

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:  
ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE ITANHAÉM-SP.**

**LUIZ HENRIQUE TARGA GONÇALVES MIRANDA**

São Paulo  
2014

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:  
ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE ITANHAÉM-SP.**

Luiz Henrique Targa Gonçalves Miranda

Monografia apresentada à  
Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de  
Especialista em Energias  
Renováveis, Geração Distribuída  
e Eficiência Energética.

Área de Concentração: Energia.

Orientadora:  
Prof. (a) Dr. (a) Suani Teixeira Coelho

São Paulo  
2014

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Senhor, por oferecer caminhos e oportunidades para chegar até aqui;

A minha família, pelo carinho, amor, força e suor em prol de minha felicidade;

Aos amigos verdadeiros, por estenderem as mãos quando cai, sem me deixar desistir e por compartilhar os momentos de alegria e tristeza;

Aos mais experientes, por compartilhar saberes sobre a vida;

Aos mestres acadêmicos, por contribuir para minha formação como profissional competente e ético;

Aos colegas de escola e trabalho, por fortalecer o processo de aprendizagem dividindo e multiplicando conhecimento.

## Resumo

A postura da sociedade atual em meio ao rápido desenvolvimento tecnológico e econômico promove a utilização de produtos de menores ciclos de vidas, gerado mais embalagens descartáveis e com grandes desperdícios, o que resulta em uma enorme geração de resíduos. O Brasil gera aproximadamente 209 mil toneladas de resíduos diários, a grande questão é que apenas 190 mil toneladas são coletados e dentre esse montante apenas 60% possui uma destinação adequada. Ou seja, desse total de resíduos gerados 47% são descartados irregularmente. Não por menos, a capacidade dos sistemas tradicionais de disposição já está chegando a seu limite, necessitando de alternativas para a destinação final dos bens após seu consumo, para minimizar seu impacto ambiental e para aproveitar de forma mais eficiente estes resíduos gerados. Por esta preocupação que a Lei nº 12.305/10 (Política Nacional de Resíduos Sólidos) entrou em vigor obrigando que todos os municípios desenvolvessem um Plano de Gestão Integrado de Resíduos Sólidos. A maior preocupação é com municípios de pequeno e médio porte, onde não existe conhecimento e nem corpo técnico especializado sobre o assunto, necessitando de consultorias externas. Ainda existe outra questão envolvendo os municípios litorâneos do Estado de São Paulo, onde eles precisam percorrer centenas de quilômetros para dispor de maneira adequada os seus resíduos. Isso ocorre com o Município de Itanhaém, considerado de pequeno/médio porte, com a necessidade de dispor seu resíduo a 110 km de distância da geração, acarretando grandes gastos para o município. Pensando em uma forma de solucionar esta questão, o presente trabalho desenvolveu estudos de viabilidade técnica resultando na tecnologia de gaseificação como a que mais se adapta para o estudo de caso em questão, fornecendo a destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos, além de gerar energia elétrica capaz de abastecer 4.730 residências – o equivalente a 22% da população de Itanhaém.

Palavra chave: resíduos sólidos, aproveitamento energético, gaseificação.

## ABSTRACT

The attitude of society currently in the midst of rapid technological and economic development promotes the use of products of smaller cycles of life , generated more disposable packaging and large waste. The Brazil produces about 209 thousand tons of waste daily, the big issue is that only 190 thousand tonnes are collected and those collected from only 60 % hold a proper destination . In other words, that the total waste generated 47 % are discarded improperly. Not least, the ability of traditional systems of provision is already reaching its limit, requiring alternative for the disposal of assets after their consumption, to minimize their environmental impact and to take advantage of these residues more efficiently generated. Why this concern that Law No. 12,305 / 10 (National Policy on Solid Waste) came into force requiring all municipalities to develop a Plan of Integrated Solid Waste Management. The biggest concern is with the municipalities of small and medium where there is no knowledge and no specialized staff on the subject, requiring external consultants. There is still another issue involving the coastal municipalities of the State of São Paulo, where they need to travel hundreds of miles to dispose of their waste properly. This occurs with the Country of Itanhaém, considering small / medium sized, with the need to have their residue 110 km away from the generation, leading great expense to the county. Thinking of a way to solve this issue, this paper aimed and developed technical feasibility studies resulting in gasification technology as it fits more to the case study in question and provide the proper disposal of municipal solid waste and generate energy electricity capable of powering 4,730 homes - equivalent to 22 % of the population of Itanhaém.

Keyword: solid waste , energy recovery , gasification.

# Índice

<b>1. Introdução .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Objetivo .....</b>	<b>24</b>
2.1. Objetivo Geral .....	24
2.2. Objetivos Específicos.....	24
<b>3. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>25</b>
3.1. Resíduos Sólidos Urbanos.....	25
3.2. Tecnologias para o tratamento ou a disposição final dos resíduos sólidos.....	34
3.2.1. Reciclagem + complemento .....	34
3.2.2. Compostagem + complemento.....	35
3.2.3. Coleta Seletiva. ....	39
3.2.4. Aterros Sanitários .....	41
3.2.5. Biodigestores; .....	45
3.2.6. Incineração.....	48
3.2.7. Pirólise; .....	54
3.2.8. Gaseificação; .....	56
3.2.9. Plasma;.....	66
3.2.10. Coprocessamento em forno de Clínquer;.....	69
3.3. Aproveitamento energético dos RSU .....	70
3.4. Legislações .....	76
3.5. Tecnologia para o controle de emissões .....	81
<b>4. Estudo de caso do aproveitamento energético dos RSU no município de Itanhaém/SP .....</b>	<b>85</b>
4.1. Desenvolvimento Metodológico.....	85
4.2. Resultados .....	88
4.2.1 Geração e Análise gravimétrica dos resíduos do município de estudo... ..	92
4.2.2. Escolha da alternativa para o aproveitamento energético.....	95
4.2.3. Escolha da área de implantação.....	102
4.2.4. Planta de Gaseificação.....	104
4.2.5. Aproveitamento energético do sistema.....	109
<b>5. Considerações Finais.....</b>	<b>113</b>
<b>6. Referência Bibliográfica.....</b>	<b>116</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 - Geração de resíduos sólidos urbanos.....	12
Figura 2 - Coleta de resíduos sólidos urbanos.....	12
Figura 3 - Destinação final dos resíduos sólidos urbanos no cenário brasileiro	12
Figura 4 - Destinação dos resíduos sólidos no Estado de São Paulo .....	13
Figura 5 - Representação da matriz energética brasileira .....	19
Figura 6 – Consumo residencial de eletricidade x renda per capita – comparação internacional. ....	20
Figura 7 – Consumo total de eletricidade, 2013-2050 (TWh).....	20
Figura 8 – Perfil da frota de veículos leves por combustível. ....	22
Figura 9 - Mapa de fluxo de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo. .....	23
Figura 10 - Esquema ilustrativo da poluição causada pela interação do meio com o lixão. ....	30
Figura 11 - Esquema ilustrativo do tratamento e dos impactos gerados pela interação do meio com o aterro sanitário. ....	31
Figura 12 – Composição Gravimétrica dos Resíduos Gerados no Município de São Paulo.....	35
Figura 13 - Composteira disposta em forma de pilhas. ....	36
Figura 14 - Composteira disposta em forma de leira.....	36
Figura 15 - Distribuição dos Municípios com Iniciativas de Coleta Seletiva (%) .....	40
Figura 16 - Distribuição das entidades de catadores de materiais recicláveis cadastrados no CaDEC.....	41
Figura 17 - Destinação final de RSU no Brasil (t/dia) .....	42
Figura 18 – Esquema ilustrativo do preparo e terreno e finalização de um aterro sanitário.....	44
Figura 19 - Esquema ilustrativo do tratamento e dos impactos gerados pela interação do meio com o aterro sanitário. ....	45
Figura 20 - Modelos de biodigestor: a) Modelo indiano, b) modelo chinês. ....	47
Figura 21 - Incinerador com forno em grelha .....	51
Figura 22 – Incinerador de leito fluidizado.....	52
Figura 23 – Forno rotativo .....	53
Figura 24 - Reator pirolítico. ....	55
Figura 25 – Teor de umidade em relação ao PCI do gás de síntese. ....	60
Figura 26 - Gaseificador de fluxo ascendente.....	61
Figura 27 - Gaseificador de fluxo descendente.....	61
Figura 28 - Gaseificador Leito Fluidizado Borbulhante.....	62
Figura 29 – Gaseificador Leito Fluidizado Circulante .....	62
Figura 30 - Gaseificador Leito de Arraste.....	63
Figura 31 - Matriz mundial de gaseificação .....	65
Figura 32 - Produto final na conversão dos combustíveis da gaseificação – Cenário Mundial. ....	65

Figura 33 - Tipos de gaseificadores e suas potências geradoras. ....	66
Figura 34 - Incinerador do tipo Plasma. ....	68
Figura 35 - Tocha de plasma.....	68
Figura 36 - Representação esquemática do ciclo Rankine de um sistema simples de potência a vapor.....	73
Figura 37 - Representação esquemática do ciclo Brayton e a geração de energia a partir de turbina a gás.....	74
Figura 38 - Ilustração esquemática das etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto .....	75
Figura 39 - Funcionamento do motor Diesel .....	76
Figura 40 – Tipos de coletores relacionados com a melhor eficiência para determinados tipos de poluentes.....	82
Figura 41 – Vista geral da estação de transbordo em Itanhaém.....	91
Figura 42 – Trajeto da destinação dos resíduos do município de Itanhaém – SP. ....	92
Figura 43 – Quantidade total de habitantes no município de Itanhaém, por ano. ....	94
Figura 44 – Composição física do lixo do município de Itanhaém.....	95
Figura 45 – Projeção da quantidade de RSU gerados, captados e destinados. ....	96
Figura 46 – Foto com delimitação da circunferência de 20km. ....	100
Figura 47 – Delimitação dos bairros de Itanhaém. ....	103
Figura 48 – Número de habitantes por bairro.....	104
Figura 49 - Unidade de recepção do RSU e produção do CDR.....	107
Figura 50 - Gaseificador na planta protótipo da Carbogas.....	107
Figura 51 - Unidade geradora de energia elétrica – Motogerador.....	107

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens das tecnologias de tratamento de RSU.....	16
Tabela 2 – Domicílios consumidores por faixa de consumo (2013-2050) .....	21
Tabela 3 – Fatores responsáveis pela alteração da composição e do volume dos resíduos sólidos urbanos.....	27
Tabela 4 - Geração média per capita de resíduos sólidos urbanos no Brasil. .	28
Tabela 5 - Modelo causal sintético: potenciais impactos das situações dos serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos sobre a saúde pública. ....	29
Tabela 6 - Morbidade por doença relacionada ao saneamento básico (internações por 10 mil habitantes), segundo faixa etária e as grandes regiões geográficas.....	32
Tabela 7 - Quantidade de municípios por tipo de destinação adotado (Cenário 2013). .....	33
Tabela 8 - Materiais com tecnologia economicamente viável e amplo mercado para a reciclagem.....	34
Tabela 9 - Padrões de qualidade de composto a ser utilizado como fertilizante. ....	39
Tabela 10 - Poder calorífico inferior (PCI) de alguns RSU .....	48
Tabela 11 – Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores.....	50
Tabela 12 - Efeitos da temperatura na pirólise de RSU. ....	55
Tabela 13 - Características dos gaseificadores.....	57
Tabela 14 – Composição média do gás de síntese.....	59
Tabela 15 - Vantagens e desvantagens dos tipos de gaseificadores.....	64
Tabela 16 – Destinação final dos RSU coletados em diversos países.....	70
Tabela 17 – Estimativas da conservação potencial de energia elétrica a partir da reciclagem.....	72
Tabela 18 - Padrões nacionais de qualidade do ar .....	79
Tabela 19 – Classificação do porte do município de acordo com a população residente.....	89
Tabela 20 - Número de municípios segundo as Unidades da Federação e classes de tamanho da população dos municípios - Brasil – 2000. ....	89
Tabela 21 - Classificação quanto ao porte do município em relação ao número da população residente - Brasil – 2000. ....	89
Tabela 22 – Municípios de pequeno porte pertencentes em cada estado. ....	90
Tabela 23 – Resíduos gerados nos anos de 2009, 2010, 2011, 2012 e 2013. ....	93
Tabela 24 – Composição física do lixo do município de Itanhaém.....	94
Tabela 25 – Porcentagem mensal de geração para os anos de 2012 e 2013. ....	97
Tabela 26 – Geração, coleta e destinação de RSU média diário.....	98
Tabela 27 – Composição física dos resíduos gerados para o ano de 2013 e 2034. ....	98

Tabela 28 - Estimativas da quantidade mínima de RSU e geração de energia elétrica para as tecnologias citadas. ....	100
Tabela 29 – Tecnologias de escolha.....	101
Tabela 30 – Resíduos retirados pelas cooperativas, com valor de mercado, pelo sistema de triagem manual e mecanizado. ....	108
Tabela 31 – Resumo das premissas e resultados.....	112

## 1. Introdução

A postura da sociedade atual, convivendo com a imposição de padrões de consumo e crescente utilização de produtos com menores ciclos de vida e de embalagens descartáveis, tem gerado uma grande quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU). A capacidade dos sistemas tradicionais de disposição já está chegando a seu limite, necessitando de alternativas para a destinação final dos bens após seu consumo, para minimizar seu impacto ambiental (Gonçalves, Tanaka e Amedomar, 2013).

Ainda assim, com o crescimento populacional cada vez mais intensificado e as ocupações desordenadas e periféricas, o planejamento de gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos se faz de forma precária, acarretando na criação de lixões e, quando ciente pelo poder público, aterros controlados, transformando a questão do lixo urbano em um dos grandes desafios ambientais contemporâneos.

Segundo dados da ABRELPE (2013), a geração diária de resíduos no cenário brasileiro teve acréscimo de 4,1%, entre 2012 e 2013, saindo de 201.058 toneladas para 209.280 toneladas (Figura 1). Evolução semelhante ocorreu com a coleta destes resíduos, com crescimento de 4,4% (Figura 2). Apesar disso, existem cerca de 20.000 toneladas de resíduos gerados diariamente sem sua coleta, cujo destino é desconhecido, sendo um deles provavelmente os lixões. Vale ressaltar que mesmo os RSU coletados, não necessariamente possuem sua destinação correta, conforme Figura 3, onde é possível verificar que 41,74% dos resíduos gerados no Brasil possuem destinação inadequada.



Figura 1 - Geração de resíduos sólidos urbanos.

Fonte: ABRELPE, 2013.

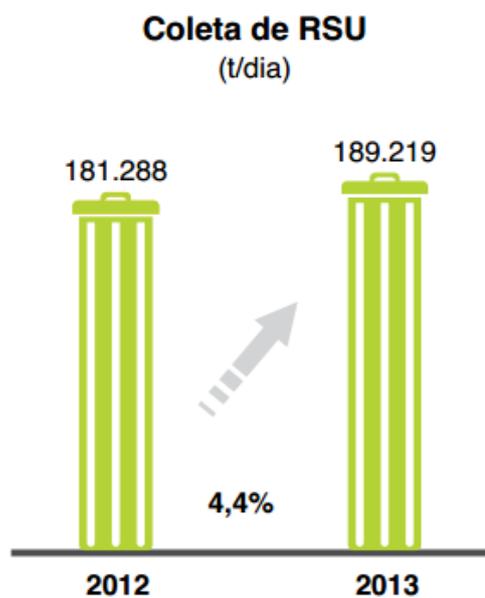


Figura 2 - Coleta de resíduos sólidos urbanos.

Fonte: ABRELPE, 2013.

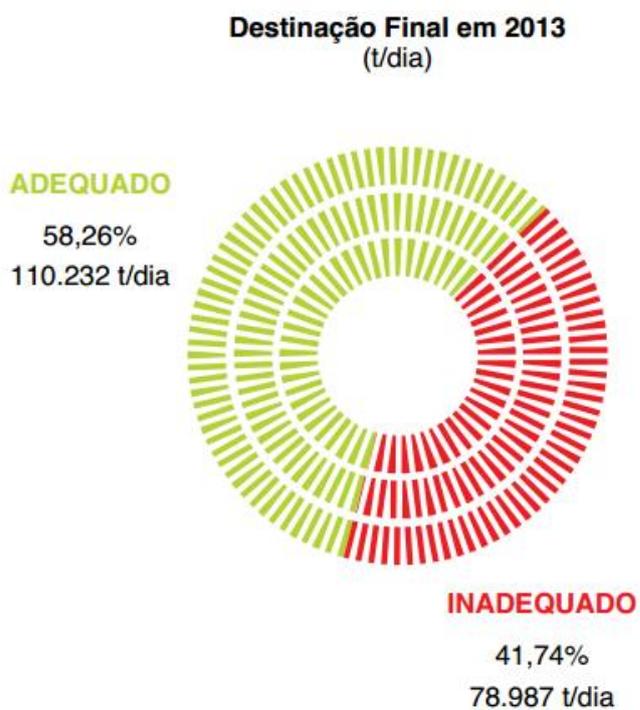


Figura 3 - Destinação final dos resíduos sólidos urbanos no cenário brasileiro

Fonte: ABRELPE, 2013.

Ao analisar o Estado de São Paulo, pode-se observar (Figura 4) uma acentuada melhora nessa situação da destinação dos resíduos, com aproximadamente 25% dos resíduos sendo destinados de forma incorreta para aterros controlados ou mesmo lixões (ABRELPE, 2013). Mesmo que em menor quantidade com relação ao cenário brasileiro, a destinação correta desses resíduos é preocupante.

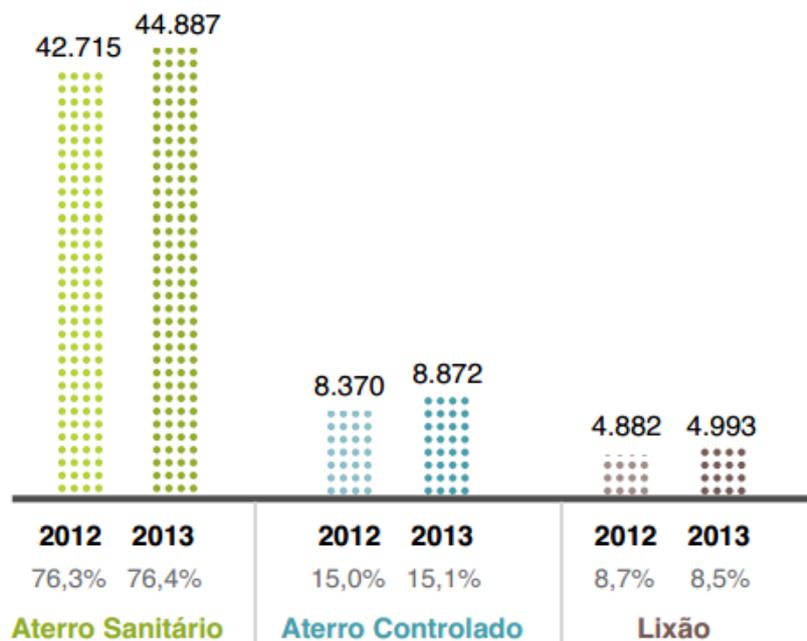


Figura 4 - Destinação dos resíduos sólidos no Estado de São Paulo

Fonte: ABRELPE, 2013.

Todo esse resíduo lançado em lixões e aterros controlados causam grandes impactos para a saúde pública e para o meio ambiente, com as emissões de gases nocivos e de efeito estufa, degradação do solo e poluição dos corpos hídricos pelo chorume gerado, além da proliferação de vetores. Sendo que, pelo menos, deveriam ser destinados para aterros sanitários, onde possuem todo o controle e monitoramento de geração, tratamento e emissão de poluentes.

Devido a esta preocupação que a nova Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) trata sobre “diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os

perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis”.

Desta forma, ela estabelece a responsabilidade direta e indireta pelo gerenciamento dos resíduos sólidos. Nesses termos, a contratação de serviço de coleta, armazenamento, transporte, transbordo, tratamento, destinação e disposição final de resíduos sólidos, não isenta os responsáveis pela elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da responsabilidade por danos que vierem a ser provocados pelo gerenciamento inadequado dos mesmos. Com isso, o município também arcará por qualquer dano ao meio ou a terceiros pelo processo de destinação do resíduo gerado no seu território.

Visando esta disposição final de forma correta, os municípios possuem algumas alternativas para fazê-lo, sendo algumas em conjunto com alternativas complementares e outras de forma única, sendo elas:

- Reciclagem + complemento;
- Compostagem + complemento;
- Aterros Sanitários;
- Biodigestores;
- Incineração;
- Pirólise;
- Gaseificação;
- Plasma;
- Coprocessamento em forno de Clínquer.

A reciclagem é uma realidade adotada por grande maioria dos municípios, seja por “*ecopontos*”, coleta seletiva ou pelos catadores, uma vez que existe valor agregado para esses resíduos, gerando uma fonte de renda para o município ou comunidade, além do ganho ambiental visto que os resíduos serão introduzidos em outro processo como insumo ou matéria prima.

A compostagem, de forma sucinta, trata-se da decomposição da matéria orgânica, podendo ser utilizada como adubo pós-processamento.

Ambas podem funcionar em conjunto com os resíduos orgânicos dispostos na composteira e os inorgânicos no processo de reciclagem, ou ainda com uma ou mais das tecnologias mencionadas.

Já o aterro sanitário é a forma mais comumente utilizada para a destinação dos resíduos sólidos, que por sua vez estão cada vez mais sobrecarregados. Com a escassez de área para a implantação de novos, necessitam de destinações de formas alternativas, para que somente o irrecuperável e o não aproveitável possam ser destinados para este fim.

As demais formas de destinação dos RSU são tecnologias disseminadas internacionalmente, porém recentes no cenário brasileiro, com apenas algumas plantas instaladas para este fim. Sendo adotadas em menor escala, principalmente pelos elevados custos da tecnologia, pois trata-se de equipamentos importados, tornando até economicamente inviável a implantação em alguns municípios principalmente por uma questão de escala.

Ainda existem outras, no caso da incineração, mesmo com o conhecimento desta tecnologia com implantações em grande escala, muitos projetos não estão sendo concretizados, inviabilizando-os, principalmente devido a elevados custos de investimento e o repúdio da comunidade pela existência de registros históricos em épocas onde o controle das emissões atmosféricas e a preocupação ambiental eram mínimos, prejudicando diversas comunidades residentes do entorno. Esta tecnologia pode ser uma grande alternativa para a destinação dos resíduos, já que a redução do volume original pode ser de 85% a 90% e ainda as cinzas geradas podem servir como matéria-prima para a produção de cimento do tipo Portland.

Posteriormente serão abordadas conceituações mais específicas das formas de disposição dos RSU mencionados.

Pelo fato de envolver vários pontos que devem ser analisados, a fim de avaliar as alternativas mais sustentáveis, não existe uma solução de destinação dos resíduos sólidos urbanos que possa ser indicada como a melhor para todas as cidades e regiões. Deste fato nasce a necessidade de uma avaliação caso a caso (Lanziani, 2013).

Na Tabela 1, a seguir, são apresentadas as formas de disposição mencionadas, suas vantagens e desvantagens.

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens das tecnologias de tratamento de RSU.

Processo	Vantagens	Desvantagens
Aterro Sanitário	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Domínio da tecnologia para construção e manutenção.</li> <li>- Retenção da emissão de gases de efeito estufa e possibilidade de recuperação energética</li> <li>- Retenção e tratamento do chorume</li> <li>- Minimização dos riscos à saúde pública</li> <li>- Redução de catadores no local</li> <li>- Decomposição controlada dos resíduos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto investimento</li> <li>- Necessidade de grandes espaços</li> <li>- Gastos com logística</li> <li>- Demora na processo de tratamento</li> <li>- Baixa redução do volume</li> <li>- Custos com a operação e o monitoramento</li> </ul>
Compostagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução dos resíduos a serem encaminhados para aterros sanitários</li> <li>- Redução da logística</li> <li>- Aumento da vida útil dos aterros</li> <li>- Maior envolvimento da comunidade</li> <li>- Possibilidade de geração de renda a partir da venda do adubo</li> <li>- Melhoria das condições do solo que recebe o composto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comprometimento necessário dos geradores na segregação dos resíduos</li> <li>- Necessidade de pessoal para a gestão do processo</li> <li>- Possibilidade de aversão por parte da comunidade</li> </ul>
Biodigestor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tratamento de diversos tipos de resíduos orgânicos</li> <li>- Redução de logística dos resíduos, se instalado de forma descentralizada</li> <li>- Produção de energia</li> <li>- Aumento da vida útil dos aterros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não aceitação pela comunidade</li> <li>- Em lugares frios, há aumento do tempo de decomposição e redução da produção de biogás</li> <li>- O biogás pode reduzir a vida útil dos equipamentos que o utilizam, se não for reduzido o teor de compostos de enxofre</li> <li>- Necessidade de manejo e monitoramento</li> </ul>
Incineração	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta redução do volume dos resíduos</li> <li>- Possibilidade de descentralização do tratamento e redução da logística</li> <li>- Redução de espaço em aterros</li> <li>- Geração de energia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risco de haver poluição atmosférica</li> <li>- Geração de gases de efeito estufa</li> <li>- Possibilidade de encaminhamento de resíduos passíveis de reciclagem, por facilidade</li> <li>- Necessidade de equipamentos de qualidade</li> <li>- Monitoramento e operação por pessoal especializado</li> </ul>

Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens das tecnologias de tratamento de RSU.

Continuação...

Processo	Vantagens	Desvantagens
Pirólise	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução do volume de resíduo</li> <li>- Geração de combustível para produção de energia</li> <li>- Descentralização do tratamento</li> <li>- Redução da logística</li> <li>- Redução de espaço em aterros sanitários</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risco em relação à poluição atmosférica</li> <li>- Possibilidade de encaminhamento de resíduos passíveis de reciclagem, por facilidade</li> <li>- Necessidade de equipamentos de qualidade</li> <li>- Monitoramento e operação por pessoal especializado</li> <li>- Alto custo dos equipamentos</li> </ul>
Gaseificação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geração de gás combustível para produção de energia</li> <li>- Redução do volume de resíduo</li> <li>- Possibilidade de descentralização do tratamento e redução da logística</li> <li>- Redução da necessidade de espaço em aterros sanitários</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riscos em relação à poluição atmosférica</li> <li>- Possibilidade de encaminhamento de resíduos passíveis de reciclagem, por facilidade</li> <li>- Necessidade de equipamentos de qualidade</li> <li>- Monitoramento e operação por pessoal especializado</li> <li>- Alto custo dos equipamentos</li> </ul>
Plasma	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta redução do volume dos resíduos</li> <li>- Tratamento de diversos tipos de resíduos</li> <li>- Geração de gás combustível para produção de energia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto custo</li> <li>- Necessidade de pessoal especializado</li> </ul>
Coprocessamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilização de outros processos calórico</li> <li>- Redução do volume de resíduo</li> <li>- Destinação de um <i>blend</i> de resíduo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de um processamento existente</li> <li>- Negociação do encaminhamento</li> </ul>

Fonte: Junior; Saiani; Dourado, 2013.

Conforme apresentado na Tabela 1 (vantagens e desvantagens dos sistemas), nas seis últimas tecnologias existe a possibilidade do aproveitamento dos gases gerados da degradação do resíduo (Aterros Sanitário, Biodigestores, Pirólise e Gaseificação) e posteriormente sua queima, ou pelo aproveitamento térmico (Incineração, Plasma e Coprocessamento), por troca de calor, para a geração de energia como um dos produtos finais do processo.

Esse aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, não só agregaria valor ao seu ciclo de vida, mas também contribuiria para o preocupante cenário elétrico atual brasileiro.

Pimentel (2014) aponta alguns fatores que intensificam e justificam essa preocupação, como:

- Sendo a nossa principal matriz energética proveniente das hidroelétricas, nos últimos períodos houve uma situação hidrológica desfavorável, cujo armazenamento das hidroelétricas permanecerem baixos;
- Obras atrasadas e não executadas;
- Muitas das hidroelétricas projetadas, das que estão em obras ou finalizadas, são “a fio d’água”. Ou seja, existe uma contextualização na redução dos impactos ambientais, mas, por outro lado, não possuem armazenamento;
- Térmicas de complementação operando na base, sendo que deveriam atuar apenas no pico ou emergencialmente, mostrando que nossa matriz energética alcançou tal demanda que aqueles geradores que deveriam sanar essa necessidade não estão de acordo.

Estas preocupações mencionadas por Pimentel (2014) reflete a grave situação atual do cenário energético brasileiro, onde passa por grandes crises de abastecimento e financeiras, desencadeados por drásticas secas - reduzindo consideravelmente os volumes dos reservatórios das hidroelétricas -, falta de planejamento e ainda por recordes de demanda.

Conforme Figura 5, a matriz energética em 2012 era representada por 76,9% de energia hidráulica, reduzindo para 70,6% em 2013 (BEN, 2014).

Acredita-se que o Balanço Energético para o ano base de 2014 essa porcentagem seja menor ainda.

A solução para atender a demanda exigida foi o acionamento das termelétricas, que segundo o Balanço Energético Nacional (2014), teve crescimento de 31% na geração de energia para o ano base 2013, o que deve representar muito mais neste ano.

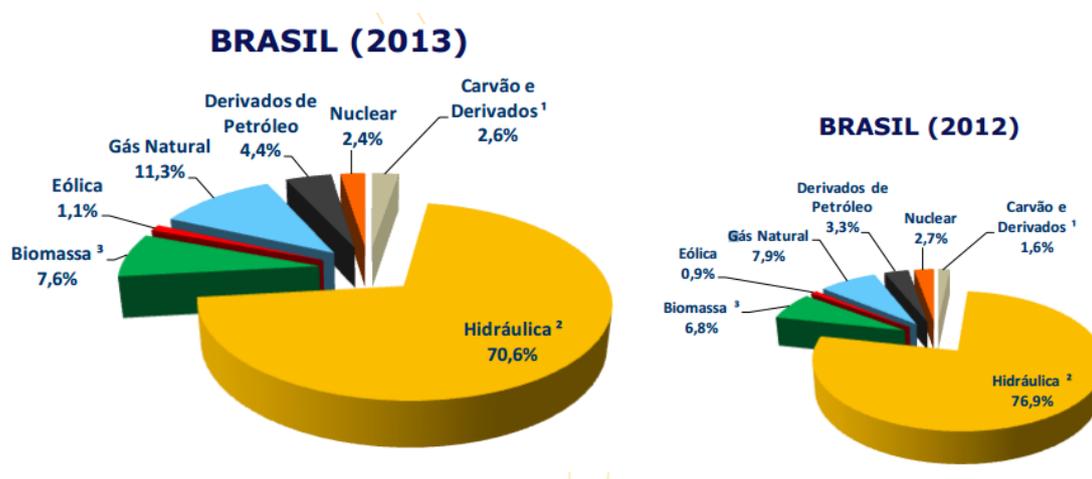


Figura 5 - Representação da matriz energética brasileira

Fonte: BEN, 2014.

Pelas condições hidrológicas desfavoráveis, a falta de planejamento, falta de incentivos em outras fontes renováveis e a necessidade do atendimento da demanda com o acionamento das termelétricas, transformando-as em base o que era para ser apenas geração de pico ou emergenciais, proporcionaram gastos, apenas para o ano de 2014, que poderão alcançar 26,8 bilhões de reais. Uma vez que a substituição da matriz hidráulica (onde a matéria prima para a geração de energia é gratuita) para a térmica gera gastos com a queima do combustível (seja ele diesel, óleo ou gás natural).

Valor este acumulado, com a geração de energia pelas térmicas, nos anos 2013 e 2014 em, aproximadamente, 45 bilhões de reais.

Visto que é fato essa preocupação com o cenário energético e prejudicial a todos da nação, cabe decidir no incentivo da geração alternativa e consideradas renováveis, além da injeção do autoprodutor e a geração distribuída, ou se esta será a nova configuração da matriz energética nacional. O que acarretaria em mais gastos, já que estudos realizados pelo EPE apontam tendência de crescimento consideráveis no consumo per capto de

energia elétrica, conforme se pode observar nas Figuras 6 e 7. Tendência essa projetada para alcançar países desenvolvidos, uma vez que o país está em franco crescimento.

