

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA

**Análise das tecnologias para gestão e
reaproveitamento energético dos resíduos urbanos
para reciclagem de plásticos**

Priscila Alves Carneiro

Itajubá, abril de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA

Priscila Alves Carneiro

**Análise das tecnologias para gestão e
reaproveitamento energético dos resíduos urbanos
para reciclagem de plásticos**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha

Abril de 2009

Itajubá - MG

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

C289a

Carneiro, Priscila Alves

Análise das tecnologias para gestão e reaproveitamento energético dos resíduos urbanos para reciclagem de plásticos / Priscila Alves Carneiro. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2009.

112 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Resíduos urbanos. 2. Energia. 3. Biogás. 4. Reciclagem. 5. Plásticos. I. Rocha, Carlos Roberto, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

CDU 628.477(043)

Aos meus pais, irmãos e a
todos que de alguma forma
me apoiaram nessa
caminhada.

Agradeço ao meu orientador e amigo Carlos Roberto,
aos amigos Rodolfo e Karina pela ajuda prestada
e a Deus que me possibilitou vencer
mais essa etapa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTAS DE TABELAS.....	vi
LISTA DE SIMBOLOS.....	vii
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Objetivo Geral.....	4
1.2 - Objetivos Específicos.....	4
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - Resíduos Urbanos	5
2.1.1 - <i>Histórico dos Resíduos Urbanos</i>	5
2.1.2 - <i>Definição e Classificação</i>	6
2.1.3 - <i>Composição dos Resíduos Urbanos</i>	7
2.1.4 - <i>Destinação Final dos Resíduos Urbanos no Brasil</i>	8
2.1.5 - <i>Gestão dos Resíduos Urbanos</i>	10
2.2 - Reciclagem dos Resíduos Urbanos.....	11
2.2.1 - <i>Resíduos Urbanos Recicláveis</i>	13
2.2.2 - <i>Processos de Reciclagens Existentes</i>	17
2.3 - Geração de Energia dos Resíduos Urbanos.....	20
2.3.1 - <i>Biodigestão</i>	21
2.3.2 - <i>Incineração</i>	36
2.3.3 - <i>Gaseificação</i>	40
2.3.4 - <i>Outras Tecnologias Utilizadas</i>	42
2.4 - Combustíveis Provenientes das Tecnologias Existentes.....	43
2.4.1 - <i>Biogás</i>	43
2.4.2 - <i>Gases Resultantes da Gaseificação</i>	44

2.4.3 - Outros Combustíveis Advindos das Tecnologias.....	45
3 - METODOLOGIA.....	48
3.1 - A Ferramenta Metodológica.....	48
3.2 - Detalhamento dos Procedimentos Utilizados na Ferramenta Metodológica	50
3.2.1 - Levantamento Qualitativo e Quantitativo dos Resíduos Urbanos	50
3.2.2 - Estimativa do Consumo Potencial de Energia para Reciclagem de Plásticos Pós-Consumo	55
3.2.3 - Estimativas da Quantidade de Combustível e do Potencial de Energia Gerados a partir das Tecnologias de Conversão e Geração	56
3.2.4 - Seleção da Melhor Configuração das Tecnologias em Função do Potencial de Conversão e Geração de Energia para Reciclagem dos Plásticos e da Gestão dos Resíduos Urbanos.....	65
4 - ESTUDO DE CASO.....	67
4.1 - Localização da Área	67
4.2 - Coleta e Destinação dos Resíduos Urbanos em Itajubá- MG.....	68
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
5.1 - Gerais	71
5.1.1 – Aplicativo de execução da metodologia proposta	72
5.2 - Específicos para o Estudo de Caso	73
5.2.1 - Levantamento Qualitativo e Quantitativo dos Resíduos Urbanos de Itajubá- MG	73
5.2.2 - Estimativa do Consumo Potencial de Energia para Reciclagem de Plásticos Pós-Consumo de Itajubá-MG	75
5.2.3 - Estimativas da Quantidade de Combustível e do Potencial de Energia Gerados a partir das Tecnologias de Conversão e Geração Através dos Resíduos Urbanos de Itajubá-MG	77
5.2.4 - Seleção da Melhor Configuração das Tecnologias em Função do Potencial de Conversão e Geração de Energia para Reciclagem dos Plásticos e da Gestão dos Resíduos Urbanos.....	83

6 - CONCLUSÕES.....	94
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
APÊNDICE	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Composição total do lixo urbano em porcentagem no Brasil	7
Figura 2.2 - Destinação do resíduo em percentual no Brasil	8
Figura 2.3 - Evolução dos índices de reciclagem de resíduo sólido no Brasil.....	9
Figura 2.4 - Simbologias utilizadas para separação dos materiais	12
Figura 2.5 - Percentual de petróleo para produção de plásticos.....	16
Figura 2.6 - Diagrama mostrando a relação entre os custos para	17
Figura 2.7 - Esquema de reciclagem mecânica.....	18
Figura 2.8 - Fases de geração de biogás em aterros de resíduos sólidos.....	23
Figura 2.9 - Corte esquemático de um aterro sanitário.....	27
Figura 2.10 - Esquema de um biodigestor.....	34
Figura 2.11 - Esquema de um incinerador com geração de energia elétrica	37
Figura 2.12 - Direção do movimento relativo da biomassa e do agente gaseificador: (a) contracorrente; (b) concorrente; (c) fluxo cruzado; (d) leito fluidizado; (e) leito circulante.	40
Figura 3.1 - Fluxograma Metodológico	49
Figura 3.2 - Quarteamento de resíduos urbanos.....	51
Figura 3.3 - Amostragem para análise da composição.....	52
Figura 3.4 - Linha de reciclagem de plásticos	56
Figura 3.5 - Sistema integrado de captação e conversão de biogás de aterros sanitários em energia elétrica.....	57
Figura 3.6 - Moto-gerador LANDSET	57
Figura 3.7 - Planta de tratamento térmico e geração de.....	61
Figura 3.8 - Esquema do gaseificador Downdraft.....	63
Figura 4.1 - Localização da área de estudo	67
Figura 4.2 - Aterro controlado de Itajubá-MG	70

Figura 5.1 - Tela para cálculo de energia térmica e elétrica através do aterro sanitário	72
Figura 5.2 - Composição dos resíduos urbanos domiciliares de Itajubá-MG	75
Figura 5.3 - Diagrama contendo as etapas do processo de reciclagem dos plásticos, os equipamentos utilizados e a energia elétrica	76
Figura 5.4 - Diagrama de energia produzida com a matéria orgânica e gasta	79
Figura 5.5 - Fluxograma A – Disposição dos resíduos	83
Figura 5.6 - Fluxograma B – Disposição dos resíduos	85
Figura 5.7 - Fluxograma C – Disposição dos resíduos	86
Figura 5.8 - Fluxograma D – Disposição dos resíduos	88
Figura 5.9 - Fluxograma E – Disposição dos resíduos	90
Figura 5.10 - Fluxograma F – Disposição dos resíduos	91
Figura 5.11 - Fluxograma G – Gestão dos resíduos para Itajubá - MG	92

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição média dos constituintes do biogás	22
Tabela 2.2 - Valores de k e L ₀ propostos pela USEPA	31
Tabela 2.3 - Estimativa da densidade do lixo depositado	31
Tabela 2.4 - Valores para k proposto em correspondência com a precipitação anual	32
Tabela 2.5 - Valores L ₀ em função da degradabilidade do resíduo.....	33
Tabela 2.6 - Capacidade de Geração de 1 Nm ³ de Biogás	35
Tabela 2.7 - Equivalência do biogás com outros combustíveis usuais	43
Tabela 5.1 - Caracterização dos resíduos urbanos de Itajubá.....	74
Tabela 5.2 - Consumo de energia nos equipamentos de reciclagem	75
Tabela 5.3 - Quantidade de plásticos diários a serem reciclados	77
Tabela 5.4 - Produção de biogás pela biodigestão.....	78
Tabela 5.5 - Energia térmica e elétrica gerada pela biodigestão	78
Tabela 5.6 - Quantidade de biogás para alimentar motores ciclo diesel na proporção 7:1	80
Tabela 5.7 - Energia térmica advinda do incinerador	81
Tabela 5.8 - Energias intermediária e elétrica final resultante do processo de incineração	81
Tabela 5.9 - Produção de gás pelo processo de gaseificação.....	81
Tabela 5.10 - Energia térmica gerada pela gaseificação	82
Tabela 5.11 - Energia elétrica gerada pelo processo de gaseificação	82

LISTA DE SIMBOLOS

ABEPET – Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRE – Associação Brasileira de Embalagens

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ASMT - American Standard Methods

BEM – Biomassa – Energia - Materiais

BEN – Balanço Energético Nacional

Ca – Cálcio

cal - Calorias

Cd – Cádmiio

CDR – Combustível Derivado do Resíduo

CEMPRE – Centro Empresarial para Reciclagem

CENPES – Centro de Pesquisas de Petróleo

CETESB – Companhia da Tecnologia de Saneamento Ambiental

CH₄ – Metano

CH₃COOH – Ácido Acético

CO - Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPAM - Conselho de Política Ambiental

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós – Graduação e Pesquisa de Engenharia
da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cu – Cobre

cv – Cavalo - Vapor

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EPA – Environmental Protection Agency

EPI – Equipamentos de Proteção Individual
FEAGRI - Faculdade de Engenharia Agrícola
FEM - Faculdade de Engenharia Mecânica
GJ – GigaJoules
GLP – Gás Liquefeito de Petróleo
H₂ – Hidrogênio
HCl – Ácido Clorídrico
HF – Ácido Fluorídrico
Hg - Mercúrio
H₂S - Sulfeto de Hidrogênio
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K – Potássio
kW - QuiloWatts
LANDGEM - Landfill Gas Emission Model
MB – Mass Burn
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MJ - MegaJoules
MW - MegaWatts
N₂ - Nitrogênio
NaCl - Cloreto de Sódio
NBR – Norma Brasileira
NH₃ – Amoníaco
NIPE - Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético
Nm³ – Normal Metro Cúbico
O₂ – Oxigênio
PCI – Poder Calorífico Inferior

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PEBD - Polietileno de Baixa Densidade

PET - Polietileno Tereftalato

pH – Potencial Hidrogeniônico

PMI – Prefeitura Municipal de Itajubá

PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PVC - Policloreto de Vinila

RCC – Resíduos de Construção Civil

RSS – Resíduos do Serviço da Saúde

S – Sul

SEMOP - Secretaria Municipal de Obras

SO₂ – Ácido Sulfídrico

TWh – TeraWatts-hora

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

USEPA - United States Environment Protection Agency

W - Oeste

RESUMO

O crescimento populacional e a elevação do poder aquisitivo em virtude do desenvolvimento econômico impulsionam o aumento gradativo de produção de resíduos gerados a cada ano. O descarte destes resíduos representa um grande desafio econômico e ambiental. A reciclagem de resíduos plásticos é uma solução para minimizar o seu descarte e garantir uma melhoria ambiental, porém o alto consumo de energia encarece o processo. Este estudo analisa as diversas tecnologias para geração de energia utilizando resíduos urbanos que poderá ser utilizada para reciclar resíduos plásticos, além de apresentar modelos de gestão para o município. Inicialmente foi realizado um levantamento e análise da composição física dos resíduos, o qual permitiu encontrar o percentual de plásticos (12,9%) dispostos diariamente pela população. Dados sobre equipamentos utilizados na reciclagem de plásticos foram essenciais para obtenção da demanda energética necessária ao processo tanto para plástico mole e PET (2,12 GJ/tonelada) quanto para plástico duro (0,11 GJ/tonelada). Em posse do percentual de plásticos a ser reciclados e da quantidade de energia elétrica necessária verificou-se a possibilidade de reciclagem utilizando a energia gerada por diferentes tecnologias através dos resíduos no município. A energia elétrica gerada pela utilização do biogás proveniente da matéria orgânica, ao aplicar um estudo de caso no município de Itajubá-MG, possível de se obter no aterro sanitário (11,7 GJ diários) e se for utilizado biodigestores (14,9 GJ diários) é suficiente para suprir a demanda energética necessária para reciclagem dos plásticos duros (0,17 GJ diários), bem como os plásticos moles e PET (10,98 GJ diários) descartados diariamente neste município. Com relação aos processos que utilizam a porção seca (matéria orgânica seca, restos de podas e outros) dos resíduos urbanos, incineração e gaseificação, foram obtidas energia elétrica (13,6 GJ, 12,5 GJ) e térmica (158 GJ, 35,7 GJ). Através da análise dos resultados tem-se que para Itajubá-MG, a configuração para melhor aproveitamento energético e gestão ambiental dos resíduos seria o aproveitamento da matéria orgânica, constituída de restos de alimentos, em biodigestores, o que geraria aproximadamente 12,9 GJ de energia elétrica; restos de podas em gaseificadores, gerando 12,5 GJ de eletricidade e materiais contaminados com material orgânico levados aos incineradores, gerando 5,3 GJ, ficando o aterro sanitário para deposição dos resíduos inertes. A reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo utilizando energia reciclada dos resíduos descartados em um município e uma melhor gestão destes, além de acarretar um ganho social e ambiental, vem contribuir para a solução de problemas relacionados à destinação final dos resíduos e conseqüentemente para o aproveitamento da energia elétrica gerada por essas tecnologias, que ao ser vendida à concessionária local tem seu preço reduzido a metade

além de não incidir imposto tornando a viabilidade econômica bem menor do que sua utilização, o que incentiva a instalação de unidades de reciclagem nas proximidades de uma comunidade garantindo uma maior sustentabilidade ao município em que o projeto venha a ser implantado.

Palavras-chave: Resíduos urbanos, energia, biogás, reciclagem, plásticos.

