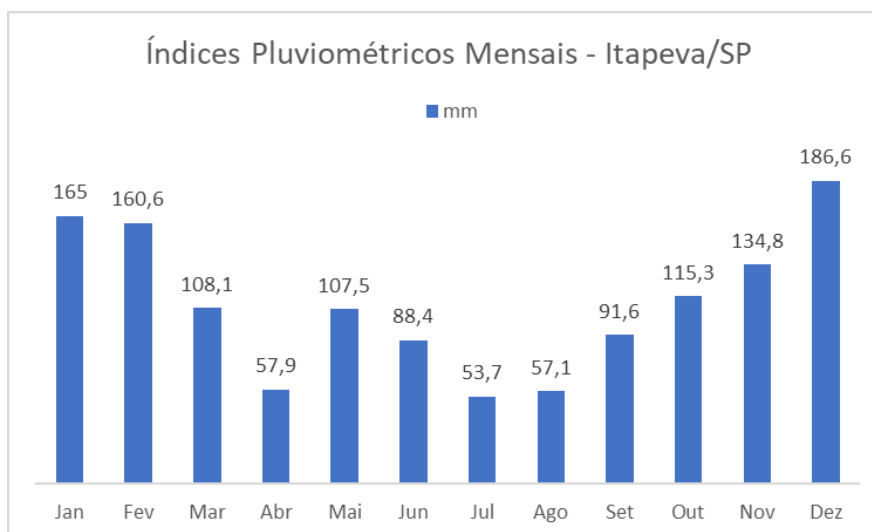
classificar o resíduo quanto à intensidade da sua biodegradabilidade, baseado nos valores de referência do Banco Mundial (2004) apresentados na Tabela 1 da seção 2.5.2.2.

### 3.3.1.2 Determinação da taxa de geração de metano (k)

Devido à dificuldade em se obter dados referentes aos fatores que influenciam tal taxa, sugere-se a utilização dos valores de k propostos pelo Banco Mundial (2004), que são determinados em função dos índices pluviométricos da região do aterro conforme a Tabela 2 apresentada na seção 2.5.2.2.

A precipitação anual da cidade de Itapeva/SP foi obtida pelo acumulado das precipitações mensais apresentadas no Boletim Climatológico do Estado de São Paulo (INMET, 2017), que usa como referência dados da normal climatológica de 1961 a 1990.

Figura 10 - Índices pluviométricos mensais da cidade de Itapeva/SP.



Fonte: INMET, 2017.

## 3.4 Dimensionamento da recuperação de energia a partir da previsão do biogás de aterro

A partir da previsão da produção de biogás é possível estimar a quantidade de energia elétrica que poderia ser obtida pelo seu aproveitamento. Como a parcela combustível do biogás corresponde majoritariamente ao CH<sub>4</sub> que o constitui, será considerado somente seu poder calorífico (GONTOW, 2016).

O poder calorífico inferior do CH<sub>4</sub>, em kJ/Nm<sup>3</sup>, foi determinado a partir da multiplicação de sua massa específica pelo seu poder calorífico em kcal/kg, levando em consideração condições normais de temperatura e pressão (Pressão = 1atm e Temperatura = 273K). O poder calorífico do CH<sub>4</sub> em kcal/kg foi obtido a partir da literatura (LIMA, 2018).

O cálculo da potência disponível por ano (Eq. 4) foi realizado conforme sugerido por Gontow (2016) baseado nas pesquisas de Mendes (2005), Figueiredo (2011) e Barros, Tiago Filho e Silva (2014).

$$P_x = \frac{Q_x \cdot P_{c(CH_4)} \cdot \eta}{31.536.000} \quad (4)$$

Onde:

$P_x$  = Potência disponível por ano (kW);

$Q_x$  = Vazão de metano por ano (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ano);

$P_{c(CH_4)}$  = Poder calorífico do metano (kJ/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>);

$\eta$  = Eficiência do equipamento gerador (%);

31.536.000 = segundos por ano (s/ano).

Cabe ressaltar que o cálculo da potência disponível, além de levar em conta a eficiência do equipamento, levou em consideração a eficiência de coleta do biogás no aterro. Adicionalmente multiplicou-se os valores da potência disponível pelas horas de funcionamento do equipamento gerador, determinando assim a disponibilidade de energia elétrica, e permitindo uma discussão acerca de quantas pessoas poderiam ser abastecidas baseando-se em dados de consumo per capita de energia elétrica.

### 3.5 Ferramenta utilizada para os cálculos

Para realização do cálculo da composição e fórmula química do RSU de Itapeva/SP, da previsão de produção de biogás pela aplicação do modelo e da quantidade de energia que poderia ser gerada, foi utilizada uma planilha de cálculo desenvolvida no software Excel ®.

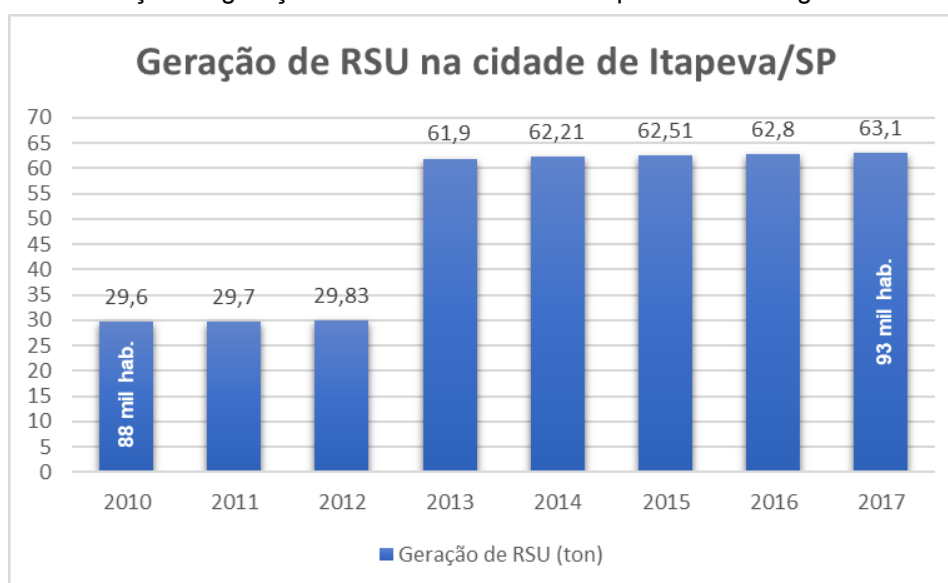
## 4 RESULTADOS E DISCUSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes às estimativas de geração de RSU da cidade de Itapeva/SP, às previsões da produção de biogás de aterro sanitário e à quantidade de energia disponível pelo aproveitamento energético do biogás.

### 4.1 Geração de RSU na cidade de Itapeva/SP

Segundo o Relatório do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos divulgado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2010), o município de Itapeva, com uma população de aproximadamente 88 mil habitantes, produziu naquele ano cerca de 29,6 toneladas de RSU por dia, ou seja, no ano de 2010 cada habitante da cidade produziu cerca de 122,8 kg de RSU, equivalente a aproximadamente 0,34 kg por dia. O mesmo relatório com dados referentes à 2017 registrou uma produção diária de 63,1 toneladas para uma população estimada de aproximadamente 93 mil habitantes, ou seja, uma produção per capita anual de aproximadamente 247,6 kg e diária de 0,68 kg. Nota-se que a geração per capita de RSU dobrou no período. A evolução da geração de RSU ao longo dos últimos anos na cidade de Itapeva/SP é apresentada na Figura 11.

Figura 11 - Evolução da geração de RSU na cidade de Itapeva/SP ao longo dos últimos anos.

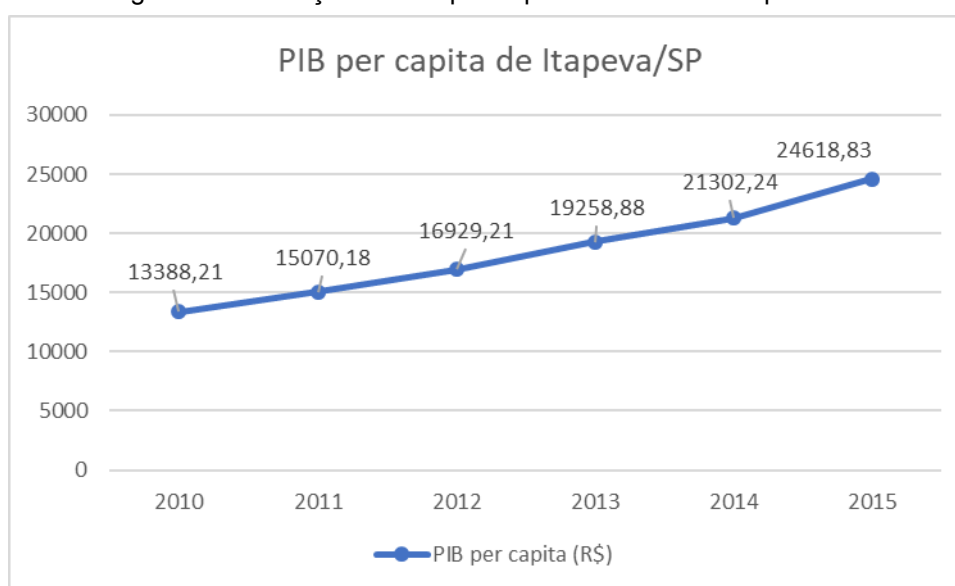


Fonte: CETESB, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017; IBGE, 2018; elaborado pelo autor.