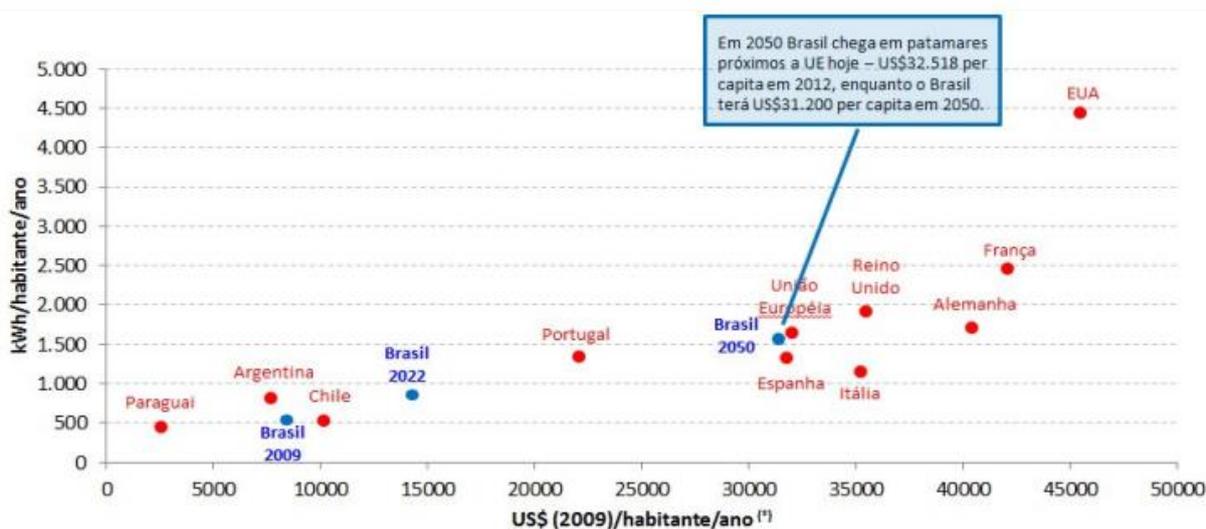


Figura 6 – Consumo residencial de eletricidade x renda per capita – comparação internacional.

Fonte: EPE, 2014.

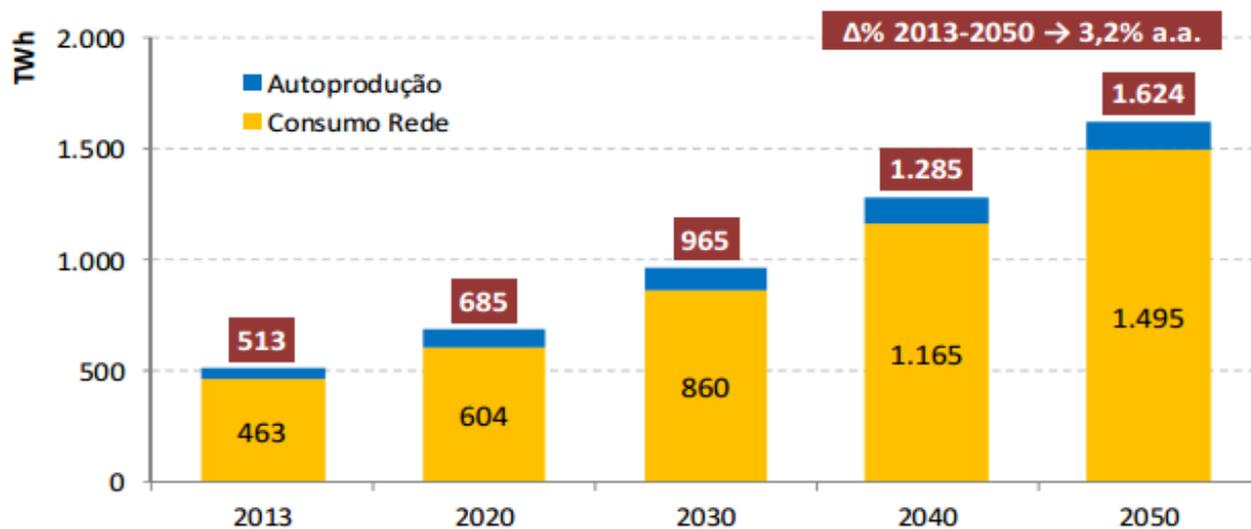


Figura 7 – Consumo total de eletricidade, 2013-2050 (TWh)

Fonte: EPE, 2014.

Vale destacar que essa projeção considera ganhos de eficiência energética, aumento da participação do aquecimento solar de água, introdução de equipamentos eletroeletrônicos com capacidade de autoatendimento energético (principalmente de fonte solar), resfriamento solar, introdução e expansão do “*smart grid*” e o expressivo crescimento da autoprodução.

Mesmo que o setor industrial seja o maior consumidor energético, o setor residencial apresentará uma significativa expansão no consumo de energia, o que já vem acontecendo conforme apresentado no Balanço Energético Nacional (2014), onde este apresentou crescimento de 6,2%, contra os 0,2% do setor industrial, e os demais setores somados (público, agropecuária, comercial e transporte) apresentou variação positiva de 4,8%.

Esse acréscimo no setor residencial é principalmente motivado pelo poder econômico familiar, com aquisição e troca de equipamentos eletroeletrônicos, conforme se pode observar na Tabela 2 onde há troca dos consumidores de baixo consumo para consumos maiores.

Tabela 2 – Domicílios consumidores por faixa de consumo (2013-2050)

<b>Faixa de consumo (kWh)</b>	<b>2013</b>	<b>2050</b>
0-30	6.889	985
30-100	18.044	19.693
100-200	18.581	31.509
200-300	13.574	21.170
300-400	2.783	12.308
400-500	1.265	6.154
500-1000	1.474	4.923
>1000	336	1.723
<b>Total</b>	<b>62.947</b>	<b>98.466</b>

Fonte: EPE, 2014.

Outro setor que talvez possa surpreender e ainda não visto como um potencial de consumo será o de transporte. Essa alteração será mais perceptível assim que a participação dos veículos elétricos e híbridos ingresse de maneira significativa na frota veicular, visto a projeção na Figura 8.

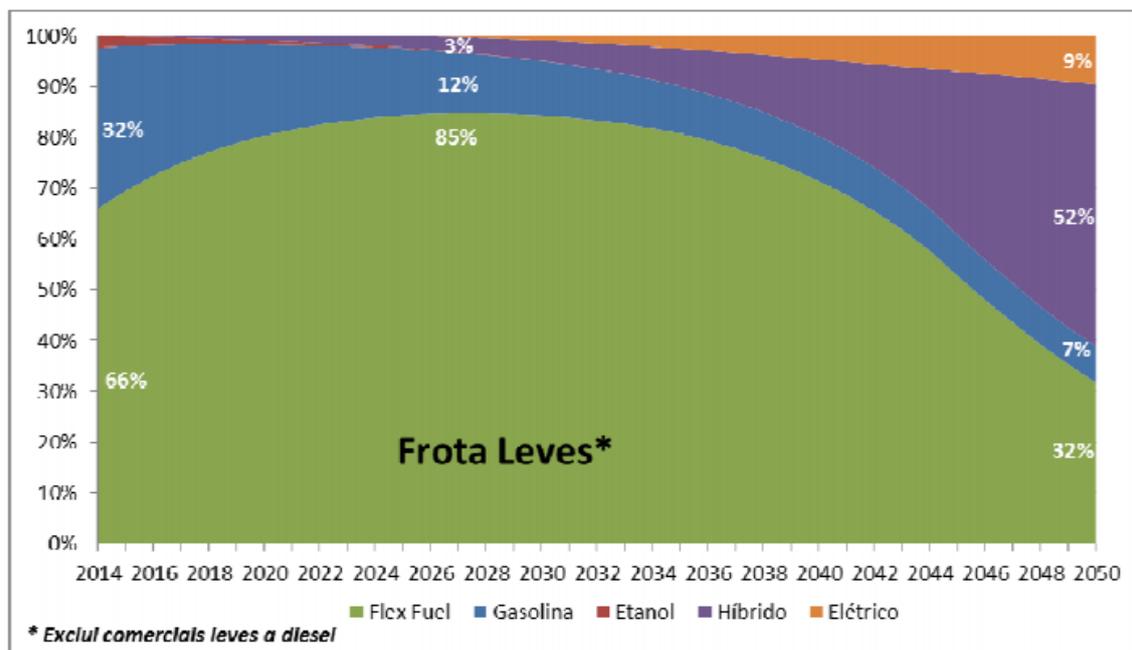


Figura 8 – Perfil da frota de veículos leves por combustível.

Fonte: EPE, 2014.

Com esse tipo de geração distribuída, os municípios contribuiriam para a redução das perdas de transmissão e distribuição, aumento da estabilidade do sistema, diminuição da dependência do parque gerador despachado de forma centralizada, mantendo reservas próximas aos centros de carga, o que eliminaria a sobrecarga no sistema nacional.

A partir dessa oportunidade do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbano, com as tecnologias disponíveis no mercado e a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o presente trabalho entra nesta discussão e a junção destas ideias para serem aplicadas, principalmente, em municípios de pequeno porte, uma vez que são os mais afetados pela falta de gestão, gerenciamento dos resíduos e corpo técnico especializado.

Com a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o histórico problemático da gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos na região litorânea do Estado de São Paulo (com diversas notificações, multas do poder público e a interdição de diversos lixões e aterros controlados nestas regiões, obrigando-os a destinar seus resíduos a quilômetros de distância da sua origem, conforme Figura 9), objetivou este trabalho a elaboração de um estudo de destinação

com o aproveitamento energético em um desses municípios localizados no litoral de São Paulo, em específico o município de Itanhaém.

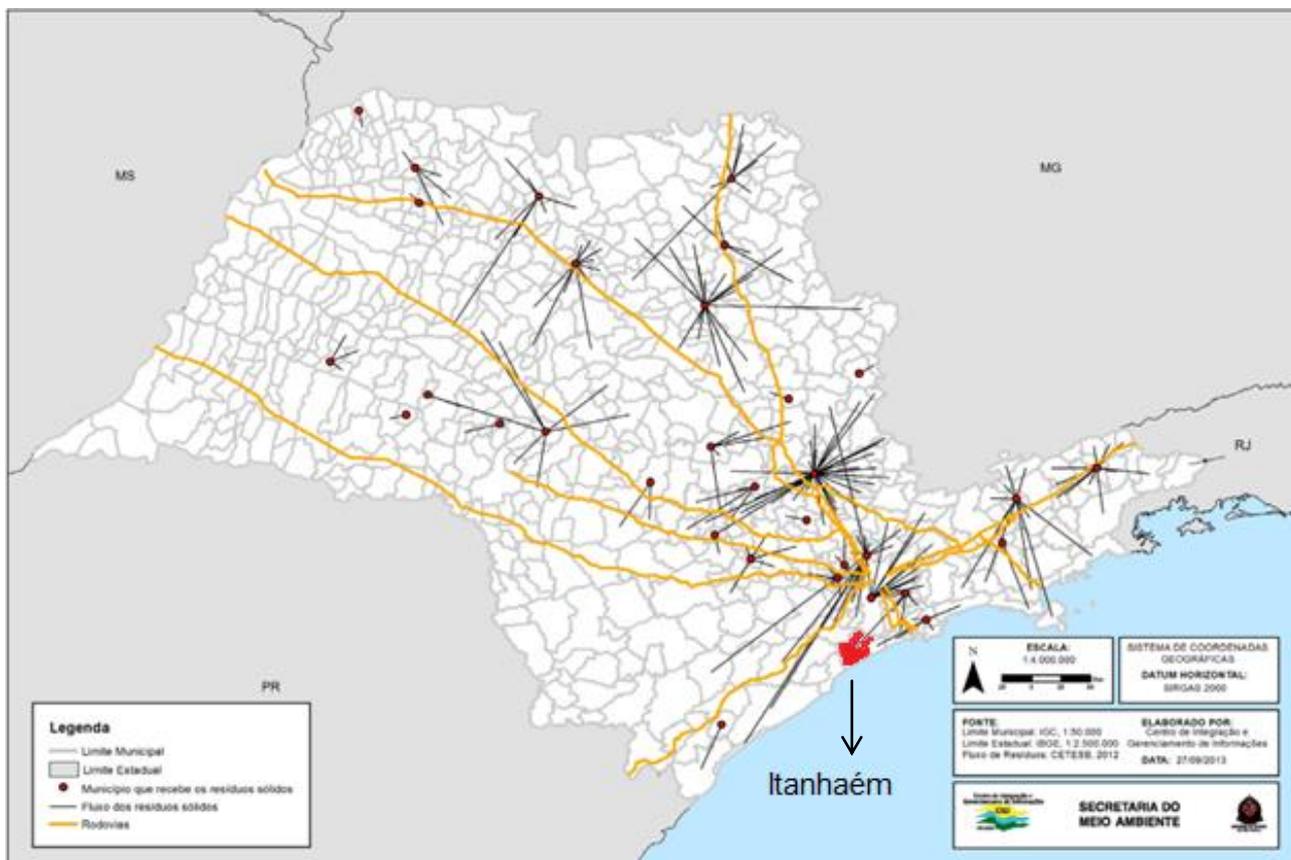


Figura 9 - Mapa de fluxo de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo.

Fonte: SMA/CPLA (2013).

Neste contexto, esta monografia se divide em seis capítulos, sendo o primeiro, no caso este, a introdução do trabalho; o segundo capítulo contempla os objetivos do trabalho; o terceiro a revisão bibliográfica com panorama sobre os resíduos sólidos urbanos, as tecnologias de tratamento e disposição final destes resíduos, o aproveitamento energético, legislações vigentes e tecnologias para o controle de emissões; já o quarto apresenta o desenvolvimento metodológico do projeto e os resultados obtidos; o quinto as considerações finais da monografia; e, por fim, o sexto capítulo com as referências bibliográficas utilizadas.

## **2. Objetivo**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo desta monografia é analisar a viabilidade da implantação de um sistema de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos no município de Itanhaém-SP, discutir as dificuldades existentes e realizar propostas.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Analisar o cenário de geração de resíduos urbanos no Estado de São Paulo e no município de escolha.
- Identificar as alternativas tecnológicas relacionadas ao tratamento e geração dos resíduos sólidos.
- Analisar o estágio de maturação das tecnologias de escolha
- Verificar a viabilidade da tecnologia de escolha com o cenário de geração do município.
- Identificar os potenciais municípios para a replicação do estudo de caso.
- Apresentar propostas de políticas.

### **3. Revisão Bibliográfica**

#### **3.1. Resíduos Sólidos Urbanos.**

A definição de resíduo, ou vulgarmente denominado de lixo, é amplamente discutido entre diversos autores, de diversos ramos de atividade, conceituando-o de diferentes formas.

Dentre várias definições, o termo mais utilizado para esta definição é tudo aquilo que não se possui mais valor agregado ao produto final.

Não há apenas uma definição sobre o lixo, mas várias. 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 (Penteado, 2011).

Enquanto o lixo para alguns se resume àquilo que não tem valor, ou mesmo utilidade, pode por outro ângulo passar a ser tratado como substrato, ou mesmo, matéria prima, se considerado seu potencial energético (Nascimento, 2012).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2008), define resíduo como termo que engloba os diversos artefatos utilizados pelo homem que tenha perdido sua utilidade para cumprir o fim a que foram destinados inicialmente.

De forma normativa, segundo a ABNT NBR 10.004/2004, os resíduos sólidos são “resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Os resíduos sólidos definidos como resto das atividades humanas, são considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. A classificação de resíduos pode ser feita, ainda, de acordo com a fonte geradora (domiciliar, comercial, industrial, proveniente de atividades públicas, de vias públicas, de portos, aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários, serviço de saúde, urbano, radioativos e agrícolas) e com a sua degradabilidade (facilmente degradáveis, moderadamente degradáveis, dificilmente degradáveis e não-degradáveis) (FARIA, 2002).

No caso dos RSU a NBR 10.004 da ABNT classifica-os em:

Classe I – Perigosos: São aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

Classe II – Não inertes: São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos – ou Classe III – Inertes.

Classe III – Inertes: São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10.007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme teste de solubilização segundo a norma NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores

aos padrões de potabilidade da água, conforme listagem nº 8 (Anexo H da NBR 10.004), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Os materiais mais comumente presentes nos RSU são:

Restos de alimentos, papéis, papelão, plásticos, borrachas, couro, isopor, embalagens metalizadas, fraldas descartáveis infantis e geriátricas, absorventes higiênicos, vidros, metais, entulhos, resíduos de jardins, tecidos, madeiras, pilhas, baterias, lâmpadas, eletroeletrônicos, materiais volumosos e outros (FEMA, 2012).

A composição e fração destes materiais presentes nos RSU podem variar de acordo com a densidade demográfica, fatores socioeconômicos, climatológicos e eventuais datas festivas. A Tabela 3 apresenta as influências com relação ao tipo de material e volume representativos para estes fatores.

Tabela 3 – Fatores responsáveis pela alteração da composição e do volume dos resíduos sólidos urbanos.

Fatores		Influência
Demográficos	População Urbana	quanto maior a população urbana, maior a geração per capita
Sócioeconômicos	Nível cultural	quanto maior o nível cultural, maior a incidência de materiais recicláveis e menor a 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)

...continuação

Tabela 3 - Fatores responsáveis pela alteração da composição e do volume dos resíduos sólidos urbanos.

...continuação

	Fatores	Influência
Climáticas	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/Páscoa	aumento de embalagens (papel/papelão, plásticos maleáveis e metais) aumento de matéria orgânica
	Dia dos Pais/Mães	aumento de embalagens (papel/papelão e plásticos maleáveis e metais)
	Férias Escolares	esvaziamento de áreas da cidade em locais não turísticos aumento populacional em locais turísticos

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de FEAM (2012).

Monteiro (2001) apresenta a geração per capita de RSU no Brasil, relacionado com o tamanho da cidade e o número de habitantes, ver Tabela 4.

Tabela 4 - Geração média per capita de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

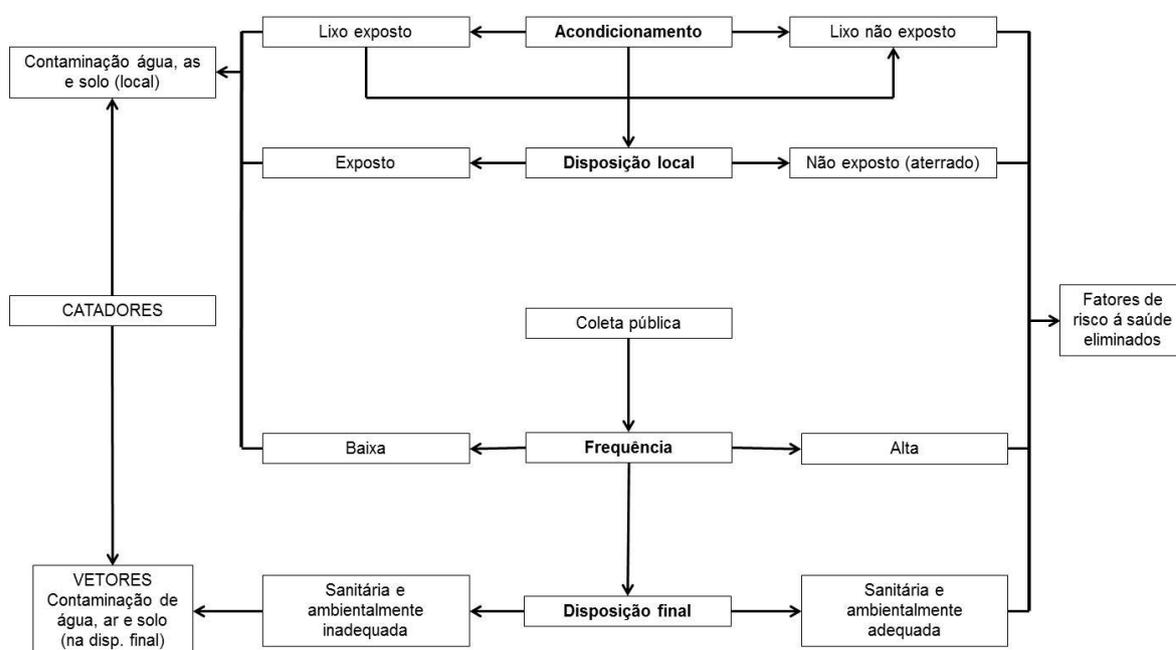
Tamanho da cidade	População urbana (hab.)	Geração per capita (kg/hab./dia)
Pequena	Até 30 mil	0,5
Média	30 mil a 500 mil	0,50 a 0,80
Grande	500 mil a 5 milhões	0,80 a 1,00
Megalópole	> 5 milhões	> 1,00

Fonte: Monteiro *et al.* (2001)

A maior preocupação na atualidade é com a destinação correta destes resíduos mediante aos problemas de saúde pública e poluição ambiental, preconizados por este descaso.

A Tabela 5 apresenta um modelo por meio dos quais as situações dos serviços de manejo de resíduos sólidos urbanos podem afetar a saúde. Primeiramente, deve-se apontar que os resíduos sólidos não coletados tendem a ser queimados, enterrados ou jogados em terrenos baldios, lagos, rios e mares. Conseqüentemente, poluem o ar, os solos e os recursos hídricos, afetando a saúde. Ainda podem poluir estes três citados por meio dos gases e do chorume decorrentes da decomposição dos materiais (Júnior; Saiani; Dourado, 2013).

Tabela 5 - Modelo causal sintético: potenciais impactos das situações dos serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos sobre a saúde pública.



Fonte: Heller, 1997.

Conforme apresentado anteriormente, a maior parcela dos resíduos sólidos urbanos é destinada a aterros sanitários, local este onde há o controle dos poluentes e emissões geradas pela decomposição dos resíduos. O que nem sempre foi desta forma e ainda continua, em certas regiões e de forma clandestina, a destinação destes resíduos para locais onde não existe este controle e seu lançamento é realizado *in natura*, como o caso dos lixões.

Esta é uma prática realizada desde a antiguidade onde a preocupação com o meio ambiente era mínima.

Os lixões são áreas de disposição final de resíduos sólidos sem nenhuma preparação prévia do solo. Não tem nenhum sistema de tratamento de efluentes líquidos - o chorume que por sua vez penetra pela terra levando substâncias contaminantes para o solo e para o lençol freático.

O lixo em decomposição fica exposto sem nenhum procedimento que evite as consequências ambientais e sociais negativas, causando a proliferação de moscas, pássaros e ratos. Além de crianças, adolescentes e adultos que catam comida e materiais recicláveis para vender.

Um esquema ilustrativo do lixão é demonstrado na Figura 10 e seus agravantes ao meio.

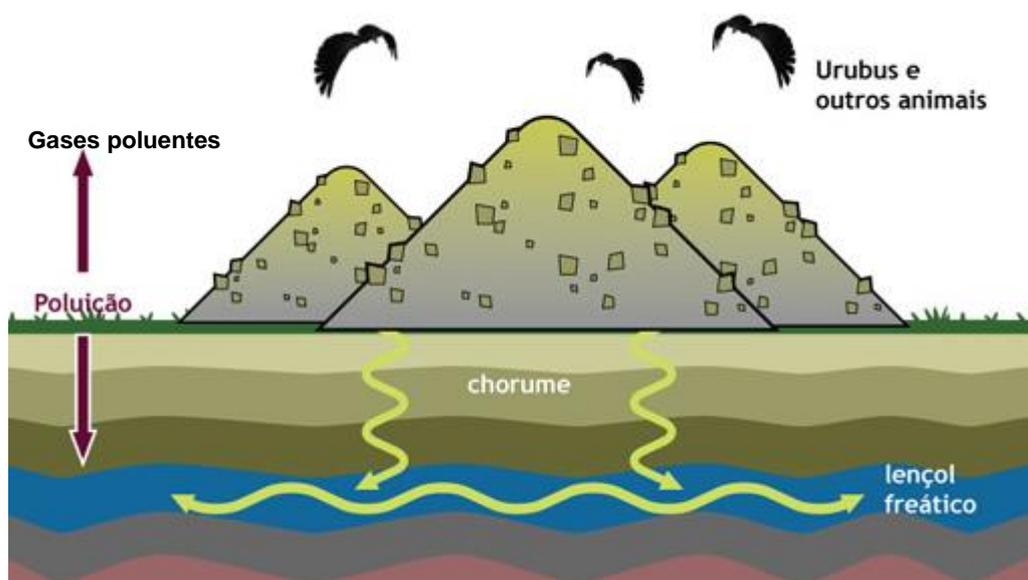


Figura 10 - Esquema ilustrativo da poluição causada pela interação do meio com o lixão.

Fonte: Gonçalves, 2014.

Em decorrência de diversos problemas ambientais, afetando direta e indiretamente a população circunvizinha destes locais de despejo dos resíduos, o Ministério Público teve que tomar as devidas providências para a extinção desse tipo de disposição, além de punições severas e o controle destes lixões criados, a fim de evitar uma maior contaminação pelos resíduos já dispostos e

até encontrar outro local legalmente adequado para receber estes resíduos. Estes lixões de forma controlada são denominados de aterro controlado.

O aterro controlado é uma fase intermediária entre o lixão e o aterro sanitário. Normalmente é uma célula adjacente ao lixão que foi remediado, ou seja, que recebeu cobertura de argila, e grama (idealmente selado com manta impermeável para proteger a pilha da água de chuva), com a captação de chorume e gás. Esta célula é preparada para receber resíduos com uma impermeabilização com manta e tem uma operação que procura dar conta dos impactos negativos tais como a cobertura diária da pilha de lixo com terra ou outro material disponível. O chorume coletado ou é recirculado para cima da pilha de resíduo ou é, eventualmente, destinado para a estação de tratamento de efluente. A Figura 11 ilustra o funcionamento e os impactos do aterro controlado.

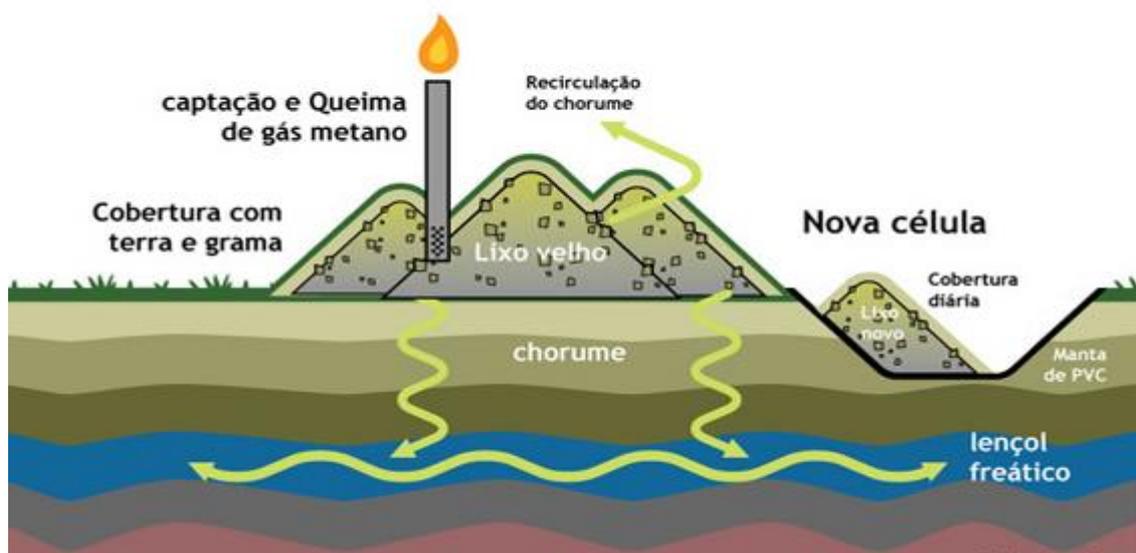


Figura 11 - Esquema ilustrativo do tratamento e dos impactos gerados pela interação do meio com o aterro sanitário.

Fonte: Gonçalves, 2014.

A seguir, são listadas as principais doenças que podem ser causadas pela má gestão e descarte inadequado dos resíduos (Júnior; Saiani; Dourado, 2013).

Estas doenças são divididas pelas suas vias de transmissão e seus sintomas.

- Doenças com transmissão feco-oral (hídrica ou relacionada à higiene): febres entéricas (febres tifoides e paratífoides); doenças diarreicas (cóleras, isosporíase, amebíase, infecção por salmonela e outras infecções intestinais por bactérias, protozoários ou vírus); e outras doenças (hepatite A, poliomielite, leptospirose, ascaridíase, tricuriase);
- Doenças transmitidas por insetos vetores: insetos com procriação em fontes de recursos hídricos (filariose linfática, malária, doença de Chagas, febre amarela, leishmaniose e dengue) e picada próxima a fontes de recursos hídricos (doença do sono);
- Doença transmitida pelo contato com água contaminada: ingestão (infecção por helmintos, teníase e cisticercose) e penetração na pele (esquistossomose);
- Doenças relacionadas à higiene: doenças dos olhos (tracoma e conjuntivites) e doenças da pele (dermatofitoses e micoses superficiais).

Pela Tabela 6, é notável a preocupação com número de morbidade nas faixas etárias menores de 1 ano e mais de 64 anos, justamente nos períodos em que a imunidade é mais fragilizada, e principalmente nas regiões norte e nordeste, onde ainda existem diversos municípios adotando os lixões como prática de disposição final, conforme pode-se observar na Tabela 7.

Tabela 6 - Morbidade por doença relacionada ao saneamento básico (internações por 10 mil habitantes), segundo faixa etária e as grandes regiões geográficas.

Região	Faixa Etária				
	Menos de 1 ano	De 1 a 5 anos	De 5 a 15 anos	De 15 a 64 anos	Mais de 64 anos
<b>Norte</b>	425,43	227,47	50,11	39,07	103,76
<b>Nordeste</b>	289,45	167,98	46,73	30,99	112,25
<b>Centro-Oeste</b>	225,92	137,57	31,89	20,92	64,39
<b>Sudeste</b>	95,2	51,72	17,53	6,9	18,57
<b>Sul</b>	175,59	106,47	24,26	13,24	42,14

Fonte: Adaptado do Ministério da Saúde e IBGE.

Tabela 7 - Quantidade de municípios por tipo de destinação adotado (Cenário 2013).

Destinação Final	2013 - Regiões e Brasil					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	BRASIL
Aterro Sanitário	92	453	161	817	703	2.226
Aterro Controlado	111	504	148	645	367	1.775
Lixão	247	837	158	206	121	1.569
<b>BRASIL</b>	450	1.794	467	1.668	1.191	5.570

Fonte: ABRELPE, 2013.

De forma a reduzir estes índices de morbidade e gastos públicos, com a remediação da população e do meio provinda da poluição causado pela disposição inadequada dos resíduos, são necessários investimentos na gestão e gerenciamento dos mesmos.

Para uma boa gestão dos resíduos sólidos, são necessárias sua caracterização e sua segregação, já que os diferentes resíduos devem receber diferentes formas de acondicionamento, manutenção no local gerador, apresentação à coleta, sistema de coleta, tipo de transporte, formas de tratamento e destinação final. Alguns aspectos que devem ser considerados para a escolha desses procedimentos estão relacionados à origem dos resíduos a sua fonte geradora, se é um resíduo orgânico ou inorgânico, suas características físicas, características químicas e microbiológicas (Júnior; Saiani; Dourado, 2013).

A escolha do processo mais adequado de tratamento depende fundamentalmente das características do resíduo a ser tratado.

No item posterior serão abordados os tipos de tratamento e disposição final adequado perante as legislações vigentes.

### 3.2. Tecnologias para o tratamento ou a disposição final dos resíduos sólidos.

#### 3.2.1. Reciclagem + complemento

De acordo com a PNRS (2010) a reciclagem consiste no processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos. Ou seja, aquele resíduo que iria ser destinado para tratamento ou destinação final, fechando, assim, seu ciclo de vida, retornará para o processo como insumo ou matéria-prima para outro processo, agregando valor a ele.

Os resíduos destinados para reciclagem, denominado de fração seca dos resíduos, consiste genericamente nos papéis, plásticos, vidros e metais ferrosos e não ferrosos. A Tabela 8 a seguir, apresenta de forma mais específica quais tipos de materiais presentes nos resíduos sólidos urbanos possuem potencial de reciclagem e mercado para venda.