ABSTRACT

The population growth and the rise of the purchasing power in virtue of the economic development stimulate the gradual increase of production of residues generated to each year. The discarding of these residues represents a great economic and ambient challenge. The recycling of plastic residues is a solution to minimize its discarding and to guarantee an ambient improvement, however the high consumption of energy encircle the process. This study it analyzes the diverse technologies for energy generation using urban residues that could be used to recycle plastic residues, beyond presenting models of management for municipal. Initially it was carried through a survey and analysis of the physical composition of the residues, which allowed to daily find the percentage of plastics (12.9%) made use for the population. Data on equipment used in the plastic recycling had been essential for attainment of the necessary energy demand to the process in such a way for soft plastic and PET (2,12 GJ/ton) how much for hard plastic (0.11 GJ/ton). In ownership of the percentage of plastics to be recycled and of the amount of necessary electric energy it was verified recycling possibility using the energy generated for different technologies through the residues in the city. The electric energy generated by the use of biogas proceeding from the organic substance, when applying a study of case in the city of Itajuba-MG, possible of if getting in it I fill with earth bathroom (11,7 GJ daily) and will have used biodigestors (14,9 GJ daily) is enough to supply the necessary energy demand for recycling of hard plastics (0,17 GJ daily), as well as soft plastics and PET (10,98 GJ daily) discarded daily in this city. With regard to the processes that use the dry portion (organic substance drought, remaining portions of pruning and others) of the urban residues, incineration and gasification, they had been gotten electric energy (13,6 GJ, 12,5 GJ) and thermal (158 GJ, 35,7 GJ). Through the analysis of the results it is had that for Itajuba-MG, the configuration for better energy exploitation and ambient management of the residues would be the exploitation of the organic substance, constituted of food remaining portions, in biodigestors, what would generate 12,9 GJ of electric energy approximately; remaining portions of pruning in aerators, generating 12,5 GJ of electricity and materials contaminated with organic material taken to the incinerators, generating 5,3 GJ, being I fill with earth it sanitary for deposition of the inert residues. The recycling of plastic residues after-I consume using recycled energy of the discarded residues in a city and one better management of these, beyond causing a social and ambient profit, comes to contribute consequently for the solution of problems related to the final destination of the residues and for the exploitation of the electric energy generated by these technologies, that to the sold being to the local concessionaire the half beyond not happening tax well has its reduced price becoming the well lesser economic viability of

what its use, what it stimulates the installation of units of recycling in the neighborhoods of a community guaranteeing a greater support the city where the project comes to be implanted.

Key words: Urban residues, energy, biogas, recycling, plastics.

1 - INTRODUÇÃO

O impacto causado pela produção desenfreada de resíduos urbanos em virtude do aumento populacional aliada ao ritmo acelerado das modificações econômicas e tecnológicas, principalmente em relação ao uso de embalagens artificiais, tem levado o governo e a sociedade a buscar alternativas para minimizar a degradação ambiental e aumentar o bem estar da sociedade como um todo.

Essa produção exponencial de lixo no meio urbano vem preocupando cientistas e estudiosos em todo o mundo, já que os métodos convencionais de tratamento e disposição final, com o passar do tempo, tornam-se mais irreversíveis. Esta preocupação estimula o surgimento de novos métodos alternativos que visam em primeiro lugar, acompanhar a evolução do processo de urbanização, adequando soluções mais precisas às necessidades da sociedade em curso, e em segundo lugar, adotar um plano de gestão dos resíduos com foco em um maior reaproveitamento energético (elétrico e térmico) contido nos resíduos urbanos.

“Os resíduos urbanos são considerados a expressão mais visível e concreta dos riscos ambientais, ocupando um importante papel na estrutura de saneamento de uma comunidade urbana, e, conseqüentemente nos aspectos relacionados á saúde pública. Além das conseqüências para a saúde comunitária, deve-se considerar ainda o impacto que a disposição inadequada desses resíduos provoca no solo, na atmosfera, na vegetação e nos recursos hídricos”, segundo Moritz (1995).

Segundo Ensinas (2003), a disposição final dos resíduos sólidos urbanos é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos em todo planeta e tende a agravar-se com o aumento do consumo de bens descartáveis. Entre as alternativas de disposição dos resíduos sólidos estão os aterros sanitários, os biodigestores, incineradores, além dos gaseificadores.

O grande desafio em gerenciar resíduos urbanos principalmente a grande concentração de plásticos descartados sem aproveitamento econômico e energético, os quais se acumulam em locais de disposição devido ao grande tempo de decomposição dos mesmos, tem sido motivo de preocupação. Além dos plásticos, a matéria orgânica presente em 50% da composição dos resíduos ao se decompor acaba por emitir metano. O metano (principal componente do biogás), importante fonte de energia e também um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento cerca de 20 vezes maior que o dióxido de carbono e responsável por 25% do aquecimento global segundo a EPA (2007).

A quantidade de plástico entre os materiais que compõem o lixo urbano no Brasil ainda é pequena quando comparada à dos países desenvolvidos, mas vem gradativamente aumentando. Para se ter idéia, o consumo per capita de plásticos nos EUA (o maior consumidor deste material no mundo) é de 100 kg/hab./ano e no Japão de 60 kg/hab./ano, enquanto no Brasil está em torno de 19 kg/hab./ano, de acordo com o Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2004). Esta diferença pode vir a indicar que o Brasil apresenta um grande potencial para o aumento do consumo de plástico, já que a cada dia cresce o consumo de bens industrializados acondicionados em embalagens plásticas, em oposição ao uso de produtos naturais

Neste contexto estudos sobre reciclagem de plásticos passam a ser relevantes, já que é possível supor um aumento na geração de resíduos e conseqüentemente, um agravo no problema de destinação do lixo urbano.

A reciclagem vista como medida para minimizar o descarte de resíduos plásticos e garantir uma melhoria ambiental por economizar matéria-prima, vem acompanhada pelo alto custo de geração energética, tornando-a muitas vezes inviável, o que leva a busca de novas alternativas para geração de energia e reaproveitamento dos resíduos.

O suprimento de energia tem dado lugar às fontes alternativas que estão se destacando em substituição das energias derivadas do petróleo, principalmente pelo fato das atuais formas de produção de energia trazerem impactos negativos para o meio ambiente e para a população envolvida.

Atualmente, cerca de 5% de toda a energia produzida no planeta provém de fonte renovável e estima-se que em 2060, quando a população do planeta deverá ser de 12 bilhões de pessoas, esse percentual chegue a 70%, de acordo com CEMPRE (2004).

Em geral, salvo algumas exceções, as fontes renováveis são consideradas energias "limpas", isto é, que não produzem poluição e nem se esgotam e, ainda reciclam resíduos de alto poder energético.

Na procura por tecnologias capazes de solucionar a questão dos resíduos urbanos e buscar novas fontes alternativas de geração de energia elétrica e térmica, diferentes alternativa podem diversificar ou incrementar a matriz energética existente nos dias de hoje. Alguns exemplos são as provenientes dos resíduos sólidos advindas do biogás produzido pela decomposição dos resíduos urbanos, da queima deste em incineradores e gaseificadores ou até mesmo uma gestão utilizando o simples processo de compostagem.

A captação do biogás pode ser encaminhada a um conjunto moto - gerador que utilizam o gás metano como combustível, transformando a energia mecânica resultante

dos motores em eletricidade, por meio de um gerador acoplado, além de ser possível sua utilização em motores flex-fuel.

Este sistema a duplo combustível no ciclo diesel apresenta vantagens por não necessitar de modificações técnicas no projeto do motor e nem mesmo da razão de compressão não impedindo que o motor seja acionado 100% a diesel, além da redução do diesel utilizado, em virtude do aproveitamento do biogás. Na condição de duplo combustível, a substituição do diesel pode ser de até 70%, segundo Avellar (2001).

A incineração dos resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético quer seja para a geração de energia elétrica quer seja para geração de vapor ou ar refrigerado é uma alternativa que vem sendo empregada para solucionar os problemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos, principalmente nos países da Europa, Estados Unidos e Japão, por não possuírem grandes áreas para confinar os resíduos, segundo Gripp (1998).

Nos gaseificadores, reatores químicos onde ocorrem os processos de gaseificação, parte do combustível entra em combustão como em uma fornalha e o fornecimento de ar é controlado de modo a evitar que a combustão se estenda a toda a carga (característica principal do processo), produzindo gás. Utiliza-se como oxidante para o processo de gaseificação o ar atmosférico ou oxigênio puro. O gás obtido pode ser utilizado como combustível em um grupo motor-gerador (baixas potências até cerca de 600 - 1000 kW), em turbinas a gás (acima de 1 MW) ou ainda queimado conjuntamente a outros combustíveis em caldeiras, segundo Martins (2006).

O aproveitamento energético dos resíduos e sua utilização para reciclagem ou aproveitamento em motores do ciclo diesel além de ampliar a segurança do sistema elétrico nacional, por ofertar eletricidade de maneira descentralizada, em virtude de o lixo estar disponível próximo dos centros consumidores, algumas delas ainda reduzem significativamente a emissão de gases causadores de efeito estufa proveniente da decomposição da matéria orgânica e proveniente da combustão de combustíveis fósseis. Além disso, a redução da quantidade de resíduos sólidos urbanos a ser depositada em aterros sanitários tais como os plásticos, amplia suas vidas úteis e soluciona um dos grandes problemas da atualidade, a escassez de áreas para novos depósitos de resíduos urbanos.

A “reciclagem de energia” a partir do biogás gerado seja em aterros ou em biodigestores, ou através da utilização de incineradores e gaseificadores para geração de energia elétrica e térmica aliada ao uso desta para reciclar plásticos pós-consumo, que seriam descartadas sem um devido aproveitamento ou até mesmo utilizadas para outros

fins de preferência do município, vem a ser uma medida importante para amenizar o problema energético bem como a gestão dos resíduos garantindo uma melhoria na sustentabilidade ambiental.

Este trabalho aborda diferentes caminhos para gestão dos resíduos urbanos priorizando a geração de energia elétrica e térmica, bem como a reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo que seriam descartados sem nenhum aproveitamento, no contexto amplo de reaproveitamento energético, eficiência, conservação de energia, minimização de impactos ambientais.

1.1 - Objetivo Geral

Desenvolver ferramenta metodológica de planejamento para aproveitamento do potencial energético e gestão dos resíduos urbanos, aplicando-a na reciclagem dos plásticos, enfatizando seus benefícios ambientais e sociais.

1.2 - Objetivos Específicos

- Estudar a composição dos resíduos gerados e descartados;
- Levantar dados a respeito da demanda energética dos equipamentos utilizados na reciclagem de plásticos;
- Avaliar o potencial de geração de biogás resultante da decomposição anaeróbica dos resíduos;
- Determinar a capacidade de geração de energia elétrica e térmica utilizando biogás através das tecnologias do aterro sanitário e biodigestor;
- Estimar a quantidade de biogás a ser utilizado em motores do ciclo diesel;
- Determinar a capacidade de geração de energia elétrica e térmica advinda dos incineradores;
- Determinar a capacidade de geração de energia elétrica e térmica obtida pelo processo de gaseificação;
- Analisar a viabilidade energética de reciclagem de plásticos utilizando a energia proveniente das tecnologias de aproveitamento dos resíduos existentes;
- Criar um programa de execução da ferramenta metodológica desenvolvida;
- Desenvolver e avaliar diversas configurações possíveis para tratamento e/ou disposição dos resíduos para um aproveitamento energético, ambiental e social satisfatório.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Resíduos Urbanos

2.1.1 - Histórico dos Resíduos Urbanos

Do ponto de vista histórico, segundo Dias (2000), o lixo surgiu no dia em que os homens passaram a viver em grupos, fixando-se em determinados lugares e abandonando os hábitos de andar de lugar em lugar à procura de alimentos ou pastoreando rebanhos.

A partir daí processos para eliminação do lixo passaram a ser motivo de preocupação, embora as soluções visassem unicamente transferir os resíduos produzidos para locais afastados das aglomerações humanas primitivas (Dias, 2000).

Os registros encontrados no Brasil de épocas pré-históricas mostram-nos sambaquis, lançamento de detritos em locais desabitados a céu aberto ou em rios e córregos, assim como enterramento e uso do fogo como métodos de destruição dos restos inaproveitáveis, de acordo com Junkes (2002).

Com o passar do tempo as práticas para resolução dos problemas relacionados aos resíduos urbanos mantiveram-se inalteradas mesmo com o grande crescimento das comunidades. Somente no século XIX começaram a surgir as primeiras alternativas para o problema do lixo urbano capazes de atender aos aspectos sanitários e econômicos, desde então adotaram medidas para a regulamentação dos serviços e procedimentos no campo da limpeza, segundo Dias (2000).

De acordo com Junkes (2002), a primeira iniciativa dos serviços para destinação final dos resíduos urbanos no Brasil ocorreu na cidade de São Paulo, no século XIX, quando se definiram as áreas para disposição final do lixo distantes do centro urbano, sendo que o transporte ficava a cargo dos municípios interessados.

Atualmente o impacto causado pela produção desenfreada de resíduos urbanos, tem levado governo e sociedade a buscar alternativas para minimizar a degradação do meio ambiente e aumentar o bem estar da sociedade como um todo. Várias iniciativas no sentido de ordenar a questão dos resíduos urbanos já foram realizadas mediante projetos de lei ficando a cargo dos municípios planos de gerenciamento integrado e a gestão do lixo municipal, tal como o aproveitamento energético dos resíduos urbanos, segundo Peixoto *et. al.* (2005).

2.1.2 - Definição e Classificação

Segundo a Norma Brasileira, NBR 10.004 (ABNT, 1987), os resíduos urbanos são definidos como, “resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades da comunidade 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. Também determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face da tecnologia disponível”.

Na presente norma também são classificados os resíduos em classes de acordo com suas periculosidades, sendo estas:

- **Resíduos Classe I – Perigosos:** Estão incluídos aqueles que apresentam periculosidade ou mesmo inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- **Resíduos Classe II – Não-Inertes:** são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I – perigosos ou de resíduos Classe III – inertes. Estes podem apresentar propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade e solubilidade em água;
- **Resíduos Classe III – Inertes:** podem ser considerados quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. Como exemplos destes materiais, podem-se citar rochas, tijolos, vidros, certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

Conforme Oliveira (2006), os resíduos quanto à natureza física, pode ser:

- **Seco:** composto por materiais potencialmente recicláveis;
- **Molhado:** correspondente à parte orgânica dos resíduos, como as sobras de alimentos, cascas de frutas, restos de poda, entre outros. Essa classificação é muito utilizada nos programas de coleta seletiva, por ser facilmente compreendida pela população.