Pela análise da Figura 11, embora o incremento na população entre 2010 e 2017 tenha sido relativamente baixo (aproximadamente 5 mil habitantes), observa-se que a geração de RSU entre os anos de 2012 e 2013 praticamente dobrou. De acordo com os Panoramas dos RSU no Brasil divulgados anualmente pela ABRELPE, a geração de RSU no cenário nacional dos últimos anos teve seu maior crescimento registrado entre os anos de 2012 e 2013, com aumento de 4,1% na geração total de RSU. Entre os anos de 2012 e 2013 na cidade de Itapeva/SP, esse crescimento pode ser explicado pela mudança no tratamento dos dados de geração de RSU pelo Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos, onde passou a se considerar os resíduos gerados pelos serviços de limpeza urbana originários da varrição e da limpeza de logradouros e vias públicas.

Paralelamente ao considerável incremento da geração nacional de RSU, podemos observar a evolução do PIB per capita na cidade de Itapeva/SP apresentada pela Figura 12.

Figura 12 - Evolução do PIB per capita da cidade de Itapeva/SP.



Fonte: IBGE, 2018; elaborado pelo autor.

A Figura 12 mostra uma evolução positiva do PIB per capita da cidade de Itapeva/SP ao longo dos últimos anos. Analisando o incremento nacional na geração de RSU entre 2012 e 2013, e considerando os fatores que influenciam a geração de RSU, apresentados no Quadro 1, a evolução do PIB per capita de Itapeva/SP indica

uma melhora considerável do cenário econômico da cidade, ou seja, houve um aumento do poder aquisitivo da população. Dessa forma, o consumo de bens e serviços aumentou no período, conseqüentemente impactando a geração de RSU da cidade.

#### 4.2 Parâmetros de entrada dos modelos de previsão

Para determinar o potencial de geração de CH<sub>4</sub> (L<sub>0</sub>), foi aplicada equação estequiométrica de decomposição dos RSU (Eq. 1) considerando as características físico-químicas e biodegradabilidade dos componentes. Do balanço estequiométrico foi extraída a composição volumétrica do biogás e a fórmula química dos RSU de Itapeva/SP, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação da composição do biogás obtida com a de outros países e fórmula química dos RSU.

% Volumétrica					
Constituinte	Estados Unidos - Típico	Hong Kong	Itália	Espanha	Itapeva (São Paulo)
CH <sub>4</sub>	40 - 55%	50%	49,57%	51,05%	51%
CO <sub>2</sub>	35 - 50%	45%	47,76%	46,29%	45%
NH <sub>3</sub>	0 - 20%	5%	2,38%	2,21%	4%
H <sub>2</sub> S	até 200 ppm	21 ppm	0,29%	0,44%	1%
<b>Fórmula química geral dos RSU</b>					<b>C<sub>25</sub>H<sub>39</sub>O<sub>15</sub>N</b>

Fonte: BOVE; LUNGHI, 2006; LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2006; HAO; YANG; ZHANG, 2008.

A partir da fórmula química geral dos RSU e da quantidade aterrada, e considerando a biodegradabilidade de todos os componentes dos RSU, obteve-se o valor de 99,33 Nm<sup>3</sup>.CH<sub>4</sub>/ton. RSU para o potencial de geração de metano (L<sub>0</sub>). A quantidade de RSU aterrada aumenta conforme o tempo de recepção de RSU no aterro. O tempo mínimo de recepção do aterro considerado pelo estudo foi de 5 anos, conforme o estudo de Lombardi, Carnevale e Corti (2006). De acordo com o valor de L<sub>0</sub> obtido, os RSU da cidade de Itapeva/SP podem ser classificados como moderadamente degradáveis, segundo o Banco Mundial (Tabela 1).

A Tabela 6 apresenta estudos sobre diferentes aterros brasileiros e os valores que  $L_0$  pode assumir em cada um deles, e a faixa de valores recomendada pelo Banco Mundial (2004).

Tabela 6 - Comparativo dos valores de  $L_0$  adotados em diferentes estudos com o valor obtido para os RSU de Itapeva/SP e a faixa de valores recomendada pelo Banco Mundial.

<b>AUTOR</b>	<b>ATERRO</b>	<b><math>L_0</math> (Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton. RSU)</b>
Ensinas (2003)	Delta (Campinas/SP)	156,90
Mendes (2005)	Experimental (Guaratinguetá/SP)	131,40
Percora et. al. (2009)	Essencis (Caieiras/SP)	99,69
Figueiredo (2011)	Essencis (Caieiras/SP)	109,30
Alves (2008)	Muribeca (Pernambuco/RE)	120,52
Crovador (2014)	Municipal (Guarapurava/PR)	48,32
Machado et. al (2009)	Metropolitano (Salvador/BA)	66,62
Audibert (2011)	Controlado (Londrina/PR)	85,91
USEPA (1997)	Bandeirantes (São Paulo/SP)	124,91
Gontow (2016)	Municipal (Rio Claro/SP)	201,00
Faixa de valores recomendados pelo Banco Mundial (2004)		5 - 300
<b>Presente estudo</b>	<b>Itapeva/SP</b>	<b>99,33</b>

Fonte: Adaptado de GONTOW, 2016.

Pela análise dos valores da Tabela 6, nota-se que o valor de  $L_0$  obtido para os RSU de Itapeva/SP se encontra dentro da faixa estabelecida pelo Banco Mundial (2004) e na média em comparação com os valores adotados por outros estudos. Cabe ressaltar que, no presente estudo foi considerada a biodegradabilidade dos componentes dos RSU para o cálculo de  $L_0$ , tornando o resultado mais confiável.

A taxa de geração de CH<sub>4</sub> (k) foi obtida a partir da classificação dos RSU de acordo com sua biodegradabilidade e do índice pluviométrico anual de Itapeva/SP, conforme recomendado pelo Banco Mundial (2004). Os RSU de Itapeva/SP são classificados como moderadamente degradáveis e a cidade apresenta uma precipitação de chuva anual média de 1326,6 mm, sendo obtido um valor de k igual a 0,06 conforme a Tabela 2.

A variável mais fácil de se alterar para aumentar a quantidade de biogás gerado é a quantidade de resíduo disposto no aterro, que é função do tempo de

recepção de resíduos no aterro. Embora o tempo mínimo de recepção adotado seja de 5 anos, os cálculos de previsão também foram realizados para um tempo de recepção de 10 e 15 anos, adotando-se 3 taxas diferentes de geração de RSU ao ano para analisar a influência da quantidade de RSU sobre os modelos. A Tabela 7 apresenta os 9 casos de estudos distintos quanto aos anos de recepção e à quantidade de RSU disposta no aterro.

Tabela 7 - Diferenciação dos casos de estudo.

Anos de recepção de RSU no aterro	Taxa de incremento na geração de RSU	Caso
5	1,0	1
	1,1	2
	1,2	3
10	1,0	4
	1,1	5
	1,2	6
15	1,0	7
	1,1	8
	1,2	9

De forma geral, os parâmetros de entrada utilizados no estudo são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros gerais adotados pelos modelos.

Parâmetros gerais adotados	
L0	99,33 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton. RSU
Classificação quanto à degradabilidade	Moderadamente degradável (BANCO MUNDIAL, 2004)
Índice pluviométrico anual de Itapeva/SP	1326,6 mm (INMET, 2017)
k	0,06 (BANCO MUNDIAL, 2004)
Quantidade de RSU	Conforme a Figura 11 e Tabela 7
Tempo de recepção de RSU no aterro	Conforme a Tabela 7
Tempo de funcionamento do aterro	30 anos (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2006)

### 4.3 Previsão da produção de CH<sub>4</sub> dos RSU de Itapeva/SP

Aplicando os parâmetros aos 3 modelos de previsão, obtivemos os gráficos que representam a previsão da produção de CH<sub>4</sub> ao longo dos anos para cada um dos 9 casos. As Figuras 13, 14, 15 ilustram os gráficos obtidos.

Figura 13 - Produção de biogás ao longo da vida útil do aterro, considerando 5 anos de recepção de RSU (Casos 1, 2 e 3).