Tabela 8 - Materiais com tecnologia economicamente viável e amplo mercado para a reciclagem.

Tipo	Reciclagem	Lixo comum não reciclável
Papel	Papelão, caixas em geral, papel de escritório, jornais, revistas, livros, cadernos, cartolinas e embalagens longa vida.	Papel carbono, celofane, papel vegetal, papéis encerados ou plastificados, higiênico, lenço de papel, guardanapos, fotografias, fitas ou etiquetas adesivas.
Plástico	Sacos, CDs, disquetes, embalagens de produtos de limpeza, canos e tubos, garrafas, plásticos em geral.	Plásticos termofixos (usados na indústria eletroeletrônica e na produção de alguns computadores, telefones e eletrodomésticos) e embalagens plásticas metalizadas (como as de salgadinhos).
Vidro	Garrafas de bebida, vidros de janelas, vidros de automóveis, frascos em geral, potes de produtos alimentícios e copos.	Espelhos, cristais, lâmpadas, ampolas de medicamentos, cerâmicas, porcelanas, tubos de TV e de computadores.
Metais	Latas de alumínio (refrigerante, cerveja, suco), latas de produtos alimentícios (óleo, leite em pó, conservas), tampas de garrafa, embalagens metálicas de congelados, folha-de-flandres.	Clips, grampos, esponjas de aço, tachinhas, pregos e canos.

Fonte: CBS, 2014.

Ao avaliar a composição gravimétrica dos resíduos gerados no município de São Paulo, Figura 12, pode-se observar que cerca de 30% do resíduo são potencialmente recicláveis. Ou seja, se todo o resíduo da fração seca retornasse como insumo ou matéria-prima, 1/3 teriam outra destinação sem ser em aterros sanitários, já que atualmente esse é o meio mais utilizado como destinação final. Além do ganho com a redução da extração de matéria-prima para determinados processos.

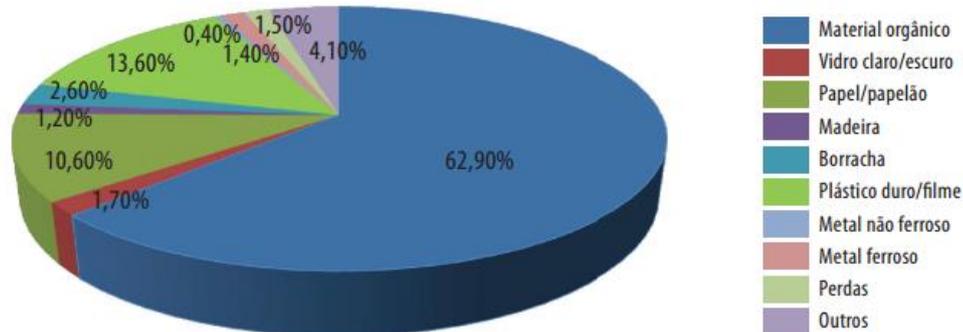


Figura 12 – Composição Gravimétrica dos Resíduos Gerados no Município de São Paulo.

Fonte: SMA/CPLA, 2013.

Mesmo com 1/3 dos resíduos sendo reciclados, ainda existe a fração úmida e outros resíduos que representam uma porcentagem maior, cerca de 70% dos resíduos gerados. Esse é um dos motivos pelo qual a reciclagem deve atuar complementarmente a outra forma de destinação final.

### 3.2.2. Compostagem + complemento

A compostagem é um método de tratamento de resíduos sólidos no qual a matéria orgânica presente, em condições adequadas de temperatura, umidade e aeração, é transformada num produto estável, denominado composto orgânico, que tem propriedades condicionadoras de solo, sendo, portanto, de grande aplicabilidade na agricultura (CETESB, 1997).

O processo de compostagem pode ser considerado uma versão acelerada do processo natural de transformação da matéria orgânica no solo, sendo

obtido através do fornecimento de condições favoráveis (como, por exemplo, aeração, temperatura, umidade e pH) à atividade microbiana (Provenzano et al, 2001).

Há diversos tipos de composteiras. As dimensões devem ser definidas considerando a necessidade de introdução de ar para que possa haver oxigênio disponível para os micro e macro-organismos aeróbicos. Esse consórcio de organismos é composto por bactérias, fungos, minhocas, lacraias, aranhas, baratas, besouros, entre outros. Além de forma e dimensão que favoreçam a aeração, é recomendável que se revolva os resíduos, a fim de provocar sua maior oxigenação (Junior; Saiani; Dourado, 2013).

A forma de composteira mais comumente utilizada no tratamento de resíduos sólidos em larga escala é a em pilhas ou leiras, conforme Figuras 13 e 14, respectivamente.



Figura 13 - Composteira disposta em forma de pilhas.

Fonte: [conservandoeeducando.blogspot](http://conservandoeeducando.blogspot).



Figura 14 - Composteira disposta em forma de leira.

Fonte: [conservandoeeducando.blogspot](http://conservandoeeducando.blogspot).

De acordo com MANSUR (1993), as substâncias resultantes da decomposição por via aeróbia são: gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ); água ( $\text{H}_2\text{O}$ ); e, produtos finais oxidados (nitratos, sulfatos, etc.), havendo uma grande liberação de energia sob a forma de calor durante o processo.

Conforme mencionado e além do parâmetro aeração, a umidade do composto no processo deve ser de grande importância, uma vez que ela, também, determina a sobrevivência da vida dos organismos envolvidos. Por outro lado, no caso do excesso de chuvas, ela deve ser coberta para não

encharcar demais, o que também seria prejudicial aos seres. A temperatura é outro fator a se levar em conta, já que em baixas temperaturas há redução de atividade dos organismos. Neste sentido, as composteiras devem receber insolação em pelo menos parte do dia, para seu aquecimento e suas demais atividades, ou implantar o aquecimento forçado, mas sem que se atinjam temperaturas exageradamente altas que comprometam os organismos ali presentes.

Elango *et al.* apresentaram um estudo de decomposição da fração orgânica do RSU na Índia, a partir de micro-organismos termofílicos, isto é, que se adaptam a temperaturas mais elevadas, em torno de 65 a 70°C, e obtiveram tempo de decomposição de 40 dias, redução de 75% do volume inicial de resíduos e geração de húmus de ótima qualidade (Junior; Saiani; Dourado, 2013), sendo que diversos estudos informam que durante o processo até o estágio de maturação a redução de massa e volume é entorno de 50%.

O processo de compostagem se desenvolve em três etapas:

- a) **fase de decomposição** caracterizada pelas elevadas temperaturas e pela presença de numerosos microrganismos;
- b) **fase de maturação** com temperaturas menos elevadas e presença de microrganismos e de alguns invertebrados;
- c) **fase de estabilização** com temperaturas próximas à do ambiente e importante redução do número de microrganismos e do volume do material a ser compostado.

Para que o tratamento da compostagem seja eficiente e o produto final aproveitável para aplicação no solo, além dos fatores mencionados, deve-se respeitar o tempo de maturação do composto, pois caso o composto seja aplicado no solo antes de atingir este estágio, ocorre uma rápida decomposição que pode gerar alta concentração de CO<sub>2</sub>, baixos níveis de O<sub>2</sub>, o qual pode levar a deficiência de O<sub>2</sub> na rizosfera e, conseqüentemente, condições anaeróbicas e redutoras no solo. A alta atividade microbiana também pode promover a degradação da matéria orgânica inerente ao solo. O N inorgânico pode ser imobilizado através de sua incorporação nas células microbianas, tornando-se temporariamente indisponíveis às plantas. Produtos intermediários

da degradação da matéria orgânica, como ácidos voláteis, álcoois e fenóis, são tóxicos para as plantas e as condições redutoras podem solubilizar metais tóxicos no solo (Bernal et al., 1998; Provenzano et al., 2001; Rivero et al., 2004).

Alguns indicadores do início do processo e da maturação do composto:

- Cor preta: final do processo;
- Odor ocre: início da compostagem;
- Odor de terra mofada: fim da compostagem;
- Umidade elevada: início do processo;
- Umidade baixa: fim do processo.

Fialho (2007) apresenta alguns benefícios da aplicação do composto já estabilizado ao solo, como:

- Aumento da capacidade de retenção de água nos solos;
- Aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos, assim os nutrientes ficam menos sujeitos às perdas por lixiviação;
- Formação de agregados de solos mais estáveis, portanto melhora a aeração e drenagem dos solos, prevenindo a erosão e, conseqüentemente, o assoreamento de rios;
- Aumento do pH e do poder de tampão do solo;
- Nova forma de matéria orgânica para os solos e de macro e micronutrientes para as plantas;
- Incremento de biodiversidade das comunidades microbianas dos solos, tornando-o mais produtivo.

Por ser um processo aeróbio, a compostagem destina-se, preferencialmente, ao processamento de resíduos orgânicos sólidos. Resíduos líquidos podem ser incorporados como palha de cereais, fibra de coco, restos de vegetais desidratados, etc. De maneira geral, praticamente todos resíduos orgânicos podem ser compostado (Rodrigues, 2004). Assim como a reciclagem, a compostagem não atua unicamente como tratamento da composição total dos resíduos sólidos urbanos, sendo necessárias outras

formas de tratamento ou destinação final complementares, para os resíduos de fração seca e outros.

Para que um composto orgânico seja usado como fertilizante, suas características devem obedecer às especificações dos seguintes diplomas legais, (ver Tabela 9):

- Decreto-Lei 86.955/82 do Ministério da Agricultura;
- Portaria 01/83 da Secretaria de Fiscalização Agropecuária do Ministério da Agricultura.

Tabela 9 - Padrões de qualidade de composto a ser utilizado como fertilizante.

Descrição	Valor ou exigência	Tolerância
pH	Mínimo de 6	Até 5,4
Umidade	Máximo de 40%	Até 44%
Matéria Orgânica	Mínimo de 40%	Até 36%
Nitrogênio total	Mínimo de 1%	Até 0,9%
Relação C/N	Máximo de 18	Até 21
Granulometria farelada	100% do produto deve passar na peneira de 4,8 mm e 90% na peneira 2,8 mm	Até 85% deve passar na peneira de 4,8 mm
Granulometria farelada grossa	100% deve passar em peneira de 38 mm e 90% em peneira de 25 mm	Não admite

Fonte: Adaptado Brasil, 1982.

### 3.2.3. Coleta Seletiva.

Para que a reciclagem dos resíduos e o tratamento pela compostagem atuem mutuamente, sendo destinado a fração seca para o primeiro e a úmida para o segundo, é necessário que os resíduos sejam segregados desta forma, preferencialmente na fonte geradora.

A ocorrência de forma eficaz com a unificação das soluções acima, se faz pelo poder público no comprometimento e atuação com o programa de coleta seletiva, onde são destinados veículos específicos apenas para coletar a fração seca dos resíduos, em dias ou horários diferenciados da coleta da fração úmida. Além, de forma mais expressiva que o anterior por questões sociais, a

atuação dos catadores e dos galpões de triagem, em que cooperativas realizam essa separação e a venda dos mesmos, já separados, é revertida para os próprios funcionários do local.

Nas Figuras 15 e 16, a seguir, é possível verificar a participação da coleta seletiva no cenário nacional e a distribuição das entidades de catadores cadastrados no CadEC (Cadastro de Entidades de Catadores de Materiais Recicláveis do Estado de São Paulo).

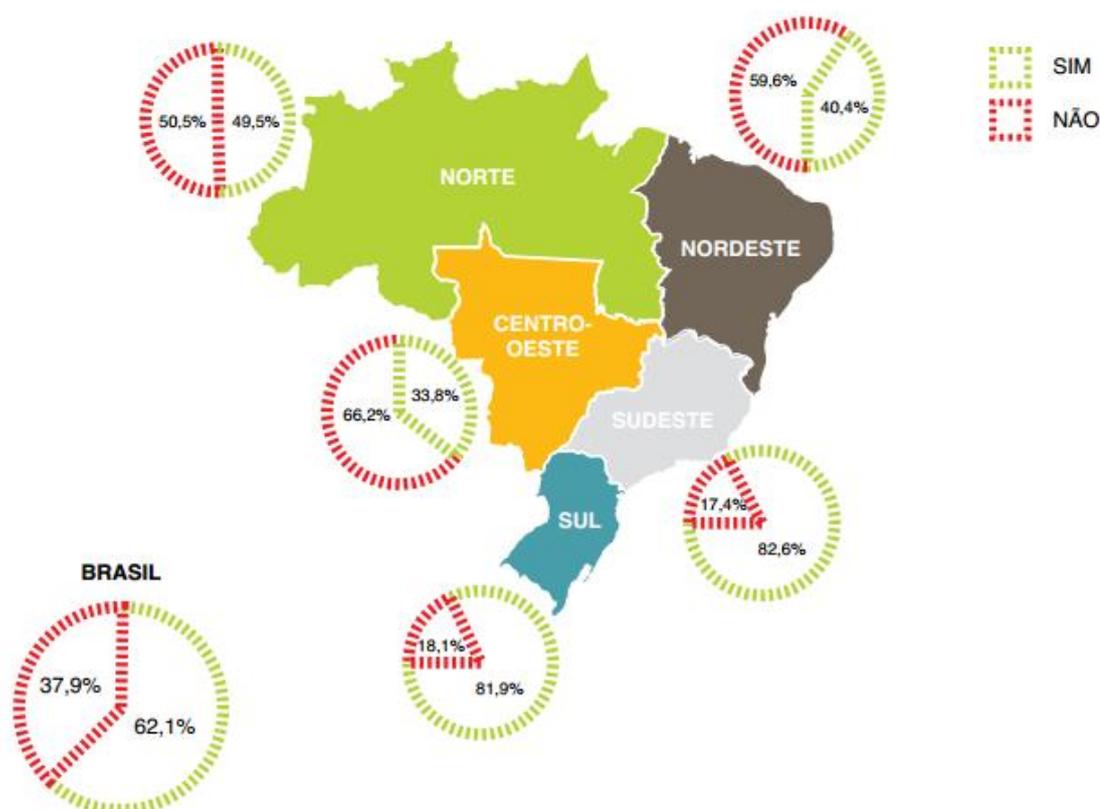


Figura 15 - Distribuição dos Municípios com Iniciativas de Coleta Seletiva (%)

Fonte: ABRELPE, 2013.

As principais regiões com a adoção da coleta seletiva são as regiões Sul e Sudeste, onde mais de 80% dos municípios possuem coleta seletiva. Vale ressaltar que não significa que todos os bairros do município são atendidos pelo sistema.

A participação dos catadores na coleta de resíduos recicláveis, principalmente dessas regiões citadas, apresenta um cenário crescente por

questões sociais, o acréscimo da demanda e aos preços associados a estes tipos de resíduos, principalmente na região metropolitana de São Paulo.

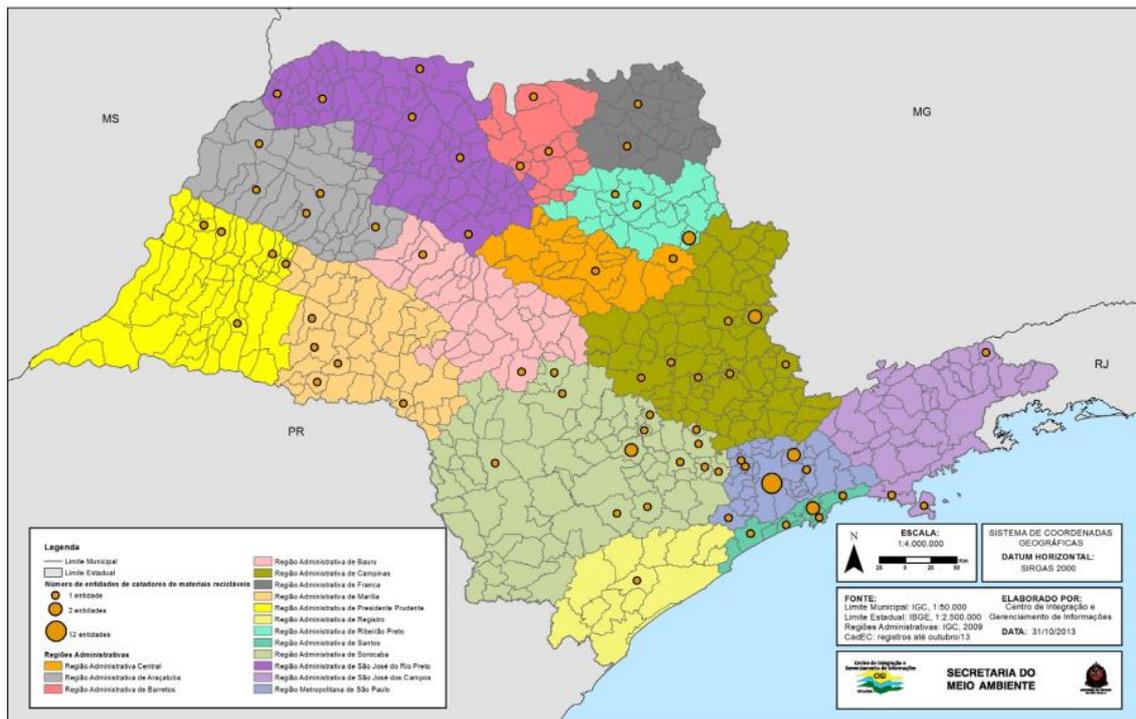


Figura 16 - Distribuição das entidades de catadores de materiais recicláveis cadastrados no CaDEC.

Fonte: SMA/CPLA, 2013.

### 3.2.4. Aterros Sanitários

Os aterros sanitários consistem na forma adequada e monitorada de disposição final dos resíduos, tornando-os, por este motivo, diferenciado dos lixões e aterros controlados.

É a destinação mais comumente utilizada no cenário brasileiro, com cerca de 60% dos resíduos gerados sendo destinados para este fim, conforme pode-se notar na Figura 17.

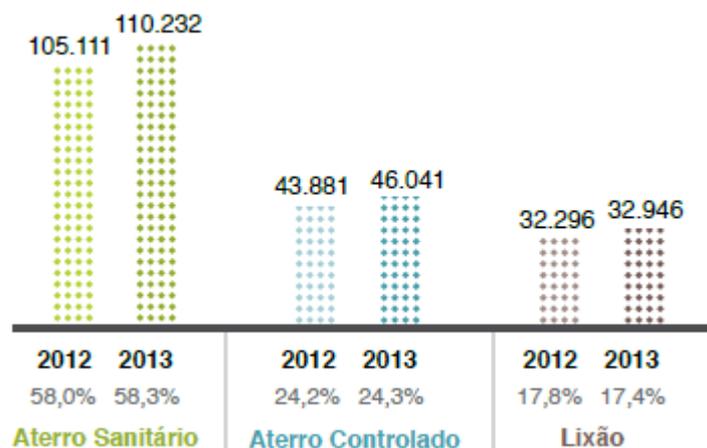


Figura 17 - Destinação final de RSU no Brasil (t/dia)

Fonte: ABRELPE, 2013

Os métodos de acondicionamento e coleta adotados pela maioria das cidades resultam na mistura de materiais que dificilmente são separados pelos processos de triagem atualmente utilizados. Como consequência, tanto as “usinas de compostagem” quanto as técnicas de “coleta seletiva” geram rejeitos que, obrigatoriamente, devem ser descartados. Até mesmo as soluções que serão citadas posteriormente de incineração ou aproveitamento energético direto do resíduo geram escórias e cinzas que precisam ser descartadas em aterros (CETESB, 2014).

Essa técnica consiste basicamente na compactação dos resíduos no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte.

Ainda que sendo o método sanitário mais simples de destinação final de resíduos sólidos urbanos, o aterro sanitário exige cuidados especiais e técnicas específicas a serem seguidas, desde a seleção e preparo da área até sua operação e monitoramento.

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 anaeróbia 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, 2014).

Desta forma, antes de iniciar a disposição do lixo o terreno deve ser preparado previamente com o nivelamento de terra e com o selamento da base com argila ou geomembrana e mantas de PVC, esta extremamente resistente. Com essa impermeabilização do solo, o lençol freático não será contaminado pelo chorume. Este é coletado através de drenos de PEAD, encaminhados para o poço de acumulação de onde será encaminhado para a estação de tratamento de efluentes. A operação do aterro sanitário, assim como a do aterro controlado prevê a cobertura diária do lixo, não ocorrendo à proliferação de vetores, mau cheiro e poluição visual (Gonçalves, 2014).

De forma a reiterar o controle e o tratamento dos poluentes gerados pela decomposição dos resíduos, são listados a seguir as suas principais características (CETESB, 2014).

- Impermeabilização da base do aterro: evita o contato do chorume com as águas subterrâneas. A impermeabilização pode ser feita com argila ou geomembranas sintéticas;
- Instalação de drenos de gás: canal de saída do gás do interior do aterro. Os drenos podem ser construídos de concreto ou de PEAD, podendo receber uma conexão final de aço-inox quando a célula for fechada. O biogás pode ser recolhido para o aproveitamento energético através da ligação de todos os drenos verticais com um ramal central;
- Sistema de coleta de chorume: a coleta de chorume deve ser feita pela base do aterro. O chorume coletado é enviado a lagoas previamente preparadas com impermeabilização do seu contorno ou enviados para tanques de armazenamento fechados;
- Sistema de tratamento de chorume: após coletado, o chorume deve ser tratado antes de ser descartado no curso de um rio ou em uma lagoa. O tratamento pode ser feito no próprio local ou o chorume coletado pode ser transportado para um local apropriado (geralmente uma Estação de Tratamento de Esgotos). Os tipos de tratamento mais convencionais são o tratamento biológico (lagoas anaeróbias, aeróbias e lagoas de estabilização), tratamento por oxidação (evaporação e queima) ou tratamento químico (adição de substâncias químicas ao chorume);

- Sistema de drenagem de águas pluviais: o sistema de captação e drenagem de águas de chuva visa escorrer a água por locais apropriados para evitar a infiltração que gera o chorume.

Os aterros podem ser divididos em dois diferentes tipos:

**Aterro convencional:** formação de camadas de resíduos compactados, que são sobrepostas acima do nível original do terreno resultando em configurações típicas de “escada” ou de “troncos de pirâmide”;

**Aterro em valas:** o uso de trincheiras ou valas visa facilitar a operação do aterramento dos resíduos e a formação das células e camadas; assim sendo, tem-se o preenchimento total da trincheira, que deve devolver ao terreno a sua topografia inicial.

As Figuras 18 e 19 a seguir ilustram o processo de preparo, funcionamento e finalização de um aterro sanitário.

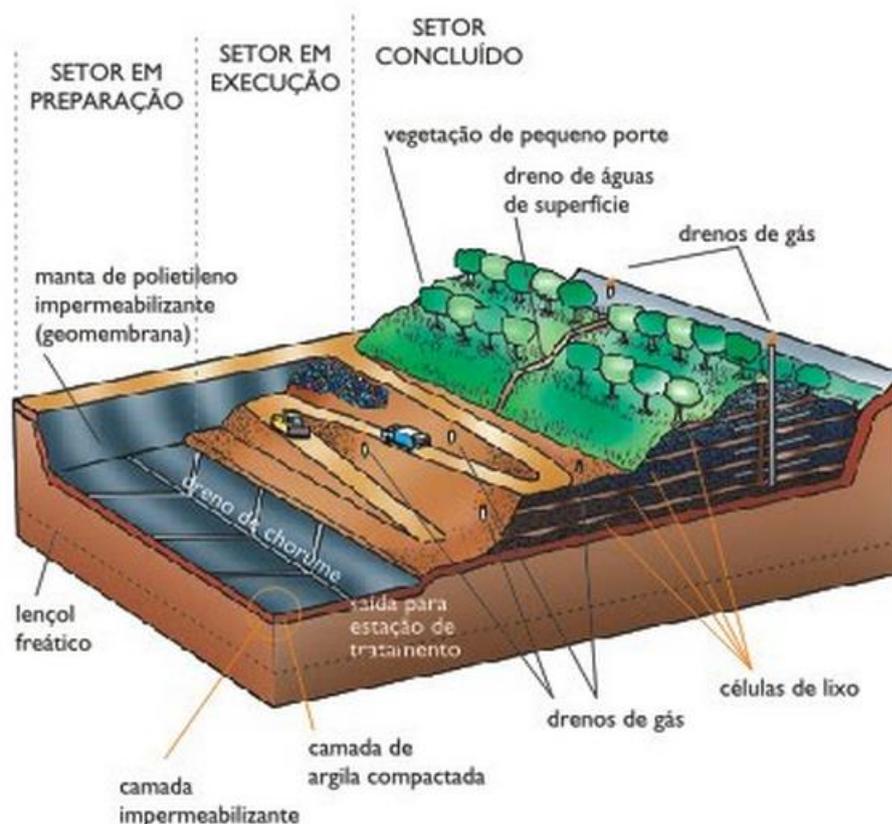


Figura 18 – Esquema ilustrativo do preparo e terreno e finalização de um aterro sanitário.

Fonte: Pereira, 2010.

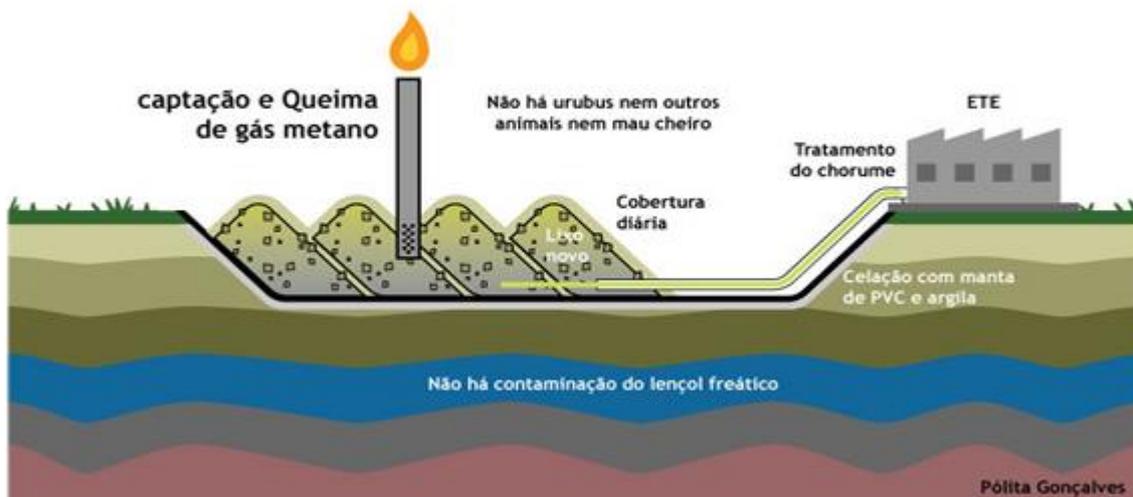


Figura 19 - Esquema ilustrativo do tratamento e dos impactos gerados pela interação do meio com o aterro sanitário.

Fonte: Gonçalves, 2014.

### 3.2.5. Biodigestores;

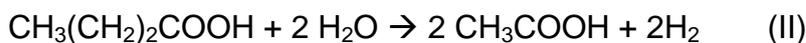
A biodigestão anaeróbia é um processo fermentativo microbiano onde a matéria orgânica, na ausência de oxigênio livre, é convertida a gases compostos, predominantemente, de metano e dióxido de carbono (Massey; Pohland, 1993 apud Pinto, 2008). Desta forma, para que o processo seja eficiente e como produto final o biogás e biofertilizante, o resíduo que será destinado para este tipo de tratamento deve conter apenas a fração úmida dos RSU.

O processo de digestão anaeróbia ocorre pela ação de quatro tipos de microorganismos; hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos (VEEKEN; HEMELERS, 1999).

Segundo Chernicharo (1997), a digestão anaeróbica de compostos orgânicos complexos é normalmente considerada um processo de dois estágios. No primeiro estágio, um grupo de bactérias facultativas e anaeróbicas, denominadas formadoras de ácidos ou fermentativas, age sobre os compostos orgânicos complexos com carboidratos, proteínas e lipídios, onde estes são hidrolisados, fermentados e biologicamente convertidos a compostos orgânicos mais simples, principalmente ácidos voláteis. Em uma

segunda etapa, os ácidos orgânicos são convertidos, principalmente, em gás metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) através da ação de bactérias estritamente anaeróbicas, denominadas formadoras de metano.

As reações visualizadas abaixo demonstram a decomposição dos compostos orgânicos e a produção de metano, sendo a principal para este fim a terceira equação.



A forma de abastecimento dos biodigestores os classifica em batelada, em que se armazena a máxima capacidade de carga, substituída somente após a digestão completa do material orgânico; e contínuos, construídos para que o abastecimento de carga seja diário, existindo uma saída para material processado com volume de descarga proporcional ao de carga.

Além da distinção do abastecimento dos biodigestores, ainda existem duas típicas formas de construção: os biodigestores modelo indiano e o modelo chinês (ver Figura 20).

O modelo indiano é caracterizado por possuir uma câmara de fermentação cilíndrica, feita em alvenaria e dividida por uma parede central. Esta divisão faz com que a biomassa percorra dois estágios distintos do processo de fermentação e circule por todo o interior da câmara. A cúpula é geralmente de ferro e move-se verticalmente, à medida que o volume de biogás produzido aumenta, para manter a pressão constante. Já o modelo Chinês de biodigestor é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria para a fermentação, com teto abobado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás, e para economizar espaço é totalmente enterrado no solo. O funcionamento do biodigestor baseia-se no princípio de prensa hidráulica. O aumento da pressão em seu interior, devido ao acúmulo de biogás, resulta no deslocamento do

efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre descompressão (Silva; Oliveira, 2014).

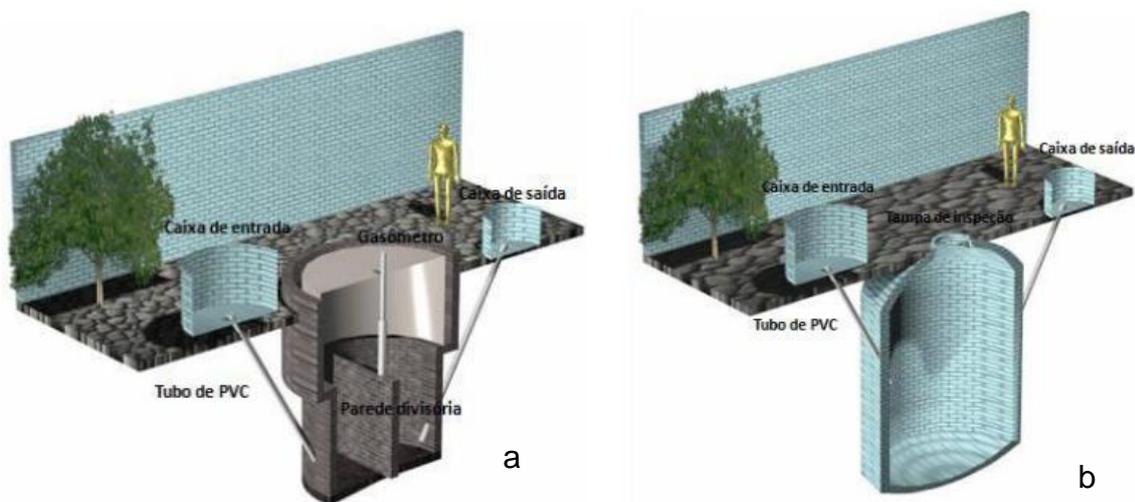


Figura 20 - Modelos de biodigestor: a) Modelo indiano, b) modelo chinês.

Fonte: DEGANUTTI et. al., 2002

Na construção dos biodigestores deve-se pensar na impermeabilização do local, para não haver percolação do conteúdo no solo. A câmara de decomposição deve ser hermética (sem introdução de ar) para que ocorram a anaerobiose e a geração de biogás. Deve haver um sistema de captação do biogás.

De forma genérica, um biodigestor deve ser composto por dois compartimentos: o primeiro, fechado, recebe os dejetos orgânicos que são decompostos anaerobicamente, gerando o biogás e o biofertilizante, que será lançado gradativamente no segundo compartimento, que é aberto. O biofertilizante resultante do processo é um condicionador do solo, contendo nitrogênio e fósforo, com baixa carga orgânica (Júnior; Saiani; Dourado, 2013). Já o biogás pode ser convertido em energia elétrica pela sua queima em motores a combustão interna, ou o aproveitamento calórico com a queima em caldeiras, ou até mesmo a fim de manter a temperatura do biodigestor adequada (entre 20 e 35°C) em regiões de baixa temperatura.