2.1.3 - Composição dos Resíduos Urbanos

Os resíduos urbanos domésticos, segundo definição apresentada, são constituídos por misturas de restos de alimentos, papel, papelão, plásticos, metal, vidro, madeira, trapos, couro, entre outros, conforme Netto (1991).

Essa composição varia com a localidade e com o estágio de desenvolvimento em que estes se encontram inserido, pois, este aspecto acompanha diretamente as modificações econômicas e as transformações tecnológicas, que vêm influenciando o modo de vida dos centros urbanos em um ritmo cada vez mais acelerado, principalmente em relação ao uso de embalagens artificiais devido ao aumento no consumo de produtos industrializados, de acordo com Netto (1991) e Souza *et. al.* (2000).

Conforme a Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET (ABEPET, 2007) no Brasil a maior parte do lixo urbano é composta de material orgânico, segundo Figura 2.1, seguido pelo papel e papelão. Observa-se que a presença de metais, principalmente do alumínio no lixo urbano é reduzida, devido ao alto valor agregado às latas descartadas, favorecendo sua separação para venda (ABEPET, 2007).

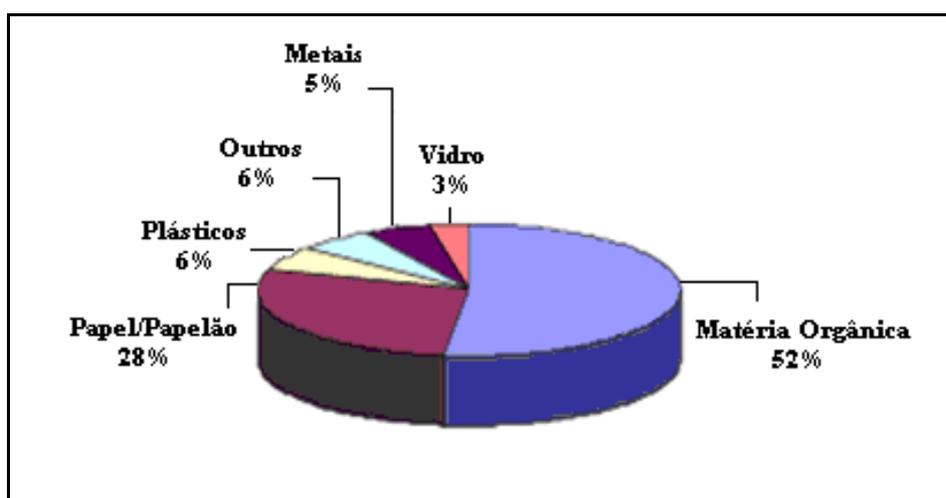


Figura 2.1 - Composição total do lixo urbano em porcentagem no Brasil

Fonte: ABEPET (2007)

Em países não industrializados a porcentagem de matéria orgânica no lixo é maior do que nos países com um alto grau de industrialização. As duas principais causas, segundo Netto (1991), são sistemas de distribuição pouco eficientes principalmente para produtos “in natura” e a falta de embalagens adequadas, que acarretam grandes perdas de alimentos.

O conhecimento da composição física dos resíduos urbanos domésticos torna-se importante para a seleção e/ou operação de equipamentos e instalações, otimização de

recursos e de consumo de energia, bem como para projetos de aterros sanitários, de acordo com Barbosa (2004).

2.1.4 - Destinação Final dos Resíduos Urbanos no Brasil

Lixões, aterros controlados, aterros sanitários e reciclagem são algumas das destinações e/ou tratamentos dos resíduos urbanos atualmente encontrados no Brasil, conforme o Ministério do Meio Ambiente, (MMA, 2004). A questão sobre o que fazer com os resíduos urbanos apresenta uma grande infinidade de respostas que se estende desde o reaproveitamento da matéria-prima via reciclagem até mesmo o aproveitamento energético destes resíduos. Em tese, grande parcela do resíduo gerado, pode ser transformada em algo útil à humanidade, inclusive, a matéria orgânica pode ser reciclada para beneficiamento do solo ou como fonte de energia. Contudo, grande parte do resíduo ainda não é reaproveitada, sendo disposta de forma prejudicial à natureza, conforme Singer (2003).

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB, 2004), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), aproximadamente 75% das cidades brasileiras dispõem de sistemas de coletas de resíduos fornecidas pelas administrações municipais.

Quanto à natureza dos serviços urbanos relacionados ao gerenciamento dos resíduos urbanos, conforme apresentado na PNSB (2004), estes são subdivididos em: limpeza urbana, coleta de resíduo, coleta seletiva, reciclagem, remoção de entulhos e coleta de resíduo especial. A mesma pesquisa revela que no Brasil a maioria dos municípios tem serviços de limpeza urbana e coleta de resíduo, porém os serviços de coleta seletiva e de reciclagem mantêm-se irrisório. Por exemplo, os dados do (PNSB, 2004), cita que das 125.281 toneladas diárias de resíduo coletado no Brasil na sua maioria são dispostas em lixões como apresentado na Figura 2.2.

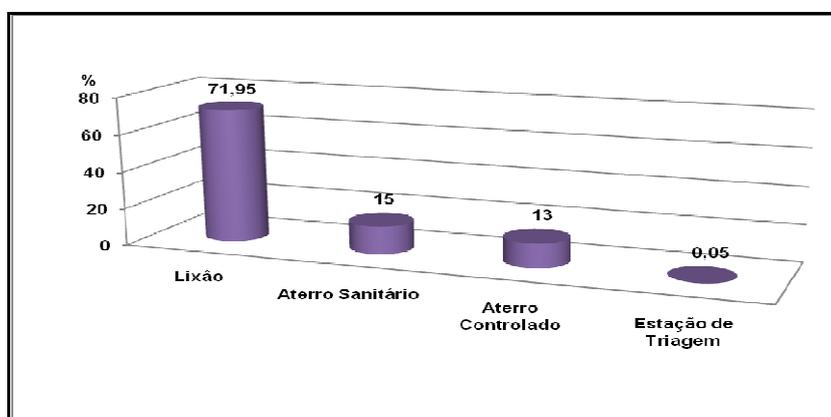


Figura 2.2 - Destinação do resíduo em percentual no Brasil

Fonte: PNSB (2004)

Verifica-se que no Brasil, pequena quantidade de resíduo é disposta de maneira mais adequada, 28% do total que é coletado diariamente, recebe como destinação final os aterros controlados e sanitários.

Quanto à reciclagem, dados publicados pelo Centro Empresarial para Reciclagem – (CEMPRE, 2004), mostram que os índices têm aumentado gradativamente conforme Figura 2.3.

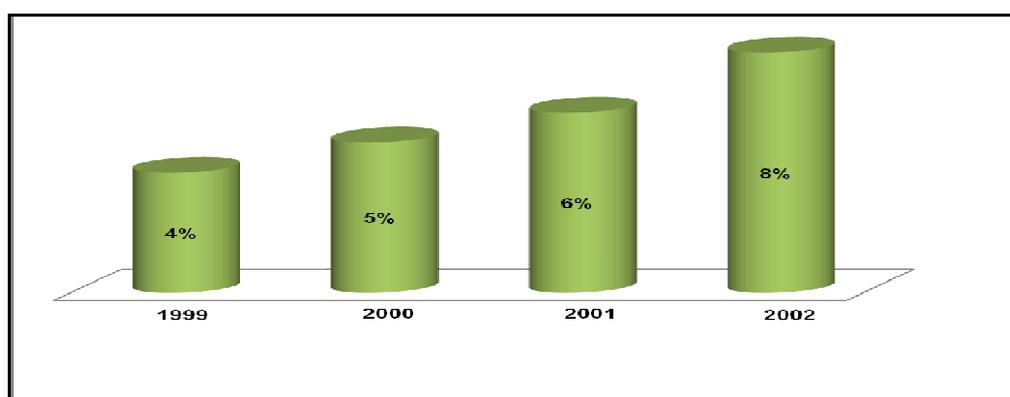


Figura 2.3 - Evolução dos índices de reciclagem de resíduo sólido no Brasil

Fonte: CEMPRE (2004)

Este é apenas um exemplo da importância e do potencial da reciclagem de materiais, sobretudo embalagens de produtos de consumo – papéis, plásticos, vidro, metais, e outros materiais encontrados em abundância na massa de resíduos urbanos, conforme Streb (2001).

Segundo Lizárraga (2005), o tratamento dos resíduos urbanos é um grande problema nacional. Hoje, o Brasil produz aproximadamente 200 mil toneladas de resíduos sólidos, por dia. Desse total, 76% são destinados aos lixões a céu aberto, sem nenhum tipo de tratamento; 13% destinam-se aos aterros controlados; 10% para aterros sanitários e somente 1% é reciclado.

Dentre as destinações, segundo Consoni *et. al.* (2000), o aterro sanitário é o que reúne as maiores vantagens, considerando a redução dos impactos ocasionados pelo descarte dos resíduos urbanos. Caracteriza-se por ser uma instalação de destinação final de resíduos através de sua adequada disposição no solo, sob controle técnico e operacional permanente, de modo a que nem os resíduos, nem os seus efluentes líquidos e gasosos, venham a causar danos à saúde pública ou ao meio ambiente, conforme Real (2005).

Outro método de disposição final dos resíduos é o aterro controlado, que segundo Roth *et. al.* (1999) é menos prejudicial que os lixões pelo fato de os resíduos dispostos no solo serem posteriormente recobertos com terra, o que acaba por reduzir a poluição local.

Porém, trata-se de uma solução com eficácia bem inferior à possibilitada pelos aterros sanitários, pois não ocorre inertização da massa de lixo em processo de decomposição.

É uma instalação destinada à disposição de resíduos urbanos, na qual algumas modalidades de controle devem ser periodicamente exercidas, visando minimizar possíveis danos, riscos à saúde pública, a segurança e ao meio ambiente. Admite-se, desta forma, que o aterro controlado se caracterize por um estágio intermediário entre o lixão e o aterro sanitário, conforme Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2000).

Os vazadouros a céu aberto, os chamados “lixões” constituem uma forma inadequada de descarte final dos resíduos urbanos, segundo Mousinho (2003), caracterizando pela simples descarga dos resíduos sobre o solo sem qualquer tipo ou modalidade de controle, sobre os resíduos ou sobre seus efluentes.

Problemas e inconvenientes como: depreciação da paisagem, presença de vetores de doenças, formação de gás metano sem coleta e degradação social de pessoas, são fatores comuns a todos os lixões, afirma Vanzan (2000).

2.1.5 - Gestão dos Resíduos Urbanos

Entre os fatores relacionados à preservação da saúde e da qualidade de vida das populações, o acesso à coleta, à disposição adequada dos resíduos sólidos e o tratamento destes, estão entre aqueles de importância fundamental, segundo Machado *et. al.* (1999).

Conforme Ferreira *et. al.* (2001), no Brasil, a geração de resíduos sólidos urbanos tem sido crescente ao longo dos últimos anos, sendo esta agravada pela falta de conscientização dos indivíduos, pelo déficit de cobertura dos serviços de coleta e pela baixa qualidade dos serviços oferecidos à população, o que reflete a precariedade das políticas de gestão neste setor.

Embora não existam dúvidas sobre a importância da atividade de limpeza urbana para o meio ambiente e para a saúde da comunidade, esta percepção não se tem traduzido em ações efetivas que possibilitem mudanças qualitativas na situação negativa em que se encontram de forma geral, os sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos em toda a América Latina, inclusive no Brasil (Ferreira *et. al.*, 2001).

Os impactos provocados pelos resíduos sólidos municipais podem estender-se para a população em geral, por meio da poluição e contaminação dos corpos d'água e dos lençóis subterrâneos, direta ou indiretamente, dependendo do uso da água e da absorção de material tóxico ou contaminado de acordo com Machado *et. al.* (1999).

Segundo OPAS/OMS (1994), a gestão ecologicamente racional dos resíduos deve ir além da simples eliminação ou aproveitamento por métodos seguros, mas procurar resolver a causa fundamental do problema buscando modificar as relações não sustentáveis de sua produção e consumo. Os referenciais que indicam as ações necessárias devem apoiar-se em: redução dos resíduos, aumento da reutilização e reciclagem, recuperação energética, promoção do tratamento e ampliação do alcance dos serviços de limpeza urbana.

De acordo com Nunesmaia (1997), uma gestão municipal integrada pode interessar-se por todas as categorias de resíduos, incluindo aqueles provenientes de serviços de saúde, os da demolição e construção civil, dentre outros. No tocante ao tratamento de resíduos, a preocupação de uma gestão integrada leva a conceber várias linhas tecnológicas de valorização dos resíduos, como a recuperação de energia e a eliminação final (tratamento).

2.2 - Reciclagem dos Resíduos Urbanos

Reciclar é economizar energia, poupar recursos naturais e trazer de volta ao ciclo produtivo o resíduo que seria jogado fora, para que o mesmo seja usado novamente como matéria-prima, conforme Ambiente Brasil (2008).

Reciclagem segundo Duston (1993) é o processo através do qual qualquer produto ou material que tenha servido para os propósitos a que se destinava, e que tenha sido separado do lixo e reintroduzido no processo em um novo produto, seja igual ou semelhante ao anterior, seja assumindo características diversas das iniciais.

Além de ecologicamente correta, esta pode ser viável econômica e lucrativamente, tanto para os recicladores como para as indústrias de transformação, segundo Gedeia (2008).

Para Jardim (1995), reciclagem é o resultado de uma série de atividades por vias de materiais que se tornariam lixo ou estão no lixo e são desviados, sendo coletados, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de bens feitos anteriormente apenas com matéria-prima virgem.

Basicamente, a reciclagem inclui as etapas de coleta, separação, revalorização e transformação do material coletado, conforme a Associação Brasileira de Embalagens (ABRE, 2007). A coleta e separação são atividades iniciais de triagem por tipo de material como papel, metal, plástico e madeira. A revalorização é uma etapa intermediária que prepara os materiais separados para a etapa de transformação, responsável pelo processamento industrial dos materiais para a fabricação de novos produtos.