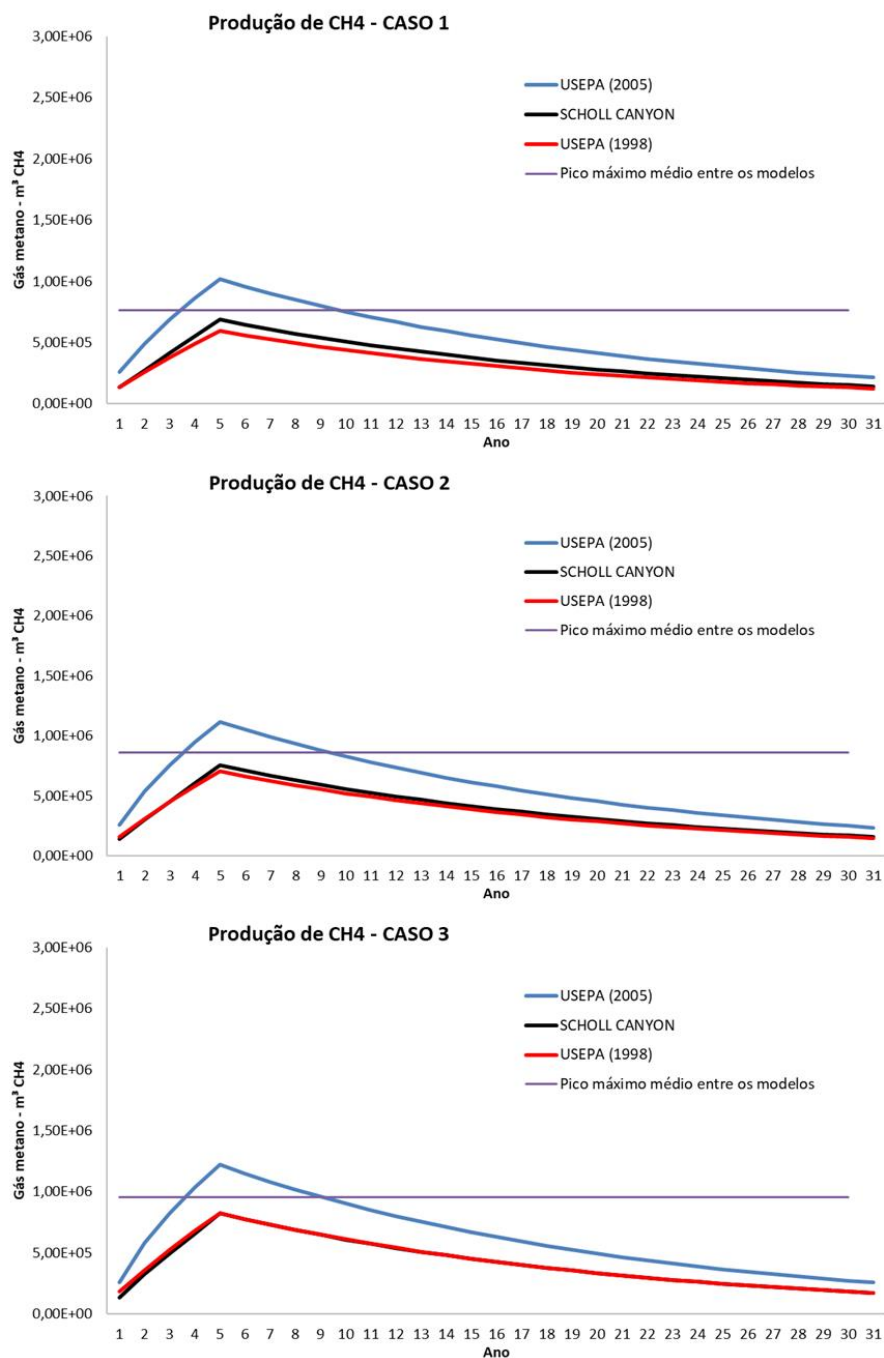


Figura 14 - Produção de biogás ao longo da vida útil do aterro, considerando 10 anos de recepção de RSU (Casos 4, 5 e 6).

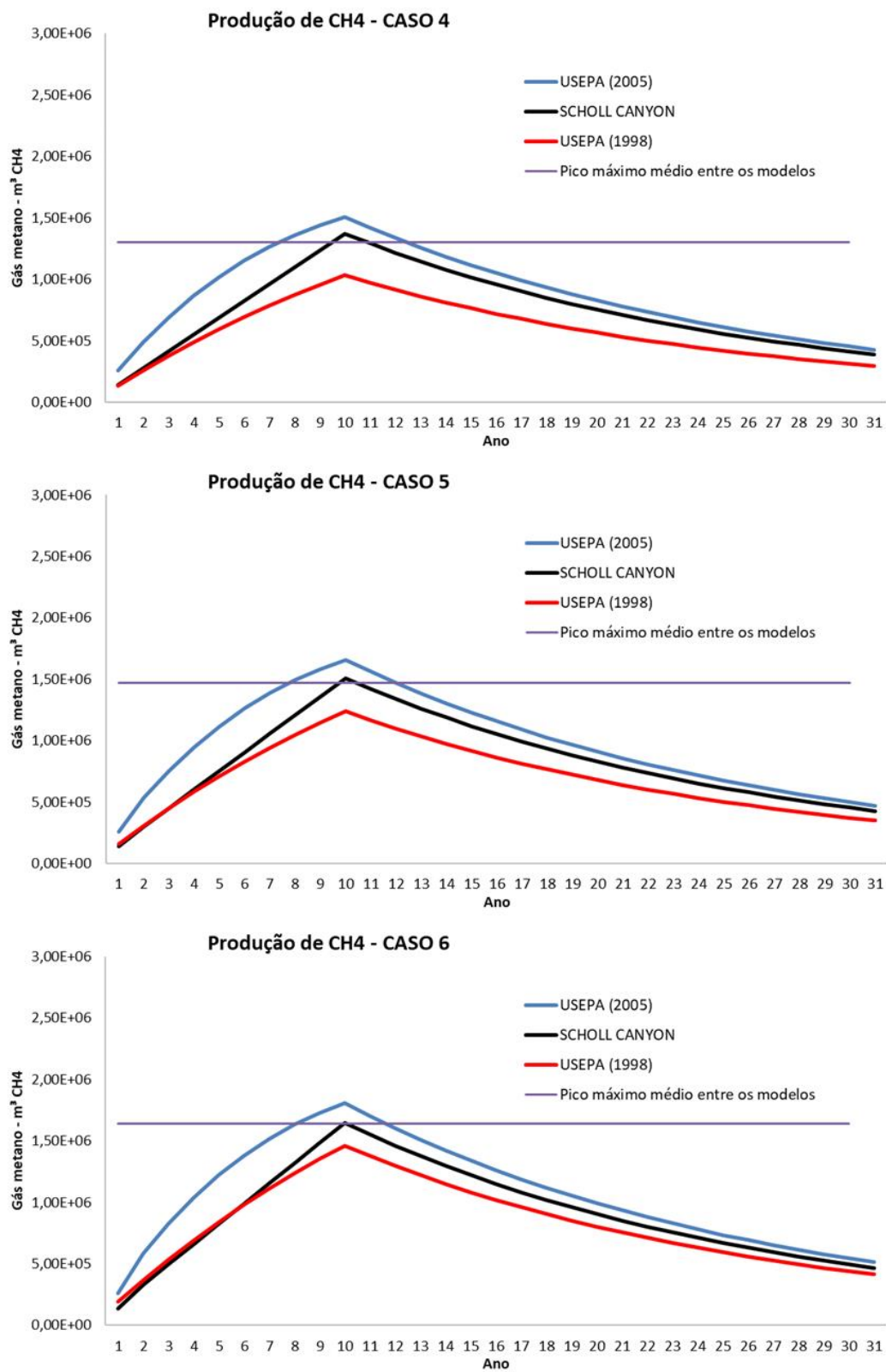
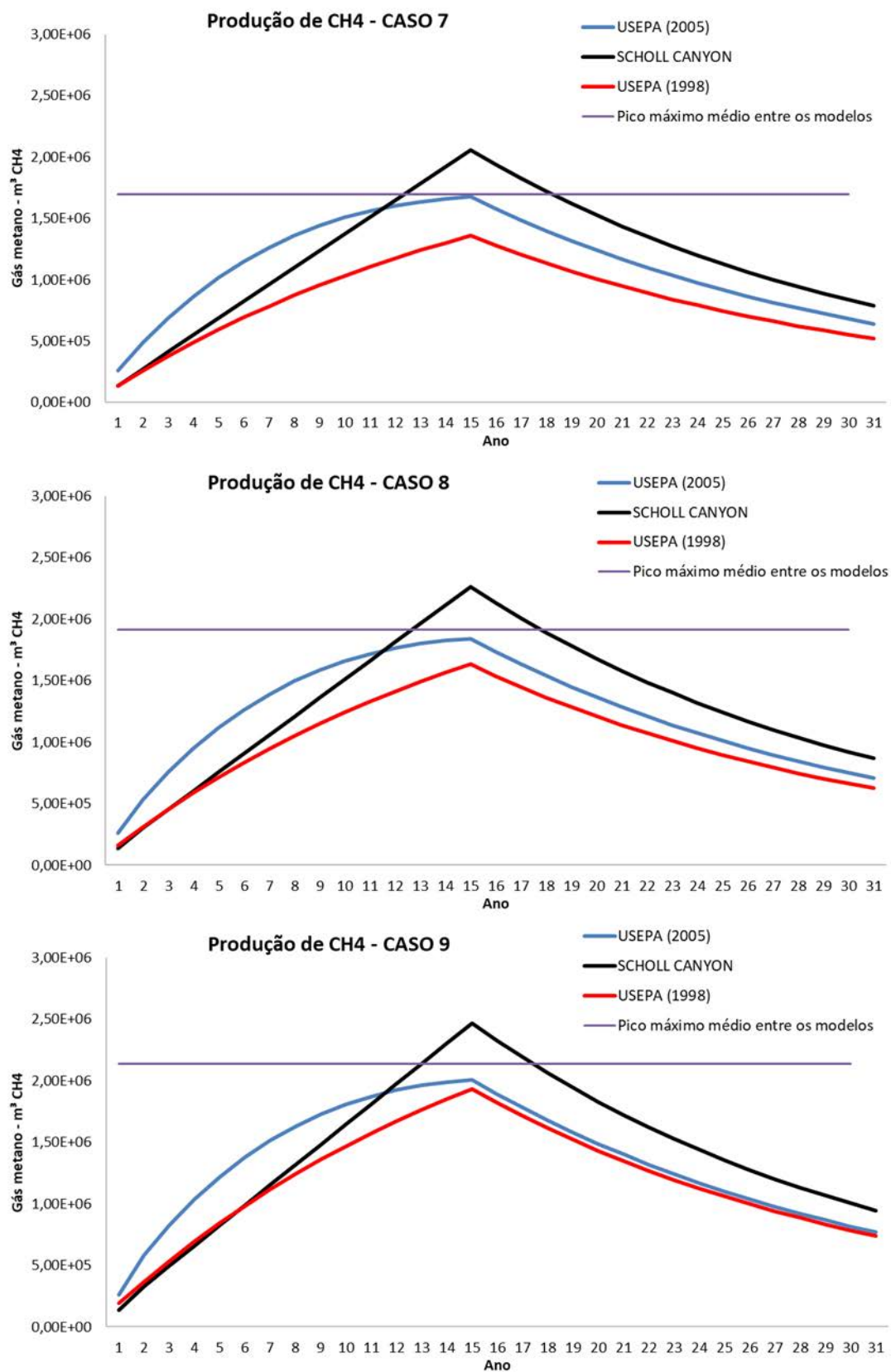


Figura 15 - Produção de biogás ao longo da vida útil do aterro, considerando 15 anos de recepção de RSU (Casos 7, 8 e 9).