É importante ressaltar que o biogás gerado possui uma fração de compostos de enxofre, que são corrosivos e devem ser removidos antes da utilização em equipamentos.

Como se trata de microorganismos, os digestores anaeróbicos são suscetíveis a um controle rigoroso das condições ambientais para o funcionamento adequado. Existem algumas variáveis a serem consideradas para o monitoramento e avaliação do processo, como a temperatura, pH, ausência de substâncias tóxicas e teor de água.

### 3.2.6. Incineração

A incineração é um processo de combustão controlada, que tem como princípio básico a reação do oxigênio com componentes combustíveis presentes no resíduo (como carbono, hidrogênio e enxofre), em temperatura superior a 800 °C, convertendo sua energia química em calor (FEAM, 2012). Possui a capacidade de redução dos resíduos orgânicos e combustíveis à matéria inorgânica e incombustível em até 15% do peso e 90% do volume iniciais (Junior; Saiani; Dourado, 2013).

Os resíduos com maior potencial de combustão neste tipo de tratamento são os que apresentam elevado poder calorífico, como plásticos, papel/papelão e borrachas (Tabela 10). Todavia, a composição dos RSU de São Paulo possui uma elevada fração de matéria orgânica a qual, devido à sua elevada umidade, apresenta baixo poder calorífico em relação a outros materiais; isto pode resultar em resíduos misturados com carga térmica inferior à de projeto do forno de incineração, implicando no aumento do consumo de combustível auxiliar.

Tabela 10 - Poder calorífico inferior (PCI) de alguns RSU

RSU	PCI (base seca) kcal/kg	Umidade (%)	Cinzas (%)	PCI (base úmida sem cinzas) kcal/kg
Matéria Orgânica	4.300	66	25	712
Papel e papelão	3.800	21	5	2.729
Têxteis e couro	4.200	36	10	1.921
Madeira	3.700	25	5	2.490
Plástico	10.300	17	3	8.193
Borracha	9.700	5	6	8.633

Fonte: CODESC (2003) apud FEAM, 2012.

A composição dos gases e dos subprodutos gerados pela combustão no processo de incineração varia de acordo com o resíduo de alimentação e sua composição. De forma geral, são gerados como produtos da combustão, além de vapor d'água, CO<sub>2</sub> e SO<sub>x</sub>, HCl, HF, CO, NO<sub>x</sub>, material particulado (partículas finas quase sempre com sílica), metais — em particular Cd, Hg, As, V, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni e Tl, entre outros — e substâncias orgânicas (como dioxinas) na forma gasosa ou aderidas também ao material particulado. Também são gerados rejeitos (cinzas volantes e escórias) de materiais inorgânicos nos RSU que não participam das reações de combustão (FEAM, 2012).

Na combustão, a formação de dioxinas (substâncias comprovadamente cancerígenas) ocorre por mecanismos complexos, envolvendo matéria orgânica, oxigênio e cloro. Estas são destruídas a temperaturas acima de 600 °C, mas sintetizadas novamente entre 500 °C e 250 °C na presença de cloro e carbono. A maior parte das dioxinas fica retida nas cinzas volantes (FEAM, 2010).

Tanto os gases emitidos quanto as cinzas geradas em incineradores devem receber atenção especial, dentro das recomendações da legislação, sendo necessários equipamentos e instalações especiais para o seu tratamento (Junior; Saiani; Dourado, 2013).

Para que a combustão do resíduo seja o mais eficiente possível e evitar a formação das dioxinas e furanos, três fatores são de grande relevância no processo, sendo eles:

- **Tempo de residência:** fundamental para que ocorram as reações de destoxificação.
- **Turbulência:** importante para garantir a mistura com o oxigênio, a fim de que ocorra a queima.
- **Temperatura:** fornece o calor necessário para sustentar o processo.

Os principais componentes de um sistema de incineração são o sistema de preparo e alimentação do resíduo, câmara de combustão principal, torre de resfriamento e sistema de controle de emissões.

Existem no mercado diversos modelos de incineradores, porém, a escolha pela tecnologia adequada depende do tipo de resíduo a ser queimado, ou seja,

da quantidade e a características do resíduo, que por sua vez, pode ser líquido, semissólido ou sólido (Nascimento, 2012).

Na Tabela 11 pode-se observar a aplicabilidade favorável dos principais tipos de fornos com relação ao tipo de resíduos.

Tabela 11 – Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores

	Injeção Líquida	Forno Rotativo	Câmara Fixa	Leito Fluidizado
<b>Sólidos</b>				
Granulares, homogêneo		X	X	X
Irregular, bruto(pellets, etc)		X	X	X
Baixo ponto de fusão (alcatrões, etc)	X	X	X	X
Compostos Orgânicos com constituintes de cinzas fundíveis		X	X	X
Material não preparado, volumoso, material a granel		X	X	X
<b>Gases</b>				
Vapores orgânicos	X	X	X	X
<b>Líquidos</b>				
Resíduos aquosos com alta carga de orgânicos	X	X	X	X
Líquidos orgânicos	X	X	X	X
	Injeção Líquida	Forno Rotativo	Câmara Fixa	Leito Fluidizado
<b>Sólidos Líquidos</b>				
Resíduo contendo compostos aromáticos halogenados (mínimo de 1204° C)	X	X	X	X
Lodo aquoso orgânico	X	X	X	X

A seguir são abordados de forma sucinta os tipos de incineradores comercialmente utilizados (FEAM, 2012).

**Combustão em grelha:** é a mais empregada para RSU no estado bruto, adotando-se para isso uma grelha móvel inclinada de ação reversa, instalada em um forno-caldeira (Figura 21), permitindo operar com materiais com granulometrias bastante variadas. Ao percorrer a grelha, o resíduo passa por um processo de secagem, ocorrendo à perda dos compostos orgânicos voláteis e a combustão do resíduo carbonoso;

Parte do ar de combustão pré-aquecido é introduzido por baixo da grelha, e outra parte introduzido sobre a grelha à alta velocidade para criação de uma região de elevada turbulência e promoção de sua mistura com os gases e vapores gerados durante a combustão.

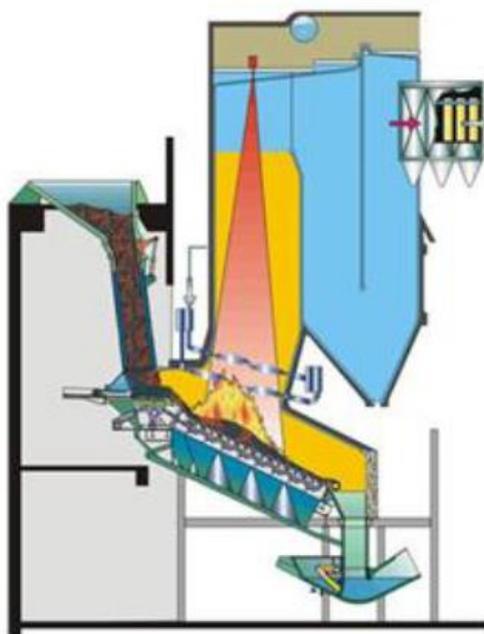


Figura 21 - Incinerador com forno em grelha

Fonte: FEAM (2010)

**Leitos fluidizados tipos circulante ou borbulhante:** são mais utilizados para lodo de esgoto; os resíduos, que devem estar triturados a diâmetro igual ou inferior a 2,5 cm, são incinerados em suspensão em leito de partículas inertes como areia e cinzas, insuflado com ar primário de combustão. Exige maior

complexidade operativa e ainda não alcançou seu pleno desenvolvimento comercial.

Consiste em um vaso de combustão simples, revestido de refratário parcialmente cheio de areia, alumina, carbonato de cálcio ou outro material semelhante (ver Figura 22). O ar de combustão é suprido através de um distribuidor em forma de pratos, localizado na base do combustor, a uma taxa suficiente para fluidizar ou carrear o material do leito (Rigato, 2008).

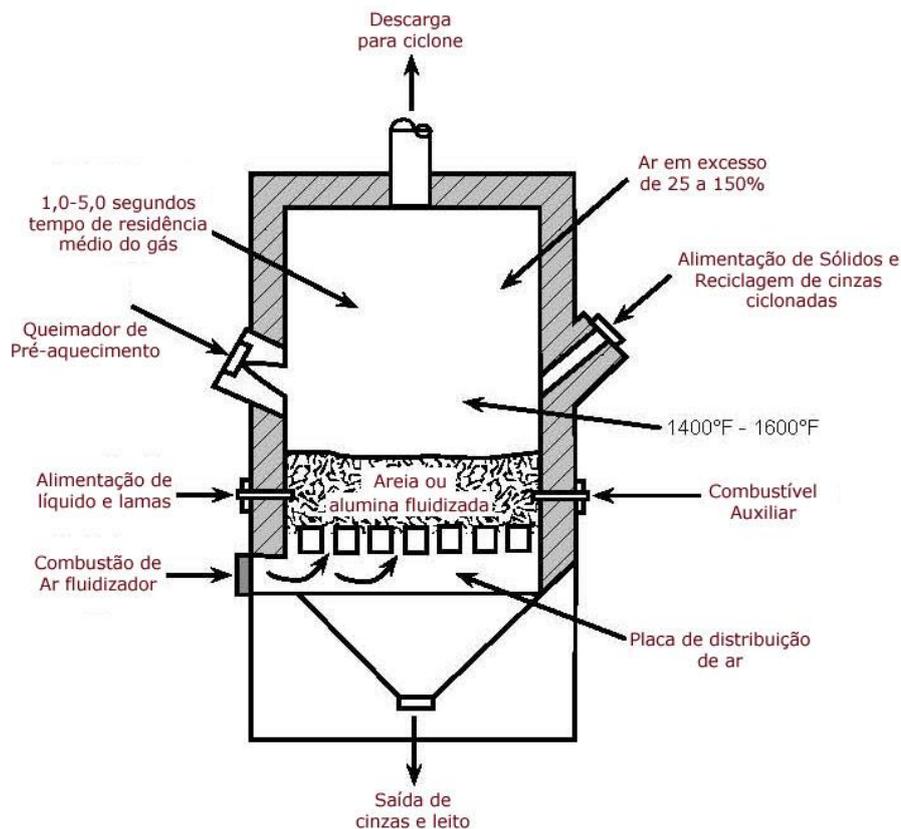


Figura 22 – Incinerador de leito fluidizado.

Fonte: Adaptado US EPA, 1981.

**Injeção líquida:** são aplicáveis quase que exclusivamente para resíduos líquidos bombeáveis. Essas unidades são em geral cilindros simples, revestidos internamente de refratários (verticais ou horizontais) e equipados com um ou mais queimadores. Os resíduos líquidos são injetados através desses queimadores, atomizados em pequenas gotículas e queimados em suspensão. Os queimadores, assim como os bicos sprays, podem estar direcionados axialmente, radicalmente ou tangencialmente em relação a chama. Uma melhor utilização do espaço de combustão e taxas maiores de

liberação de calor, podem ser alcançadas com a utilização de queimadores ciclônicos ou vórtex (Kiang, 1977).

Os incineradores de injeção líquida vertical são os preferidos quando os resíduos contêm alto teor de sais inorgânicos e de cinzas fundíveis, enquanto que os horizontais podem ser usados com resíduos com baixo teor de cinzas (Rigato, 2008).

**Câmaras fixa:** são adotadas geralmente para capacidades pequenas (0,2 a 200 t/dia), aplicável, por exemplo, a determinados grupos de resíduos de serviços de saúde; os resíduos são incinerados na grelha fixa da câmara primária e a pós-queima dos gases ocorre na câmara secundária; como gera baixas pressões de vapor, não é recomendado para a geração de energia elétrica (CEMPRE, 2010).

**Forno rotativo:** possuem a versatilidade de aplicação tanto para resíduos sólidos, lamas, e líquidos. É mais utilizado para resíduos.

São de formato cilíndrico, horizontal revestido internamente com refratário, montado com uma pequena inclinação. A rotação induz o transporte dos resíduos através do forno e melhora a mistura a ser queimada (ver Figura 23).

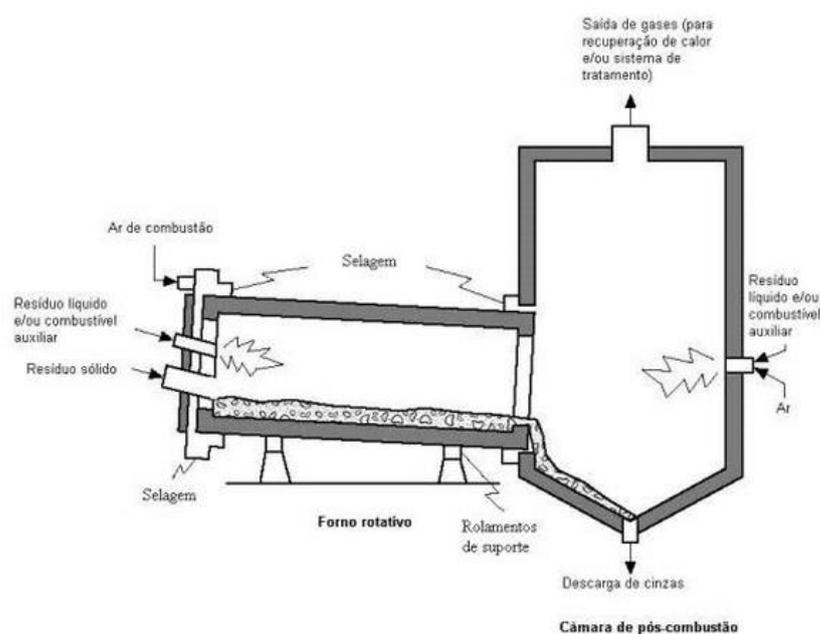


Figura 23 – Forno rotativo

Fonte: Formosinho e Barros, 2000.

A principal forma de geração de energia a partir de incineradores é a calórica, com a utilização de vapor para a geração de energia elétrica, por exemplo (Junior; Saiani; Dourado, 2013).

### **3.2.7. Pirólise;**

Pirólise é o processo onde a matéria orgânica é decomposta após ser submetida a condições de altas temperaturas em ambiente desprovido de oxigênio. Apesar de sua definição esclarecer a necessidade da inexistência de oxigênio, vários processos contam com uma pequena quantidade dele.

O processo é endotérmico, logo é necessário que exista bastante fornecimento externo de calor para acontecer o êxito da reação (Leal, 2010).

O fracionamento das substâncias orgânicas ocorre gradualmente à medida que estas passam pelas diversas zonas de calor de um reator vertical ou horizontal: na zona de secagem, parte inicial no reator, perde a umidade e na zona pirolítica (pode variar de 300 °C a 1.600 °C), ocorrem os processos de volatilização, oxidação e fusão, onde são produzidos os seguintes subprodutos: (LIMA, 1995):

- Gases não condensáveis, compostos principalmente por nitrogênio e gás de síntese (uma mistura de dióxido de carbono, hidrocarbonetos ( $C_nH_m$ ) e, principalmente, monóxido de carbono e hidrogênio);
- Líquido pirolenhoso, obtido pela condensação de gases que se desprendem durante o processo, com baixo teor de enxofre, composto por ácido pirolenhoso (ácido acético, metanol, alcatrão solúvel e outros vários compostos em menor quantidade) e alcatrão insolúvel;
- Resíduo sólido, constituído por carbono quase puro e ainda, por vidros, metais e outros materiais inertes (escória) caso presentes no RSU processado.

Na Figura 24, pode-se observar um reator ilustrativo e seu funcionamento.

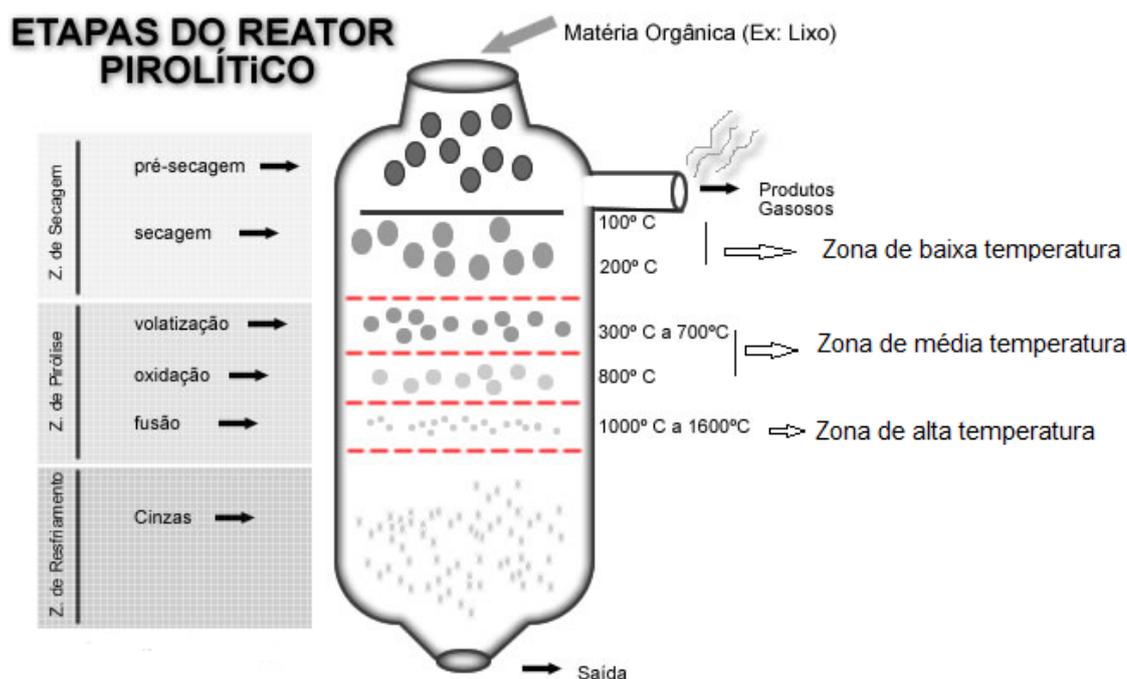


Figura 24 - Reator pirolítico.

Fonte: Adaptado de Leal, 2010.

Estudos realizados por Lima (1995) apontam que os subprodutos gerados no processo estão diretamente ligados a temperatura de operação, conforme pode-se observar na Tabela 12, quanto maior a temperatura, maior é a produção de gases como subproduto.

Tabela 12 - Efeitos da temperatura na pirólise de RSU.

Temperatura (°C)	Percentuais de subproduto da pirólise (%)		
	Gases	Líquidos	Sólidos
482	12,23	61,08	24,71
649	18,64	59,18	21,8
927	24,36	58,70	17,67

Fonte: Lima (1995)

O líquido pirolenhoso é corrosivo, nocivo e altamente poluente. Este pode ser gaseificado ou refinado para uso energético e, dependendo da concentração de alcatrão e outros compostos tóxicos, pode ser utilizado na agricultura (CAMPOS, 2007).

Os gases não condensáveis podem ser utilizados para a produção de vapor através de trocadores de calor e caldeiras ou, após resfriamento e limpeza em sistema de controle de emissão, podem ser queimados em caldeiras, turbinas a gás ou motores de combustão interna, para geração de eletricidade ou destinados à fabricação de produtos químicos (FEAM, 2012).

No final do processo, os materiais sólidos fundidos juntamente com a escória (vidros, terra, pedras, metais e outros) são resfriados e removidos. É possível, ainda, submeter o rejeito da pirólise a um processo de segregação, obtendo-se, principalmente, vidros e metais. O carvão pode ser processado ou utilizado como carvão ativado devido às suas propriedades de absorção (FEAM, 2012).

### **3.2.8. Gaseificação;**

Gaseificação é um processo termoquímico que transforma o carbono presente nas estruturas químicas dos elementos pela decomposição da matéria orgânica, de fluxo contínuo ou batelada, sendo a técnica mais comum à oxidação parcial utilizando um agente de gaseificação (oxigênio, ar ou vapor quente), em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para combustão), para a produção de gás de síntese cujos principais componentes são monóxido de carbono e hidrogênio, mas contêm também dióxido de carbono e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor de água em diferentes proporções (CARBOGAS e FEAM, 2012).

Tendo em vista a ausência de  $O_2$ , não há formação de componentes tóxicos como  $NO_x$ ,  $SO_x$ , dioxinas ou furanos que são radicais de cloro ligados por átomos de oxigênio (CARBOGAS).

A composição dos gases e a produção concomitante de combustíveis sólidos (carvão) e líquidos condensáveis (pirolenhosos) dependem dos seguintes fatores: tipo de forno de gaseificação, forma de fornecimento de energia ao processo, introdução ou não de vapor de água junto com o comburente (ar,  $O_2$ ), tempo de retenção da carga, sistema de retirada de gases e outros produtos, da matéria orgânica utilizada (FEAM, 2012).

A Tabela 13 a seguir representa algumas características gerais dos gaseificadores.

Tabela 13 - Características dos gaseificadores

<b>Características</b>	<b>Variações</b>
Poder Calorífico do Gás Produzido	Baixo: até 5 MJ/Nm <sup>3</sup> (997 kcal/kg)
	Médio: 5 a 10 MJ/Nm <sup>3</sup> (997 a 1.993 kcal/kg)
	Alto: 10 a 40 MJ/Nm <sup>3</sup> (1.993 a 7.972 kcal/kg)
Tipo de agente gaseificador	Ar, vapor d'água, oxigênio, hidrogênio
Tipo de leito	Fixo: corrente paralela ou contracorrente
	Fluidizado: borbulhante ou circular
Pressão de trabalho	Baixa: pressão atmosférica
	Pressurizado: até 6 Mpa (59,2 atm)
Natureza da biomassa	Resíduos agrícolas, industriais ou sólidos urbanos
	Biomassa <i>in natura</i> , peletizada ou pulverizada

Fonte: Adaptado de Cortez, Lora e Gómez (2009) e Henriques (2004)

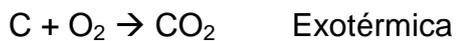
A obtenção econômica de gás de síntese com poder calorífico médio ou alto só é possível utilizando-se oxigênio puro, pois a eliminação do nitrogênio inerte do ar aumenta o poder calorífico, ou misturas de gases — oxigênio e vapor de água ou ar enriquecido com oxigênio e vapor de água (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009; BRAND, 2010).

O processo de gaseificação ocorre em equipamentos chamados de gaseificadores. Segundo Coelho (2012) apud Soares (2012), as etapas podem ser resumidas em:

I. Pirólise (ou decomposição térmica, se desenvolve a temperaturas próximas de 600°C)

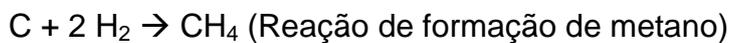
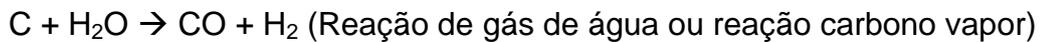
Biomassa + Calor Coque + Gases + Alcatrão + Condensáveis

II. Oxidação do Carbono (constitui a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação.)

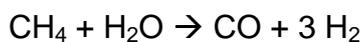


III. Gaseificação (inclui reações heterogêneas entre os gases e o coque residual, assim como reações homogêneas entre os produtos já formados).

- Reações Heterogêneas



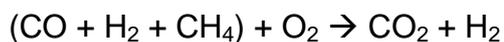
- Reações Homogêneas



IV. Craqueamento do Alcatrão (processo de destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão com a obtenção de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros gases como produtos).



V. Oxidação Parcial dos Produtos da Pirólise.



Por se tratar de um combustível proveniente de RSU, existem grande heterogeneidade e variações de composição química. De maneira geral, a composição média do gás de síntese pode ser visto na Tabela 14.

Tabela 14 – Composição média do gás de síntese.

Componentes	Concentração (%)
CO	8 a 25
H <sub>2</sub>	13 a 15
CH <sub>4</sub>	3 a 9
CO <sub>2</sub>	5 a 10
N <sub>2</sub>	45 a 54
H <sub>2</sub> O	10 a 15

Fonte: (NOGUEIRA, 2003; ANDO, 2005; TINAUT, 2006; PUIG-ARNAVAT, 2010; MARTINES, 2012) apud BRENNEISEN, 2013.

O objetivo principal desse processo, seja ele com a injeção de ar, oxigênio puro, vapor ou hidrogênio, é maximizar a produção de CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, constituintes do gás combustível produzido. Os fatores que afetam a condição de equilíbrio dos gases são temperatura, pressão, umidade do combustível (máximo de 30%), teor de oxigênio no reator e o tipo de combustível (LORA, 2008).

O gás produzido a partir da gaseificação da biomassa pode ser utilizado em diversas aplicações, como a geração de energia elétrica, geração de calor para aquecimento direto e como matéria-prima para obtenção de combustíveis líquidos através da síntese de Fischer-Tropsch (produzindo metanol, etanol, amônia, gasolina, diesel, entre outros).

O teor de umidade da matéria-prima utilizada e conseqüentemente do gás de síntese gerado está diretamente relacionado com o seu PCI, prejudicando a obtenção de energia para os gaseificadores de ciclo combinado, conforme Figura 25.

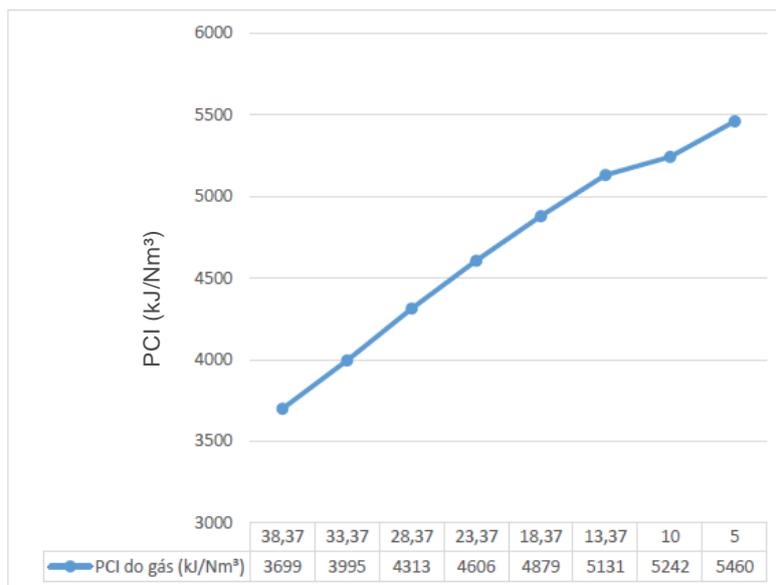


Figura 25 – Teor de umidade em relação ao PCI do gás de síntese.

Fonte: Carvalhaes, 2013.

Estes resultados mostram a importância de estimar um processo de secagem anterior ao processo de gaseificação, já que desta forma é obtido um gás com maior PCI.

A maneira usual de classificação dos diversos tipos disponíveis de gaseificadores é feita em função do comportamento do leito da matéria a ser gaseificada. Uma subdivisão pode ser feita em função do movimento relativo do insumo, do agente oxidante e dos gases produzidos.

Uma descrição dos tipos de gaseificadores pode ser notado a seguir.

**Gaseificadores de leito fixo:** A matéria a ser gaseificada só se move por ação da gravidade. Esses gaseificadores são construídos em um leito fixo, onde todo o combustível é suportado por uma grelha, podendo ser de fluxo ascendente ou descendente com relação ao gás produzido. É a tecnologia mais difundida, conhecida e dominada operacionalmente, a qual vem sendo implementada principalmente em pequenas escalas. Na geração de energia elétrica, gaseificadores de leito fixo têm sido empregados na alimentação de motores de combustão interna, em sistema de capacidades entre 100 kW e 10 MW.

Os gaseificadores de leito fixo ascendente possuem o agente oxidante introduzido por parte inferior do equipamento e o gás produzido sai pela parte superior (Figura 26), produzem gases com pouco particular, mas com altos

teores de alcatrão (10 a 20%). No caso de aplicações em motores de combustão interna, o alcatrão deverá ser removido.

Rajadas de ar e vapor são injetadas para manter as cinzas abaixo da temperatura de fusão e facilitar a conversão de carvão.

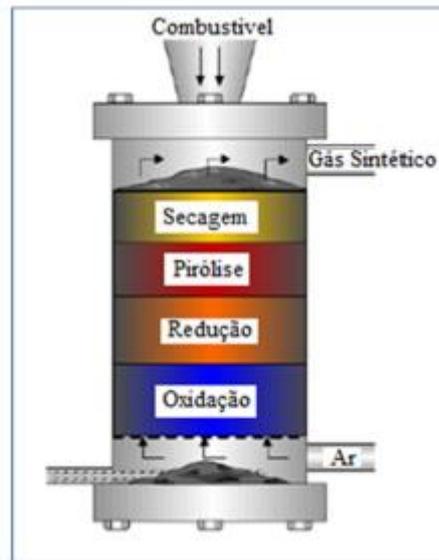


Figura 26 - Gaseificador de fluxo ascendente.

Fonte: Adaptado: Obernberger, Thenk, 2008.

Já os de fluxo descendente ou co-correntes, possuem o oxidante e o gás produzido fluindo para baixo (Figura 27), gerando gases com baixos teores de alcatrão e de material particulado. O baixo rendimento, a dificuldade de manuseio e as cinzas geradas são problemas comuns em pequenos gaseificadores descendentes. A temperatura de saída dos gases também tende a ser maior, pois não trocam calor diretamente com as zonas de pirólise e secagem (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2011).

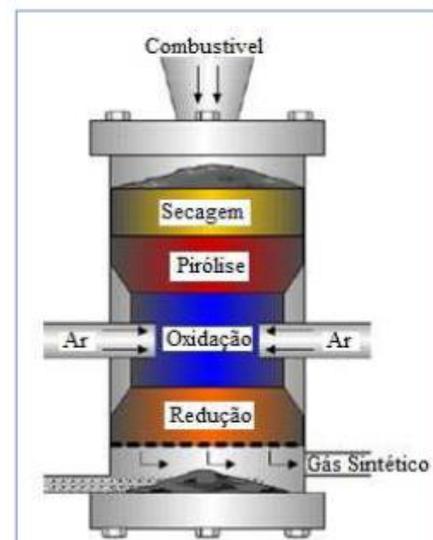


Figura 27 - Gaseificador de fluxo descendente.

Fonte: Adaptado: Obernberger, Thenk, 2008.

**Gaseificadores de leito fluidizado:** Nos equipamentos desse tipo, emprega-se um material que é mantido suspenso em um leito de partículas inertes (areia, cinzas ou alumina) fluidizadas pelo fluxo de ar, que arrasta consigo a biomassa, podem ser do tipo borbulhante ou circulante, conforme a velocidade com que o material atravessa o leito. No tipo borbulhante, a velocidade é em torno de 3 m/s, e no circulante o material atravessa em velocidade mais alta (3 m/s a 10 m/s), permitindo melhor mistura do ar com o combustível a ser gaseificado, mas as bolhas se tornam maiores formando grandes lacunas no leito e arrastando uma quantidade substancial de sólidos que são coletados, separados do gás e levados de volta ao leito.

Um gaseificador com leito fluidizado borbulhante (Figura 28) consiste em um recipiente com uma grelha ao fundo pelo qual o ar é introduzido, assim uma corrente de gás com sentido ascendente atravessa a grelha atingindo um leito de materiais de fina granulação, normalmente areia, onde se encontra a biomassa (GEROSA, 2012).

Gaseificadores de leito fluidizado circulante (Figura 29) diferem-se do leito borbulhante pelo fato de não haver uma separação bem definida entre a zona de sólidos densos e a zona de sólidos diluídos (CALLE, 2005).

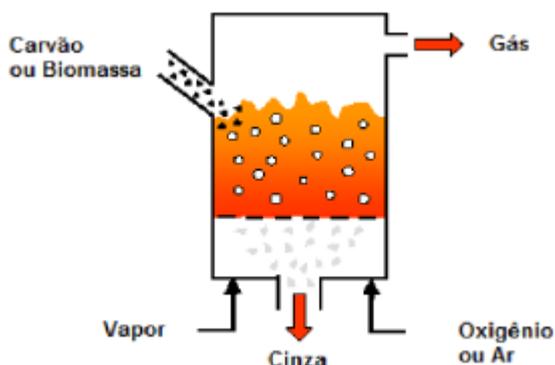


Figura 28 - Gaseificador Leito Fluidizado Borbulhante

Fonte: GEROSA, 2012.