Dessas etapas a mais importante é a etapa de separação dos resíduos, pois é através dela que todo processo é desencadeado. Vários símbolos foram criados através de normas a fim de facilitar todo o processo conforme mostra a Figura 2.4 (ABRE, 2007).

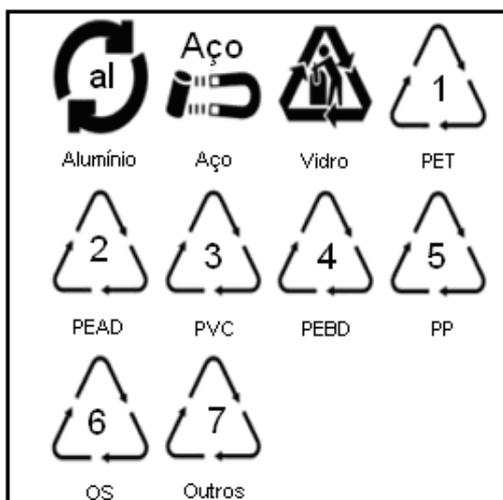


Figura 2.4 - Simbologias utilizadas para separação dos materiais

Fonte: ABRE (2007)

Segundo Pereira (2000), a reciclagem já é utilizada no Brasil e em várias partes do mundo pelas indústrias de transformação, aonde um programa bem conduzido tende a desenvolver na população uma nova mentalidade sobre questões que envolvem a economia e a preservação ambiental. Quando o lixo residencial é acondicionado adequadamente, o morador passa a se colocar como peça integrante de todo um sistema de preservação do meio ambiente.

A reciclagem traz inúmeros benefícios tais como: a diminuição da quantidade de lixo a ser aterrada (conseqüentemente aumenta a vida útil dos aterros sanitários); preservação de recursos naturais, economia de energia na produção de novos produtos; diminuição dos impactos ambientais; novos negócios e geração de empregos diretos e indiretos através da criação de indústrias recicladoras, conforme Jardim (1995).

Apesar das vantagens listadas acima a reciclagem não pode ser vista como a principal solução para o lixo. É uma atividade econômica que deve ser encarada como um elemento dentro de um conjunto de soluções, segundo Junkes (2002). Conforme Jardim (1995), o maior objetivo de um programa de reciclagem é o componente ambiental por meio da exploração em menor escala dos recursos naturais diante do aproveitamento de materiais recicláveis como matéria-prima de um novo processo de industrialização, além de diminuir o lixo acumulado e poupar energia.

2.2.1 - Resíduos Urbanos Recicláveis

A reciclagem surgiu como uma maneira de reintroduzir no sistema uma parte da matéria (e da energia), que se tornaria lixo. Assim desviados, os resíduos são coletados, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de bens, os quais eram feitos anteriormente com matéria prima virgem. Dessa forma, os recursos naturais ficam menos comprometidos.

Muitos materiais podem ser reciclados e os exemplos mais comuns são os descritos abaixo, de acordo com Ambiente Brasil (2008).

- **Aço:**

A reciclagem de aço é o reaproveitamento do aço utilizado em objetos que já não estão funcionando para produzir novos objetos, pois é utilizado em diversos materiais, desde latas até carros. Sua reciclagem é tão antiga quanto a própria história de sua utilização e pode ser reciclado infinitas vezes, com custos menores e menos dispêndio de energia do que na sua criação inicial. O aço pode ser separado de outros resíduos por diversos processos químico-industriais e voltar a ser utilizado sem perder suas características iniciais.

- **Alumínio:**

A reciclagem de alumínio é o processo pelo qual o alumínio pode ser reutilizado em determinados produtos, após ter sido inicialmente produzido. O processo resume-se no derretimento do metal, o que é muito menos dispendioso e consome muito menos energia do que produzir o alumínio através da mineração de bauxita. A mineração e o refino deste requerem enormes gastos de eletricidade, enquanto que a reciclagem requer apenas 5% da energia para produzi-lo. Por isto, a reciclagem tornou-se uma atividade importante para esta indústria.

O alumínio pode ser reciclado tanto a partir de sucatas geradas por produtos de vida útil esgotada, como de sobras do processo produtivo. O alumínio reciclado pode ser obtido a partir de esquadrias de janelas, componentes automotivos, eletrodomésticos, latas de bebidas, entre outros. A reciclagem não danifica a estrutura do metal, que pode ainda ser reciclado infinitamente e reutilizado na produção de qualquer produto com o mesmo nível de qualidade de um alumínio recém produzido por mineração. Pelo seu valor de mercado, a sucata de alumínio permite a geração de renda para milhares de famílias brasileiras envolvidas da coleta à transformação final da sucata. Desta forma, a reciclagem do alumínio gera benefícios para o país e o meio ambiente, além de ser menos custoso de obter do que através da sua produção por mineração.

- **Papel:**

A reciclagem de papel é o reaproveitamento do papel não-funcional para produzir papel reciclado. Há duas grandes fontes de papel a se reciclar: as aparas pré-consumo (recolhidas pelas próprias fábricas antes que o material passe ao mercado consumidor) e as aparas pós-consumo (geralmente recolhidas por catadores de ruas). De um modo geral, o papel reciclado utiliza os dois tipos na sua composição e tem a cor creme.

A aceitação do papel reciclado é crescente, especialmente no mercado corporativo. O papel reciclado tem um apelo ecológico, o que faz com que alcance um preço até maior que o material virgem. No Brasil, os papéis reciclados chegaram a custar 40% a mais que o papel virgem em 2001. Em 2004, os preços estavam quase equivalentes e o material reciclado custava de 3% a 5% a mais. A redução dos preços foi possibilitada por ganhos de escala, e pela diminuição da margem média de lucro. Na Europa, o papel reciclado em escala industrial chega a custar mais barato que o virgem, graças à eficiência na coleta seletiva e ao acesso mais difícil à celulose, comparado ao do Brasil.

- **Embalagens Longa Vida:**

A reciclagem de embalagens longa vida é o processo pelo qual são reintegrados à cadeia produtiva os materiais componentes deste tipo de embalagem. O processo de reciclagem consiste de duas etapas independentes e sucessivas. A primeira delas é a reciclagem do papel e a seguinte a reciclagem do composto de polietileno e alumínio. O papel reciclado pode ser utilizado por exemplo para a produção de papelão ondulado, caixas, papel para tubetes. O composto de polietileno e alumínio pode ser utilizado para a fabricação de peças plásticas, placas, telhas ou, através da sua completa separação via processo a plasma, para a produção de parafina e alumínio metálico.

- **Vidro:**

A Reciclagem do vidro é o processo pelo qual o vidro é basicamente derretido e refeito para sua reutilização. Dependendo da finalidade do seu uso, pode ser necessário separá-lo em cores diferentes. As três cores principais são: vidro incolor, vidro verde e vidro marrom/âmbar. Os componentes de vidro decorrentes de lixo municipal (lixo doméstico e lixo comercial) são geralmente: garrafas, artigos de vidro quebrados, lâmpada incandescente, potes de alimentos e outros tipos de materiais de vidro. A reciclagem de vidro implica em um gasto de energia consideravelmente menor do que a sua manufatura através de areia, calcário e carbonato de sódio.

O vidro pronto para ser novamente derretido é chamado de *cullet*. Este material é ideal para a reciclagem e pode, dependendo das circunstâncias, ser infinitamente

reciclado. O uso de vidro reciclado em novos recipientes e cerâmicas possibilita a conservação de materiais, a redução do consumo de energia (o que ajuda nações que têm que seguir as diretrizes do Protocolo de Quioto) e reduz o volume de lixo que é enviado para aterros sanitários

- **Plásticos:**

De acordo com a Brasilplast (2003), os plásticos são utilizados em quase todos os setores da economia desde lazer, construção civil, têxtil, alimentos, setor de energia entre outras. Segundo Ambiente Brasil (2008), os plásticos são formados pela união de grandes cadeias moleculares chamadas polímeros que, por sua vez, são formadas por moléculas menores denominadas monômeros, os quais são produzidos através de um processo químico conhecido como polimerização, união química de monômeros. O tamanho e estrutura da molécula do polímero determinam as propriedades do material plástico, que podem ser classificados como (Ambiente Brasil, 2008):

- **Termoplásticos:** São plásticos que não sofrem alterações na sua estrutura química durante o aquecimento e que podem ser novamente fundidos após o resfriamento. Entre eles, polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC) entre outros;

- **Termofixos:** São aqueles que não fundem com o reaquecimento, tais como resinas fenólicas, poliuretanos entre outros, não podendo ser novamente utilizado em sua função original.

Uma das vantagens dos plásticos é sua leveza, proporcionando grande economia no transporte das mercadorias. As embalagens de plástico descartadas reduzem o peso dos resíduos, diminuem o custo de coleta e destinação final, não apresentam riscos de manuseio e são 100% recicláveis, de acordo com Plasnec (2007). Conforme Brasilplast (2003), ao impedir que os plásticos sejam dispostos sem nenhum reaproveitamento, evita o desperdício de tudo o que a sociedade e o meio ambiente investiram para produzi-lo: energia, recursos naturais, trabalho entre outros.

Apesar de um uso tão amplo, apenas 4% do petróleo extraído (Figura 2.5), são destinados à produção de plásticos, segundo a Plasnec (2007).

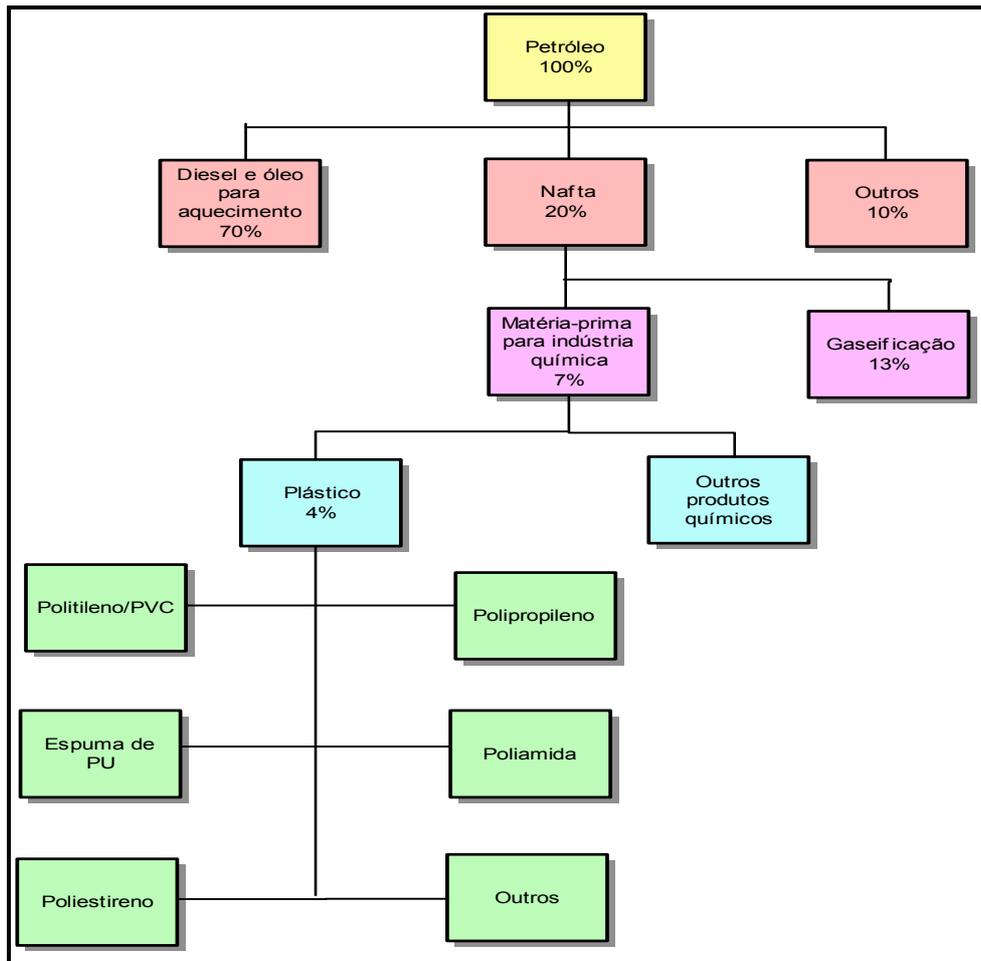


Figura 2.5 - Percentual de petróleo para produção de plásticos

Fonte: Plasnec (2007)

A reciclagem dos plásticos é vista como ambientalmente viável, pois se o produto descartado permanecesse no meio ambiente, poderia estar causando maior poluição. Isso pode ser entendido como uma alternativa para as oscilações do mercado abastecedor e também como preservação dos recursos naturais, o que pode reduzir inclusive, os custos das matérias primas, segundo a Plastivida (2007).

Segundo Faria (2005), esse material apresenta duas características paradoxais para fins de reciclagem e viabilidade econômica e financeira. Para um lado, a fabricação de plástico reciclado economiza 70% de energia, considerando todo o processo desde a exploração da matéria-prima virgem até a formação do produto final, por outro lado a baixa relação preço/volume é desfavorável devido ao alto custo de energia elétrica convencional, o que encarece a reciclagem.

A seguir observa-se na Figura 2.6 a relação custo para reciclar e fração reciclada.