Pela análise das Figuras 13, 14 e 15 e, comparando os resultados obtidos por cada modelo em todos os casos, é possível notar que embora os parâmetros utilizados para alimentar os modelos tenham sido os mesmos, os resultados obtidos para a previsão da produção de biogás apresentam alguma variabilidade entre os modelos, confirmando a ideia de Oonk (2010) de que nenhum modelo pode ser considerado o mais adequado devido suas diferentes características.

Embora os modelos tenham apresentado comportamentos distintos, o valor obtido para o pico máximo de geração de biogás em cada um não apresenta grande variação com relação a média entre eles. O modelo da USEPA de 1998 se mostrou mais conservador em todos os casos, subestimando a produção de CH<sub>4</sub>.

Os modelos da USEPA de 2005 e Scholl Canyon apresentaram comportamentos distintos. Enquanto o modelo da USEPA se tornou mais conservador ao longo dos casos, ou seja, subestimou a produção de CH<sub>4</sub> conforme aumentou-se o tempo de recepção e quantidade de RSU no aterro, o modelo Scholl Canyon foi se tornando mais otimista, atingindo picos de geração de CH<sub>4</sub> maiores que a média para os casos 7, 8 e 9.

Essa previsão otimista se deve ao fato de que os cálculos para este modelo incorporam o termo exponencial de decaimento apenas a partir do fechamento do aterro, enquanto nos outros modelos considera-se a degradação dos RSU dispostos a partir do primeiro ano de recepção do aterro.

Embora os modelos apresentem resultados com pouca variabilidade, a utilização dos mesmos parâmetros de entrada e a consideração da biodegradabilidade dos componentes dos RSU nos cálculos tornam confiável a utilização da média dos resultados obtidos pelos modelos para os cálculos de energia disponível.

#### **4.4 Estimativa da energia elétrica disponível pelo aproveitamento do biogás de Itapeva/SP**

A partir da previsão da produção de CH<sub>4</sub> ao longo dos anos, obteve-se a potência disponível por ano pela aplicação da Equação 4. A geração de energia elétrica a partir do biogás requer a utilização de um equipamento responsável pela conversão da energia. Os cálculos da potência disponível por ano levam em

consideração a eficiência desse equipamento, e a disponibilidade de energia elétrica vai depender de quantas horas o equipamento funcionará por ano. Este equipamento pode ser um motor de combustão interna, uma caldeira ou uma turbina a gás.

O presente estudo considerou o tempo de funcionamento do equipamento de 24 horas por dia e uma eficiência de 33% na conversão de energia elétrica, conforme o estudo de Silva (2012). Este valor se aproxima da eficiência média dos motores ciclo Otto, ou motores de combustão interna, que são muito utilizados no aproveitamento do biogás de aterro. Entretanto existem tecnologias que prometem uma eficiência maior, mas que estão em fase de desenvolvimento, como as células de combustível (BARROS, 2013).

Diante das emissões fugitivas inevitáveis que ocorrem no aterro sanitário, a eficiência de coleta do biogás considerada foi de 75% conforme recomendado pela CETESB (2006) e Banco Mundial (2004), e adotado por Gontow (2016) em seu estudo.

Os valores adotados nos cálculos da geração de energia elétrica estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados nos cálculos da geração de energia.

<b>Parâmetros utilizados para calcular a disponibilidade de energia</b>	
Eficiência do equipamento gerador de energia elétrica	33% (SILVA, 2012)
Horas de funcionamento do equipamento	8760 horas/ano
Eficiência de coleta do biogás	75% (CETESB, 2006; BANCO MUNDIAL, 2004; GONTOW, 2016)
Poder calorífico do CH <sub>4</sub>	35669,27 kJ/Nm <sup>3</sup> (LIMA, 2018)

Aplicando os parâmetros citados, obteve-se os gráficos de energia elétrica disponível ao longo dos anos de vida útil do aterro, conforme apresentado pelas

Figuras 16, 17 e 18. Além da quantidade de energia disponível, também foi inserido nos gráficos de cada caso o número de pessoas que seriam beneficiadas no primeiro ano de funcionamento do aterro considerando que o consumo médio de energia elétrica per capita no Brasil é de 2,228 MWh/ano (EPE, 2017).

Figura 16 – Estimativa da geração de energia elétrica ao longo da vida útil do aterro, considerando 5 anos de recepção de RSU (Casos 1, 2 e 3).

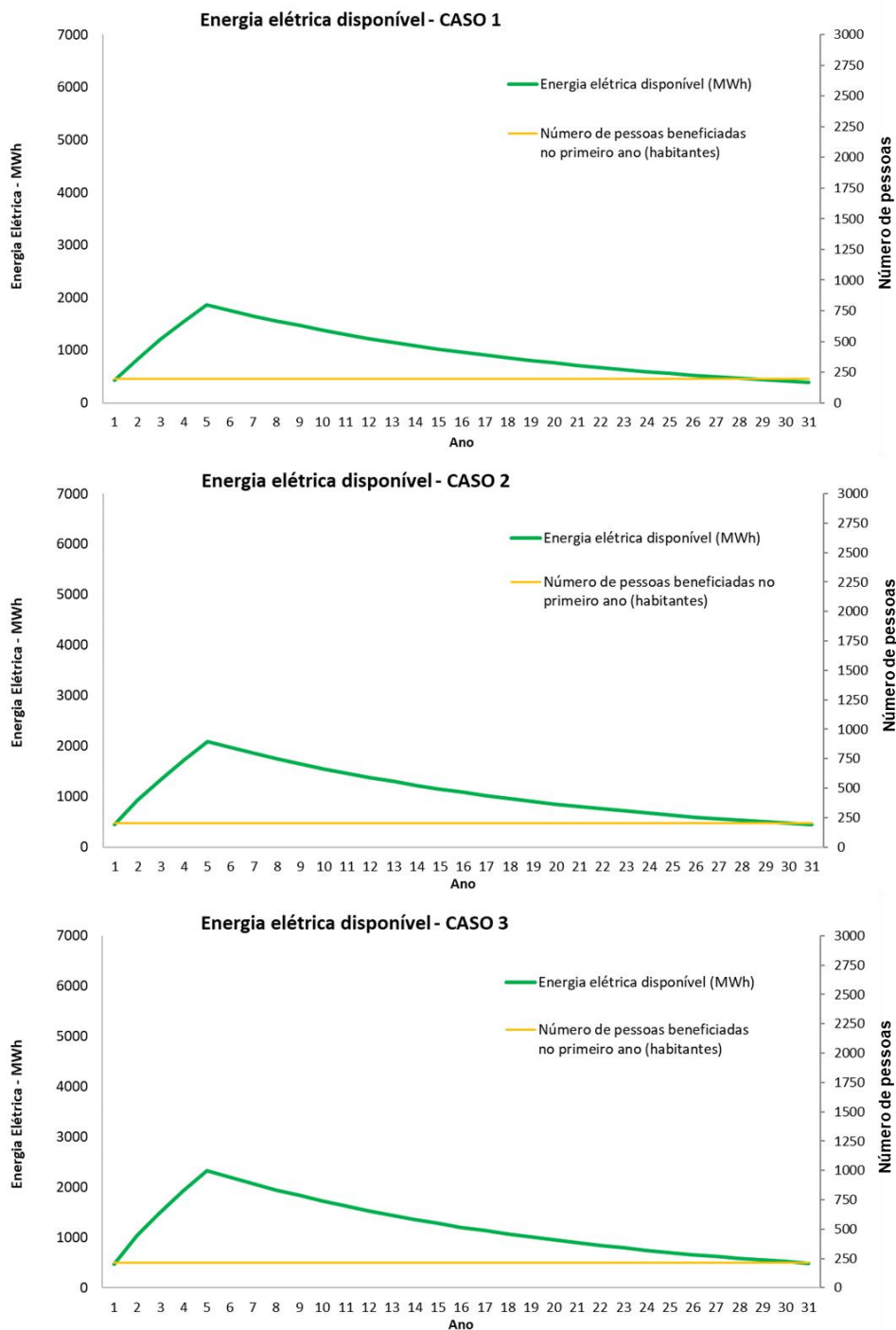


Figura 17 - Estimativa da geração de energia elétrica ao longo da vida útil do aterro, considerando 10 anos de recepção de RSU (Casos 4, 5 e 6).