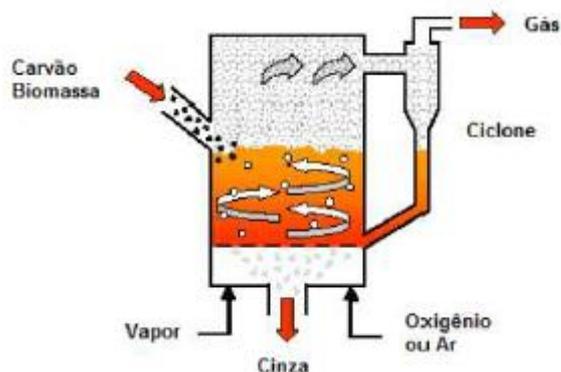


Figura 29 - Gaseificador Leito Fluidizado Circulante

Fonte: GEROSA, 2012.

Estes tipos de gaseificadores são mais adequados à conversão de uma maior quantidade de biomassa; sistemas com capacidade entre 10 a 20 toneladas de biomassa por hora já são operacionais.

São também mais flexíveis quanto às características de insumo, podendo ser empregados na conversão de biomassa com mínimas necessidades de processamento anterior à alimentação.

Há dois modos de fornecer calor: direto e indireto. No fornecimento de calor direto, o calor requerido para a gaseificação vem da combustão do carvão no reator. No modo indireto, o carvão removido do gaseificador é queimado em um recipiente separado. A vantagem é que os subprodutos da queima do carvão não se misturam com os produtos da gaseificação.

**Gaseificação de leito de arraste:** Neste tipo de gaseificador a biomassa seca (ou líquida) é injetada junto com uma quantidade relativamente alta de oxigênio e/ou vapor pressurizado.

Esta tecnologia tem como principal característica a produção de um gás limpo e sem alcatrão. Isso ocorre devido ao uso de oxigênio, o que permite o equipamento trabalhar com temperaturas em torno do ponto de fusão das cinzas. E ainda permite que a matéria prima utilizada para alimentar o gaseificador possa estar tanto seca como úmida, o que apesar de ser um ponto positivo, pode-se tornar negativo devido ao fato de que quanto mais umidade (ou teor de cinzas), maior a necessidade de injeção de oxigênio (Soares, 2012).

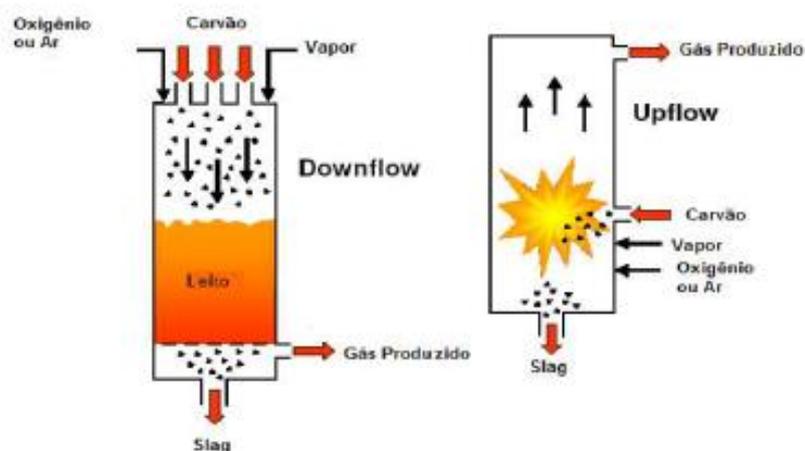


Figura 30 - Gaseificador Leito de Arraste

Fonte: GEROSA, 2012.

São listadas na Tabela 15, as vantagens e desvantagens dos tipos de gaseificadores mencionados.

Tabela 15 - Vantagens e desvantagens dos tipos de gaseificadores.

Gaseificadores		Vantagens	Desvantagens
Leito Fixo	Ascendentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplicidade operacional e habilidade de gaseificar materiais com elevado teor de água e material inorgânico</li> <li>- Potencial de operar com temperaturas muito elevadas na região de grelha, capaz de fundir metais e escória.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O gás normalmente contém de 10 a 20% de alcatrão gerado na pirólise do combustível, com uma concentração da ordem de 100 g/Nm<sup>3</sup>.</li> <li>- No caso de aplicações em motores de combustão interna, turbinas ou para geração de gás de síntese, o alcatrão deverá ser removido.</li> <li>- A grelha pode ser submetida a temperaturas muito elevadas, a não ser que vapor d'água ou CO<sub>2</sub> seja injetado com o ar ou oxigênio.</li> <li>- A granulometria do combustível alimentado tem de ser uniforme para evitar perda de carga elevada no leito ou formação de canais preferenciais.</li> </ul>
	Descendente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consome entre 99 a 99,9% do alcatrão; desta forma o gás gerado pode ser transportado em tubulações e utilizados em motores com um mínimo de limpeza.</li> <li>- Os materiais inorgânicos ficam retidos na matriz do carvão e cinza retirada pelo fundo dos gaseificadores, reduzindo de forma acentuada a necessidade de ciclones de elevada eficiência e filtros a quente</li> <li>- Os gaseificadores de topo aberto apresentam poucos problemas em casos de explosão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O combustível tem de apresentar baixa umidade (&lt;20%) e granulometria uniforme.</li> <li>- O gás de saída possui temperaturas elevadas (em geral 700°C); considerando uma energia perdida caso não haja o seu aproveitamento.</li> <li>- Tipicamente 4 a 7% do carbono do combustível não é convertido, saindo com as cinzas pelo fundo do gaseificador.</li> <li>- A potência de pico de motores com ignição a vela é reduzida em 30 a 40%, a menos que ele seja turbinado.</li> </ul>
Leito Fluidizado		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tolerância à qualidade do combustível.</li> <li>- Grande tolerância à granulometria do combustível.</li> <li>- Bom controle da temperatura do leito.</li> <li>- Rápida resposta a carga.</li> <li>- Excelente distribuição da temperatura do leito.</li> <li>- Possibilidade de processo catalítico no leito.</li> <li>- Moderados níveis de alcatrão no gás produzido.</li> <li>- Pode operar a carga parcial.</li> <li>- Alta eficiência de conversão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de alimentação.</li> <li>- Pode haver aglomeração do leito.</li> <li>- Demora na partida.</li> <li>- Não é operação trivial.</li> <li>- Alta concentração de particulados no gás produzido.</li> <li>- Perda de carbono com as cinzas.</li> </ul>
Leito de arraste		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta eficiência de conversão.</li> <li>- Capacidade de operar a temperaturas e pressões elevadas (&gt; 1.200°C e ~80 bar).</li> <li>- Baixa formação de CH<sub>4</sub> e alcatrões.</li> <li>- Cinza sai na fase fundida.</li> <li>- Conhecimento amplo no uso comercial para a gaseificação de carvão mineral e óleos residuais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material refratário resistente às cinzas de biomassa.</li> <li>- Desenvolver sistema de alimentação de finos de biomassa.</li> <li>- Pouco conhecimento na utilização de biomassa como combustível.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de CENBIO (2002), ANDRADE (2007) e USHIMA.

Apesar do antigo e vasto conhecimento sobre a gaseificação processual, a biomassa ainda não é tão abordada como combustível para este tipo de destinação final, tendo início comercial de forma tímida nos últimos anos. Atualmente representa apenas 1% dos projetos, sendo os principais com carvão, seguidos de petróleo, gás natural e coque de petróleo (Figura 31) (GTC, 2012).

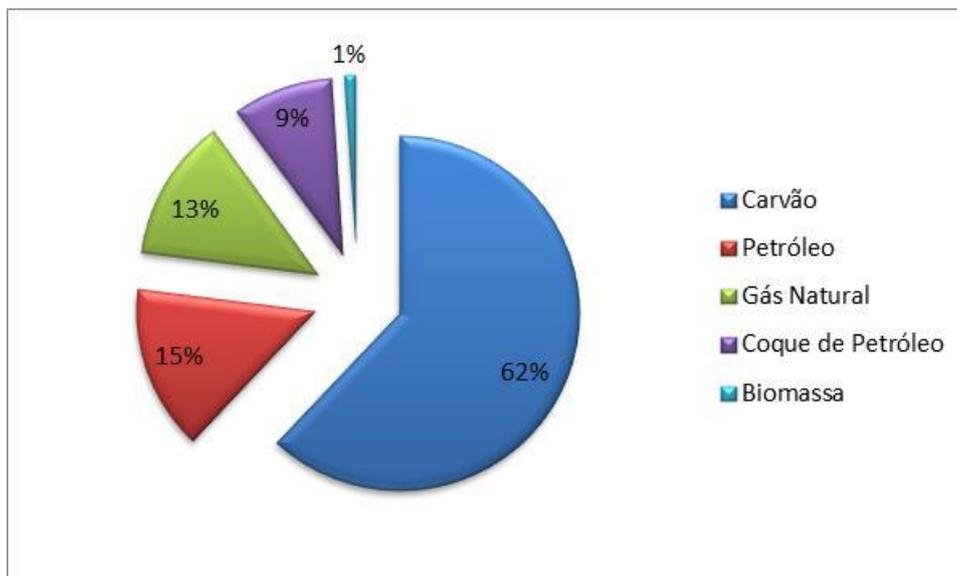


Figura 31 - Matriz mundial de gaseificação

Fonte: Adaptado de GTC, 2012.

Como produto final, a maior conversão destes combustíveis mencionados é para a obtenção de produtos químicos, seguido de combustíveis líquidos, em terceiro lugar, para a obtenção de energia elétrica e, por fim, combustíveis gasosos (Figura 32) (NETL, 2012).

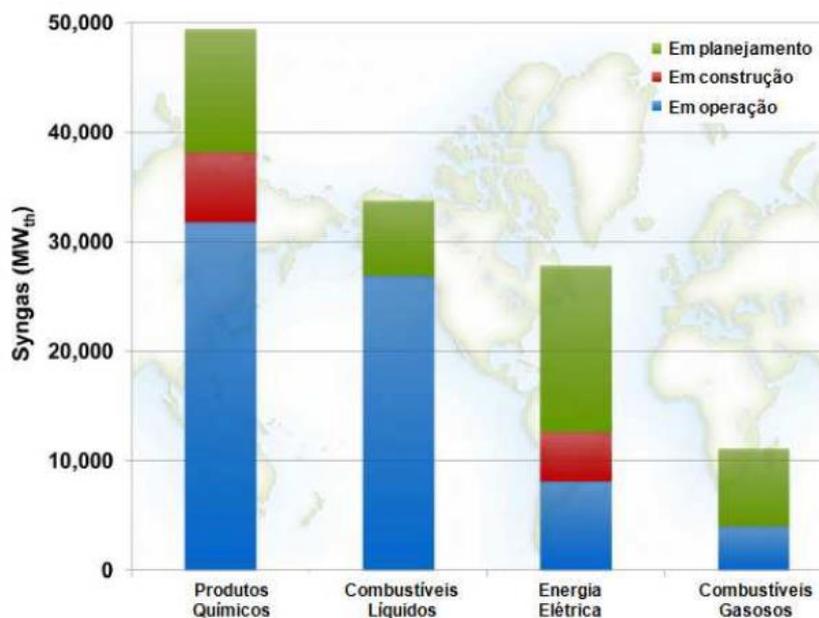


Figura 32 - Produto final na conversão dos combustíveis da gaseificação – Cenário Mundial.

Fonte: NETL, 2012.

A Figura 33 a seguir demonstra os tipos de gaseificadores apresentados e sua respectiva gama de potência de geração de energia.

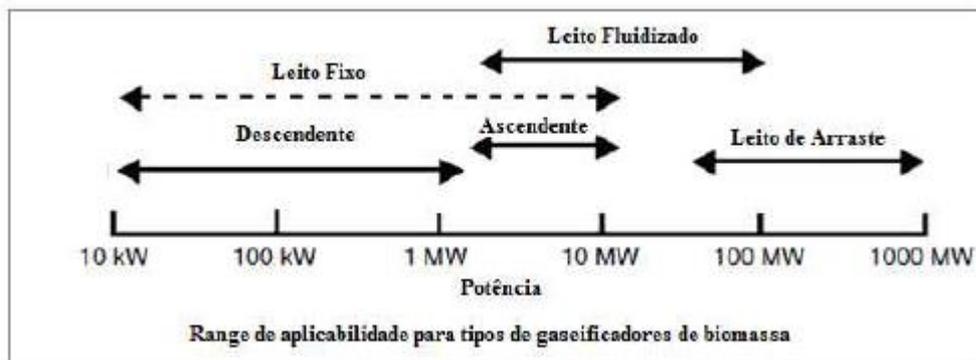


Figura 33 - Tipos de gaseificadores e suas potências geradoras.

Fonte: Kinto, 2012.

De forma geral, os gaseificadores possuem uma grande vantagem com relação a pequenas plantas de geração de energia, principalmente para aplicação em regiões isoladas e para a destinação final dos RSU em municípios de pequeno porte.

Além disso, podemos citar outros benefícios:

- Gaseificação possui maior eficiência energética (65 a 80%) em relação a combustão direta (60 a 75%);
- As cinzas e o carbono residual permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de particulados;
- É facilmente distribuído;
- A sua queima é mais facilmente controlada

### 3.2.9. Plasma;

A tecnologia arco de plasma também conhecida como plasma pirólise consiste em um processo de decomposição química por calor na ausência de oxigênio. Esta é uma tecnologia dedicada à destruição dos resíduos que associa as altas temperaturas geradas pelo plasma com a pirólise dos resíduos.

As propriedades de um gás sofrem mudanças significativas quando este gás é submetido a temperaturas muito elevadas. Quando a temperatura de

aquecimento atinge cerca de 2.000 °C as moléculas do gás começam a se dissociarem em estado atômico. Quando atinge 3.000 °C os átomos são ionizados devido à perda de parte dos elétrons. Este gás ionizado é chamado de plasma.

No estado de plasma o gás atinge temperaturas extremamente elevadas, variando de 5.000 °C a 50.000 °C de acordo com as condições de geração, tipicamente as temperaturas do plasma são da ordem de 15.000 °C. O gás sob o estado de plasma apresenta boa condutividade elétrica e alta viscosidade quando comparado a um gás no estado normal.

O plasma é gerado pela formação de um arco elétrico através da passagem de corrente entre o cátodo e o ânodo. Podem ser utilizadas tanto a corrente contínua como a corrente alternada (FEAM, 2010).

O resíduo sólido é alimentado na fornalha por meio de um sistema de alimentação de câmaras estanques ("lock hopper"). Ar pré-aquecido, enriquecido ou não com oxigênio, é injetado na base da fornalha para alimentar a combustão de parte do material, sob a forma carbonizada neste ponto do equipamento.

Os gases de queima são conduzidos para um reator de decomposição térmica a plasma, onde são totalmente decompostos, tendo ao final como constituintes, basicamente, hidrogênio e monóxido de carbono. A queima do resíduo é acompanhada da vitrificação do material inorgânico no fundo da fornalha. Na concepção deste processo nenhuma corrente resultante da queima pode deixar o sistema sem ser exposta a elevadas temperaturas, quer seja a escória vitrificada ou os gases da decomposição.

Os gases e os sólidos fluem contracorrente através da fornalha. A escória fundida escoar pela base a cerca de 1450 °C enquanto que o gás, inclusive hidrocarbonetos e outras substâncias orgânicas parcialmente decompostas, sai pelo topo da fornalha entre 600 °C e 800 °C. Este gás é misturado com ar aquecido a plasma no reator de decomposição, onde é completamente destruída a matéria orgânica remanescente, produzindo um gás combustível a cerca de 1200 °C a 1400 °C, ver Figuras 34 e 35 (FEAM, 2010).

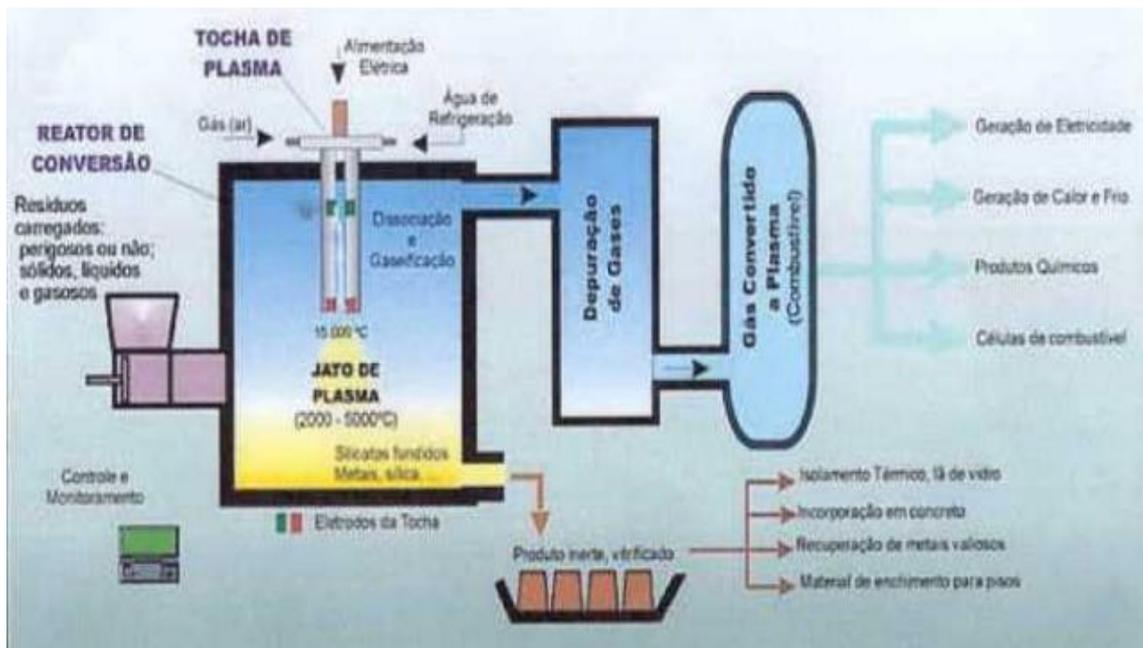


Figura 34 - Incinerador do tipo Plasma.

Fonte: [www.kompac.com](http://www.kompac.com)



Figura 35 - Tocha de plasma.

Fonte: [www.kompac.com](http://www.kompac.com)

Segundo Rigato (2008), os principais atrativos para a utilização deste tipo de sistema são:

- Elevadas temperaturas causam rápida e completa pirólise da substância orgânica, assim como fundem e podem vitrificar certos resíduos inorgânicos;
- Alta densidade de energia possibilita a construção de reatores com menores dimensões para as mesmas capacidades, também favorece a construção de equipamento móvel;
- O uso de energia elétrica reduz a vazão total de gás combustível, dessa forma resultando em menores instalações para o processamento dos gases efluentes e de grande número de opções de gases para geração

do plasma, tornando flexível o controle sobre os fatores químicos do processo;

- Com menores instalações e alta densidade de energia, os tempos de partida e paradas são reduzidos;
- Favorece a pirólise de substâncias sensíveis à radiação ultravioleta, como os organoclorados.

Além do ganho ambiental com relação as emissões de gases, uma vez que o volume gerado é bem menor que os sistemas convencionais de combustão, ainda que não seja excludente a necessidade de lavadores de gases.

Já a grande desvantagem deste processo é principalmente devido as variação dos preços da energia elétrica, já que a tocha é gerada a partir de corrente elétrica. Ainda que sua eficiência de transformação seja da ordem de 85 a 90%.

O processo de gaseificação de resíduo com a tecnologia de plasma pode ser usado para gerar energia elétrica, mas quando o volume de lixo processado é relativamente pequeno, não se produz gás de síntese para combustível. Entretanto, a usina produz vapor e água quente, que podem ser usados como energia e geração de calor em um parque industrial, por exemplo.

Para um volume processado conveniente, um intervalo típico de energia elétrica gerada no processo é [0,6 a 2,2] MW por tonelada de resíduo gaseificado (LAR, 2011).

### **3.2.10. Coprocessamento em forno de Clínquer;**

O coprocessamento consiste em um sistema no qual o tratamento dos resíduos é feito por meio de aproveitamento de uma fonte calórica com outra finalidade primária. Como exemplo, pode ser citado o caso dos fornos para a produção de cimento, que utilizam temperaturas de até 1.450°C para a cliquerização, nos quais se pode fazer a incineração dos resíduos fornecendo energia térmica ao processo, enquanto outros configuram a substituição de matéria-prima (Junior; Saiani; Dourado, 2013). No Brasil, o percentual médio de substituição de combustíveis e matérias-primas é de 15% (SNIC, 2010). Os principais resíduos coprocessados são: borrachas, pneus e emborrachados,

resíduos de biomassa, ceras, substâncias oleosas, lodo de Estação de Tratamento de Efluentes, resinas, colas e látex, catalisadores usados, madeira e terra contaminadas, solventes (DEMA).

### 3.3. Aproveitamento energético dos RSU

Conforme mencionado anteriormente e notável na Tabela 16, diversos países ainda prevalece à forma convencional de destinação dos resíduos, o cobrimento dos resíduos, ainda que já existam diversas plantas com o aproveitamento do biogás gerado pela decomposição do mesmo, seguido da incineração, principalmente em países onde o espaço territorial é limitado, necessitando de alternativas para o tratamento e disposição final dos resíduos.

Tabela 16 – Destinação final dos RSU coletados em diversos países.

Países	Formas de destinação dos resíduos sólidos urbanos (%)			
	Reciclagem	Compostagem	Incineração	Aterros*
Holanda	39%	7%	42%	12%
Suíça	31%	11%	45%	13%
Dinamarca	29%	2%	58%	11%
Estados Unidos	24%	8%	13%	55%
Austrália	20%	<1%	<1%	80%
Alemanha	15%	5%	30%	50%
Japão	15%	<1%	78%	7%
Israel	13%	<1%	<1%	87%
França	12%	12%	40%	48%
Reino Unido	8%	1%	8%	83%
Grécia	5%	<1%	<1%	95%
Itália	3%	10%	7%	80%
Suécia	3%	5%	52%	40%
México	2%	<1%	<1%	98%
Brasil	8%	2%	<1%	90%

\* Contabilizado os aterros sanitários, aterros controlados e lixões.

Fonte: EPE, 2008.

As outras tecnologias de tratamento térmico e o reaproveitamento energético estão em desenvolvimento com diversos estudos em andamento, existindo aplicações para outros fins, não a de RSU, como a pirólise na produção de carvão vegetal a partir da madeira e a reciclagem de pneus; a

gaseificação utilizando madeira, casca de arroz, palha e outros resíduos agrícolas; e a tecnologia de plasma aplicada em siderúrgicas.

Na pirólise, embora as linhas gerais de seu conceito estejam consolidadas, os detalhes do processo como um todo ainda são alvo de inúmeros estudos e divergências. Tem sido há muito empregada na produção de carvão vegetal a partir da madeira e também se encontra tecnicamente consolidada em vários países para reciclagem de pneus (FEAM, 2012).

Ressalta-se que é primordial, antes mesmo de pensar na forma de destinação dos resíduos e seu aproveitamento energético pós-tratamento, a sua redução na geração e o seu reuso. Caso seja inevitável, a terceira opção é a reciclagem.

Um estudo realizado por Calderoni (1996), Tabela 17, estima a conservação potencial de energia elétrica pela reciclagem dos RSU, constatando que o potencial total de energia conservado por dia seria na ordem de 222,6 GWh - considerando as premissas a seguir. Assim pode-se gerar quase o equivalente à geração diária da hidroelétrica de Itaipu (280 GWh por dia)

- Todos os resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil são coletados;
- O volume total de resíduos sólidos urbanos coletados passa por processo de coleta seletiva e triagem de materiais, de modo que todos os materiais passíveis de reutilização são separados e estão disponíveis para a reciclagem;
- A composição gravimétrica dos RSU coletados corresponde à composição gravimétrica dos RSU não coletados;
- Todos os materiais recicláveis disponíveis são reinseridos em processos produtivos;
- Todos os materiais recicláveis são produzidos e reaproveitados por empresas situadas no próprio país.

Tabela 17 – Estimativas da conservação potencial de energia elétrica a partir da reciclagem.

Resíduos sólidos urbanos gerados (kg)	61.936.368.000
<b>Papéis e papelões</b>	
Participação no total de resíduos sólidos urbanos (%)	13,10%
Volume gerado (kg)	8.113.664.208
Índice potencial de conservação de energia (kWh/kg)	3,51
Conservação potencial de energia (kWh)	28.478.961.370,08
Conservação potencial de energia por dia (MWh)	78.024,55
<b>Plástico</b>	
Participação no total de resíduos sólidos urbanos (%)	13,50%
Volume gerado (kg)	8.361.409.680
Índice potencial de conservação de energia (kWh/kg)	5,06
Conservação potencial de energia (kWh)	42.308.732.980,80
Conservação potencial de energia por dia (MWh)	115,914,34
<b>Vidros</b>	
Participação no total de resíduos sólidos urbanos (%)	2,40%
Volume gerado (kg)	1.486.472.832
Índice potencial de conservação de energia (kWh/kg)	0,64
Conservação potencial de energia (kWh)	951.342.612,48
Conservação potencial de energia por dia (MWh)	2.606,42
<b>Metais</b>	
Participação no total de resíduos sólidos urbanos (%)	2,90%
Volume gerado (kg)	1.796.154.672
Índice potencial de conservação de energia (kWh/kg)	5,3
Conservação potencial de energia (kWh)	9.519.619.761,6
Conservação potencial de energia por dia (MWh)	26.081,15
Conservação potencial total de energia (kWh)	81.258.656.724,96
Conservação potencial total de energia por dia (MWh)	222.626,46

Fonte: Calderoni (1996) apud Júnior; Saiani e Dourado, 2013.

Mas como em todo processo existem perdas, não excluindo nossa vivência com o meio, que o seja feito de forma a aproveitar de todas as maneiras possíveis os resíduos gerados, dispondo apenas aquilo que não possua tecnologia para tal.

Ainda que tenha mencionado as técnicas de tratamento e aproveitamento energético, para que haja a geração de energia elétrica outros equipamentos são necessários.

A conversão dos resíduos sólidos em energia a partir do seu tratamento pode ser classificada de duas formas: o primeiro grupo de tecnologias de conversão se baseia na combustão direta dos resíduos (incineração, plasma e coprocessamento), enquanto o segundo se baseia na queima de combustíveis líquidos ou gasosos derivados dos resíduos (aterros sanitários, biodigestores, pirólise e gaseificação).

No primeiro grupo estão as tecnologias que se baseiam nos ciclos a vapor (ciclo Rankine), como as turbinas a vapor, com a combustão direta dos resíduos e utilizando este poder calorífico para a geração de energia. No segundo estão às tecnologias que geram gases combustíveis baseadas na gaseificação, pirólise ou digestão anaeróbia de resíduos, integradas às turbinas ou microturbinas a gás (ciclo Brayton) e motores de combustão interna (ciclo otto e diesel), sendo queimados diretamente nos motores.

No ciclo Rankine (Figura 36), o vapor d'água que passa pela turbina, acoplada ao gerador elétrico, é condensado e retorna à caldeira para reinício do ciclo. Este ciclo utiliza uma turbina a vapor, que é uma máquina térmica de combustão externa (o combustível, no caso o resíduos, queima na caldeira, cedendo calor ao ciclo através do vapor), baseada na conversão de energia calorífica em energia cinética da seguinte forma: o vapor de alta pressão se expande, perdendo pressão e temperatura ao passar por um rotor dotado de palhetas engastadas no mesmo, cedendo parte de sua energia ao rotor da turbina.

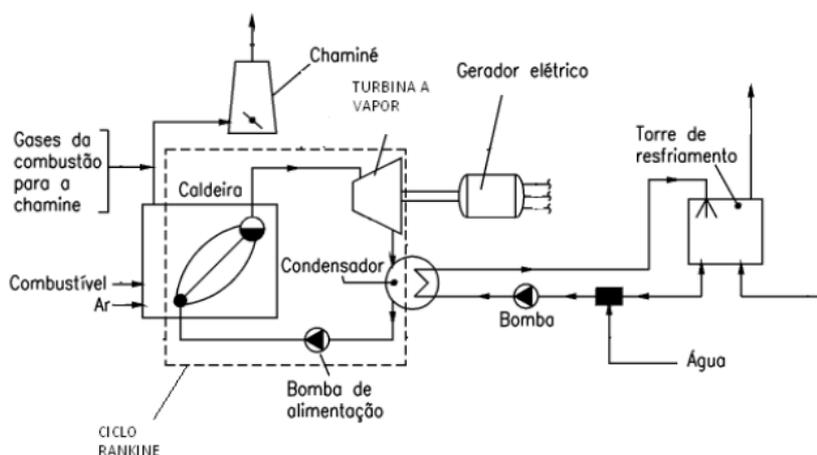


Figura 36 - Representação esquemática do ciclo Rankine de um sistema simples de potência a vapor.

Fonte: VAN WYLEN; SONNTAG e BORGNAKKE, 1997.

As turbinas e microturbinas a gás são compostas por três partes: o compressor, a câmara de combustão e a turbina, propriamente dita (Figura 37). No ciclo Brayton, turbinas e microturbinas a gás, constituem de quatro etapas. Primeiramente o ar, em condições ambientes, passa pelo compressor, onde ocorre sua compressão. O ar, então comprimido, é direcionado às câmaras, onde se mistura com o combustível (subproduto dos resíduos) possibilitando a queima e o aquecimento, à pressão constante. Ao sair da câmara de combustão, os gases, à alta pressão e temperatura, se expandem conforme passam pela turbina. Na medida em que o fluido exerce trabalho sobre as palhetas, reduzem-se a pressão e temperatura dos gases, gerando-se potência mecânica. A potência extraída através do eixo da turbina é usada para acionar o compressor e o gerador.

A quarta etapa não ocorre fisicamente, se tratando de um ciclo termodinâmico aberto. Conceitualmente, esta etapa representa a transferência de calor do fluido para o ambiente.

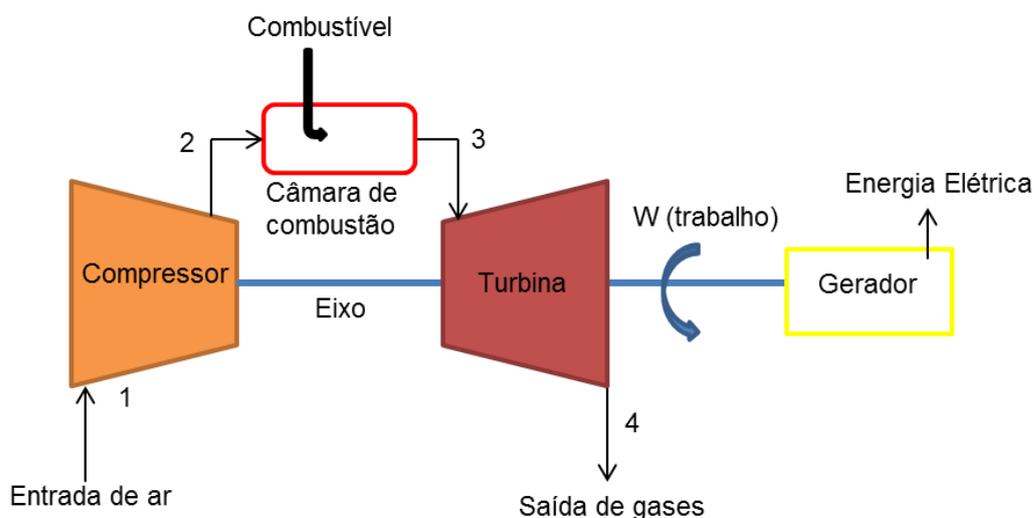


Figura 37 - Representação esquemática do ciclo Brayton e a geração de energia a partir de turbina a gás.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os motores de ciclo Otto se caracterizam por operar de forma cíclica admitindo uma mistura de combustível e ar atmosférico para promover uma explosão na câmara de combustão, expansão dos produtos de combustão e gerando trabalho mecânico. Nesse motor, a combustão é iniciada pela

produção de uma centelha sincronizada com o ciclo numa câmara onde se encontra a mistura ar-combustível já pressurizada. de ignição por centelha.