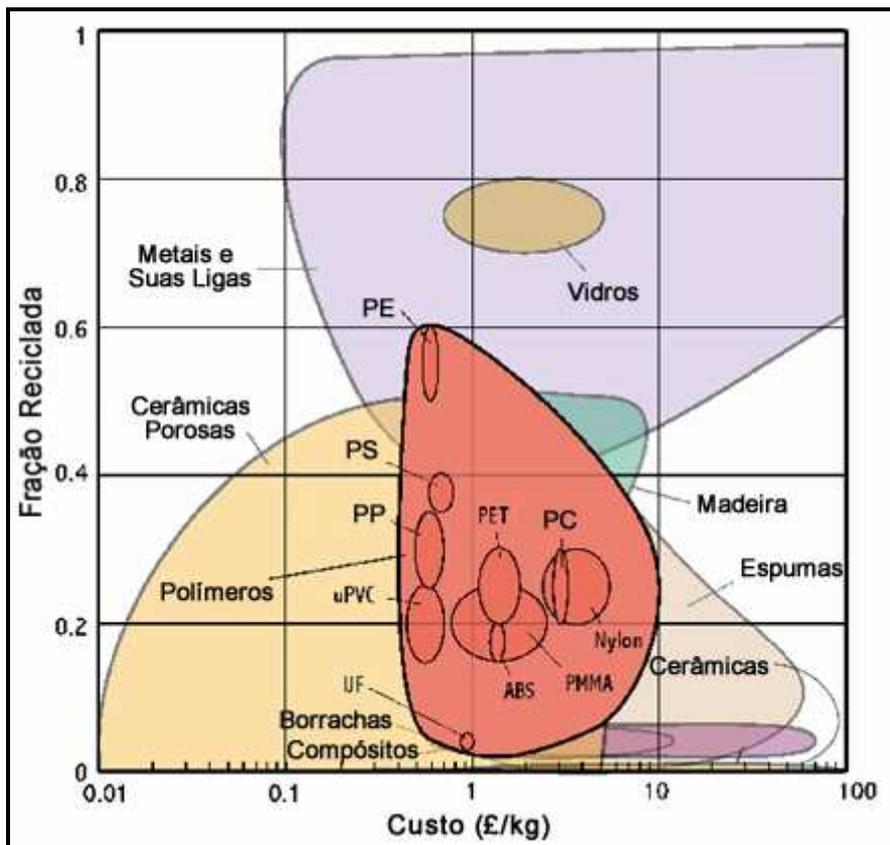


Figura 2.6 - Diagrama mostrando a relação entre os custos para reciclar e a fração reciclada

Fonte: ASHBY (2003)

O diagrama de Ashby (2003) mostra que os plásticos são materiais com baixa ou média reciclabilidade, basicamente porque o custo de sua recuperação geralmente é superior ao da obtenção da matéria prima.

O plástico reciclado tem infinitas aplicações, tanto nos mercados tradicionais das resinas virgens, quanto em novos mercados.

2.2.2 - Processos de Reciclagens Existentes

Existem três tipos de reciclagem: Mecânica, química e energética.

- **Reciclagem Mecânica**

A reciclagem mecânica (Figura 2.7) é a mais conhecida e a mais utilizada para os plásticos em particular segundo Gedeia (2008).

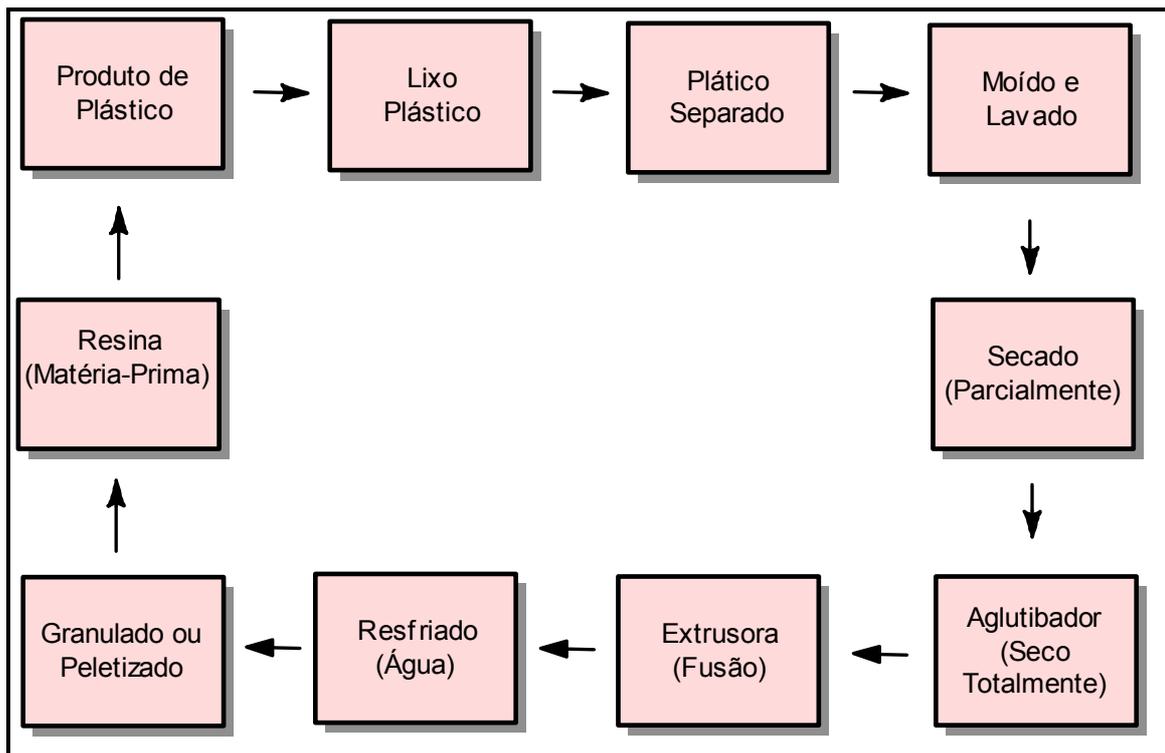


Figura 2.7 - Esquema de reciclagem mecânica

Fonte: Ambiente Brasil (2008)

Neste processo, a qualidade do produto final depende principalmente da qualidade do produto a ser reciclado, ou seja, depende da qualidade dos descartes encaminhados para a reciclagem e consiste na transformação de descartes plásticos de origem industrial e do consumo da população em grânulos que podem ser reutilizados para a produção de outros produtos (Gedea, 2008).

Segundo o Ambiente Brasil (2008), a reciclagem mecânica segue as seguintes etapas:

- **Separação:** Separação em uma esteira dos diferentes tipos de plásticos, de acordo com a identificação ou com o aspecto visual. Nesta etapa são separados também rótulos de diferentes materiais, tampas de garrafas e produtos compostos por mais de um tipo de plástico, embalagens metalizadas, grampos, entre outros.

Por ser uma etapa geralmente manual, a eficiência depende diretamente da prática das pessoas que executam essa tarefa, além da qualidade da fonte do material a ser separado, sendo que aquele oriundo da coleta seletiva é mais limpo em relação ao material proveniente dos lixões ou aterros.

- **Moagem:** Processo onde os diferentes tipos de plásticos separados são moídos e fragmentados em pequenas partes.

- **Lavagem:** Na etapa de lavagem, o plástico fica livre dos seus contaminantes, para que possa continuar o processo até sua utilização final como

matéria prima para novos produtos. É necessário que a água de lavagem receba um tratamento para a sua reutilização ou emissão como efluente.

➤ **Secagem:** A etapa de secagem elimina o excesso de água que o material moído contém. Essa é realizada com a utilização de uma secadora tipo centrífuga, removendo sua umidade.

A secagem para materiais higroscópicos - materiais que apresenta grande capacidade de absorver água e umidade do ar - é extremamente importante, uma vez que o excesso de água pode prejudicar o processamento com este material.

➤ **Aglutinação:** Além de completar a secagem, o material é compactado, reduzindo-se assim o volume que será enviado à extrusora. O atrito dos fragmentos contra a parede do equipamento rotativo provoca elevação da temperatura, levando à formação de uma massa plástica. O aglutinador também é utilizado para incorporação de aditivos, como cargas, pigmentos e lubrificantes.

➤ **Extrusão:** A extrusora funde e torna a massa plástica homogênea. Na saída da extrusora, encontra-se o cabeçote, do qual sai um "espaguete" contínuo, que é resfriado com água. Em seguida, o "espaguete" é picotado em um granulador e transformando em pellet (grãos plásticos).

- **Reciclagem Química**

A produção de compostos com baixo custo de produção e com elevado grau de qualidade, faz com que a reciclagem química tenha maior abrangência em mercados emergentes como o Brasil, por ter uma flexibilidade grande em reprocessamento de materiais compostos como, blendas poliméricas de PP, de acordo com Gedeia (2008).

A reciclagem química se divide em quatro processos básicos (Gedeia, 2008):

➤ **Pirólise:** O processo de pirólise consiste na quebra das moléculas, pela ação calorífica na ausência de oxigênio, gerando frações de hidrocarbonetos que futuramente serão processados em refinarias. Esse processo é o mais utilizado quando se trata de reciclagem química.

➤ **Hidrogenização:** Com o tratamento de hidrogênio e calor, as cadeias são quebradas, acabando por gerar compostos puros, deixando apenas uma pequena parcela de resíduos não aproveitáveis, que na sua maioria são voláteis. Produtos de utilização vigente no mercado são reproduzidos nas refinarias, sem perda de característica micromolecular.

➤ **Gaseificação:** As cadeias poliméricas são aquecidas com ar ou oxigênio, gerando um gás que chamamos de "gás de síntese", que por sua vez contém hidrogênio e monóxido de carbono.

➤ **Quimólise:** Na presença de água, glicol e metanol, as cadeias são quebradas parcialmente em monômeros, que podem ser de eteno ou propeno.

Vale citar que ainda os materiais sofrem um processo de degradação. Essa degradação pode ser química, mecânica, térmica, fotolítica, ou outros processos degradativos menos importantes, além de existirem alguns materiais que são biodegradáveis, estes sofrem uma ação biológica natural ou induzida de degradação (Gedea, 2008).

- **Reciclagem Energética**

Conforme a Plastivida (2007), é a recuperação da energia contida nos materiais como os plásticos através de processos térmicos.

A reciclagem energética distingue-se da incineração por utilizar os resíduos plásticos como combustíveis na geração de energia elétrica. Já a simples incineração não reaproveita a energia dos materiais. A energia contida em 1 kg de plástico é equivalente à contida em 1 kg de óleo combustível. Além da economia e da recuperação de energia, com a reciclagem ocorre ainda uma redução de 70 a 90% da massa do material, restando apenas um resíduo inerte esterilizado (Plastivida, 2007).

Deve ser levado em conta que o valor energético dos plásticos é equivalente ao de um óleo combustível (37,7 MJ/kg) e por esta razão, podem-se constituir em valiosa fonte energética se não houver possibilidade de serem reciclados por uma das alternativas anteriores. Na cidade de São Paulo, são coletadas 700 toneladas de lixo por dia equivalentes a cerca de 5000 barris de petróleo, o que representa 0,3% do consumo do país, segundo Pinto (1995).

2.3 - Geração de Energia dos Resíduos Urbanos

A geração de energia elétrica a partir dos resíduos urbanos pode ser considerada como alternativa por suas significativas vantagens estratégica, econômica e ambiental, segundo Costa *et. al.* (2001):

- **Vantagens estratégicas:** geração descentralizada; próxima aos pontos de carga, não necessitando de investimentos em linhas de transmissão;

- **Vantagens econômicas:** utilização de combustível disponível no local e de baixo custo (resíduo de processo); dinamização do setor de máquinas e equipamentos no país;

- **Vantagens ambientais:** utilização de energia renovável (resíduos urbanos), com menores emissões poluentes e com balanço de carbono negativo (contribuindo para redução do efeito estufa).

Os resíduos urbanos são um indicador do desenvolvimento de uma nação. Quanto mais forte a situação econômica do país, mais sujeira este irá produzir. É sinal de que o país está crescendo e de que as pessoas estão consumindo mais. A questão é que muitas vezes as cidades brasileiras não têm estrutura para encarar esse crescimento e se encontram perto de um limite. As prefeituras estão sem dinheiro para a coleta e já não há mais lugar onde depositar esses resíduos, de acordo com Udaeta (1997).

Segundo Kanayama (1999), uma característica importante que nem sempre é executada na prática é a priorização de ações, muitas vezes conhecida como política dos 5 R's, de "Reduzir", "Reutilizar", "Reciclar", "Repensar" e "Recusar", antes da disposição final.

Cada "R" obedece a uma hierarquia. A reutilização não deve ser considerada até que as possibilidades de redução na fonte tenham se esgotado. A reciclagem não deve ser levada em conta até que as possibilidades de utilização tenham se esgotado, e assim por diante, até se chegar à disposição final (Kanayama, 1999).

Assim, têm-se além da reciclagem, outras formas de se solucionar o problema de disposição e/ou aproveitamento energético, como as tecnologias definidas a seguir, segundo Tchobanoglous (1994 a).

2.3.1 - Biodigestão

O processo de biodigestão nada mais é do que a decomposição da matéria orgânica realizada por microorganismos, resultando como produto o biogás.

O biogás é um combustível gasoso resultante da digestão anaeróbia, sendo composto de vários gases como mostrado na Tabela 2.1, os quais estão presentes em grandes quantidades (gases principais), procedentes da decomposição da fração orgânica dos resíduos urbanos, e de vários outros em menores frações (oligogases), que podem apresentar riscos à saúde pública por serem tóxicos, segundo Oliveira *et. al.* (2002).

Entre os gases presentes encontram-se: o amoníaco (NH_3), o dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), metano (CH_4), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), sendo o metano e o dióxido de carbono os principais gases procedentes da decomposição anaeróbia dos componentes biodegradáveis dos resíduos urbanos, conforme o boletim do World Bank (2002).

Segundo Oliveira *et. al.* (2002), a mistura dos gases que constituem o biogás é resultante do tipo de material orgânico degradado biologicamente.

Dependendo da eficiência do processo, influenciado por fatores como carga orgânica, pressão e temperatura durante a fermentação, o biogás pode conter entre 40% a 80% de metano (Oliveira *et.al.*, 2002).

Tabela 2.1 - Composição média dos constituintes do biogás

GASES	PORCENTAGEM (%)
Metano (CH₄)	55 – 80
Gás carbônico (CO₂)	24,8 – 60
Nitrogênio (N₂)	Até 5
Oxigênio (O₂)	Até 1
Hidrogênio (H₂)	1 – 10
Gás sulfídrico (H₂S)	Até 3
Monóxido de carbono (CO)	0,1
Outros gases	Traços

Fonte: Oliveira *et. al.* (2002)

Segundo Pecora (2006), com a formação do biogás alguns problemas referentes à saúde e de ordem social e econômica, tais como, riscos de incêndios e explosões em instalações próximas aos aterros, odores desagradáveis, desvalorização das propriedades, formação de ozônio de baixa altitude, formação de alguns constituintes que podem causar câncer, entre outros, podem vir a ocorrer se esse não for devidamente coletado e tratado.