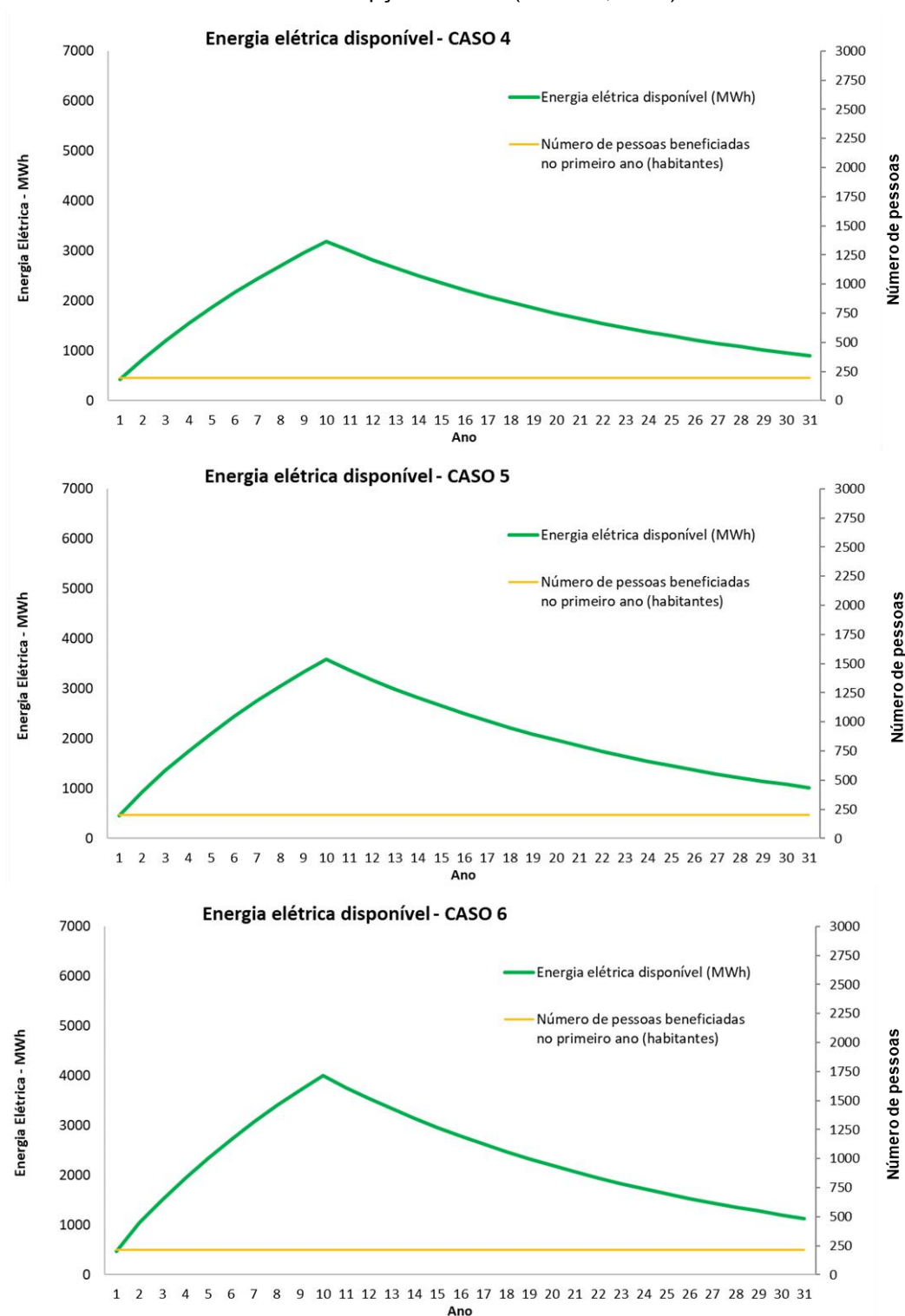
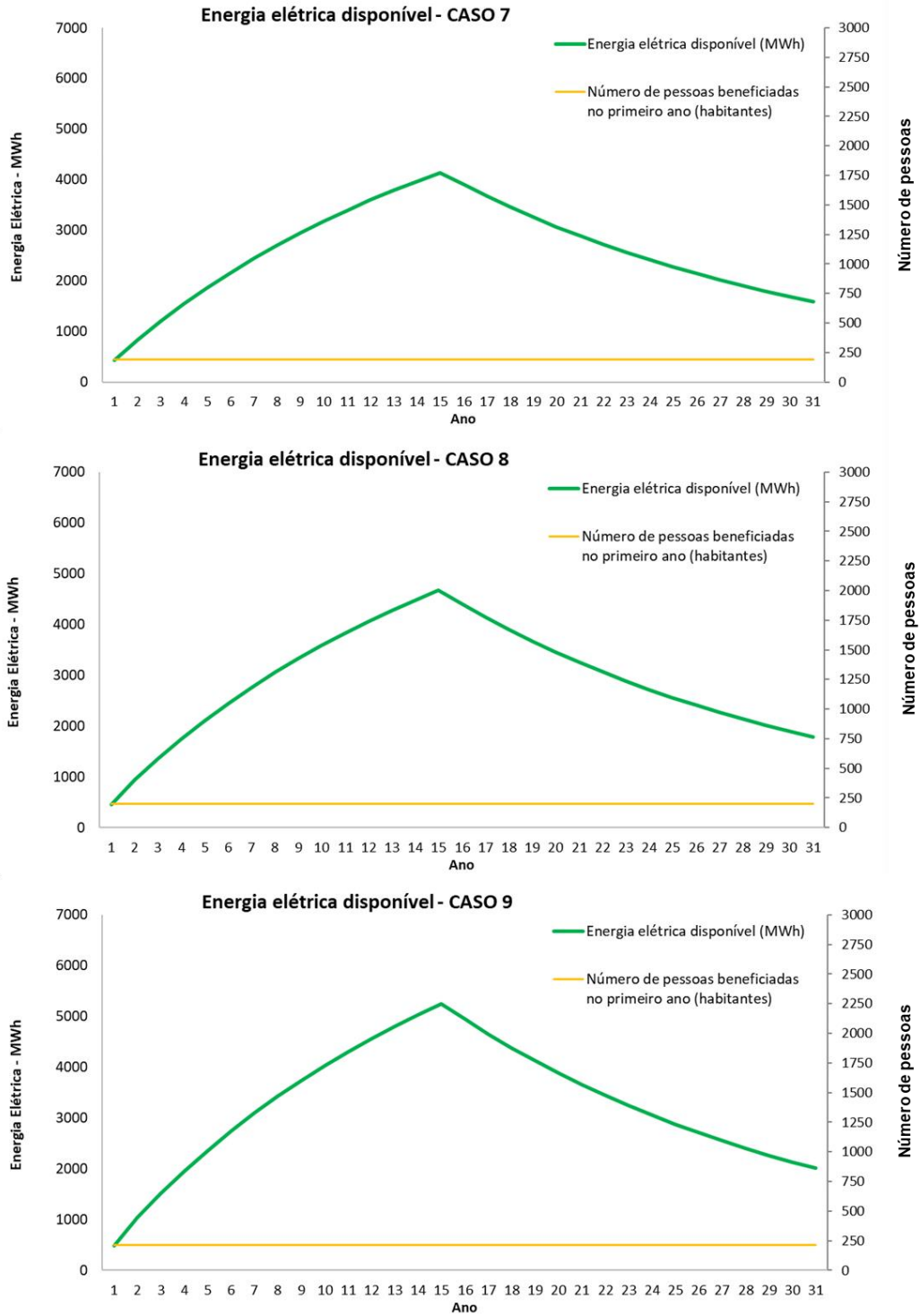
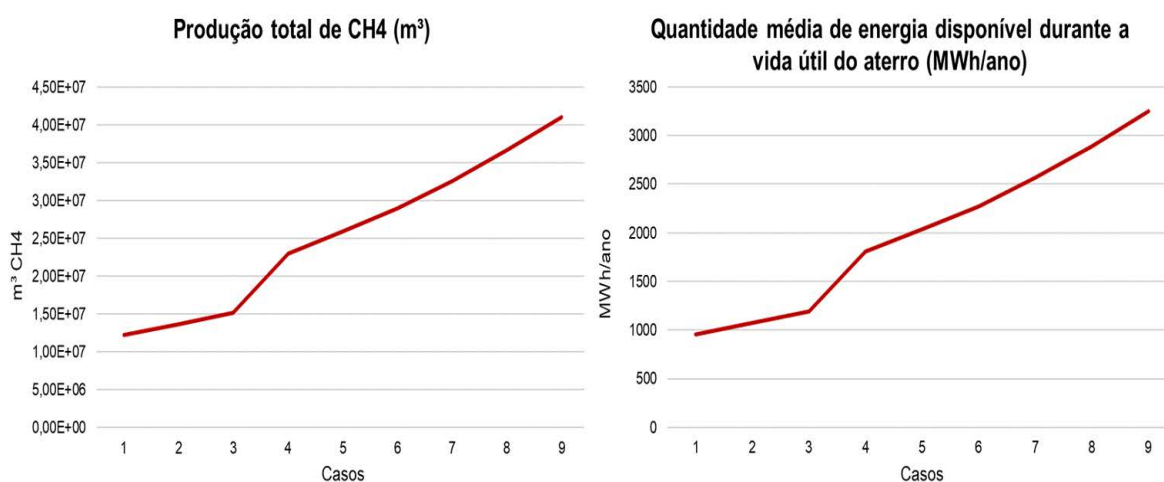


Figura 18 - Estimativa da geração de energia elétrica ao longo da vida útil do aterro, considerando 15 anos de recepção de RSU (Casos 7, 8 e 9).



Como observado, com o aumento da quantidade de RSU aterrados ao longo dos casos e, conseqüentemente, da produção de CH<sub>4</sub>, aumentou-se a quantidade de energia elétrica disponível por ano. No entanto, além da dificuldade de se prever a quantidade de RSU que seria enviada ao aterro em cada ano, a capacidade de um aterro de receber RSU depende da disponibilidade de recursos espaciais, financeiros, ou ainda tecnológicos que nem sempre estão à disposição dos municípios. Os gráficos da Figura 19 ilustram a tendência de crescimento observada.

Figura 19 - Linha de tendência da produção total de CH<sub>4</sub> e da quantidade média de energia disponível durante a vida útil do aterro, conforme a aplicação dos casos.