O seu funcionamento consiste em quatro etapas (Figura 38): a primeira (admissão) ocorre à abertura da válvula de admissão através da qual é injetada no cilindro a mistura ar-combustível e o pistão é empurrado para baixo com o movimento do virabrequim; na segunda (compressão) etapa é realizado o fechamento da válvula de admissão e compressão da mistura (taxa da ordem de 10:1) e, conforme o pistão sobe (antes de chegar à parte superior), a vela gera uma faísca; na terceira (combustão) há explosão da mistura (combustível-ar) e expansão dos gases quentes formados pelo mesmo. Esta expansão promove uma força que faz com que o pistão desça, gerando o trabalho necessário para que o virabrequim gire o eixo vinculado a um gerador; por fim, acontece a abertura da válvula de escape através do qual os gases são expulsos pelo pistão, iniciando novamente o ciclo.

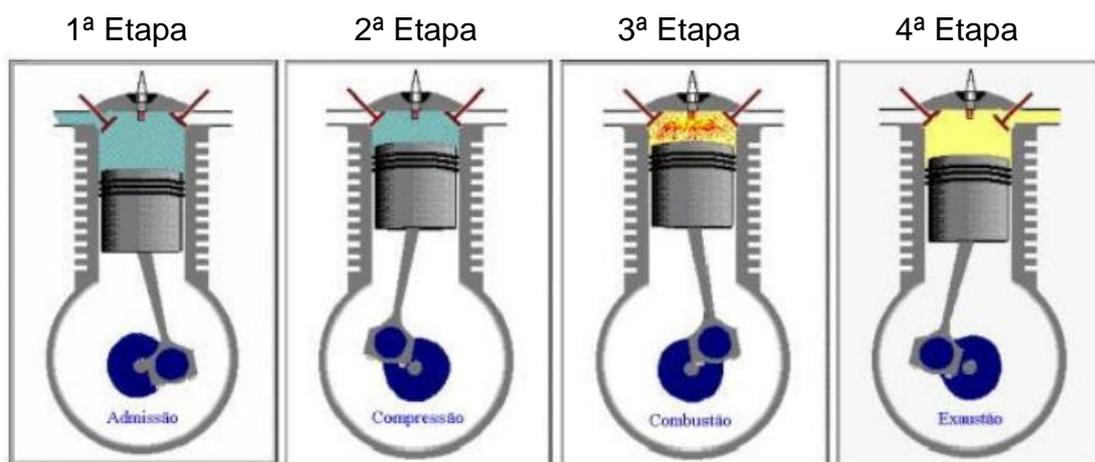


Figura 38 - lustração esquemática das etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto

Fonte: PECORA, 2006.

Estes tipos de motores, ciclo diesel, se caracterizam por operar também de forma cíclica admitindo primeiramente o ar atmosférico e posteriormente, ao final do processo de compressão desse ar, é injetado o combustível. Com a injeção do combustível na massa quente e pressurizada de ar dá-se a combustão espontânea do mesmo, dando início ao processo seguinte de produção de trabalho mecânico no eixo do motor.

O seu funcionamento é realizado, também, por quatro etapas (Figura 39): na primeira etapa (A), o ar é aspirado através da válvula de entrada para o interior do cilindro. Na segunda etapa (B), o pistão sobe comprimindo (com taxa muito elevada) este ar do cilindro, promovendo a elevação da temperatura. A terceira (C), com a injeção do combustível a alta pressão que ao contato com o ar comprimido a alta temperatura, acarretando na combustão espontânea, forçando o pistão a se mover para baixo, finalizando a quarta etapa (D) com a exaustão dos gases da combustão pela elevação do pistão.

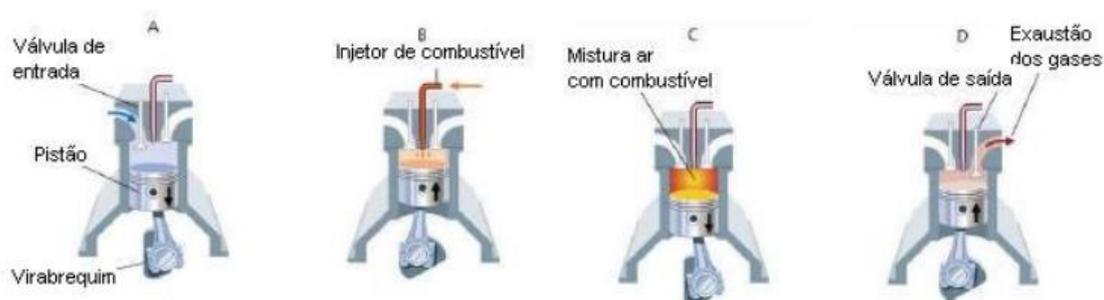


Figura 39 - Funcionamento do motor Diesel

Fonte: CASTRO, 2006.

As microturbinas, além do custo do equipamento em si, exigem que o gás combustível apresente propriedades mais controladas que os motores convencionais, acarretando o uso de sistemas de purificação do gás, o que não se faz necessário para os motores de combustão interna, pois, além de suportar o uso de um biogás in natura, dispensa a necessidade de compressão uma vez que o seu princípio de funcionamento se dá por aspiração (FEAM, 2012).

### 3.4. Legislações

Qualquer forma de aproveitamento energético dos resíduos para a geração de energia elétrica, seja ele pela conversão direta ou pela conversão dos subprodutos gerados pelos mesmos, acarretará na emissão de gases de efeito estufa e nocivos, podendo até, em determinados tratamentos, gerar de outros sub-resíduos sólidos ou líquidos.

Os principais poluentes resultantes do tratamento térmico de RSU são descritos a seguir (FEAM, 2010).

**Gases** – gases ácidos (tais como Ácido Clorídrico, Ácido Fluorídrico e Dióxido de Enxofre), e outros gases como Óxidos de Nitrogênio (NOx), Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) são gerados e devem ser removidos pelos sistemas de limpeza dos gases.

**Metais** – em particular Cádmio, Mercúrio, Arsênico, Vanádio, Cromo, Cobalto, Cobre, Chumbo, Manganês, Níquel e Tálcio, entre outros. Estes estão presentes como compostos solúveis (como cloretos e sulfatos), e compostos menos solúveis (como óxidos e silicatos). Mercúrio e Cádmio são emitidos em forma de vapor.

**Substâncias Orgânicas** – estas ocorrem frequentemente quando a combustão não é completa, ou são formadas após a incineração. Os compostos orgânicos podem ser emitidos na forma de vapor ou aderidos ao material particulado (poeiras) arrastado pelos gases de combustão. As dioxinas são os poluentes orgânicos que motivam as maiores preocupações, por serem altamente tóxicas, carcinogênicas e teratogênicas, além de serem substâncias persistentes no meio, levando de anos a séculos para se degradarem.

**Materiais Particulados** – partículas finas (quase sempre materiais inorgânicos como Sílica), frequentemente com metais e compostos orgânicos em suas superfícies. Estas apresentam grandes variações em seus tamanhos e normalmente são retidas sem muita dificuldade. Mas recentemente as preocupações voltaram-se para as partículas ultrafinas, menores do que 10 microns (10 milionésimos de metro), conhecidas como PM10, cuja remoção requer tecnologias mais sofisticadas.

Mediante a preocupação com a minimização dos impactos ao meio e a saúde pública com estas emissões, toda e qualquer planta de aproveitamento energético deve atender legislações específicas referentes às emissões atmosféricas.

Em âmbito nacional, a Resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990, trata dos padrões de qualidade do ar.

Segundo esta resolução, são padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a

segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

São estabelecidos dois tipos de padrões de qualidade do ar: os primários e os secundários.

- Padrões primários de qualidade do ar as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo.
- Padrões secundários de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo.

A Tabela 18 verifica-se os padrões de emissões, primários e secundários de qualidade do ar, e o método de medição, estabelecidos pelo CONAMA 03/1990, para alguns poluentes.

Tabela 18 - Padrões nacionais de qualidade do ar

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Padrão Secundário $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Método de Medição
Partículas totais em suspensão	24 horas <sup>1</sup>	240	150	amostrador de grandes volumes
	MGA <sup>2</sup>	80	60	
Partículas inaláveis	24 horas <sup>1</sup>	150	150	separação inercial/filtração
	MAA <sup>3</sup>	50	50	
Fumaça	24 horas <sup>1</sup>	150	100	refletância
	MAA <sup>3</sup>	60	40	
Dióxido de enxofre	24 horas <sup>1</sup>	365	100	pararosanilina
	MAA <sup>3</sup>	80	40	
Dióxido de nitrogênio	1 hora <sup>1</sup>	320	190	quimiluminescência
	MAA <sup>3</sup>	100	100	
Monóxido de carbono	1 hora <sup>1</sup>	40.000	40.000	infravermelho não dispersivo
	8 horas <sup>1</sup>	35 ppm	35 ppm	
		10.000	10.000	
		9 ppm	9 ppm	
Ozônio	1 hora <sup>1</sup>	160	160	quimiluminescência

1 - Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano. 2 – MGA = Média geométrica anual.

3 – MAA = Média aritmética anual.

Fonte: CONAMA 03/90

A Resolução CONAMA 382 de 26 de dezembro de 2006, também aborda e estabelece limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos por fontes fixas, mas nenhum limite de emissão é específico para o aproveitamento energético de RSU para a geração de energia elétrica, utilizado-a apenas como base, e não legalmente.

No âmbito estadual, o Decreto nº 8.468 de 08 de setembro de 1976 dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente, tanto da poluição do ar, quanto da poluição do solo e de corpos hídricos.

Já o Decreto Estadual nº 59.113 de 23 de abril de 2013, estabelece uma revisão dos padrões de emissões do Decreto citado anteriormente, baseado nas diretrizes estabelecidas pela Organização Mundial de Saúde (OMS). Ainda delimita regiões de gerenciamento da qualidade do ar, que coincide com as 22 Unidades de Gerenciamento de Recurso Hídrico, definido na Lei nº 9.034, de 27 de dezembro de 1994, além da possibilidade de subdividir estas regiões e aborda os mecanismos de geração de créditos para fontes móveis e fixas.

Ainda há a Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, que dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos e engloba o tratamento térmico de resíduos sólidos de origem urbana, considerando que as cinzas volantes e escórias provenientes do processo de tratamento térmico, devem ser consideradas, para fins de disposição final, como resíduos Classe I – Perigoso, e que o órgão ambiental poderá autorizar a disposição destes como resíduos Classe II A (não perigoso, não inerte) e Classe II B (não perigoso, inerte), se comprovada sua inertização, de acordo com a ABNT NBR 10.004 que dá classificação dos resíduos sólidos. Além de limites de emissões de dioxinas e furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-paradioxina): 0,50 ng/Nm<sup>3</sup>. Sendo a CETESB mais rigorosa com padrão de emissão de dioxina em 0,14 ng/Nm<sup>3</sup> (CETESB E15.011/Dez.92).

Há a legislação estadual de SP – resolução SMA de 2008 com padrões bem mais restritivos, seguindo a da Diretiva Europeia, que os da Resolução CONAMA n. 316/2002, e de qualidade do ar no raio de alcance da pluma de dispersão atmosférica, estabelecido na Resolução CONAMA n. 003/1990, ou outra exigência específica estabelecida pelo Órgão Ambiental.

Vale ressaltar que mesmo com padrões de emissões já estabelecidos, depois de apresentado o relatório de impacto ambiental, dependendo do porte do empreendimento, cabe ao órgão ambiental analisar e estabelecer, em determinadas circunstâncias, padrões mais rígidos de emissões se convir.

Para o atendimento destas normas vigentes, tecnologias de controle de poluição devem ser instaladas nas plantas de aproveitamento energético. No item a seguir, serão mencionadas as tecnologias utilizadas como controle para a redução ou inertização dos poluentes gerados no processo de combustão do resíduo ou dos subprodutos do mesmo.

### **3.5. Tecnologia para o controle de emissões**

Para que os empreendimentos de reaproveitamento energético dos RSU atendam as legislações de emissões atmosféricas, comentado anteriormente, alguns sistemas de controle de poluição do ar devem ser contemplados. Cada qual avaliado tecnicamente e economicamente para atender as suas especificidades de projeto.

A metodologia a ser utilizada para controle das emissões de poluentes atmosféricos se baseia na avaliação do tipo de tecnologia de controle a ser utilizada, ou seja, da melhor tecnologia disponível levando em conta os aspectos técnicos, socioeconômicos e ambientais (JACOMINO et al., 2002).

Além dos equipamentos de controle das emissões gasosas e das tecnologias utilizadas, a eficácia de um sistema de controle de poluição do ar requer um monitoramento contínuo, não apenas das emissões atmosféricas como também da sua operação. Para isso um sistema de monitoramento contínuo deve ser instalado e equipado para medir e gravar os vários parâmetros, para que estejam em conformidade com as normas legais vigentes e que não afetem a qualidade do ar e conseqüentemente a saúde da população (FEAM, 2010).

Os equipamentos comercialmente utilizados para o controle das emissões atmosféricas são:

- Coletor Gravitacional;
- Ciclones;
- Lavadores de Gases;
- Filtros Mangas;
- Filtros Eletrostáticos;
- Filtros Absolutos.

Na Figura 40, é possível observar as tecnologias citadas relacionadas com sua utilização, de acordo com os tipos de poluentes e as dimensões de partículas.

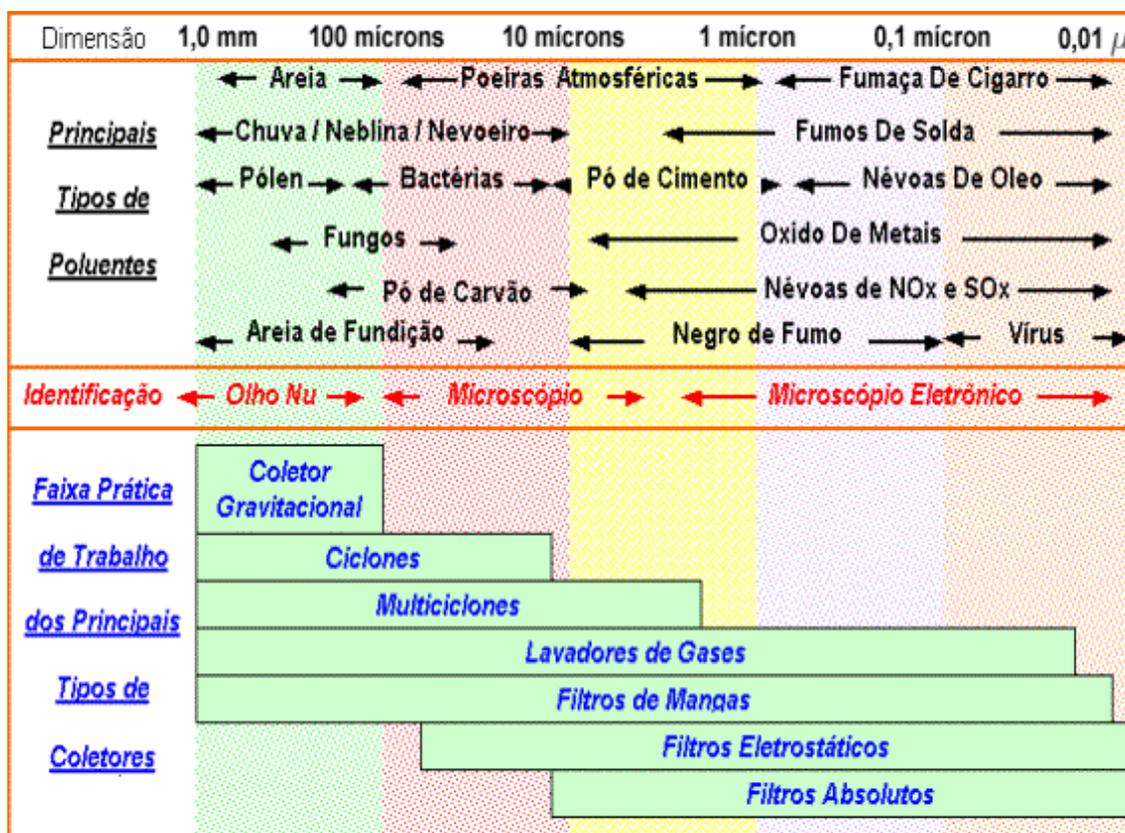


Figura 40 – Tipos de coletores relacionados com a melhor eficiência para determinados tipos de poluentes.

Fonte: Aguiar, 2002.

Os equipamentos normalmente utilizados para o controle e a remoção de material particulado são: filtros de manga, precipitadores eletrostáticos e lavadores úmidos.

Outro poluente a ser considerado é o NOx que, dentre outras origens, pode ser formado a partir do N<sub>2</sub> presente no ar que é injetado durante a combustão (NOx térmico). Porém, isso só ocorre mais intensa e significativamente em temperaturas elevadas (cerca 1.400 °C), o que não é comum em processos de tratamento térmico de RSU, ainda que presente. Para o controle das emissões de NOx, é importante manter o processo de combustão (temperatura de chama, concentração de oxigênio, umidade da fornalha, tempo de retenção etc.) em níveis adequados, o que irá reduzir a geração desse poluente.

Os equipamentos de controle de poluição do ar nem sempre conseguem remover metais pesados, principalmente mercúrio, cádmio e chumbo oriundos do tratamento térmico dos RSU devido às características físico-químicas, como por exemplo, temperaturas de volatilização relativamente baixas.

Estudos relatam, referentes ao balanço de massa de cádmio e mercúrio no tratamento térmico de resíduos sólidos municipais, que 5% do cádmio que entra no processo sai no gás limpo após tratamento, 30% sai na escória e 65% fica junto às cinzas retidas nos filtros. Para o mercúrio, tem-se que 70% do que entra no incinerador sai com o gás limpo, 20% na escória e 10% nas cinzas dos filtros (FEAM, 2010).

Neste caso, para a adsorção de metais pesados, e também aplicáveis para dioxinas/furanos, injeta-se carvão ativado no fluxo de gases de combustão antes do sistema de lavagem, ou até a passagem dos gases por filtros de carvão ativado.

Outra forma para evitar a formação das dioxinas e furanos é recomendável trabalhar em temperaturas acima de 1200 °C, com tempos de residência de 2 segundos, CO na faixa de 40-50 ppm, excesso de oxigênio em torno de 3% base seca na chaminé, resfriamento rápido dos gases de combustão (brusco até 80 °C, sem etapas intermediárias, evitando-se tempo de residência nas faixas entre 275-375 °C e 550-650 °C), além de evitar o acúmulo de cinzas, principalmente nas zonas de baixa temperatura. Outros equipamentos como torres de lavagem, oxidação catalítica a 300°C e injeção de oxidante, como água oxigenada, também devem ser empregados (GABAÍ, 1994).

As cinzas são subprodutos do tratamento térmico e constituem-se da porção inorgânica e da matéria não-combustível presente nos RSU.

Durante o processo de tratamento térmico são gerados dois tipos de cinzas: as de fundo denominadas por alguns autores como cinza pesada, cinza de fundo ou escória e as cinzas suspensas retidas pelo sistema de controle das emissões gasosas, também denominadas de cinza leve ou cinzas volantes. As primeiras correspondem de 75% a 90% de toda cinza gerada dependendo do tipo de instalação e do tipo de combustível (resíduo sólido domiciliar, resíduo sólido dos serviços de saúde, resíduo sólido industrial ou outros). (FEAM, 2012)

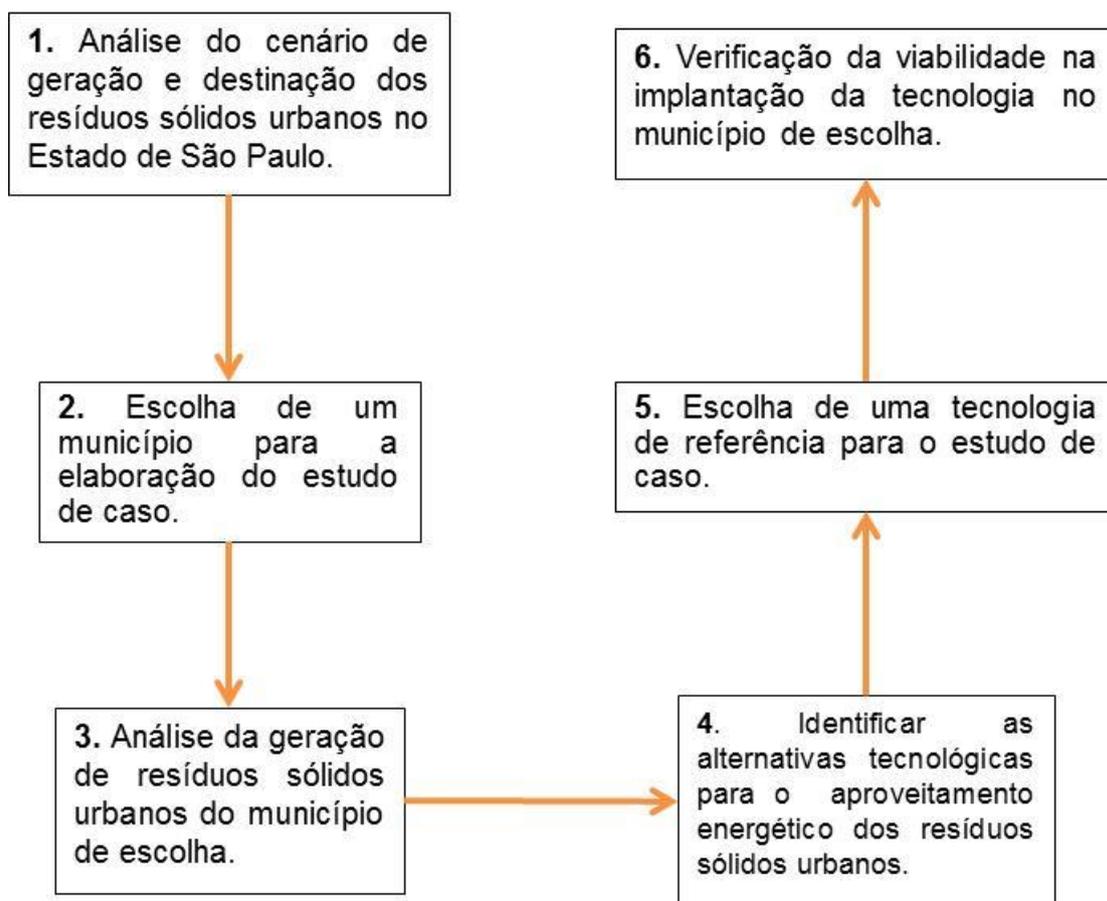
E por fim, ainda existe a preocupação com as emissões odoríferas, por técnicas de tratamentos físicos (adsorção em carvão ativado, absorção em lavadores com água pura), químicos (oxidação térmica, oxidação catalítica, lavadores químicos, ozonização) e biológicos (biolavadores, biopercoladores, biofiltros).

## 4. Estudo de caso do aproveitamento energético dos RSU no município de Itanhaém/SP

### 4.1. Desenvolvimento Metodológico.

O presente trabalho baseou-se em pesquisa exploratória complementada pela técnica de estudo de caso, no município de Itanhaém - SP, com o intuito de abordar questões sobre o reaproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos e sua disposição correta.

Para tanto, utilizou-se o seguinte desenvolvimento metodológico, sendo elaborado por etapas, conforme fluxograma abaixo e apresentados posteriormente.



### **1- Análise do cenário de geração e destinação dos resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo.**

A análise do cenário de geração e destinação foi possível pela pesquisa exploratória realizada em documentos governamentais, artigos, teses, livros, sites especializados e, eventualmente, outras fontes disponíveis na internet.

### **2- Escolha de um município para a elaboração do estudo.**

A partir da análise do cenário no Estado de São Paulo, optou-se na escolha de um município, em específico Itanhaém, para a realização do estudo de caso sobre o aproveitamento energético do RSU.

A justificativa da escolha deste município em específico será abordada posteriormente.

### **3- Análise da geração de resíduos sólidos urbanos do município de escolha.**

Com a escolha do município para o estudo de caso, diagnosticou-se a gestão e gerenciamento dos RSU quanto a sua geração, classificação, quantificação, destinação e disposição final, para identificar o potencial aproveitamento destes resíduos e a melhor tecnologia a ser aplicada.

### **4- Identificar as alternativas tecnológicas para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.**

Identificaram-se as possíveis tecnologias existentes para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos.

Essa pesquisa teve seu embasamento em artigos, teses, livros, sites especializados e, eventualmente, outras fontes disponíveis na internet.

### **5- Escolha de uma tecnologia de referência para o estudo de caso.**

Com a compilação dos itens 3 e 4, escolheu-se a tecnologia que melhor se enquadra no cenário do município em estudo.

## **6- Verificação da viabilidade na implantação da tecnologia no município de escolha.**

Com o cenário da geração do município de escolha e a tecnologia mais cabível para o mesmo, fora elaborado um estudo de viabilidade técnica para a disposição final dos RSU, com o intuito do aproveitamento energético.

Este estudo tem a principal intenção de servir como exemplo para sua replicação em diversos outros municípios.

## 4.2. Resultados

Os resultados foram alcançados a partir do desenvolvimento metodológico proposto neste trabalho.

A escolha do município de Itanhaém - SP para a realização do estudo de caso foi decorrente de três motivos que impulsionaram esta pesquisa.

O primeiro, e mais importante, foi ao observar a grande problematização na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, principalmente nos municípios de pequeno e médio porte, uma vez que a PNRS estabeleceu prazos e exigências para a elaboração de um plano de gestão integrada dos resíduos sólidos, e estes municípios precisaram recorrer para consultorias externas, já que não possuem corpo técnico especializado para fazê-lo.

Ainda que o município de Itanhaém se classifique, segundo classificação sugerida pelo Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome (2004) e o Centro de Referência da Assistência Social (CRAS) conforme Tabela 19 abaixo, em médio porte, com aproximadamente 87.000 habitantes (IBGE, 2010), este estudo poderia ser replicado para diversos outros municípios ou até servir de base para a elaboração do plano de gestão, já que, seguindo esta classificação, dos 5.561 municípios existentes no Brasil, 5.037 são considerados como pequeno porte, ver Tabelas 20 e 21. O que representa mais de 90% do total de municípios com menos de 50.000 habitantes, sendo que destes, aproximadamente 73% (4.074 municípios) possui menos de 20.000 habitantes.

Mais da metade destes municípios estão concentrados nas regiões Sul e Sudeste, conforme Tabela 22, consideradas as regiões com o maior desenvolvimento econômico e poder aquisitivo, proporcionando possíveis recursos e incentivos para iniciativas no gerenciamento dos resíduos.

Tabela 19 – Classificação do porte do município de acordo com a população residente.

Pequeno Porte I	Municípios de até 20.000 habitantes
Pequeno Porte II	Municípios de 20.001 a 50.000 habitantes
Médio Porte	Municípios de 50.001 a 100.000 habitantes
Grande Porte	Municípios com mais de 100.001 habitantes

Fonte: Elaborado pelo autor com base na classificação do MDS (2004)

Tabela 20 - Número de municípios segundo as Unidades da Federação e classes de tamanho da população dos municípios - Brasil – 2000.

Classificação de acordo com o tamanho da população (habitantes)	Classes de tamanho da população dos municípios (habitantes)	Número de municípios	Taxa de crescimento 1991/2000
	Brasil		
	Até 5 000	5.561	1,6
Pequeno Porte I	Até 5 000	1.382	0,1
Pequeno Porte I	De 5 001 até 10 000	1.308	0,4
Pequeno Porte I	De 10 001 até 20 000	1.384	1,1
Pequeno Porte II	De 20 001 até 50 000	963	1,5
Médio Porte	De 50 001 até 100 000	299	2,1
Grande Porte	De 100 001 até 500 000	194	2,4
Grande Porte	Mais de 500 000	31	1,6

Fonte: Elaborado pelo autor com base no IBGE, 2000.

Tabela 21 - Classificação quanto ao porte do município em relação ao número da população residente - Brasil – 2000.

Classificação de acordo com o tamanho da população	Número de municípios	Relação ao Total
Pequeno Porte I	até 20 000	4.074
Pequeno Porte II	De 20 001 até 50 000	963
Médio Porte	De 50 001 até 100 000	299
Grande Porte	Mais de 100 001	225
<b>Total</b>		<b>5.561</b>
		<b>100,00%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor com base no IBGE, 2000.

Tabela 22 – Municípios de pequeno porte pertencentes em cada estado.

Região	Estado/Distrito	Número de municípios	Pequeno porte I e II	Porcentagem do total
Norte	Rondônia	52	46	88,46%
	Acre	22	20	90,91%
	Amazonas	62	56	90,32%
	Roraima	15	14	93,33%
	Pará	143	120	83,92%
	Amapá	16	14	87,50%
	Tocantins	139	136	97,84%
Nordeste	Maranhão	217	200	92,17%
	Piauí	222	217	97,75%
	Ceará	184	160	86,96%
	Rio Grande do Norte	167	160	95,81%
	Paraíba	223	215	96,41%
	Pernambuco	185	154	83,24%
	Alagoas	102	96	94,12%
	Sergipe	75	69	92,00%
	Bahia	417	380	91,13%
Sudeste	<b>Minas Gerais</b>	<b>853</b>	<b>793</b>	92,97%
	Espírito Santo	78	67	85,90%
	Rio de Janeiro	92	59	64,13%
	<b>São Paulo</b>	<b>645</b>	<b>529</b>	82,02%
Sul	<b>Paraná</b>	<b>399</b>	<b>369</b>	92,48%
	Santa Catarina	293	274	93,52%
	<b>Rio Grande do Sul</b>	<b>497</b>	<b>456</b>	91,75%
Centro-Oeste	Mato Grosso do Sul	77	72	93,51%
	Mato Grosso	139	132	94,96%
	Goiás	246	230	93,50%
	Distrito Federal	1	0	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor com base no IBGE, 2000.

A segunda motivação, e não menos importante, foi com relação à destinação dos resíduos gerados no município de Itanhaém, podendo ser observado em quase que na totalidade dos municípios litorâneos de São Paulo, na qual percorrem centenas de quilômetros para a sua disposição final, gerando grandes gastos para o município e sem o seu aproveitamento energético.

Todo o resíduo gerado neste município é transferido para uma área de transbordo, construído em 2012 pela empresa privada LARA, localizado na Estrada Gentil Perez, ver Figura 41.



Figura 41 – Vista geral da estação de transbordo em Itanhaém.

Fonte: Prefeitura de Itanhaém, 2014.

Desta estação os resíduos são destinados para o aterro sanitário LARA Ambiental, localizado na Av. Guaraciaba, 430 – Bairro Sertãozinho, no município de Mauá. Ou seja, pela falta de opção e desenvolvimento de alternativas, os resíduos precisam percorrer, aproximadamente, 110 km até a sua disposição final adequada (Figura 42).