Até a pouco tempo, o biogás era simplesmente encarado como um subproduto obtido a partir da decomposição anaeróbica. No entanto, o acelerado desenvolvimento econômico dos últimos anos, a subida acentuada do preço dos combustíveis convencionais e o apelo à preservação do meio ambiente, têm encorajado investigações para produção de energia a partir de novas fontes alternativas e economicamente atrativas, tentando sempre que possível criar novas formas de produção energética que possibilitem à conservação dos recursos naturais esgotáveis, sendo uma dessas formas a utilização do biogás proveniente de aterro sanitário ou de biodigestores, conforme Costa (2006).

A degradação dos resíduos em aterros sanitários ou em biodigestores ocorre através de dois processos, o primeiro processo é de decomposição aeróbia, fase bastante curta, devido ao rápido consumo de oxigênio presente em quantidade limitada e ocorre normalmente no período de deposição do resíduo. Nesta fase a matéria orgânica polimérica é, num primeiro momento, submetida à ação de enzimas extracelulares específicas (proteolíticas, celulolíticas, entre outras) secretadas por microrganismos ditos hidrolíticos.

Nesta fase ocorre alta liberação de calor, grande formação de CO₂ e hidrogênio, particularmente se a umidade no interior da massa de resíduos urbanos for baixa. Após este período, a redução do O₂ presente nos resíduos sólidos dá origem ao processo de digestão anaeróbia (Borba, 2006).

O processo de digestão anaeróbia, segundo Alves (2000), pode ter vindo a colaborar para a determinação da composição atmosférica e conseqüentemente para o desenvolvimento da vida, graças aos microrganismos e a intensidade de sua ação no ambiente primitivo.

Mais recentemente, em países limitados pela falta ou distribuição inadequada de energia, aliado às crises energéticas da década de 70, a digestão anaeróbia foi adaptada para atender as necessidades energéticas (Alves, 2000).

A duração de cada fase de geração de gás varia conforme a distribuição dos componentes orgânicos, a disponibilidade de nutrientes, a umidade dos resíduos, a passagem de umidade e o grau de compactação inicial, conforme Borba (2006).

Segundo Tchobanoglous *et. al.* (1994 b), a geração do biogás ocorre em cinco fases, ou quatro se for desconsiderada a segunda, por ser uma fase de transição, como definido abaixo e mostrado na Figura 2.8.

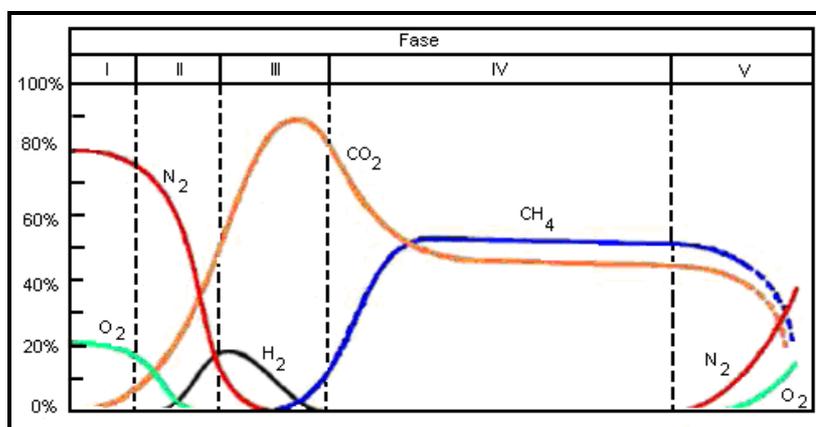


Figura 2.8 - Fases de geração de biogás em aterros de resíduos sólidos

Fonte: Tchobanoglous *et. al.* (1994 b)

- **Ajuste inicial:** Fase em que os resíduos são depositados no aterro ou nos biodigestores e sua fração biodegradável sofre a decomposição biológica em condições aeróbias. A fonte principal de microorganismos aeróbios e anaeróbios, responsável pela decomposição dos resíduos, é o solo empregado na cobertura diária e final nos aterros, o lodo de estações de tratamento, a recirculação do chorume, os nutrientes presentes nos resíduos entre outros. Esta fase, em que a decomposição é aeróbia, se estende por um período curto.

- **Transição:** Fase em que decrescem os níveis de oxigênio e começa a fase anaeróbia. Enquanto o processo é convertido em anaeróbio, o nitrato e o sulfato, que podem servir como receptores de elétrons em reações de conversão biológica, freqüentemente são reduzidos a gás nitrogênio e sulfato de hidrogênio. O início das condições anaeróbias pode ser verificado através do potencial de oxidação e redução que possui o resíduo.

Com a queda do potencial de óxido-redução os microorganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Nesta fase o potencial hidrogeniônico (pH) começa a cair devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de CO₂.

- **Ácida:** Fase que antecede a formação de metano, em que as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e pequenas quantidades de H₂. A acidogênese envolve a conversão microbiológica dos compostos resultantes da primeira etapa em compostos intermediários com baixa massa molecular, como o ácido acético (CH₃COOH) e pequenas concentrações de outros ácidos mais complexos. O CO₂ é o principal gás gerado durante a fase III. Também serão produzidas quantidades menores de hidrogênio. Os microorganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias e facultativas. A demanda bioquímica de oxigênio (DBO), a demanda química de oxigênio (DQO) e a condutividade aumentam significativamente durante esta fase devido à dissolução de ácidos orgânicos.

- **Metanogênica:** Nesta fase de fermentação do metano predominam microorganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH₄ e CO₂.

A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH nesta fase ascenderá a valores na faixa de 6.8 a 8.0. A seguir o pH continuará subindo e serão reduzidas as

concentrações de DBO, DQO e o valor da condutividade. Com valores mais elevados de pH, menores quantidades de constituintes inorgânicos permanecerão dissolvidas, tendo como consequência a redução da concentração de outras substâncias tais como os metais pesados.

- **Maturação:** Esta fase ocorre após grande quantidade do material ter sido biodegradado e convertido em CH₄ e CO₂ durante a fase metanogênica.

Como a umidade continua migrando pela massa de resíduo, porções de material biodegradável até então não disponíveis acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam são de degradação lenta. Dependendo das medidas no fechamento do biodigestor e do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no biogás.

Uma vez que a produção de biogás é toda feita por microorganismos, fatores que afetam a sobrevivência dos mesmos afetarão diretamente a formação do biogás, de acordo com Laender *et. al.* (2000).

Alguns dos fatores mais importantes e que devem ser controlados segundo a United States Environment Protection Agency (USEPA, 1991) e USEPA (1996), são:

- **Composição dos resíduos:** Quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano e vazão de biogás. Os principais nutrientes (substrato) dos microorganismos são carbono, nitrogênio e sais orgânicos, sendo que a produção não é bem sucedida, se apenas uma fonte de material for utilizada.

Uma relação específica de carbono para nitrogênio deve ser mantida entre 20:1 e 30:1.

- **Ambiente anaeróbio:** Para que haja produção de metano, a matéria orgânica deve sofrer decomposição em ambiente sem oxigênio, devido ao fato de as bactérias metanogênicas serem essencialmente anaeróbicas. A decomposição de matéria orgânica na presença de ar (oxigênio) produz apenas dióxido de carbono.

- **Umidade:** A umidade é essencial à vida das bactérias decompositoras, que dependem da umidade inicial do resíduo, da infiltração de água da superfície e do solo, e da água produzida na decomposição.

- **Acidez e temperatura:** A faixa ideal para a produção de biogás é de 35 a 45°C (bactérias mesofílicas) e de 50 a 60°C (bactérias termofílicas). As bactérias que produzem o metano sobrevivem numa faixa estreita de pH (6.5 a 8.0). Assim, enquanto

as bactérias produtoras de ácido produzem ácidos, as bactérias produtoras de metano consomem esses ácidos, mantendo o meio neutro. Entretanto, para que o processo seja bem sucedido é necessária uma população de bactérias metanogênicas já presente, pelo fato de a produção ácida ser bem mais rápida do que a produção de metano.

- **Substâncias prejudiciais:** Muitos materiais poluentes, tais como cloreto de sódio (NaCl), cobre (Cu), amoníaco (NH₃), Potássio (K), cálcio (Ca) entre outros, são aceitáveis se mantidas frações abaixo de certas concentrações. Uma quantificação exata da concentração não prejudicial é difícil, mas qualquer nutriente de elemento na solução, em excesso, pode provocar sintomas de toxidez ao meio bacteriano.

Desta maneira os aterros sanitários e os biodigestores são as duas formas de disposição dos resíduos urbanos para produção de biogás e conseqüentemente geração de energia elétrica.

2.3.1.1 - Aterro Sanitário

A utilização do biogás proveniente dos aterros sanitários é o uso energético mais simples dos resíduos urbanos, bem como mundialmente o mais utilizado de acordo com Junkes (2002).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984), aterro sanitário é definido como sendo “Técnica de disposição de resíduos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e a sua segurança, minimizando os impactos ambientais; método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos a menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores se for necessário”.

Conforme Junkes (2002), aterro sanitário é a alternativa que reúne as maiores vantagens considerando a redução dos impactos ocasionados pelo descarte dos resíduos sólidos urbanos, apresentando características como subdivisão da área de aterro em células de colocação de lixo; disposição dos resíduos no solo previamente preparado para que se torne impermeável, impossibilitando o contato dos líquidos residuais (água das chuvas e chorume) com o lençol freático; presença de lagoas de estabilização para a biodegradação da material orgânica contida nos líquidos residuais; presença de drenos superficiais para a coleta da água das chuvas; drenos de fundo para a coleta do chorume e para a dispersão do metano, coletores dos líquidos residuais em direção as lagoas de estabilização, confinamento do lixo em camadas vegetal, conforme Figura 2.9.

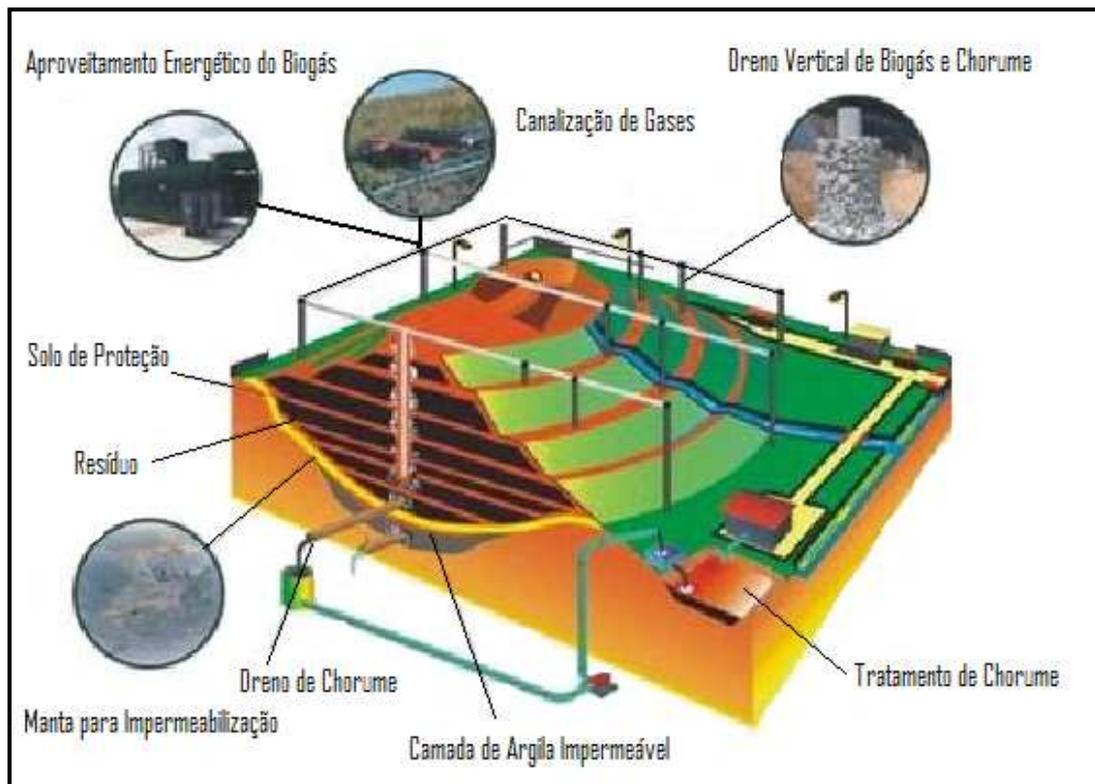


Figura 2.9 - Corte esquemático de um aterro sanitário

Fonte: RECICLOTECA (2007)

A tecnologia de aproveitamento do biogás em aterros sanitários para produção de energia elétrica é uma alternativa que pode ser aplicada a curto e médio prazo para os gases gerados nos aterros sanitários já existentes. É utilizada em centenas de aterros de diversos países, e consiste na recuperação do biogás oriundo da decomposição natural dos restos orgânicos para abastecer motores ciclo Otto ou até mesmo turbinas, que impulsionam geradores. A partir da composição do biogás (cerca de 50% de metano, 45% de dióxido de carbono, pequenas quantidades de gás sulfídrico entre outros), que foram desenvolvidos motores especificamente para melhorar o rendimento desse combustível ao utilizá-lo, segundo Oliveira (2004).

De um modo geral o aproveitamento do biogás proveniente de aterros sanitários tem as seguintes vantagens, conforme Oliveira *et.al.* (2000):

- Redução dos gases de efeito estufa;
- Baixo custo para o descarte de lixo;
- Permitir utilização para geração de energia ou como combustível doméstico.