A partir de uma análise simples das Figuras 16, 17 e 18, se considerarmos apenas o número de pessoas beneficiadas no primeiro ano como parâmetro mínimo para manter o aterro em funcionamento, nota-se que em todos os casos a partir do 4, um número mínimo estabelecido de pessoas poderia ser beneficiado por mais tempo, além dos 30 anos de funcionamento. De acordo com Paro, da Costa e Coelho (2008), um aterro sanitário pode funcionar por até 40 anos após o encerramento da disposição de RSU. Para avaliar a viabilidade de se manter um aterro de capacidade maior por mais tempo, seria necessária uma análise econômica mais detalhada, envolvendo principalmente os custos de operação e manutenção e preço da energia elétrica.

Considerando que o consumo médio per capita de energia elétrica no Brasil é de 2,228 MWh por ano (EPE, 2017), a quantidade obtida a partir do biogás em cada um dos casos poderia beneficiar uma porção da população local. A Tabela 10

apresenta a produção total de CH<sub>4</sub>, a quantidade média anual de energia elétrica disponível durante a vida do aterro, e a quantidade média de pessoas que poderiam ser beneficiadas por ano.

Tabela 10 - Resultados gerais obtidos e número de pessoas que seriam beneficiadas em cada caso.

Casos	Valores médios entre os modelos		
	Produção total de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> )	Quantidade média de energia disponível durante a vida útil do aterro (MWh/ano)	Quantidade média de pessoas beneficiadas (hab./ano)
1	1,22E+07	959	430
2	1,37E+07	1075	483
3	1,52E+07	1196	537
4	2,30E+07	1812	813
5	2,59E+07	2039	915
6	2,89E+07	2275	1021
7	3,26E+07	2565	1151
8	3,67E+07	2890	1297
9	4,10E+07	3247	1457

Analisando a Tabela 10, nota-se que com o aumento do tempo de recepção e quantidade de RSU propostos por cada caso, a produção total de CH<sub>4</sub>, a quantidade média anual de energia disponível e o número médio de pessoas beneficiadas também aumentam. No entanto, ao comparar os valores obtidos com a estimativa atual da população de Itapeva/SP, nota-se que os habitantes que poderiam ser beneficiados com tal energia representam apenas uma pequena parcela da população total. A Tabela 11 apresenta a parcela da população total que seria beneficiada.

Tabela 11 - Parcela da população que seria beneficiada pela energia obtida a partir do biogás.

Casos	População estimada de Itapeva/SP em 2018 (nº de habitantes)	93892 (IBGE, 2018)
	Quantidade média de pessoas beneficiadas (hab./ano)	Parcela da população atual que seria beneficiada
1	430	0,46%
2	483	0,51%
3	537	0,57%
4	813	0,87%
5	915	0,97%
6	1021	1,09%
7	1151	1,23%
8	1297	1,38%
9	1457	1,55%

Mesmo para o caso 9, onde o tempo de recepção e o incremento anual na geração de RSU são maiores, a parcela da população total que seria beneficiada é muito baixa, dependendo de uma análise econômica para avaliar o investimento. Embora a parcela da população seja baixa, seria interessante avaliar o uso dessa energia extra na iluminação pública da cidade.

Kalogirou (2017) destaca em seu livro que a partir do aproveitamento energético dos RSU no Brasil, assim como na maioria dos países em desenvolvimento, pode-se obter benefícios técnicos, financeiros e sociais, sendo que os resultados obtidos são influenciados por economias de escala. A Tabela 12 apresenta 2 casos especiais para avaliar o efeito das economias de escala.

Tabela 12 - Casos especiais de estudo.

Casos Especiais	Anos de recepção de RSU no aterro	Taxa de incremento na geração de RSU	Parcela aproximada da população beneficiada
1	5	1,00	50%
2	15	1,00	50%

Os casos especiais foram aplicados de forma a avaliar qual deveria ser a taxa de geração diária de RSU na cidade de Itapeva/SP, de modo que aproximadamente 50% da população atual fosse beneficiada. Para isso foram feitas simulações na planilha de cálculo de modo que se obtivesse a taxa aproximada de geração de RSU diária necessária. Os resultados obtidos pelos casos especiais estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados gerais obtidos para os casos especiais, considerando o beneficiamento de 50% da população atual.

Casos Especiais	Produção total de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> )	Quantidade média de energia disponível durante a vida útil do aterro (MWh/ano)	Quantidade média de pessoas beneficiadas (hab./ano)	Parcela aproximada da população beneficiada	Taxa aproximada de geração de RSU (ton/dia)
1	1,33E+09	104829	47051	50%	6900
2	1,33E+09	104878	47073	50%	2580

Nota-se que ao aumentar a capacidade do aterro pelo aumento do seu tempo de recepção de RSU, a taxa de geração de RSU mínima necessária para

beneficiar energeticamente 50% da população diminuiu, sendo essa constante ao longo dos anos. A Tabela 14 apresenta as diferenças entre a taxa atual de geração de RSU e as taxa mínimas necessárias para beneficiar 50% da população.

Tabela 14 - Razão entre a taxa atual e as taxas mínimas de geração de RSU, considerando o beneficiamento de 50% da população atual.

Casos Especiais	Parcela aproximada da população beneficiada	Taxa atual de geração de RSU em Itapeva/SP (ton/dia)	63,1
		Taxa aproximada de geração de RSU (ton/dia)	Razão entre a taxa atual e taxa mínima de geração de RSU
1	50%	6900	109
2	50%	2580	41

Dessa forma, para que o aproveitamento energético do biogás em Itapeva/SP possa beneficiar ao menos 50% da população atual, deve-se aumentar em mais de 100 vezes a geração diária atual para um tempo de recepção de RSU de 5 anos, e em mais 40 vezes para um tempo de 15 anos. No entanto, a taxa de geração de RSU em um município envolve uma série de fatores complexos, como o crescimento populacional, hábitos de consumo e poder aquisitivo da população, sendo difícil alterá-la em um curto período de tempo.

Uma possível solução para isso seria acumular as quantidades de RSU gerados por cidades vizinhas, aumentando assim a taxa de resíduos dispostos no aterro por ano. Kalogirou (2017) destaca que, apenas uma pequena parcela dos municípios é responsável pela maioria dos RSU gerados. Assim, os municípios que possuem uma geração diária per capita baixa poderiam considerar o transporte dos RSU para municípios onde a geração é maior de forma a centralizar a disposição de RSU, eliminando a necessidade da implantação de células de aproveitamento de gás de aterro em vários municípios e a preocupação com a disposição adequada dos RSU. Dessa forma, os custos de operação e manutenção do aterro ao longo da sua vida útil seriam substituídos pelos custos logísticos de transporte dos RSU, sendo necessária uma análise de viabilidade econômica para a tomada de decisão. A Tabela 15 apresenta a taxa de geração de RSU dos municípios que fazem divisa com Itapeva/SP localizados em um raio de até 70 km, que seria equivalente a aproximadamente uma

hora de viagem considerando um caminhão de coleta de lixo como principal transportador.

Tabela 15 - Taxa de geração de RSU dos municípios localizados em um raio de 70 km de Itapeva/SP.

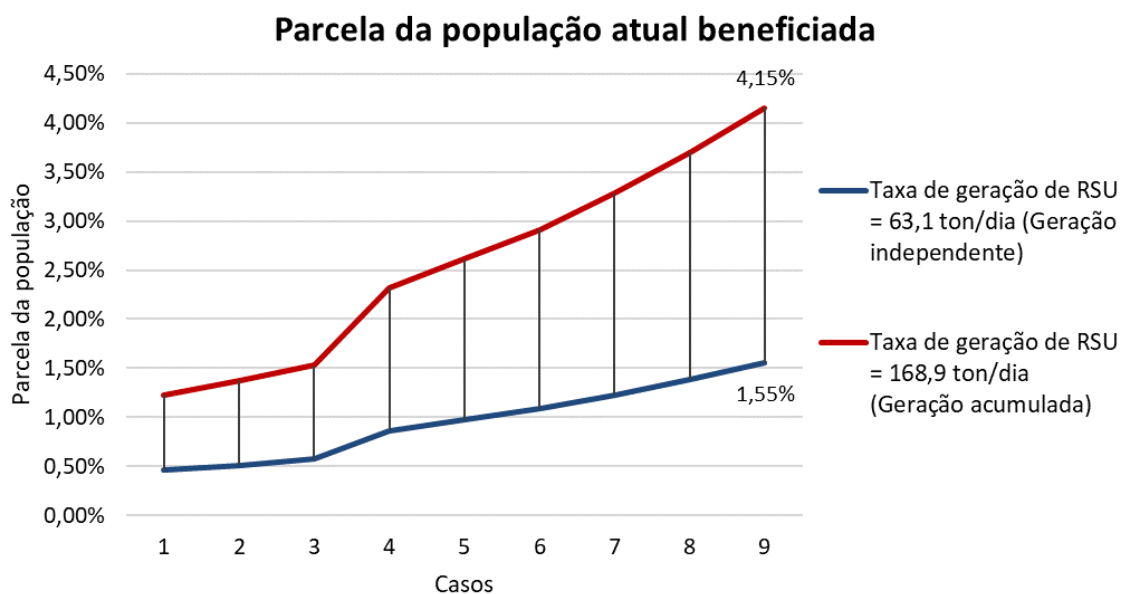
<b>Municípios</b>	<b>Distância aproximada do município de Itapeva/SP (km)</b>	<b>Taxa de geração de RSU (ton/dia)</b>
Itapeva	0	63,1
Buri	49	11,2
Capão Bonito	61	31,1
Guapiara	50	5,0
Itaberá	36	8,5
Itararé	58	37,2
Nova Campina	21	4,5
Ribeirão Branco	36	6,1
Taquarivaí	21	2,2
Taxa acumulada de geração de RSU (ton/dia)		168,9

Fonte: Adaptado de CETESB, 2017.