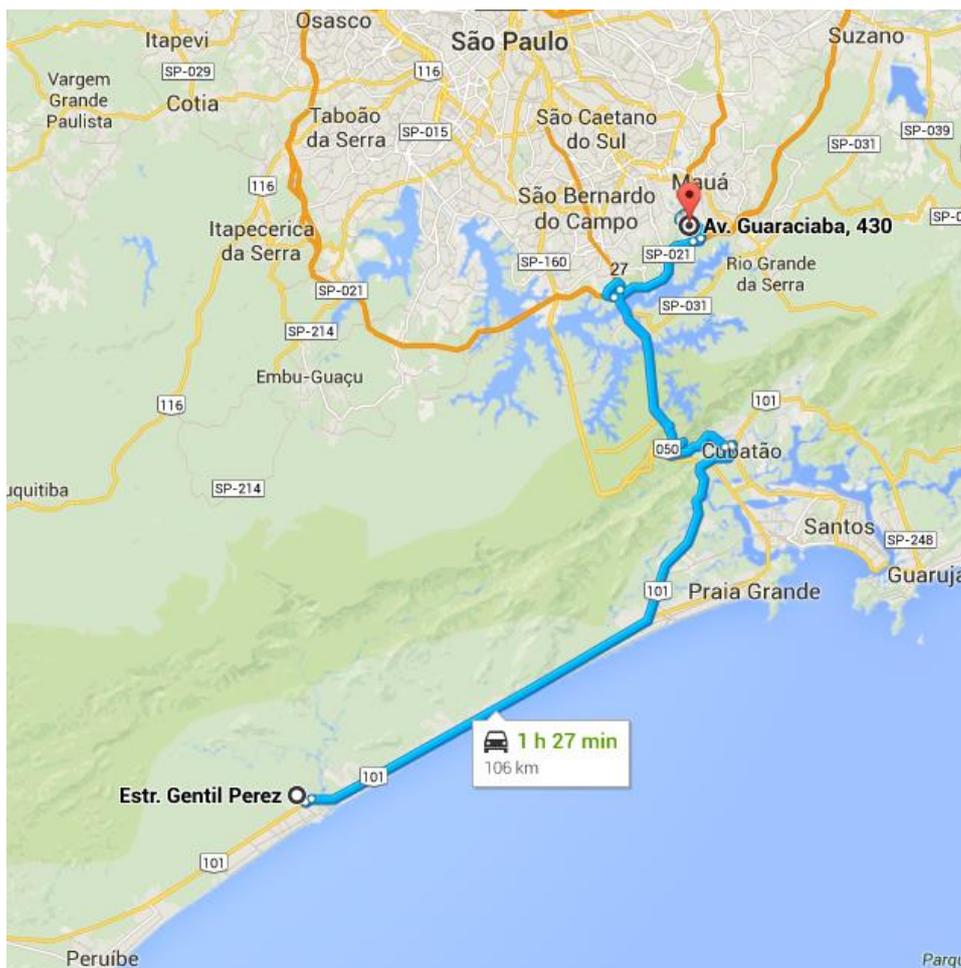


Figura 42 – Trajeto da destinação dos resíduos do município de Itanhaém – SP.

Fonte: Google Mapas.

E o terceiro e último, foi por motivos pessoais pelo apreço àquela cidade onde me acolheu de forma muito agradável.

#### 4.2.1 Geração e Análise gravimétrica dos resíduos do município de estudo

Dados apresentados pela prefeitura municipal de Itanhaém apontam que o município coletou e encaminhou para a destinação final adequada em 2013, aproximadamente, 31 mil toneladas de lixo, conforme se pode observar na Tabela 23. Ressalte-se que o município atualmente coleta 97% de todo os resíduos gerado.

Houve uma redução de 375 toneladas de resíduos com relação ao ano anterior. Inversamente aos dados de população onde, segundo estimativa do IBGE (2014) de acordo com o histórico de crescimento apresentado na Figura 43, teve acréscimo de, aproximadamente, 4.300 habitantes. O que pode estar associado a bons resultados do programa de coleta seletiva, implantado em 2012 pelo município em parceria com a cooperativa CoopersolReciclando, que vêm atuando no ramo de reciclagem no município desde 2010.

Ainda assim, a geração per capita diária do município está em torno de 0,80 kg de resíduos. Abaixo da média nacional de 1,04 kg/hab/dia (ABRELPE, 2013).

Tabela 23 – Resíduos gerados nos anos de 2009, 2010, 2011, 2012 e 2013.

<b>Totalização dos resíduos domiciliares coletado, transbordados e encaminhados à disposição final</b>					
<b>Mes/Ano</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>
jan	1.584,86	2.159,63	2.692,01	3.422,64	4.294,02
fev	2.696,23	4.313,91	4.009,38	3.647,25	2.691,850
mar	1.955,50	2.694,06	3.389,81	3.104,95	2.468,270
abr	1.882,44	1.891,64	2.990,66	1.997,09	2.366,130
mai	1.667,65	1.861,74	2.121,11	1.909,40	1.949,820
jun	1.601,94	1.893,80	2.287,98	1.602,93	2.061,090
jul	1.765,26	2.044,63	2.512,52	2.905,98	2.605,080
ago	1.602,90	1.766,73	2.422,07	2.232,30	1.943,790
set	1.944,51	1.572,85	2.079,10	2.383,51	1.884,400
out	1.969,43	2.108,06	2.240,38	2.527,15	2.657,530
nov	2.087,64	2.223,55	1.958,46	2.629,63	2.661,940
dez	2.377,92	1.681,59	2.439,85	3.081,70	3.485,320
<b>Total anual</b>	<b>23.136,28</b>	<b>26.212,19</b>	<b>31.143,33</b>	<b>31.444,53</b>	<b>31.069,24</b>

Fonte: PGIRS, 2014

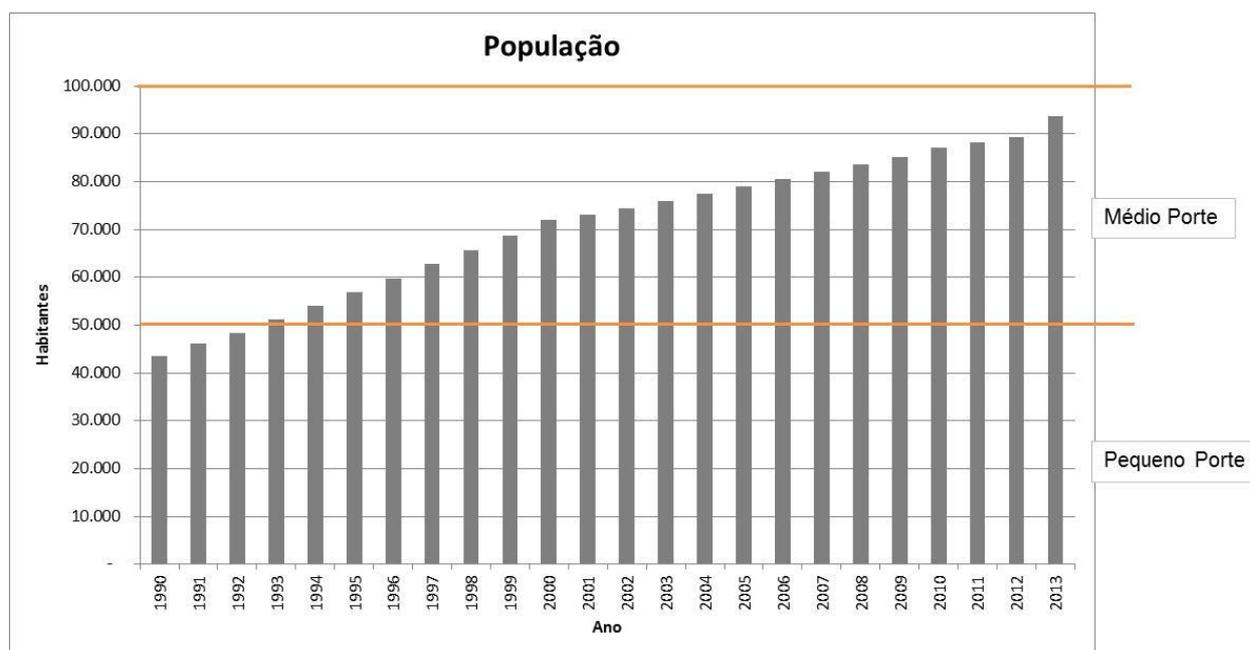


Figura 43 – Quantidade total de habitantes no município de Itanhaém, por ano.

Fonte: Elaborado pelo autor com base de dados Atlas Ambiental (2012) e IBGE, 2014.

A composição gravimétrica dos resíduos gerados é composta, segundo o Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do Município de Itanhaém (2005), na sua maior fração de, aproximadamente, 75% de matéria orgânica, conforme Tabela 24 e Figura 44. Desta forma a grande fração do RSU é composta de resíduo úmido.

Tabela 24 – Composição física do lixo do município de Itanhaém.

Componentes	%
Matéria Orgânica	74,8
Plásticos	9,9
Papel	5,4
Couro/Tecido/ Borracha	2,6
Vidro	2,3
Entulho	1,9
Metais	1,8
Madeira	1,1
Outros	0,2

Fonte: PGIRS, 2005.

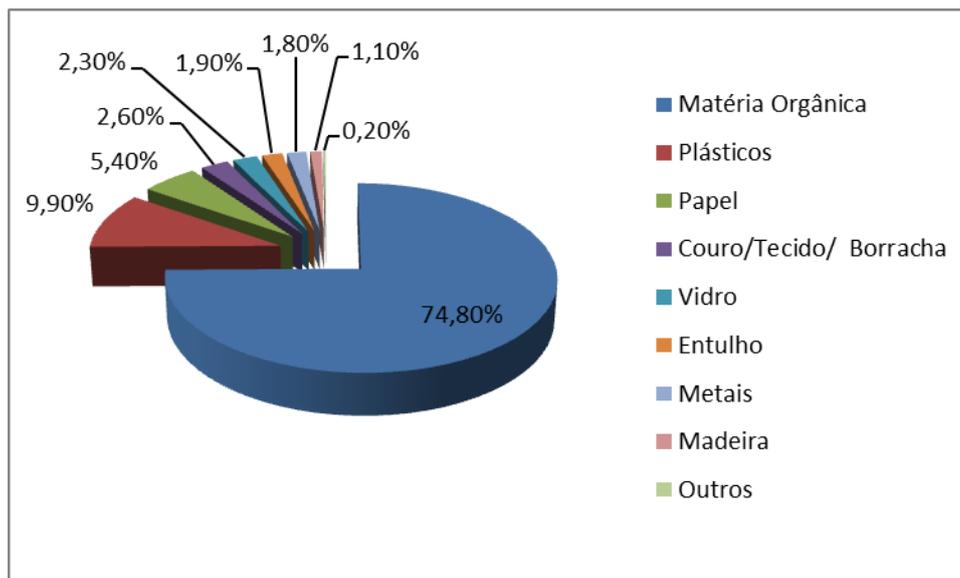


Figura 44 – Composição física do lixo do município de Itanhaém.

Fonte: PGIRS, 2005.

#### 4.2.2. Escolha da alternativa para o aproveitamento energético.

A escolha da melhor alternativa para o aproveitamento energético dos RSU gerados no município deve-se compreender prioritariamente o tipo de resíduos (composição gravimétrica) e a quantidade diária gerada. Sendo estes dois parâmetros delimitadores e excludentes para o tipo de tecnologia a ser utilizada.

Estas tecnologias de aproveitamento energético para a geração de energia, direta ou indireta, foram mencionadas anteriormente e analisadas, com o objetivo de verificar qual melhor se enquadra no cenário do município em estudo, sendo elas:

- Aterros Sanitários;
- Biodigestores;
- Incineração;
- Pirólise;
- Gaseificação;
- Plasma;

Partindo, então, das seguintes premissas, obteve-se a análise das tecnologias para a melhor aplicabilidade.

- Composição gravimétrica dos RSU gerado;
- Geração, captação e destinação diária de RSU do município;
- Projeção da geração para os próximos 20 anos;
- Restrições municipais;
- Restrições de viabilidade técnica;

A projeção foi obtida a partir de uma linha de tendência logarítmica ( $R^2 = 0.90$ ), com relação aos cinco anos apresentados na Tabela 23 e considerando 20 anos de vida útil da planta (Figura 45).

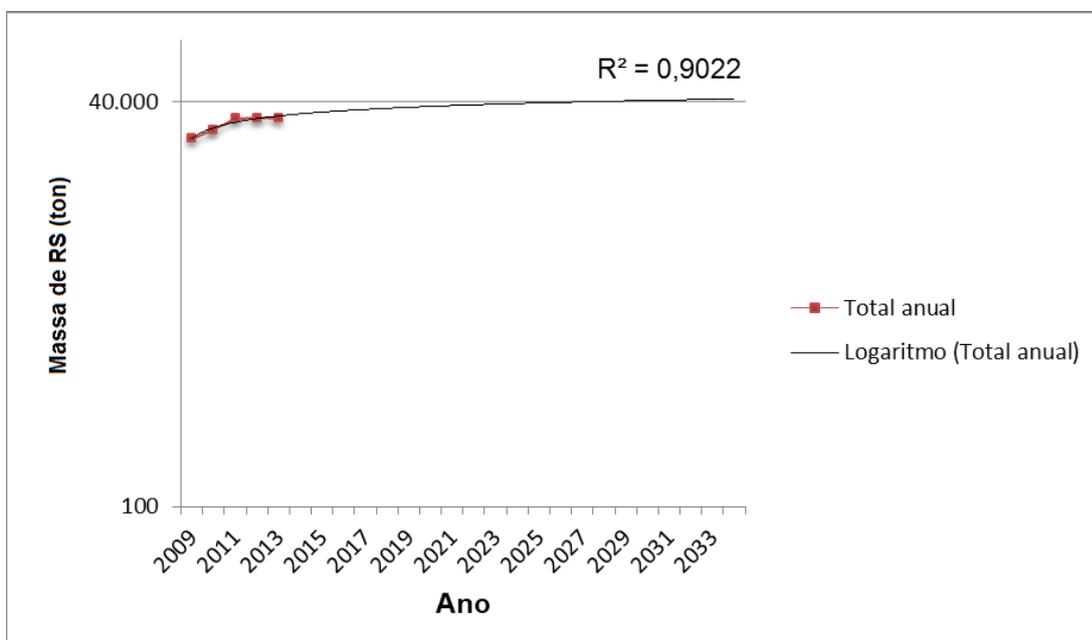


Figura 45 – Projeção da quantidade de RSU gerados, captados e destinados.

Fonte: Elaborado pelo autor com base de dados no PGIRS, 2014.

Por esta Figura 45, a geração, coleta e destinação projetada para os anos de 2024 e 2034 serão de, aproximadamente, 38.700 e 41.300 toneladas de resíduo, respectivamente.

Pela Tabela 23, onde apresenta a geração mensal dos anos de 2012 e 2013 (sendo considerados os mais representativos para o estudo) com dados obtidos na PGIRS (2014), obtiveram-se as porcentagens médias da geração para cada mês e a média mensal destes dois anos representativos (Tabela 25).

Por esta média mensal obtida, utilizou-se para os demais anos de projeção (sendo representado pelos anos de 2024 e 2034), e as médias diárias (Tabela 26).

A Tabela 27 resumisse na geração média diária total e a geração gravimétrica diária correlacionando com a Tabela 24 (para os anos de 2013, 2024 e 2034).

Acredita-se que não seria representativa a obtenção da geração e coleta diária aplicando a média para os 12 meses, uma vez que se observa uma variação de geração elevada nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro, temporada de verão, que não condiz com o restante do ano.

Tabela 25 – Porcentagem mensal de geração para os anos de 2012 e 2013.

Mês/ Ano	Geração, Captação e Destinação dos RSU (ton)		Porcentagem com relação ao total anual		Média entre os dois anos
	2012	2013	2012	2013	
Jan.	3.422,64	4.294,02	10,9%	13,8%	12,4%
Fev.	3.647,25	2.691,85	11,6%	8,7%	10,1%
Mar.	3.104,95	2.468,27	9,9%	7,9%	8,9%
Abr.	1.997,09	2.366,13	6,4%	7,6%	7,0%
Mai.	1.909,40	1.949,82	6,1%	6,3%	6,2%
Jun.	1.602,93	2.061,09	5,1%	6,6%	5,9%
Jul.	2.905,98	2.605,08	9,2%	8,4%	8,8%
Ago.	2.232,30	1.943,79	7,1%	6,3%	6,7%
Set.	2.383,51	1.884,40	7,6%	6,1%	6,8%
Out.	2.527,15	2.657,53	8,0%	8,6%	8,3%
Nov.	2.629,63	2.661,94	8,4%	8,6%	8,5%
Dez.	3.081,70	3.485,32	9,8%	11,2%	10,5%
<b>Total anual</b>	<b>31.444,53</b>	<b>31.069,24</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor com base de dados PGIRS, 2014.

Tabela 26 – Geração, coleta e destinação de RSU média diário.

Mês/ Ano	Distribuição Perceitual	Geração, Captação e Destinação		Média Diária		
	2024/2034	2024	2034	2013	2024	2034
Jan.	12,4%	4.780,51	5.101,69	143,13	159,35	170,06
Fev.	10,1%	3.920,90	4.184,32	89,73	130,70	139,48
Mar.	8,9%	3.447,94	3.679,58	82,28	114,93	122,65
Abr.	7,0%	2.702,58	2.884,15	78,87	90,09	96,14
Mai.	6,2%	2.389,34	2.549,86	64,99	79,64	85,00
Jun.	5,9%	2.270,05	2.422,56	68,70	75,67	80,75
Jul.	8,8%	3.410,70	3.639,84	86,84	113,69	121,33
Ago.	6,7%	2.584,29	2.757,91	64,79	86,14	91,93
Set.	6,8%	2.640,35	2.817,74	62,81	88,01	93,92
Out.	8,3%	3.210,25	3.425,92	88,58	107,01	114,20
Nov.	8,5%	3.276,06	3.496,15	88,73	109,20	116,54
Dez.	10,5%	4.067,05	4.340,29	116,18	135,57	144,68
<b>Total anual</b>	<b>100,0%</b>	<b>38.700,0</b>	<b>41.300,0</b>			

Fonte: Elaborado pelo autor com base de dados PGIRS, 2014.

Tabela 27 – Composição física dos resíduos gerados para o ano de 2013 e 2034.

	Composição dos resíduos gerados (ton)		
	2013	2024	2034
<b>Geração média diária</b>	76,3*	96*	102,5*
<b>Matéria Orgânica</b>	57,1	71,8	76,7
<b>Plásticos</b>	7,6	9,5	10,1
<b>Papel</b>	4,1	5,2	5,5
<b>Couro/Tecido/ Borracha</b>	2,0	2,5	2,7
<b>Vidro</b>	1,8	2,2	2,4
<b>Entulho</b>	1,4	1,8	1,9
<b>Metais</b>	1,4	1,7	1,8
<b>Madeira</b>	0,8	1,1	1,1
<b>Outros</b>	0,2	0,2	0,2

\* Média diária dos respectivos anos desconsiderando os meses de janeiro, fevereiro e dezembro.

Fonte: Elaborado pelo autor com base de dados PGIRS, 2005.

Com a análise do cenário da geração, captação e destinação dos RSU no município de Itanhaém, é possível refinar o tipo de tecnologia a ser escolhida para o estudo, analisando as possibilidades de viabilidade técnica da implantação de aproveitamento energético.

Desta forma, como primeira análise, exclui-se a tecnologia arco de Plasma, por se tratar de uma tecnologia muito recente e pouco utilizável para o aproveitamento energético dos RSU, não existindo qualquer tipo de especulação da implantação de um sistema deste no Brasil, sendo necessário alto investimento, além do treinamento da mão de obra, pois exige especialização.

No caso do aterro sanitário, com a utilização do biogás para o aproveitamento energético, existem as questões geológicas desfavoráveis nas regiões litorâneas, recomendações da escolha de regiões distantes de centros urbanos, a necessidade de grandes áreas para a sua implantação, o que acarretaria em grandes áreas de desmatamento daquela região, uma vez que a disponibilidade de área para tal está próxima a Serra do Mar, e a necessidade de acordos intermunicipais já que apenas a quantidade de resíduos gerados no município não viabiliza a implantação de um aterro com aproveitamento energético, nem ao se projetar a geração para os próximos 20 anos. Além destas restrições comentadas, ainda há restrição de implantação pela Lei Federal nº 12.725/12 que dispõem sobre o controle da fauna nas imediações de aeródromos, mesmo que o controle do aterro seja monitorado constantemente, caso ocorra alguma falha poderá atrair diversas espécies de aves, comprometendo a integridade da vida dos passageiros.

*IV - Área de Segurança Aeroportuária – ASA: área circular do território de um ou mais municípios, definida a partir do centro geométrico da maior pista do aeródromo ou do aeródromo militar, com 20 km (vinte quilômetros) de raio, cujos usos e ocupação estão sujeitos a restrições especiais em função da natureza atrativa de fauna;*

Ao traçar este raio de 20km a partir da linha da pista, a única região possível de implantação do aterro está em área protegida pelo Parque Estadual da Serra do Mar e por tribos indígenas, ver Figura 46.

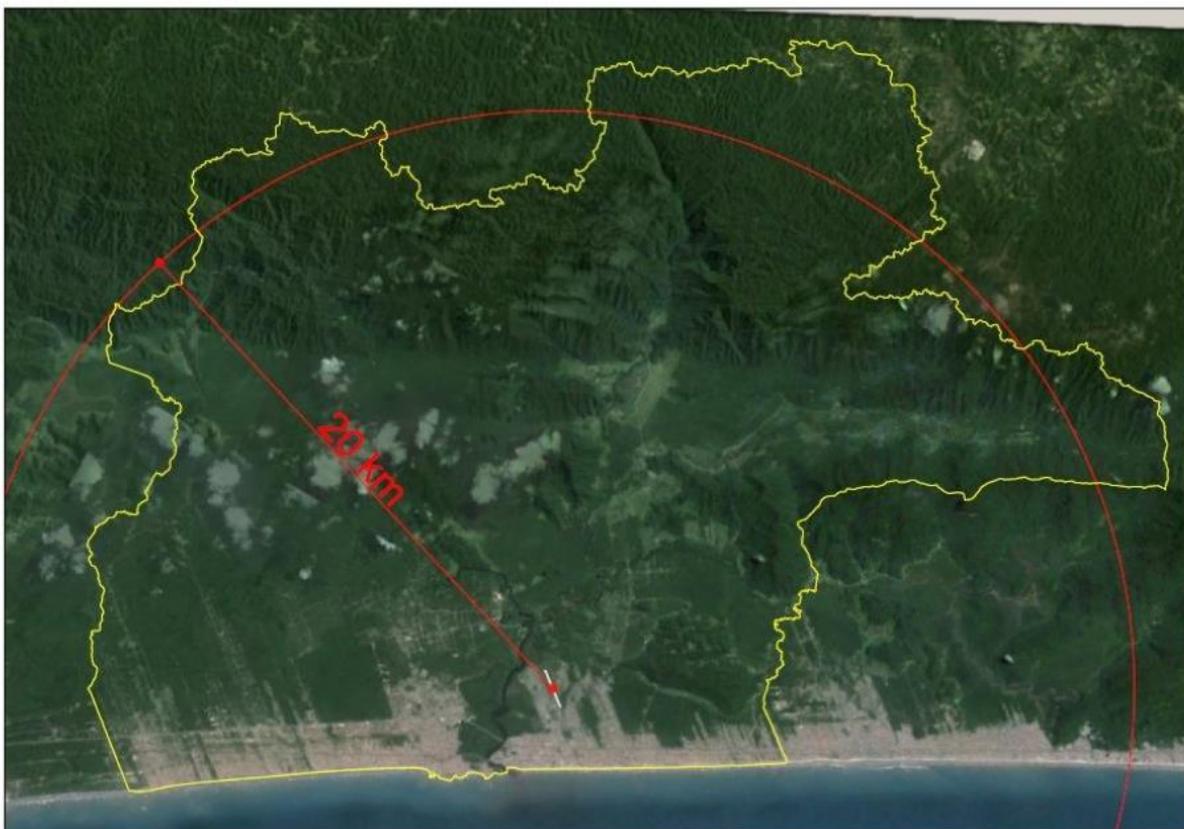


Figura 46 – Foto com delimitação da circunferência de 20km.

Fonte: PGIRS, 2014.

O mesmo mencionado para o aterro sanitário, também se aplica para a incineração, onde a quantidade de resíduos gerados diariamente pelo município não satisfaz a necessidade mínima de viabilidade econômica, conforme comparação das Tabelas 27 e 28.

Tabela 28 - Estimativas da quantidade mínima de RSU e geração de energia elétrica para as tecnologias citadas.

<b>Tecnologia</b>	<b>t RSU/dia</b>	<b>MWh / t RSU</b>
Incineração	500	0,4 a 0,6
	250 (com combustível auxiliar)	
Biogás de aterro sanitário	300	0,1 a 0,2

Fonte: Tolmasquim (2003) e Oliveira (2009 e 2011) apud FEAM (2012).

As tecnologias que mais satisfazem a necessidade de pequenos municípios são: pirólise, gaseificação e biodigestores.

Ainda que o biodigestor faça parte dessa subclassificação, sua aplicabilidade é apenas para a fração biodegradável dos resíduos, quaisquer outros tipos de resíduos inseridos no biodigestor pode prejudicar e até mesmo acabar com a reação microbiana, necessitando de uma rigorosa segregação dos resíduos, iniciando, a princípio, na fonte e por método de triagem mecanizada. E ainda implicaria em uma boa gestão dos materiais recicláveis para evitar ao máximo a disposição dos resíduos, além dos rejeitos, em aterros sanitários, não eliminando os gastos da prefeitura para este fim.

Já no caso da pirólise, além do gás de síntese produzido pelo processo, há, também, a produção do líquido pirolenhoso. Mesmo existindo a possibilidade da gaseificado e refinado deste líquido pirolenhoso para o seu uso energético, requer certa atenção, pois ele é corrosivo, nocivo e altamente poluente.

Com isso, a tecnologia de escolha e que mais satisfaz a necessidade para o aproveitamento energético do município é a tecnologia de gaseificação. Assim, pode ser contemplado também em diversos outros municípios de pequeno e médio porte, necessitando sempre dos estudos de viabilidade.

A Tabela 29 apresenta resumidamente os motivos de exclusão das tecnologias citadas.

Tabela 29 – Tecnologias de escolha.

<b>Tecnologia</b>	<b>Motivo excludente</b>
Arco de Plasma	- Tecnologia Recente - Alto investimento
Aterro Sanitário	- Geologia Desfavorável - Grandes área de implantação - Quantidade de resíduos gerados insuficiente para viabilidade
Incineração	- Quantidade de resíduos gerados insuficiente para viabilidade
Biodigestor	- Aplicável apenas para a fração biodegradável dos resíduos
Pirólise	- Produção de líquido pirolenhoso

Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que outros programas de tratamento dos RSU devem ser implementados e complementares, principalmente devido ao período de veraneio (janeiro e dezembro) onde há crescimento médio de 50% na geração de resíduos. Estas alternativas devem abordar principalmente a reciclagem, dos resíduos secos, e a compostagem para os resíduos úmidos, que é a maior geração do município, para o aproveitamento como adubo em jardinagem e paisagismo de praças e áreas de lazer.

#### **4.2.3. Escolha da área de implantação**

Segundo orientações do FEAM (2012) à escolha do local de qualquer empreendimento devem ser observados os aspectos técnicos relativos à infraestrutura, logística de transporte dos RSU e respeito às áreas com impedimentos ambientais. Entre estes cabem destacar:

- Zoneamento municipal e urbano;
- Localização preferencial em área/distrito industrial (para aproveitamento direto do vapor residual ou mesmo do biogás gerado);
- Vias de acesso e implicações no trânsito devido aos veículos de transporte, principalmente dos RSU;
- Implicações que seriam decorrente caso necessário desapropriação de áreas;
- Existência de subestação que atenda à energia elétrica a ser transmitida (para economia na implantação dos sistemas de transmissão);
- Disponibilidade de água;
- Facilidade de obtenção de mão de obra especializada;
- Distâncias econômicas das sedes municipais às estações de transbordo e destas às plantas de incineração ou aterros sanitários;
- Existência de aterro sanitário e industrial em distância econômica (para destinação final de rejeitos e RSU em eventuais paradas das unidades);
- Não comprometimento ambiental quanto a unidades de conservação (UCs), áreas de proteção ambiental (APPs), espécies endêmicas da fauna e flora e ambientes de relevância ambiental.



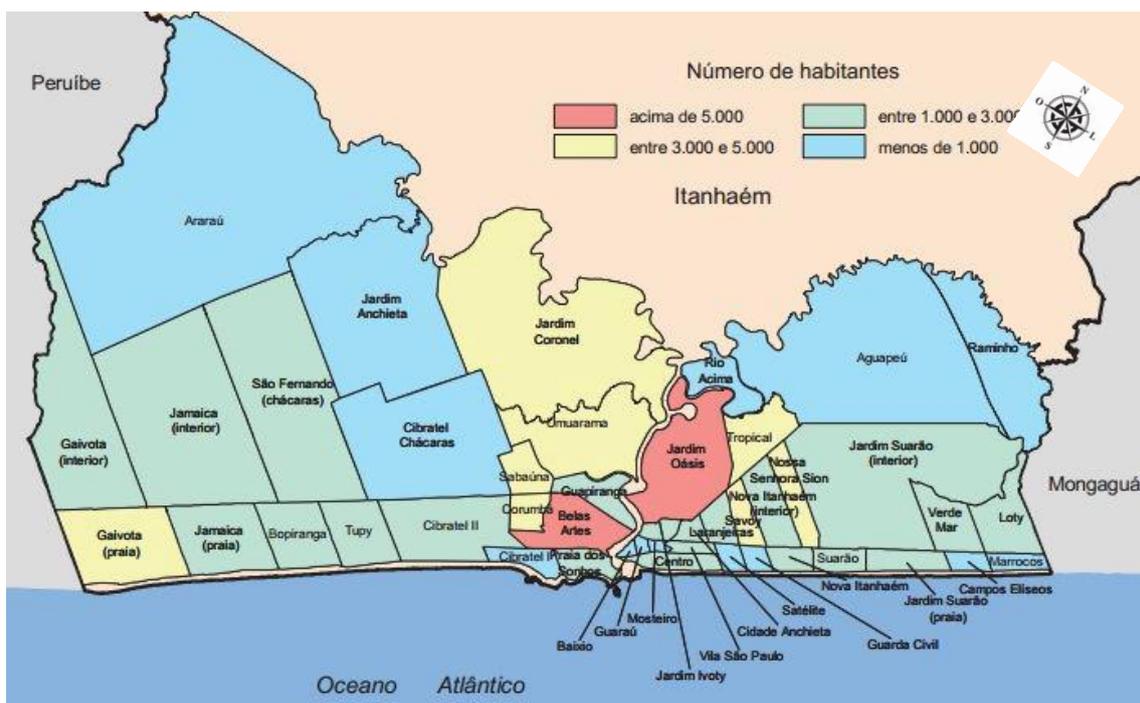


Figura 48 – Número de habitantes por bairro.

Fonte: Plano de Drenagem de Itanhaém, 2010.

#### 4.2.4. Planta de Gaseificação

Segundo informações da CarboGas Energia, empresa especializada em plantas de Gaseificação, para uma planta completa de gaseificação são necessários cerca de 3.000 m<sup>2</sup> de área.

Nesta planta estão contemplados três blocos distintos, sendo eles:

- **Unidade de recepção do RSU e produção do CDR:** Unidade composta por equipamentos que atuam no material recebido promovendo sua seleção mecânica, com ou sem auxílio de pessoal catador e de onde são segregados elementos metálicos (ferrosos e não ferrosos), materiais inertes tais como: vidros, pedras e argilosos, produzindo o CDR (Combustível Derivado do Resíduo). É responsável por ocupar a maior área do empreendimento e composta pelos seguintes equipamentos:
  - Balança veicular;
  - Moega de recepção;

- Tanque de retenção de líquidos;
  - ETA (estação de tratamento de águas – efluentes líquidos);
  - Rompedor de sacos;
  - Triturador primário, composto por esteiras de carga e descarga;
  - Separador magnético e esteira de extração de ferrosos;
  - Peneira a disco e esteira;
  - Peneiras convencionais para orgânicos;
  - Esteira classificatória;
  - Separador por densidade
  - Moinho de trituração granulométrica e classificatória;
  - Destalonador de pneus;
  - Misturador;
  - Prensa;
  - Enfardador / Embalador (para armazenamento – em alguns casos);
  - Sistemas de comandos (elétrico e hidráulico);
- **Unidade de Gaseificação:** Trata-se da unidade onde estará instalado o gaseificador e seus diversos equipamentos integrados, como:
    - Área de estocagem de CDR (para plantas autônomas);
    - Correias alimentadoras;
    - Silo de materiais combustível;
    - Secador rotativo (opção para resíduos de umidade superior a 15%)
    - Válvulas de carga;
    - Alimentadores;
    - Reator de gaseificação;
    - Unidade de lavagem de gás;
    - Unidade de resfriamento;
    - Sistema de ar comprimido;
    - Sistemas hidráulicos;
    - Sistema de ventilação;
    - Flare;
    - Sistema de limpeza do leito fluidizado;

- Esteira de remoção de partículas e cinzas;
  - Cinzeiro;
  - Unidade de fonte energética de preaquecimento (GLP);
  - Estruturas de sustentação;
  - Plataforma de instrumentação;
  - Unidade de automação, controle e supervisão;
  - Flange de fornecimento do gás (expedição do gás);
- 
- **Unidade de geração de energia:** Unidade onde se encontram os motogeradores ou caldeiras aquatubular e turbogeradores. A melhor eficiência no aproveitamento energético está no ciclo Otto, mas sua viabilidade econômica é limitada a 10MW(e) sendo que, para geração em maior potência recomenda-se a utilização do ciclo Rankine em decorrência dos menores custos de investimento na unidade de geração elétrica. Os equipamentos que contemplam a unidade com base no Ciclo Otto são:
    - Prédio de abrigo da unidade de geração;
    - Flange de recepção de gás;
    - Unidade de estabilização de pressão do gás;
    - Motogerador ciclo Otto;
    - Sistema de resfriamento de água para arrefecimento;
    - Sistema de captação de gases de escape;
    - Casa de força;
    - Painéis de controle e modulação elétrica entre geradores (equalização);
    - Barramento de distribuição elétrica;
    - Cubículo de disjuntores;
    - Unidades de aterramento;
    - Cubículo de medição de energia gerada / exportada;
    - Sistema de comunicação de interligado ao SIN / CCEE / ANEEL;
    - Sistema Diabático para controle de temperatura da sala automação;
    - Subestação de elevação da energia elétrica;
    - Modulo de conexão ao sistema de distribuição de energia.