E como desvantagens são citadas:

- A ineficiência no processo de recuperação do gás, que permite um aproveitamento de aproximadamente 50% do total de biogás produzido (correspondente a cerca de 90% do metano);
- A inviabilidade de utilização do metano para lugares remotos;
- Alto custo para “upgrade” de uma planta;

Conforme Oliveira (2004), um sistema padrão de coleta de biogás em aterros sanitários possui três componentes centrais: poços de coleta e tubos condutores, um sistema de tratamento, e um compressor.

Além disto, a maioria dos aterros sanitários com sistema de recuperação energética terá um flare para queima do excesso de gás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos (Oliveira, 2004).

De acordo com Teixeira (2004), a geração elétrica a partir do biogás de aterros sanitários é vantajosa porque produz valor agregado para o biogás. A cogeração de eletricidade e energia térmica (vapor) a partir deste pode ser uma alternativa ainda melhor, pois pode ser usado localmente para aquecimento, refrigeração, para outras necessidades de processo, ou ainda transportado por tubo para uma indústria ou comércio próximo, obtendo um segundo rendimento para o projeto.

Existem várias tecnologias para a geração de energia elétrica como: motores de combustão interna, turbinas de combustão e turbinas a gás com utilização do vapor (ciclo combinado). No futuro, outras tecnologias como células combustíveis tornarão comercialmente viáveis e poderão utilizar o biogás, de acordo com Oliveira (2004).

A respeito da metodologia recomendada para o cálculo do biogás produzido em aterros sanitários e dos dados que esta exige, é de se esperar que cada país ou grupo de países desenvolva diferentes experiências, de acordo com a disponibilidade desses dados. Dessa maneira, painéis de especialistas são formados de maneira a aperfeiçoá-la, segundo Alves (2000).

Atualmente são encontrados diversos métodos para estimar o cálculo de biogás produzido a partir dos resíduos urbanos em aterros sanitários, entre eles podemos citar os apresentados pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), pela USEPA e pelo Banco Mundial para sistemas de disposição nos quais não possuem sistema de controle desses gases.

- **Método de estimativa proposto pelo IPCC**

$$Q_{\text{Biogás}} = \text{Taxa}_{\text{RSD}} \times \text{RSD}_f \times \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (2.1)$$

onde:

- $Q_{\text{biogás}}$ - Quantidade de biogás (Nm^3 diários);
- Taxa_{RSD} - Taxa de geração de resíduo sólido (kg/dia);
- RSD_f – Fração de resíduo sólido que é depositada em aterros sanitários (%);
- FCM - Fator de correção de metano (Fator adimensional);

O IPCC (1996) define quatro categorias de qualidade dos aterros: Aterros Inadequados, Aterros Controlados, Aterros Adequados e Aterros Sem Classificação e para cada uma dessas categorias o FCM tem um valor diferente.

- COD - Carbono orgânico degradável (%);
- COD_f - Fração de carbono orgânico degradável que realmente degrada (%);
- F - Fração de CH_4 no gás de aterro (%);
- 16/12 - Fator de conversão de carbono em metano.

Adicionando a densidade do metano à equação, para obter a geração de metano em m^3/ano , tem-se uma nova equação:

$$EM = \frac{\text{População} \times \text{Taxa}_{\text{RSD}} \times \text{RSD}_f \times \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_f \times F \times \frac{16}{12}}{\rho_{\text{CH}_4}} \quad (2.2)$$

O COD é um valor baseado na composição do resíduo e é obtido através da equação:

$$\text{COD} = 0,4P_{\text{papel}} \times 0,17P_{\text{orgânico}} \times 0,15P_{\text{alimentos}} \times 0,3P_{\text{madeira}} \quad (2.3)$$

onde:

- P_{papel} - porcentagem de papel no resíduo (%);
- $P_{\text{orgânico}}$ - porcentagem de material orgânico no resíduo (%);
- $P_{\text{alimentos}}$ - porcentagem de alimentos no resíduo (%);
- P_{madeira} - porcentagem de madeira no resíduo (%);

As frações 0.4; 0.17; 0.15 e 0.3 são variáveis de acordo com a classificação de cada componente e representam a quantidade de carbono presente em cada um dos componentes do resíduo, determinadas pelo IPCC (1996). Essa equação é recomendada pelo IPCC para a realização de inventários nacionais.

O COD_f é uma função da temperatura de digestão anaeróbia e segue a equação abaixo:

$$COD_f = 0,014 \times T + 0,28 \quad (2.4)$$

onde:

- T - temperatura da digestão anaeróbia (°C)

• **Método de estimativa proposto pela USEPA**

É apresentada a equação cinética de primeira ordem (Equação 2.5), com a qual podem ser calculadas as emissões de metano. Essa tem como prioridade a estimativa direta das emissões de metano a partir de um modelo Landfill Gas Emission Model (Landgem).

$$Q_{CH_4} = L_0 \times R \times (e^{-k \cdot c} - e^{-k \cdot t}) \quad (2.5)$$

onde:

- Q_{CH_4} - Metano gerado no ano t, (Nm³/ano);

- L_0 - Potencial de geração de metano por tonelada de resíduo depositado, (Nm³ - CH₄ / tonelada de resíduo);

- R - Média anual de entrada de lixo no vazadouro, (tonelada/ano);

- k - taxa de geração de metano, (ano⁻¹);

- c - anos desde o fechamento, c=0 para os ativos, (ano);

- t - anos desde o início da atividade, (ano).

Na Tabela 2.2, são apresentados os valores para os coeficientes K e L_0 proposto pela USEPA (1998) na ausência de dados.

Tabela 2.2 - Valores de k e L₀ propostos pela USEPA

PLUVIOMETRIA ANUAL	> 635 MILIMETROS	<635 MILIMETROS
K	0,04	0,02
L₀	100 Nm ³ /tonelada	100 Nm ³ /tonelada

Fonte: USEPA (1998)

Caso não se conheça o valor da média anual de entrada de lixo (R), este pode ser estimado da seguinte forma (USEPA, 1998):

$$R = \frac{\text{Capacidade do vazadouro}}{\text{n}^\circ. \text{anos em funcionamento}} \quad (2.6)$$

$$\text{Capacidade} = \text{Área do vazadouro} \cdot \text{Altura da pilha} \cdot \text{Densidade do lixo} \quad (2.7)$$

Se a densidade do resíduo não for conhecida, ela pode ser estimada, utilizando a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Estimativa da densidade do lixo depositado

TIPO DE COMPACTAÇÃO	DENSIDADE
LIXO COMPACTADO	635 - 831 (MÉDIA 742)
LIXO DEGRADADO COMPACTADO	1.009 - 1.127 (MÉDIA 1.068)
SEM DADOS	688

Fonte: USEPA (1998)

A Equação (2.5) foi feita inicialmente para estimar a geração de metano e não para estimar emissões, pois parte do metano em sua migração para a atmosfera é captado e degradado nas camadas mais superficiais do terreno. Entretanto, dada a dificuldade em avaliar as emissões, adotando um critério conservador, considera-se que todo o metano gerado é emitido à atmosfera através de fissuras ou vias de evacuações praticadas no terreno (USEPA, 1998).

- **Método de estimativa proposto pelo Banco Mundial**

O Banco Mundial apresenta o Modelo Scholl Canyon que é também um modelo cinético de primeira ordem, como proposto pela USEPA (1998), considerando que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo.

$$Q_{(CH_4)_i} = k \cdot L_0 \cdot m_i \cdot e^{-k \cdot t} \quad (2.8)$$

onde:

- $Q_{(CH_4)_i}$ - Metano produzido no ano i a partir da seção i do resíduo, (Nm³/ano);
- k - Taxa da geração de metano, (anos⁻¹);
- L_0 - Potencial da geração de metano, (Nm³ CH₄ / tonelada de resíduo);
- m_i - Massa de resíduo despejada no ano i, (tonelada/ano);
- t - Anos após o fechamento.

Os valores sugeridos para a taxa de geração de metano (k) estão apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Valores para k proposto em correspondência com a precipitação anual

PRECIPITAÇÃO ANUAL	CAMPO DOS VALORES K		
	Relativamente Inerte	Moderadamente Desagradável	Altamente Desagradável
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 e < 500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 e <1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: Banco Mundial (2003)

O potencial de geração de metano (L_0) representa sua produção total por tonelada de lixo. Valores típicos para este parâmetro variam de 125 Nm³ a 300 Nm³ de metano/tonelada de resíduo (Banco Mundial, 2003).

O Manual do Banco Mundial (2003) propõe a utilização de um valor pré-estabelecido de L_0 de 170 Nm³ de metano/tonelada de resíduos, conforme a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Valores L_0 em função da degradabilidade do resíduo

CATEGORIZAÇÃO DO LIXO	VALOR MÍNIMO PARA L_0	VALOR MÁXIMO PARA L_0
Lixo Relativamente Inerte	5	25
Lixo Moderadamente Desagradável	140	200
Lixo Altamente Desagradável	225	300

Fonte: Banco Mundial (2003)

De acordo com o Banco Mundial (2003), a Equação (2.8) não fornece uma representação adequada de aterros de resíduos ativos, já que neste caso a exponencial da equação assume o valor 1 (um), o que fornece para aterros sem grandes flutuações no ingresso anual de resíduos uma geração constante de metano, independente do tempo de atividade do aterro.

2.3.1.2 - Biodigestor

Um biodigestor compõe-se, basicamente, de uma câmara fechada na qual uma biomassa (em geral detritos de animais ou matéria orgânica proveniente de resíduos urbanos) é fermentada anaerobicamente, isto é, sem a presença de ar. Como resultados desta fermentação ocorrem a liberação de biogás e a produção de biofertilizante. É possível, portanto, definir biodigestor como um aparelho destinado a conter a biomassa e seu produto: o biogás, de acordo com Gaspar (2003).

Segundo Benincasa *et. al.*(1991), o biodigestor é um tanque protegido do contato com o ar atmosférico, onde a matéria orgânica contida nos efluentes é metabolizada por bactérias anaeróbias (que se desenvolvem em ambiente sem oxigênio). Neste processo, os subprodutos obtidos são o gás (biogás), uma parte sólida que decanta no fundo do tanque (biofertilizante), e uma parte líquida que corresponde ao efluente mineralizado (tratado).

Como definiu Barrera (1993), o biodigestor (Figura 2.10), como toda grande idéia, é genial por sua simplicidade, pois tal aparelho não produz o biogás, uma vez que sua função é fornecer as condições propícias para que um grupo especial de bactérias, as metanogênicas, degrade o material orgânico, com a conseqüente liberação do gás metano

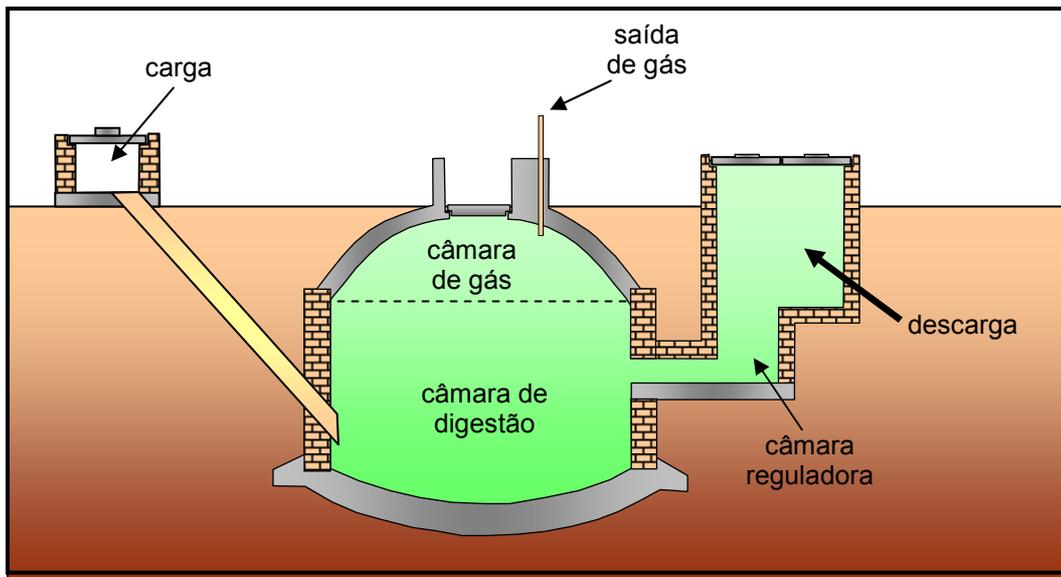


Figura 2.10 - Esquema de um biodigestor
Fonte: Salomon (2006)

Conforme Gaspar (2003) existem vários tipos de biodigestores, tais como o chinês, o indiano e a batelada, mas, em geral, todos possuem basicamente: um tanque onde é coletada e realizada a digestão da biomassa e um gasômetro (campânula), para armazenar o biogás.

A escolha do tipo de biodigestor a ser utilizado vai depender de certos fatores como: condições locais, disponibilidade de substrato, experiência e conhecimento do construtor, investimento envolvido, entre outros. Mas, qualquer digestor construído, se for corretamente instalado e operado, dará uma boa produção de gás, segundo Benincasa *et. al.* (1991).

Em relação ao abastecimento de biomassa, este pode ser contínuo onde a descarga é proporcional à entrada de biomassa, ou intermitente, sistema que utiliza sua capacidade máxima de armazenamento de biomassa, retendo-a até a completa biodigestão sem que ocorra descarga, de acordo com Gaspar (2003).

O modelo de abastecimento intermitente é mais indicado quando da utilização de materiais orgânicos de decomposição lenta e com longo período de produção, como no caso de palha ou forragem misturada a dejetos animais (Gaspar, 2003).

Segundo Barrera (1993), torna-se interessante comparar a capacidade calorífica do biogás advindos dos biodigestores com outras fontes energéticas encontradas na natureza, pois ao ser utilizado certas fontes de energia como o petróleo que apresenta uma baixa viabilidade econômica pelo seu elevado custo, o biogás ao contrário apresenta um custo mínimo, pois este oriundo de um biodigestor corretamente instalado e operado custa bem menos, pelo fato de a matéria-prima responsável pela produção do biogás já

estar presente na natureza e até mesmo no ciclo de vida dos animais, conforme mostrado na Tabela 2.6, a quantidade de material orgânico necessário para produção de 1 Nm³ de biogás.