Nota-se que Itapeva/SP é uma cidade referência, sendo o principal polo comercial e de prestação de serviços na região sudoeste paulista, com alto fluxo de bens e serviços, uma vez que, além da população ser mais numerosa, possui a taxa de geração diária de RSU mais alta entre os municípios da região. Dessa forma, se o montante de RSU gerado nos municípios fosse destinado para Itapeva/SP seria possível obter uma quantidade maior de energia e, conseqüentemente, beneficiar um número maior de pessoas.

Aplicando novamente os 9 casos da Tabela 7, obteve-se a parcela da população atual de Itapeva/SP que seria beneficiada com a energia elétrica obtida a partir de duas taxas: a geração independente de RSU em Itapeva/SP e a geração acumulada entre os municípios. A Figura 20 ilustra a diferença entre as duas condições.

Figura 20 - Parcela da população beneficiada para cada taxa de geração.



Nota-se que um aumento na quantidade de resíduos dispostos no aterro, resulta em uma maior parcela da população que poderia ser beneficiada pela energia elétrica obtida. Embora essa fração da população seja pequena com relação ao todo, o aproveitamento energético do biogás envolve outros benefícios além da disponibilidade de energia elétrica.

Os municípios adjacentes teriam os custos de tratamento e disposição dos RSU, que englobam tanto a coleta quanto a destinação final, substituídos por custos de coleta e transporte dos RSU que provavelmente seriam mais baixos, ocorrendo o repasse para terceiros das responsabilidades legais e ambientais que englobam a disposição dos resíduos no Brasil. Além disso, a não utilização de grandes áreas em regiões periféricas (como a demandada por um aterro sanitário) pode contribuir para facilitar uma expansão da área urbana nesses municípios.

Já Itapeva/SP, por sua vez, além de promover o uso de uma fonte renovável de energia e tratar de maneira correta os RSU, poderia rentabilizar o aproveitamento do biogás pela cobrança dos municípios pelos serviços de coleta, transporte e tratamento dos RSU e pela venda de energia elétrica.

## 5 CONCLUSÕES

O aumento contínuo da população e do consumo de bens e serviços vem impactando diretamente a geração de resíduos sólidos urbanos, levando a um aumento correspondente na utilização de recursos para geração de energia e, conseqüentemente, das emissões de gases do efeito estufa. Mesmo com a regulamentação da Lei 12.305 de 2010, que estabelece a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, grande parte dos municípios brasileiros ainda dispõe seus RSU de forma inadequada – como no caso de Itapeva/SP – acarretando em diversos problemas ambientais e sociais.

Assim, uma possível solução para esse problema seria a disposição adequada dos RSU em aterros sanitários, aproveitando energeticamente o biogás gerado e mitigando as emissões de GEE. No entanto, o dimensionamento de projetos com essa abordagem requer um estudo prévio de viabilidade técnica. Dessa forma, o presente estudo teve como principal objetivo avaliar a potencialidade da geração de biogás dos RSU de Itapeva/SP, por meio da aplicação de modelos teóricos de previsão, e a conseqüente energia elétrica que poderia ser obtida a partir do aterro, de modo a fornecer informações úteis para a tomada de decisão das autoridades locais com relação ao tema.

A geração de RSU em Itapeva/SP praticamente dobrou entre 2010 e 2017, apenas com um pequeno incremento na população. O crescimento econômico da cidade observado no mesmo período indica um aumento do poder aquisitivo da população, impactando diretamente a geração de resíduos.

Nesse estudo, foram consideradas as características físico-químicas dos RSU da cidade de São Paulo. No entanto, por ser uma cidade do interior cuja rotina da população não é tão intensa quanto na capital, os hábitos de consumo da população de Itapeva/SP poderiam apresentar um percentual menor de embalagens e maior de resíduos orgânicos, o que aumentaria o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) dos RSU. No entanto, o valor de  $L_0$  obtido se mostrou razoável comparado a outros estudos.

A taxa de geração de metano (k) foi obtida a partir de valores mínimos recomendados pela literatura. O valor poderia ser incrementado em função das condições climáticas da região.

Com relação aos modelos de previsão, apesar de apresentarem certa variabilidade, os resultados obtidos foram próximos da média entre eles, tornando os valores mais confiáveis para os cálculos da geração de energia.

O estado atual da geração de RSU na cidade de Itapeva/SP indica que o seu aproveitamento energético através da geração de biogás em aterro sanitário satisfaria a demanda energética de apenas uma pequena parcela da população. Os resultados demonstraram que é necessária uma taxa de geração de RSU muito maior para beneficiar a demanda de energia de 50% da população.

No entanto, se Itapeva/SP recebesse os RSU dos municípios vizinhos, a geração de energia seria incrementada de modo que uma parcela maior da população poderia ser beneficiada. Além de poder beneficiar uma parcela da população com tal energia, a diversificação da matriz energética poderia oferecer uma alternativa para o fornecimento de energia e trazer ganhos ambientais à cidade.

Adicionalmente, o consumo per capita de energia elétrica considerado nos cálculos foi superestimado, uma vez que o valor utilizado representa a média nacional devido a falta de informações sobre o consumo médio de energia elétrica na cidade de Itapeva/SP, tornando a análise pessimista. Dessa forma, por ser uma cidade de interior e possivelmente apresentar um consumo per capita médio de energia elétrica menor comparado à média nacional, o número de pessoas beneficiadas com a energia elétrica do aterro poderia ser maior.

Por fim, o estudo indicou a existência de viabilidade técnica para implantação de um projeto de aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário na cidade de Itapeva/SP. No entanto, para a melhor tomada de decisão com relação à implementação de tal projeto, a viabilidade técnica deve estar acompanhada de análises de viabilidade social-econômica, ambiental, entre outras que se fizerem necessárias.

## 6 REFERÊNCIAS

ABREU, Fabio Viana de. **Análise de viabilidade técnica e econômica da geração de energia através do biogás de lixo em aterros sanitários**. 2009. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Fenômenos de Transporte, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2009.

AKINCI, Gorkem; GUVEN, Elif Duyusen; GOK, Gulden. Evaluation of waste management options and resource conservation potentials according to the waste characteristics and household income: A case study in Aegean Region, Turkey. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 58, p.114-124, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.005>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil) (Ed.). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2007**. São Paulo: Abrelpe, 2007. 183 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil) (Ed.). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013**. São Paulo: Abrelpe, 2018. 114 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil) (Ed.). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. 15. ed. São Paulo: Abrelpe, 2018. 74 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil) (Ed.). **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. São Paulo: Abrelpe, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: Abnt, 1992. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 71 p.

AUDIBERT, Jorge Luiz. **AVALIAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS DO ATERRO CONTROLADO DE LONDRINA**. 2011. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Edificações e Saneamento, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, 2011.

AUTRET, Erwan et al. Incineration of municipal and assimilated wastes in France: Assessment of latest energy and material recovery performances. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 139, n. 3, p.569-574, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.065>.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO (Brasil). **BNDES 50 Anos - Histórias Setoriais: O setor elétrico.** [s.i]: Bndes, 2002. 21 p.

BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; SILVA, Tiago Rodrigo da. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 65, p.150-164, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>.

BARROS, Regina Mambeli et. al. A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste. **Renewable Energy Focus**, [s.l.], v. 25, p.4-16, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ref.2018.02.001>.

BARROS, Tiago Felipe de. **Geração de energia elétrica com biogás gerado em aterro sanitário.** 2013. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2013.

BASTOS, Bruno Quaresma. **Tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos.** 2013. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2013.

BRAGA, Jorge Manuel da Cunha. **Previsão da produção de biogás em aterros de resíduos sólidos urbanos.** 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

BRASIL. Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, DF, Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 11 maio 2018.

BRASIL. GOVERNO DO BRASIL. **Matriz Energética.** 2010. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/meio-ambiente/2010/11/matriz-energetica>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

BOVE, Roberto; LUNGHI, Piero. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 47, n. 11-12, p.1391-1401, jul. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2005.08.017>.

CASTRO, M. C. A. A. et. al. Estudo comparativo da geração de gás metano estimado por modelagem matemática com dados reais medidos em campo no aterro sanitário de Rio Claro-SP. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013, Goiânia. Anais 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: **ABES**, 2013. v. 1. p. 1-9.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aterro Sanitário**. 2018. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/aterro-sanitario/>>. Acesso em: 28 set. 2018.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Biogás, geração e uso energético**: Manual do usuário do programa de computador. São Paulo: Cetesb, 2006. 61 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/software/>>. Acesso em: 28 out. 2018.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares 2010**. São Paulo: Cetesb, 2010. 186 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares 2011**. São Paulo: Cetesb, 2011. 218 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2012**. São Paulo: Cetesb, 2012. 110 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2013**. São Paulo: Cetesb, 2013. 118 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2014**. São Paulo: Cetesb, 2014. 126 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2015**. São Paulo: Cetesb, 2015. 124 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2016**. São Paulo: Cetesb, 2016. 122 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2017**. São Paulo: Cetesb, 2017. 120 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**: Ano base 2016. [s.i.]: Epe, 2017. 232 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Rio de Janeiro: Epe, 2008. 73 p. (RECURSOS ENERGÉTICOS).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional: Relatório síntese** (Ano base 2017). Rio de Janeiro: Epe, 2018. 62 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Ministério de Minas e Energia. **Demanda de Energia 2050**. Rio de Janeiro: Epe, 2016. 257 p. (ESTUDOS DA DEMANDA DE ENERGIA).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Ministério de Minas e Energia. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: Epe, 2014. 50 p. (RECURSOS ENERGÉTICOS).