As Figuras 49, 50 e 51 apresentam as unidades mencionadas anteriormente, respectivamente.



Figura 49 - Unidade de recepção do RSU e produção do CDR.

Fonte: Carbogas Energia, 2014.



Figura 50 - Gaseificador na planta protótipo da Carbogas.

Fonte: Carbogas Energia, 2014.



Figura 51 - Unidade geradora de energia elétrica – Motogerador.

Fonte: Carbogas Energia, 2014.

A primeira unidade da planta (recepção, triagem e produção de CDR) está de acordo com o estabelecido no CONAMA 316/2002 art. 24, que estabelece a obrigatoriedade de um programa de separação para reciclagem e reaproveito. Assim como, toma-se a iniciativa da inclusão social com a participação de cooperativas com a separação, conjunto ao sistema de triagem, dos materiais recicláveis com valor de mercado, conforme destacado na Lei 12.305/2010, incluindo a cooperativa CoopersolReciclando, já inserida no município para a coleta dos resíduos recicláveis.

Um estudo realizado pelo CENBIO (2013) analisou o máximo de resíduos, com valor de mercado, que as cooperativas conseguiriam retirar pelo sistema manual e pela triagem mecanizada. Aplicando esses resultados no cenário do município em estudo, têm-se conforme Tabela 30:

Tabela 30 – Resíduos retirados pelas cooperativas, com valor de mercado, pelo sistema de triagem manual e mecanizado.

	Composição gravimétrica	Geração e coleta diária	Porcentagem de redução para reciclagem e/ou reaproveito	Pós Triagem	Resíduos Reciclados
<b>Componentes</b>	<b>%</b>	<b>Ton./dia</b>	<b>%</b>	<b>Ton./dia</b>	<b>Ton./dia</b>
Matéria Orgânica	74,80%	57,07	10,0%	51,37	5,71
Plásticos	9,90%	7,55	9,1%	6,87	0,69
Papel	5,40%	4,12	14,0%	3,54	0,58
Couro/Tecido/Borracha	2,60%	1,98	0,0%	1,98	0,00
Vidro	2,30%	1,75	30,4%	1,22	0,53
Entulho	1,90%	1,45	0,0%	1,45	0,00
Metais	1,80%	1,37	89,9%	0,14	1,23
Madeira	1,10%	0,84	24,8%	0,63	0,21
Outros	0,20%	0,15	0,0%	0,15	0,00
<b>Total</b>	<b>100,0%</b>	<b>76,3</b>		<b>67,4</b>	<b>8,9</b>

Fonte: Elaborado pelo autor com base de dado no CENBIO (2013) e PGIRS (2005).

Embora a matéria orgânica e a madeira não possuam valor de mercado, considerou remoção de 10% e 25% pela triagem, respectivamente, sendo destinados para compostagem com o intuito do desenvolvimento e conserva dos microrganismos nas leiras de compostagem, para acelerar a degradação dos resíduos úmidos em período de veraneio, onde a geração neste período é elevada, e reaproveitar esse resíduo degradado na forma de adubo.

O componente genericamente denominado de plástico pode ser composto por diversos subprodutos como Poliestireno, Polipropileno, Polietileno de alta e baixa densidade, PVC, entre outros. Assim como os Metais que pode ser constituídos de ferrosos e não ferrosos.

#### 4.2.5. Aproveitamento energético do sistema

A partir da análise realizada com a geração, destinação, reciclagem e compostagem que serão implantados conjuntamente ao sistema, pode-se saber, então, qual será o aproveitamento energético dos resíduos que farão parte do processo de gaseificação.

Como não foi possível obter a umidade representativa para o RSU do município de Itanhaém, optou-se por utilizar o valor do mesmo estudo realizado pelo CENBIO, escolha essa por se tratar de RSU dos municípios do litoral de São Paulo (Ubatuba, Santos, São Vicente, Praia Grande, Guarujá e Cubatão), podendo ter tal representatividade para o trabalho em questão. Sendo assim, a umidade considerada foi de 52% do RSU.

Todavia, conforme mencionado anteriormente, as exigências para uma eficiência aceitável nos gaseificadores é teor de umidade entre 10 e 30%. Essa redução pode ser obtida pela utilização de prensas no processo pós-triagem e produção do CDR, reduzindo o teor de umidade para até 15%.

Utilizando, então, a fórmula para o cálculo do PCI (poder calorífico inferior) e considerando umidade do CDR pós-prensa de 25%, valor este muito utilizado para redução da umidade em plantas de gaseificação de biomassa, têm-se para este resíduo em questão:

$$\text{PCI} = 4500 \cdot (1 - U) - 600 \cdot U$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg)

U = fração de umidade presente no resíduo.

$$\text{PCI} = 4500 \cdot (1 - 0,25) - 600 \cdot 0,25$$

$$\text{PCI} = 3.225 \text{ kcal/kg}$$

Com uma geração diária de 67,4 toneladas (massa de RS pós-triagem a ser tratado), considerando a implantação do sistema no ano vigente, a remoção dos materiais mencionados acima e o funcionamento da planta 24 horas por dia, a energia de entrada no sistema será:

- $67.400 \text{ kg/dia} = 2.808,33 \text{ kg/hora} \times 3.225 \text{ kcal/kg} = 9.056.875 \text{ kcal/hora} = 9,05 \text{ Gcal/hora}$

Estudos práticos apontam, segundo REED e DAS (1988) apud RIBEIRO, LIMA e VERAS (2006), que a gaseificação consegue converter de 60% a 90% da energia de biomassa em energia no gás de síntese. Moura (2012) e projetos pilotos da empresa CarboGas Energia utilizando CDR como combustível, apontam rendimentos de conversão na ordem de 70%. Sendo assim, calcula-se a energia convertida do combustível para o gás de síntese.

- $9,05 \text{ Gcal/hora} \times 0,70 = 6,335 \text{ Gcal/hora}$ , de energia aproveitável.

Por se tratar de uma matéria-prima de resíduo sólido urbano, tal apresenta grande heterogeneidade na sua composição, e ar como agente gaseificante, o gás de síntese é considerado de baixo poder calorífico (até  $1.194 \text{ kcal/Nm}^3 = 5\text{MJ/Nm}^3$ ). O valor adotado para este estudo será de  $\text{PCI} = 1.160 \text{ kcal/Nm}^3$  (CarcoGas).

Com isso, a vazão volumétrica do gás de síntese será:

- $6,33 \times 10^6 \text{ kcal/h} / 1.160 \text{ kcal/Nm}^3 = 5.461,20 \text{ Nm}^3/\text{h}$

O gás de síntese produzido será direcionado para um motogerador. O tipo de motor que melhor se adapta para a utilização do gás de síntese na queima é o de ciclo Diesel Dual-Fuel, não sendo necessária qualquer adaptação para o funcionamento adequado do motor. Esta é uma vantagem com relação aos motores de ciclo otto, onde é necessário adaptações para o funcionamento com o gás de síntese.

O motor do tipo Dual-Fuel consegue operar simultaneamente com dois tipos de combustíveis, óleo diesel e gás. Para o estudo em questão, seria

adotado o óleo diesel para o auxílio da partida, sua substituição gradativa pelo gás de síntese e o inverso ocorreria quando o motor fosse desacelerando até sua parada. A substituição não pode ser completa, existe a necessidade de operar com uma pequena fração de diesel, sendo possível substituí-lo em até 80%.

Nesta substituição do óleo diesel pelo gás de síntese ocorre um ganho na eficiência térmica, mas em contrapartida perda na eficiência elétrica, passando dos possíveis 34% (utilização total de óleo diesel) para 28%.

Vale destacar que esse ganho térmico pode ser reaproveitado no sistema para aquecer o agente gaseificante (ar), ou auxiliar na redução de umidade do CDR, ou até utilizá-lo em *chiller* de absorção.

Com esses dados, pela equação abaixo pode-se determinar a potência elétrica do gás de síntese no motogerador.

$$\text{Pot} = \frac{Q \times PCI_{\text{gás}} \times \eta}{860.000}$$

Onde:

Pot = potência disponível (MW);

Q = vazão do gás (m<sup>3</sup>/h);

PCI<sub>gás</sub> = Poder Calorífico Inferior do gás de síntese = 1.160 kcal/Nm<sup>3</sup>;

η = eficiência de motores ciclo Diesel = 28% = 0,28;

860.000 = fator de conversão de kcal/h para MW.

$$\text{Pot} = \frac{5.461,20 \times 1.160 \times 0,28}{860.000} = 2,06 \text{ MW}$$

Considerando Fator de Capacidade de 95%:

$$\text{Pot} = 2,06 \times 0,95 = 1,95 \text{ MW}$$

Dá-se para estimar a energia disponível diária pela equação abaixo.

$$E = P \times FC \times \text{Tempo de Operação.}$$

Onde:

E = energia disponível (MWh/dia)

P = potência disponível (MW)

FC = fator de carga – motores operando a plena carga = 87% = 0,87

Tempo de operação do motor = h/dia

$$E = 1,95 \times 0,87 \times 24 = 40,71 \text{ MWh/dia}$$

A Tabela 31, a seguir, apresenta-se resumidamente as premissas consideradas e os resultados obtidos.

Tabela 31 – Resumo das premissas e resultados

		2014
Geração diária	kg/dia	67.400,0
Fluxo de entrada no gaseificador	kg/hora	2.803,3
Umidade Natural	%	52
Umidade Pós-Tratamento	%	25
PCI do CDR	kcal/kg	3.225,0
Funcionamento da Planta de Gaseificação	horas/dia	24
Energia do CDR	kcal/hora	9,05 x10 <sup>6</sup>
Rendimento do Gaseificador	%	70
Energia convertida do CDR para Gás de Síntese	kcal/hora	6,33 x10 <sup>6</sup>
PCI do gás de síntese	kcal/Nm <sup>3</sup>	1.160
Vazão volumétrica de gás de Síntese	Nm <sup>3</sup> /hora	5.461,20
Rendimento do Motogerador	%	28
Fator de Capacidade	%	95
Potência Elétrica Disponível	MW	1,95
Fator de Carga	%	87
Energia Disponível	MWh/dia	40,71
Energia Disponível	MWh/mês	1.221,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5. Considerações Finais

Como apresentado, o trabalho objetivou-se na análise da viabilidade na implantação de um sistema de aproveitamento energético de RSU no município de Itanhaém-SP, além de discutir as dificuldades existentes e realizar propostas.

Os resultados alcançados foram desenvolvidos a partir da pesquisa exploratória complementada pela técnica de estudo de caso, partindo da análise do cenário de geração e destinação dos resíduos sólidos no Estado de São Paulo, a escolha de um município para o estudo de caso, a análise da geração e destinação deste município em específico, identificação das alternativas tecnológicas para o aproveitamento energético, a escolha de uma das tecnologias que melhor se aplica para o município e a verificação da viabilidade na implantação desta tecnologia, apresentando a revisão bibliográfica sobre o panorama dos resíduos sólidos urbanos, tecnologias para o tratamento e/ou disposição final dos resíduos, alternativas para o aproveitamento energético, legislações aplicáveis e tecnologias para o controle de emissões.

Desta forma, com a análise da geração de RSU do município, premissas e considerações adotadas, a melhor tecnologia a ser aplicada, com o aproveitamento energético para a geração de energia elétrica, é a gaseificação, principalmente pela baixa geração de resíduos sólidos gerados pelo município, inviabilizando a implantação de algumas tecnologias, além de questões de legislação, mão-de-obra qualificada e disponibilidade de verba do município.

Pela implantação desta tecnologia, considerando a geração atual de resíduos e eliminando, por sistema de triagem mecanizado, os passíveis de reciclagem e os destinados para compostagem (resultando em 67,4 toneladas/dia), o sistema geraria 40,71 MWh/dia.

Com a crise energética atual e as projeções apresentando um aumento no consumo de energia elétrica, as duas questões de grande preocupação pra a nação devem fazer parte de uma conversa interligada, utilizando os resíduos sólidos, com a implantação de uma gestão qualificada, para o aproveitamento energético através da geração de energia elétrica e/ou térmica, tornando não

apenas uma iniciativa com quesitos ambientalmente legais, mas também como uma solução futura de geração descentralizada.

O município de Itanhaém apresentou um Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos em agosto deste ano (2014), ainda na versão preliminar. O mesmo informa que existe a possibilidade de consórcio entre municípios do litoral para uma possível planta de tratamento térmico, com tecnologia de incineração, localizado no município de Cubatão.

Neste mesmo documento existe certo repúdio por essa iniciativa, mencionando questões de saúde pública e poluição atmosférica, e que a melhor solução para a destinação dos resíduos seria a reciclagem e a compostagem, além de continuar com a destinação de determinada fração do resíduo para o aterro sanitário. O que ainda não solucionaria os grandes gastos pelo transporte sem seu real aproveitamento.

A tecnologia de aproveitamento dos resíduos sólidos por gaseificação se comportaria como uma boa solução para o município, já que pode ser implantado em município com baixa geração de resíduos e as emissões são de menores proporções e mais controladas.

Isso proporcionaria o aproveitamento dos resíduos gerados no próprio município, reduzindo aqueles gastos e as emissões de GEEs por evitar o transporte em caminhões por longos percursos para a sua disposição.

Não se esquecendo do trabalho conjunto às cooperativas com a coleta dos materiais recicláveis e a implantação da composteira.

Cabe ressaltar que a iniciativa da implantação da educação ambiental é de vital importância para a conscientização socioambiental de todos os munícipes.

A implantação desta tecnologia de gaseificação com o aproveitamento energético na conversão em energia elétrica produziria, conforme apresentado pelo estudo para o ano de 2014, 40,70 MWh/dia.

Sendo o consumo de uma residência no município de Itanhaém, segundo dados da Fundação SEADE (2012), de 0,258 MWh/mês, a energia gerada por este sistema poderia sanar a necessidade de 4.733 residências. Se considerar quatro pessoas por residência, atenderia 18.935 moradores do município, para o ano de 2014. Esse valor representa 22% da população do município.

Valor este que pode ser melhorado com a adoção de diferentes medidas das citadas, como a implantação de um motor dual-fuel mais eficiente, a introdução de resíduos com PCI maiores e até mesmo trocar o agente gaseificante para oxigênio puro, entre outros. Estas iniciativas poderiam melhorar a eficiência do sistema e, conseqüentemente, a geração final de energia.

Pelo sistema ser modular, ainda existe a possibilidade da instalação de outras torres de gaseificação, prevendo o aumento da geração e até um acordo para o tratamento dos resíduos de municípios vizinhos.

Por diversas vezes o plano menciona que o município não dispõe de verba suficiente para diversas implantações, inclusive a iniciativa do biodigestor mencionado no Plano de Gestão, muito menos de corpo técnico e pessoas qualificadas. Desta forma, cabe ao município realizar uma Parceria Público-Privado (PPP).

Essa parceria corresponde ao investimento com a tecnologia da parte privada em contrapartida o município poderia ceder o terreno para tal empresa, além de garantir a compra da energia gerada pelo sistema. Com esta parceira a empresa privada ganharia com o preço da tonelada de resíduo tratado e pela energia gerada. Já o município ganharia com um menor preço de destinação dos resíduos e de energia comprada como consumo público.

Para este trabalho ainda havia o interesse da verificação da viabilidade econômica com a implantação desta tecnologia no município de Itanhaém-SP, mas por questões de falta de dados, principalmente monetário, não foi possível finalizá-lo, sendo assim, recomenda-se o estudo da viabilidade econômica da implantação do sistema de gaseificação com o aproveitamento energético no município de Itanhaém, o refinamento prático dos valores mencionados neste trabalho, adotado como premissas de cálculos e novos estudos de casos em municípios de pequeno/médio porte, visando o auxílio no planejamento do plano de gestão integrado de resíduos sólidos.

## 6. Referência Bibliográfica

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil** – 2013. Disponível em < <http://www.abrelpe.org.br/>>. Acessado em 17/08/2014.

Aguiar, Mônica L. **Poluição atmosférica e seu controle**. São Carlos, 2002. Disponível em < <http://fisica.cdcc.sc.usp.br/olimpiadas/02/palestras/PA1.html>>. Acessado em: 22/09/2014.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de biomassa: Uma análise teórica e experimental**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

Atlas Ambiental do Município de Itanhaém. **Meio Antrópico**. Prefeitura de Itanhaém, 2012.

Barbosa, Wilson P.; Azevedo, Abílio C. Soares. **Geração Distribuída: vantagens e desvantagens**. II Simpósio de estudos e pesquisa em ciências ambientais na Amazônia. Disponível em < [http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo\\_gd.pdf](http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo_gd.pdf)>. Acessado em: 17/08/2014.

Bernal, M.P.; Navarro, A. F.; Sánchez-Monedero, M. A.; Roig, A.; Cegarra, J. **Influence os sewage sludge compost stability and maturity on carbono and nitrogen mineralization in soil**. Soil Biology & Biochemistry. 1998.

Brasil. **CONAMA nº 8**, de 6 de dezembro de 1990. Dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição. Disponível em < <http://www.mma.gov.br/>> Acessado em: 19/09/2014.

Brasil. **CONAMA nº 382**, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Disponível em < <http://www.mma.gov.br/>> Acessado em: 20/09/2014.

Brasil. **ABNT NBR 10.004**. Resíduos sólidos – Classificação. Disponível em < <http://www.aslaa.com.br/legislacoes/NBR%20n%2010004-2004.pdf>> Acessado em 20/09/2014.

Brasil. **Decreto 8.468**, de 8 de setembro de 1976. Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Disponível em < <http://www.mma.gov.br/>> Acessado em: 24/09/2014.

Brasil. **Decreto nº 86.955**, de 18 de fevereiro de 1982. Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. Disponível em < <http://www.mma.gov.br/>> Acessado em: 24/09/2014.

Brasil. **Decreto nº 59.113**, de 23 de abril de 2013. Estabelece Novos Padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Disponível em < <http://www.mma.gov.br/>> Acessado em: 24/09/2014.

Brasil. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em < <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/lei12305.pdf>>. Acessado em 16/08/2014.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome. Política Nacional de Assistência Social. Brasília: MSD, 2004. 46p

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2014**. Brasília, 2014.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Demanda de Energia - 2050**. Rio de Janeiro, 2014.

BRENNEISEN, Paulo J. **Desempenho de motogeradores de clico diesel operando com gás de gaseificação/diesel ou biogás/diesel**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Título: Mestre em Energia na Agricultura. Paraná, 2013.

Calderoni S. Os bilhões perdidos no lixo. 3. Ed. São Paulo: Editora USP, 1996.

IN

Junior, Rudinei T; Saiani, Carlos C. Santejo; Dourado, Juscelino. **Resíduos Sólidos Urbanos: Oportunidades E Desafios Da Lei Federal Nº 12.305 (lei De Resíduos Sólidos)**. Editora: Manole. 456 p. 2013.

CARVALHAES, Vinícius. **Análise do potencial energético de resíduo sólido urbano para conversão em processos termoquímicos de gaseificação**. Universidade de Brasília – Título: Mestrado em Ciências Mecânicas. Brasília, 2013.

CBS Previdência. **Coleta seletiva de lixo**. Disponível em < [http://www.cbsprev.com.br/web/images/Coleta\\_Seletiva\\_de\\_lixo.pdf](http://www.cbsprev.com.br/web/images/Coleta_Seletiva_de_lixo.pdf)>. Acessado em 03/09/2014.

CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: CEMPRE, 2010

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. **Resíduos sólidos domiciliares e de serviços de saúde: tratamento e disposição final – texto básico**, São Paulo, 1997.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). **Aterro Sanitário**. Disponível em < <http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Aterro%20Sanit%C3%A1rio/21-Aterro%20Sanit%C3%A1rio>> . Acessado em 17/09/2014.

CHERNICHARO, C. A.L. **Reatores Anaeróbicos**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Belo Horizonte, 1997.

Coelho, Suani Teixeira. **Resíduos Sólidos Urbanos para Geração de Energia**. Congresso L.E.T.S. (Logística e Transporte, Energia, Telecomunicação e Saneamento Básico). São Paulo, 2014.

COELHO, Suani. T. Uso de biomassa, biodigestores e biogás. Programa de Educação Continuada – Escola Politécnica da USP, 2012. Notas de aula do curso Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

IN

SOARES, Daniel H. **Gaseificação de biomassa de médio e grande porte para geração de eletricidade: uma análise da situação atual no mundo**. Programa de Educação Continuada da Universidade de São Paulo; Título: Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. São Paulo, 2012.

Conservando e Educando – Blog. **Compostagem: O que é compostagem**. Disponível em < <http://conservandoeeducando.blogspot.com.br/>> . Acessado em 06/09/2014.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva e GÓMEZ, Edgardo Olivares. (Organizadores). **Biomassa para energia**. São Paulo: Editora da Unicamp, 2009.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M.C.J.P; ROSSI, M.; TAVARES, R. **Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada**. UNESP – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, São Paulo, 2002.

DEMA – Departamento de Engenharia de Materiais. **Fabricação de cimento Portland e co-processamento de resíduos industriais nos fornos de produção de cimento**. PUC – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em < <http://www.dema.puc-rio.br/download/Aula%20Cimento%20IEM.pdf>> Acessado em 14/09/2014.

Elango D, Thinakaran N, Panneerselvam P, Sivanesan S. **Thermophilic composting of municipal solid waste**. Applied Energy 2009

IN

Junior, Rudinei T; Saiani, Carlos C. Santejo; Dourado, Juscelino. **Resíduos Sólidos Urbanos: Oportunidades E Desafios Da Lei Federal Nº 12.305 (Lei De Resíduos Sólidos)**. Editora: Manole. 456 p. 2013.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais: Relatório 1. 2. ed.** Belo Horizonte – Minas Gerais, 2010

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica DEN 06/08. **Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande**, MS. Rio de Janeiro, 2008. (disponível em <<http://www.epe.gov.br>>).

Faria, F. S. **Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos**. UFRJ – Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2002.

FEMA (Fundação Estadual do Meio Ambiente). **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

Fialho, Lucimar L. **Caracterização da matéria orgânica em processo de compostagem por métodos convencionais e espectroscópicos**. Universidade de São Paulo – Título Doutorado. São Paulo, 2007.

FORMOSINHO, Sebastião; BARROS, José Henrique; PIO, Casimiro. **Parecer relativo ao Tratamento de resíduos industriais perigosos**. Comissão Científica Independente de Controlo e Fiscalização Ambiental da Co-Incinerção. 2000.

Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais. FEAM. Belo Horizonte, 2012.

Fundação SEADE. **Estatísticas – Índice Paulista de Responsabilidade Social e Índice Paulista de Vulnerabilidade Social (Itanhaém)**, 2012. Disponível em: <<http://www.novomilenio.inf.br/baixada/itaestat.htm>>. Acessado em: 04/11/2014.

GABAÍ, Isaac. **Incinerção e dioxinas**. Marechal Deodoro: CINAL, 1994. 7p.

GEROSA, T. M. **Desenvolvimento e aplicação de ferramenta metodológica aplicável à identificação de rotas insumo-processo-produto para a produção de combustíveis e derivados sintéticos**. 2012. Tese (Doutorado) – USP, São Paulo, 2012.

Goldemberg, José; *et al.* **Avaliação de ciclo de vida (ACV) comparativa entre tecnologia de aproveitamento energético de resíduos sólidos**. Projeto CENBIO - P&D EMAE/ANEEL – IEE (Instituto de Energia e Ambiente). São Paulo, 2013.

Gonçalves, Marilson Alves; Tanaka, Ana Karolina; Amedomar, André de Azevedo. **A destinação final dos resíduos sólidos urbanos**: alternativas para a cidade de São Paulo através de casos de sucesso. Profuturo: Programa de Estudos do Futuro. São Paulo, 2013.

Gonçalves, Pólito. **Lixão x Aterro**. Disponível em <<http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/>>. Acessado em: 15/09/2014. Heller L. **Saneamento e Saúde**. Organização Pan-Americana de Saúde. Brasília, 1997.

GTC KINGSPORT WORKSHOP, 2012, Kingsport. **Brief Overview of Gasification Industry**. Disponível em: <<http://www.gasification.org>> Acesso em: ago 2012.

Henriques. Rachel Martins. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica.** Título: Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

Itanhaém. **Plano de Drenagem de Itanhaém** – Relatório R3. São Paulo, 2010. Disponível em < [http://www.itanhaem.sp.gov.br/plano-municipal-saneamento/R3/ITA\\_R3\\_V3A\\_mar2011-drenagem.pdf](http://www.itanhaem.sp.gov.br/plano-municipal-saneamento/R3/ITA_R3_V3A_mar2011-drenagem.pdf)> Acessado em: 22/10/214.

JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano et al. **Seleção de padrões de emissão atmosférica. um estudo de caso para as pequenas e médias empresas produtoras de ferro-gusa do estado de minas gerais.** Minas Gerais: 2002.

Junior, Rudinei T; Saiani, Carlos C. Santejo; Dourado, Juscelino. **Resíduos Sólidos Urbanos: Oportunidades E Desafios Da Lei Federal Nº 12.305 (Lei De Resíduos Sólidos).** Editora: Manole. 456 p. 2013.

Kiang. Y. H. **Total hazardous waste disposal through combustion.** Marcel Dekker, New Your, 1977.

Kinto, Oscar T. **Metodologia para o pir em ambiente corporativo para o recurso energético da gaseificação de biomassa.** Universidade de São Paulo. Título: Mestre em Engenharia. São Paulo, 2012.

LAR – Laboratório de Análises de Resíduo. **Tecnologia de Plasma.** Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

Lanziani, Rodolfo L. **Estudo de caso das alternativas para recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados na região metropolitana de Campinas.** Universidade de São Paulo – Especialização. São Paulo, 2013

Leal, Adriano. **Pirólise.** 2010. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/reacoes-quimicas/pirolise/>>. Acesso em: 13 set. 2014.

LIMA, Luiz Mário Queiroz. **Lixo: tratamento e biorremediação.** São Paulo: Hemus Editora Ltda., 1995. 265p

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; SANCHEZ, C. G.; GÓMEZ, E. O. e SALES, C. V. B. Biomassa para energia. Capítulo 9: Gaseificação. Editora UNICAMP, 2008.

MANSUR, G.L. **O que é Preciso Saber Sobre Limpeza Urbana.** Rio de Janeiro: IBAM/MBES, 1993.

MASSEY, M.L; POHLAND, F.G. **Phase separation of anaerobic stabilization by kinetic controls.** Journal of Water Pollution Control Federation. V.43, 1993.

**IN**

PINTO, Paulo H. M. **Tratamento de manipueira de fecularia em biodigestor anaeróbio para disposição em corpo receptor, rede pública ou uso em fertirrigação.** UNESP – Título: Mestre em Agronomia. São Paulo, 2008.

MONTEIRO, José Henrique Penido et al. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos.** Coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MOURA, Johnson P. **Estudo de casos das rotas tecnológicas para produção de biogás e da influência da composição química de dejetos de matrizes suínas na qualidade do biogás gerada por biodigestor.** Título: Doutorado em Engenharia Mecânica – UFPE. Pernambuco, 2012.

Muylaert, M.S; *et al.* **Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta** – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudos de Casos. Editora da COPPE. Rio de Janeiro, 2000.

NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (NETL). **Worldwide Gasification Capacity**. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/>> Acesso em: ago 2012.

Nascimento, Aline L. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: os desafios da implantação da usina de recuperação energética**. Universidade de São Paulo – Título de Especialização em Energias Renováveis. São Paulo, 2012.

Obernberger T.; Thek G. **Combustion and Gasification of Solid Biomass for Heat and Power Production in Europe** – State of the art and Relevant Future Developments. Relatório Técnico Científico. Portugal, 2008.

PECORA, V., **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP** – Estudo de Caso (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PENTEADO, Maria Julieta. **Guia Pedagógico do Lixo**. 6ª edição (revista e atualizada). São Paulo: SMA/CEA, 2011.

Pereira, Carolina D. O. **Como funciona um aterro sanitário**. 2010. Disponível em <<http://caroldaemon.blogspot.com.br/2010/06/como-funciona-um-aterro-sanitario.html>> Acessado em: 17/09/2014.

PGIRS. **Plano de Gestão Integrado de Resíduos Sólidos do Município de Itanhaém/SP**. Prefeitura de Itanhaém. São Paulo, 2005.

PGIRS. **Plano de Gestão Integrado de Resíduos Sólidos do Município de Itanhaém/SP**. Prefeitura de Itanhaém. São Paulo, 2014.

PROVENZANO, M. R.; *et al.* **Assessment of maturity degree of composts from domestic solid wastes by fluorescence and fourier transform infrared spectroscopies**. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2001.

REED, T.B., & DAS, A., 1988, “**Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems**”, Biomass Energy Foundation Press, USA.

IN

RIBEIRO, Ricardo da S.; LIMA, Rafael D. C.; VERAS, Carlos A. G. **Caracterização de emissões em sistema de geração energética por gaseificação de biomassa aplicada a comunidades isoladas**. Universidade Federal de Uberlândia. 2006.

Rigato, Paulo Constante. **Estudo da composição da alimentação de um incinerador rotativo de resíduos visando aumento da capacidade operacional**. Título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos – Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, SP. 2008.

Rodrigues, M. S. **Resíduos orgânicos como matéria-prima para compostagem**. Anais – Simpósio sobre compostagem. UNESP. São Paulo, 2004.

Santana, Victor G. Andrade de. **Uma Abordagem sobre o Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos na cidade de Recife**. Título: Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica. Universidade de Pernambuco. Recife, 2010.

Silva, Ediana dos S.; Oliveira, Gisllane S. **Biodigestor: Uma proposta de aproveitamento do lixo orgânico no município de Santarém**. Disponível em <[http://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo\\_biodigestor.pdf](http://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_biodigestor.pdf)> Acessado em: 14/09/2014.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Press Kit 2010**. Disponível em <[http://www.snic.org.br/pdf/presskit\\_SNIC\\_2010.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2010.pdf)>. Acessado em 14/09/2014.

U.S. EPA. **Engineering Handbook on Hazardous Waste Incineration**. SW-889, NTIS, 1981.

USHIMA, A. H. **Gaseificação de Biomassa: Rota BTL**. Disponível em <[http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/seminbioenergia/ademarushima\\_2608.pdf](http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/seminbioenergia/ademarushima_2608.pdf)>  
Acesso em: 09/2014

VAN WYLEN; SONNTAG e BORGNAKKE. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 5ª ed. Editora Edgard Blucher. 1997.

VEEKEN, A.; HEMELERS, B. **Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste componentes**. Bioresource Technology. 1999

**IN**

PINTO, Paulo H. M. **Tratamento de manipueira de feccularia em biodigestor anaeróbio para disposição em corpo receptor, rede pública ou uso em fertirrigação**. UNESP – Título: Mestre em Agronomia. São Paulo, 2008.