EPRI (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE). **Waste-to-Energy Technology: Opportunities for expanding renewable generation & reducing carbon emissions**. 2011. Disponível em: <<https://www.epri.com/#/pages/product/00000000001022361/?lang=en-US>>. Acesso em: 03 out. 2018.

FARIA, Flávia dos Santos. **ÍNDICE DA QUALIDADE DE ATERROS DE RESÍDUOS URBANOS**. 2002. 355 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2002.

FAAIJ, André P.C. Bio-energy in Europe: changing technology choices. **Energy Policy**, [s.i.], v. 34, n. 3, p.322-342, fev. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2004.03.026>.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Vérdi de. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica: Estudo de caso**. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, EP / FEA / IEE / IF - USP, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011.

GEWALD, Daniela et. al. Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.i.], v. 16, n. 4, p.1779-1789, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.036>.

GONÇALVES, M.A.; TANAKA, A.K.; AMEDOMAR, A. A. **A destinação final dos resíduos sólidos urbanos: alternativas para a cidade de São Paulo através de casos de sucesso**. Pro-futuro: Programa de Estudos do Futuro. São Paulo, 2013.

GONTOW, Ariel. **Ajuste de modelos matemáticos de previsão de geração de metano para análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás gerado no aterro municipal de Rio Claro - SP**. 2016. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2016.

HAMADA, J. Universidade Estadual Paulista (UNESP). **Resíduos Sólidos: Conceituação e Caracterização**. [s.i.]: Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), 2003. 20 p.

HAO, Xiaoli; YANG, Hongxing; ZHANG, Guoqiang. Trigeneration: A new way for landfill gas utilization and its feasibility in Hong Kong. **Energy Policy**, [s.l.], v. 36, n. 10, p.3662-3673, out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.05.031>.

HUITRIC, R. L.; SONI, R. **Making the most of landfill gas models**. Projection models. 1997. Proceedings from SWANA's 20th Annual LFG Symposium, Monterey California, USA, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama de Itapeva/SP**. 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/itapeva/panorama>>. Acesso em: 29 out. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto dos Municípios**. 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/itapeva/pesquisa/38/47001?tipo=ranking&indicador=47001>>. Acesso em: 29 out. 2018.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **BOLETIM CLIMATOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO**: ABRIL DE 2017. São Paulo: Inmet, 2017. 9 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change. National Greenhouse Gas Inventories Programme. **Waste Generation, Composition and Management Data: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [s.i.]: Iges, 2006. 5 v. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

International Energy Agency (Ed.). **KEY WORLD ENERGY STATISTICS 2018**. 21. ed. [s.i.]: IEA, 2018. 51 p. 21 v. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2018>>. Acesso em: 02 out. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**: Relatório de Pesquisa. Brasília: Ipea, 2012. 82 p.

ITAPEVA. CÂMARA MUNICIPAL DE ITAPEVA. **A Comissão de Agricultura, Abastecimento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente presidida pelo vereador Tião do Táxi, reuniu-se para tratar do assunto: O aterro sanitário e a coleta seletiva**. 2017. Disponível em: <<https://www.camaraitapeva.sp.gov.br/imprensa/noticia/integra/8805/a-comissao-de-agricultura-abastecimento-desenvolvimento-urbano-e-meio-ambiente-presidida-pelo-vereador-tiao-do-taxi-reuniu-se-para-tratar-do-assunto:-o-aterro-sanitario-e-a-coleta-seletiva.-/>>. Acesso em: 17 mar. 2018.

ITAPEVA. CÂMARA MUNICIPAL DE ITAPEVA. **A elaboração do Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos é discutida em Audiência Pública na Câmara Municipal**.: O aterro sanitário e a coleta seletiva. 2018. Disponível em: <<https://www.camaraitapeva.sp.gov.br/imprensa/noticia/integra/9437/a-elaboracao-do-plano-de-gerenciamento-integrado-de-residuos-solidos-e-discutida-em-audiencia-publica-na-camara-municipal./>>. Acesso em: 27 set. 2018.

KALOGIROU, Efstratios N.. **Waste-to-Energy Technologies and Global Applications**. Florida: Crc Press, 2017. 244 p.

KAMALAN, H.; SABOUR, M.; SHARIATMAD, N. A Review on Available Landfill Gas Models. **Journal of Environmental Science and Technology**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.79-92, 1 fev. 2011. Science Alert. <http://dx.doi.org/10.3923/jest.2011.79.92>.

LIMA, Antônio. **Geração Térmica: Poder calorífico**. Disponível em: <<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>>. Acesso em: 28 out. 2018.

LINO, F.A.M.; ISMAIL, K.A.R. Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 6, p.3496-3502, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.048>.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Incineration and recycling for MSW treatment: Case study of Campinas, Brazil. **Elsevier: Sustainable Cities and Society**. Campinas, p. 752-757. nov. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.028>>. Acesso em: 22 maio 2018.

LOMBARDI, Lidia; CARNEVALE, Ennio; CORTI, Andrea. Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill. **Energy**, [s.l.], v. 31, n. 15, p.3208-3219, dez. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.034>.

MAIER, S. **Model for Economic Feasibility of Municipal Solid Waste Treatment Methods**. 2011. Tese (Mestrado). PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. 333 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MENDES, L. G. G. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá**. 2005. p. 179. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica na área de transmissão e conversão de energia. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, São Paulo, Guaratinguetá, 2005.

MENDES, Mara Regina; ARAMAKI, Toshiya; HANAKI, Keisuke. Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 41, n. 1, p.47-63, abr. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2003.08.003>.

MIRANDA, Luiz Henrique Targa Gonçalves. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de caso no município de Itanhaém-SP**. 2014. 121 f. Monografia (Especialização) - Curso de Energia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2014.

OLIVEIRA, Luciano Basto. **Aproveitamento Energético dos resíduos sólidos urbanos e abatimento de emissões de gases do efeito estufa**. 2000. 136 f. Tese (Mestrado) - Curso de Ciências em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2000.

OLIVEIRA, L. B., ROSA, L. P. Brazilian Waste Potential: Energy, Environmental, Social and Economic Benefits. **Elsevier: Energy Policy**, v. 31, pp. Amsterdam, 2003.

OONK, Hans. Sustainable Landfill Foundation. **Literature Review: Methane from landfills**: Methods to quantify generation, oxidation and emission. [s.i.]: Oonkay!. 2010. 75 p.

Paro, A. C., da Costa, F. C., Coelho, S. T. **Estudo comparativo para o tratamento de resíduos sólidos urbanos**: Aterros Sanitários x Incineração. *Revista Brasileira de Energia*, XIV, 113 - 125, 2008.

PAVAN, Margareth de Cássia Oliveira. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos**: Avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil. 2010. 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Energia, EP / FEA / IEE / IF - USP, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2010.

PEREIRA, Carol Daemon Oliveira. **Como funciona um aterro sanitário**. 2010. Disponível em: <<http://caroldaemon.blogspot.com/2010/06/como-funciona-um-aterro-sanitario.html>>. Acesso em: 28 out. 2018.

PricewhitehouseCoopers (PwC). **Guia de orientação para adequação dos Municípios à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. [s.i.]: PwC Brasil, 2011. 138 p.

QIU, K.; HAYDEN, A.c.s. Performance analysis and modeling of energy from waste combined cycles. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 29, n. 14-15, p.3049-3055, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.04.003>.

RAPPORT, Joshua et al. **Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Produced Under Contract by: Municipal Organic Solid Waste**. California: California Integrated Waste Management Board, 2008. 90 p.

RODRIGUES, Marcelo do Carmo. **Economia, Energia e Meio Ambiente**: Elementos para a formulação de políticas públicas e análise de oportunidades de investimentos. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2008.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. Maria Julia Penteadó. Coordenadoria de Educação Ambiental. **Guia pedagógico do lixo**. 6. ed. São Paulo: SMA/CEA, 2011. 132 p. (Cadernos de Educação Ambiental).

SILVA, Tiago Rodrigo. **Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro**

**sanitário:** Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG. 2012. 164 f. Tese (Mestrado) - Curso de Ciências em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, 2012.

SLEZAK, Radoslaw; KRZYTEK, Liliana; LEDAKOWICZ, Stanislaw. Degradation of municipal solid waste in simulated landfill bioreactors under aerobic conditions. **Waste Management**, [s.l.], v. 43, p.293-299, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.017>.

TATARNIUK, Catherine. **The feasibility of Waste-to-energy in Saskatchewan based on waste composition and quantity**. 2007. 126 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Geologica, Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, 2007.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S. **Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues**, McGraw-Hill, Inc., New York, 949 p. 1993.

TEIXEIRA, E. N. et al. Potencial de minimização de resíduos sólidos domésticos em termos de matéria orgânica e embalagens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. **ABES**. Foz do Iguaçu: Anais, 1997.

THEMELIS, Nickolas J.; ULLOA, Priscilla A. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 32, n. 7, p.1243-1257, jun. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020>.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: UMA PROSPECTIVA. **Novos Estudos**, [s.l.], v. 79, p.47-69, nov. 2007.

United States Environmental Protection Agency. National Service Center for Environmental Publications (nscep). **Greenhouse Gas Emissions from Management of Selected Materials in Municipal Solid Waste**. [s.l.]: USEPA, 1998. 144 p. (Solid Waste and Emergency Response).

WORLD BANK (BANCO MUNDIAL). **Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean**. Janeiro de 2004.

WORLD BANK (Estados Unidos) (Ed.). **WHAT A WASTE: A Global Review of Solid Waste Management**. 15. ed. Washington: World Bank, 2012. 116 p. Disponível em: <[https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What\\_a\\_Waste2012\\_Final.pdf](https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf)>. Acesso em: 07 jun. 2018.

ZAMORANO, Montserrat et al. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 11, n. 5, p.909-922, jun. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2005.05.007>.