Tabela 2.6 - Capacidade de Geração de 1 Nm³ de Biogás

MATERIAL	QUANTIDADE
Esterco Fresco de Vaca	25 kg
Esterco de Suíno	12 kg
Esterco Seco de Galinha	5 kg
Resíduos Vegetais	25 kg
Resíduos Urbanos	10 kg

Fonte: Barrera (1993)

O biogás gerado pelo biodigestor pode ser utilizado para aquecimento ou até para geração de energia elétrica quando encaminhado a uma turbina a gás ou a um conjunto moto gerador, e o biofertilizante, um rico adubo natural que substitui o fertilizante químico, pode ser usado diretamente em lavouras, hortas e forragens, aumentando a produtividade, de acordo com Energia Renovável (2008).

Segundo a Inovação Tecnológica (2007), um biodigestor capaz de processar o lixo em sua forma "natural", tal como é coletado pelos caminhões nas residências foi projetado nos Estados Unidos, minimizando problemas típicos dos biodigestores atuais, que requerem em grande parte a moagem do lixo, o que reduz os ganhos de geração de energia ao incluir uma etapa adicional de processamento e manuseio.

O conceito desse biodigestor é simples: entra lixo, sem qualquer tratamento adicional, e sai biogás, que pode ser queimado como combustível em turbinas para a geração de eletricidade (Inovação Tecnológica, 2007).

Para avaliar o potencial de biogás produzido nos biodigestores, este é feito conforme os métodos de dimensionamentos destes que variam de acordo com os tipos de resíduos a eles encaminhados, assim é dada a estimativa da produção de biogás para cada caso específico, isto é a relação entre a quantidade de biogás (m³) e a quantidade de resíduos depositada nos biodigestores (kg de resíduos), conforme Barrera (1993).

2.3.2 - Incineração

Segundo ABNT (1989), incineração de resíduo sólido é o processo de oxidação a alta temperatura que destrói reduzindo o volume e até mesmo recuperando materiais ou substâncias presentes.

Segundo Coutinho et. al.(2003), o processo de incineração é considerada uma forma de disposição final e constitui método de tratamento que se utiliza da decomposição térmica, com o objetivo de tornar um resíduo menos volumoso e menos tóxico, ou seja, consiste na queima de substâncias, ocorrendo numa área fechada debaixo de condições controladas. Durante a queima, a câmara de combustão do incinerador é alimentada com resíduos. À medida que os resíduos são queimados uma fração da sua massa é transformada em gases. Estes gases podem atingir uma temperatura tal que os compostos orgânicos existentes, podem quebrar as suas ligações separando-os nos seus constituintes elementares. Estes elementos combinam-se com o oxigênio formando gases estáveis que, por sua vez, são libertados para a atmosfera após atravessarem sistemas de despoluição. Os gases de exaustão produzidos pelo processo de combustão são primariamente compostos por dióxido de carbono, oxigênio, azoto e vapor de água.

A incineração dos resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético (Figura 2.11), quer seja para a geração de energia elétrica quer seja para geração de vapor ou ar refrigerado, é uma alternativa que vem sendo empregada para solucionar os problemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos, principalmente nos países da Europa, Estados Unidos e Japão, por não possuírem grandes áreas para confinar os resíduos, segundo Gripp (1998).

O Brasil inicia no que diz respeito à recuperação de energia pela incineração. Não há efetivamente hoje projetos representativos neste aspecto, enquanto, a nível mundial, a tendência é a de aproveitar os resíduos urbanos para a geração de energia, segundo Menezes et. al. (2000).

A atual gestão de resíduos estabelece como prioridade a prevenção na produção de resíduos, seguida da reciclagem, valorização e incineração de resíduos e considera a deposição em aterro, uma solução de último recurso, conforme Coutinho et. al. (2003).

Neste contexto, a incineração, ou o tratamento térmico, tem vindo a ser encarada como uma das soluções ambientalmente aceitáveis para tratamento de resíduos, principalmente para tratamento dos resíduos urbanos (Coutinho et. al., 2003).

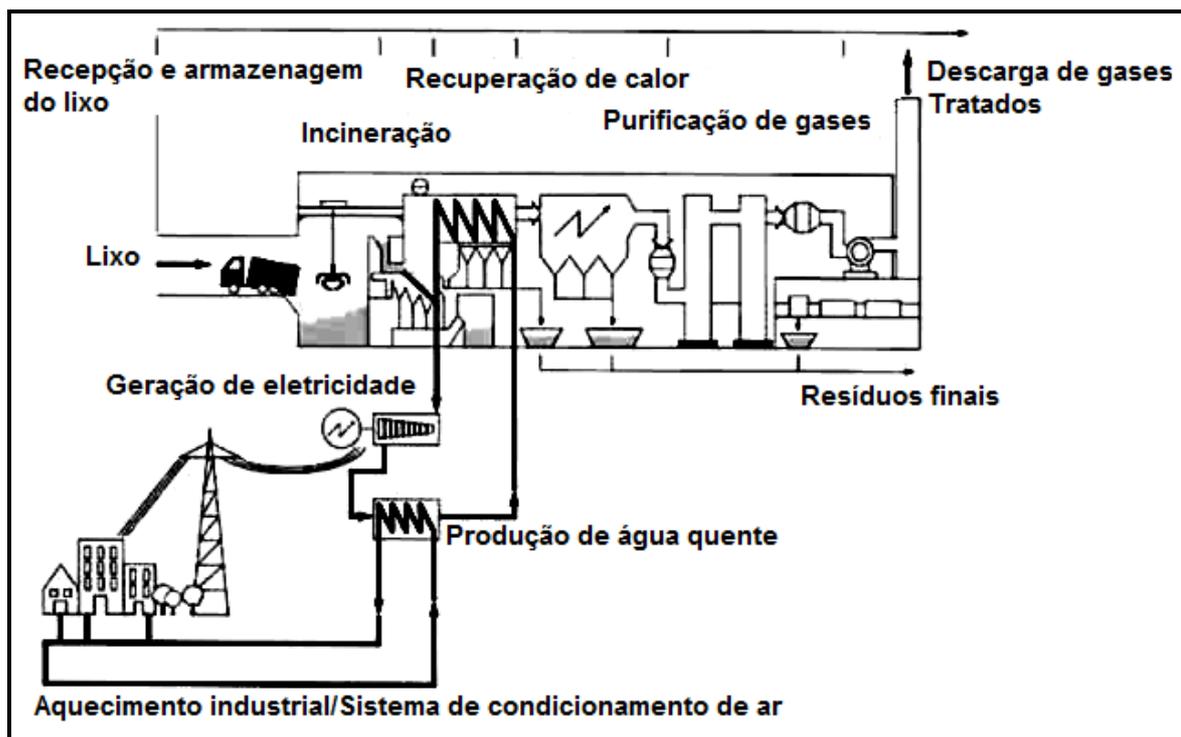


Figura 2.11 - Esquema de um incinerador com geração de energia elétrica

Fonte: Lufttech (2008)

Para Gripp (1998) há dois tipos de incineradores que processam os resíduos urbanos, classificados em função da existência ou não de tratamento prévio do resíduo: a) incinerador de queima direta (Mass Burn - MB), onde os resíduos não passam por nenhuma preparação prévia e são encaminhados diretamente para ao local que alimenta a câmara de combustão; b) incinerador tipo Combustível Derivado do Resíduo (CDR), onde os resíduos a serem incinerados passam por uma preparação prévia.

Os resíduos sólidos são formados por materiais heterogêneos e anisotrópicos devido às diferentes origens, o que lhes confere características específicas. Sendo assim, na incineração de lixo urbano há necessidade de se manter um rigoroso controle do processo de combustão, uma vez que o combustível utilizado pode apresentar variações quanto à composição, umidade, peso específico, poder calorífico entre outros, de acordo com Salgado (1993).

Segundo Coutinho *et. al.* (2003), dependendo da composição dos resíduos, no entanto, os gases provenientes da incineração, podem também conter constituintes indesejáveis, sub-produtos do processo de combustão, como são os gases ácidos: ácido clorídrico (HCl), ácido fluorídrico (HF), entre outros, dioxinas e furanos, partículas potencialmente contaminadas com metais condensados cádmio (Cd) e mercúrio (Hg), compostos orgânicos não voláteis e produtos da combustão incompleta dos resíduos, como por exemplo, o monóxido de carbono (CO).

Os níveis que estes sub-produtos podem atingir são altamente dependentes do tipo de tecnologia específica de cada unidade e dependem igualmente de uma série de outros fatores como a composição dos resíduos, do tipo de sistema de incineração, assim como dos parâmetros de operação entre eles, temperatura e velocidade dos gases de exaustão (Coutinho *et. al.*, 2003).

De acordo com Udaeta (1997), é possível obter energia a partir de resíduos através da incineração, desde que esses sejam combustíveis e não excessivamente úmidos. O calor assim gerado pode ser utilizado para aquecimento direto, em processo de vaporização ou para gerar eletricidade. Alguns resíduos líquidos podem até ser utilizados como complementos a combustíveis convencionais.

As usinas de incineração utilizam fornalhas para queima de resíduos e vaporização da água para ser aproveitado em outros processos. Existem usinas que operam em larga escala, queimando 500 a 1000 toneladas por dia, e usinas de menor escala que operam de 50 a 100 toneladas por dia. As usinas de grande escala apresentam vantagem na utilização dos resíduos e também na geração de energia, pois à medida que as turbinas a vapor utilizadas são maiores, garantem também uma maior eficiência. As usinas de escala reduzida são úteis em comunidades com população em torno de 30 a 200 mil habitantes, produzindo entre 50 a 200 toneladas diárias de resíduos urbanos, de acordo com Tchobanoglous *et. al.* (1994 a).

De acordo com Menezes *et. al.* (2000), em todo o mundo, existem em torno de 600 plantas de geração de eletricidade a partir de resíduos, em 35 países. Essas unidades tratam aproximadamente 170 milhões de toneladas de resíduos urbanos por ano.

Tradicionalmente considerada como uma área sensível ao nível da reação das populações envolvidas, o processo de incineração surge também associado a emissões de poluentes que, pelas suas características de persistência no ambiente, causam maior preocupação no que diz respeito à respectiva durabilidade dos efeitos e escala de dispersão, conforme Coutinho *et. al.*(2003).

Segundo Menezes *et. al.* (2000), esse problema já vem sendo solucionado com tecnologias contidas nos incineradores atuais de tratamento de gases perseguindo a meta de emissão Zero. Dá-se o aparecimento das tecnologias avançadas de tratamento para a produção de resíduos finais inertes, que podem ser reciclados ou dispostos sem nenhum problema para o meio ambiente, tal como o uso do plasma térmico. Vários processos estão se sofisticando atualmente no pré-tratamento do lixo, anterior à incineração, para aumentar a sua homogeneização, baixar a umidade e melhorar o poder

calorífico, de tal forma a transformá-lo em um combustível de qualidade para a máxima geração de energia.

No Brasil, uma usina de incineração vem sendo testada no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro, na Ilha do Fundão, segundo o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE, 2004).

Chama-se Usina Verde e gera energia elétrica para consumo próprio com a incineração de lixo. Esse tipo de usina foi projetado em módulos, cada um deles com capacidade para incinerar 150 toneladas de lixo por dia. Do lixo recolhido retira-se tudo que pode ser reaproveitado — papel, papelão, plásticos limpos, vidros, metais — e o que resta é triturado, misturado e lançado ao forno de incineração, cuja temperatura pode chegar a 1.200 graus centígrados. O forno dá partida com gás liquefeito de petróleo (GLP) e o calor liberado pela queima do lixo produz vapor, que movimenta uma turbina com capacidade de gerar 2,6 MW, dos quais 0,5 MW são aproveitados no consumo próprio da usina (COPPE, 2004).

Esta solução é particularmente eficaz na destruição de resíduos orgânicos perigosos e na redução do seu volume e peso (cerca de 90% e 75%, respectivamente). Igualmente relevante é a possibilidade de, através do calor gerado na combustão de resíduos, se poder produzir energia elétrica ou ser utilizado como combustível em processos industriais, conforme (COPPE, 2004).

Resumidamente pode-se dizer que os benefícios de uma usina de incineração são: esterilização dos resíduos; diminuição do volume dos resíduos a ser aterrado e ampliação da vida útil existente; economia de combustível com transporte a aterros distantes; reaproveitamento energético dos resíduos e aumento da confiabilidade do fornecimento elétrico da região, de acordo com Udaeta (1997).

Como desvantagens, segundo a empresa Tupy Fundições Ltda. (2003), a incineração apresenta: custo operacional e de manutenção elevados; manutenção difícil, exigindo trabalho constante de limpeza no sistema de alimentação de combustível auxiliar, exceto se for utilizado gás natural; elevado risco de contaminação do ar devido à geração de dioxinas pela queima de materiais clorados; risco de contaminação do ar pela emissão de materiais particulados, e elevado custo de tratamento dos efluentes gasosos e líquidos (águas de arrefecimento das escórias e de lavagem de fumos).

De acordo com Coutinho *et. al.* (2003), a incineração controlada (para evitar emissões de dioxinas e furanos) foi muito desenvolvida nos últimos anos e é comercial. Alguns processos são disponíveis, todos envolvendo uma segunda câmara de combustão (alta

temperatura: 1000-1250 °C, com excesso de oxigênio). O Japão incinera 100% do material orgânico do lixo urbano; a Suíça 80%, e muitos outros países, inclusive os EUA, estão avançando rapidamente no uso.

2.3.3 - Gaseificação

Segundo Martins (2006), a gaseificação é um processo endotérmico de conversão de um combustível sólido em gás de baixa ou média capacidade calorífica. Os resíduos urbanos são um exemplo de combustível que poderá ser utilizado no processo, sendo atualmente a gaseificação da madeira mais difundida dentre as demais biomassas.

Os gaseificadores, reatores químicos onde ocorrem os processos de gaseificação, são classificados em função da direção do movimento relativo da biomassa e do agente gaseificador (Martins, 2006), conforme Figura 2.12.

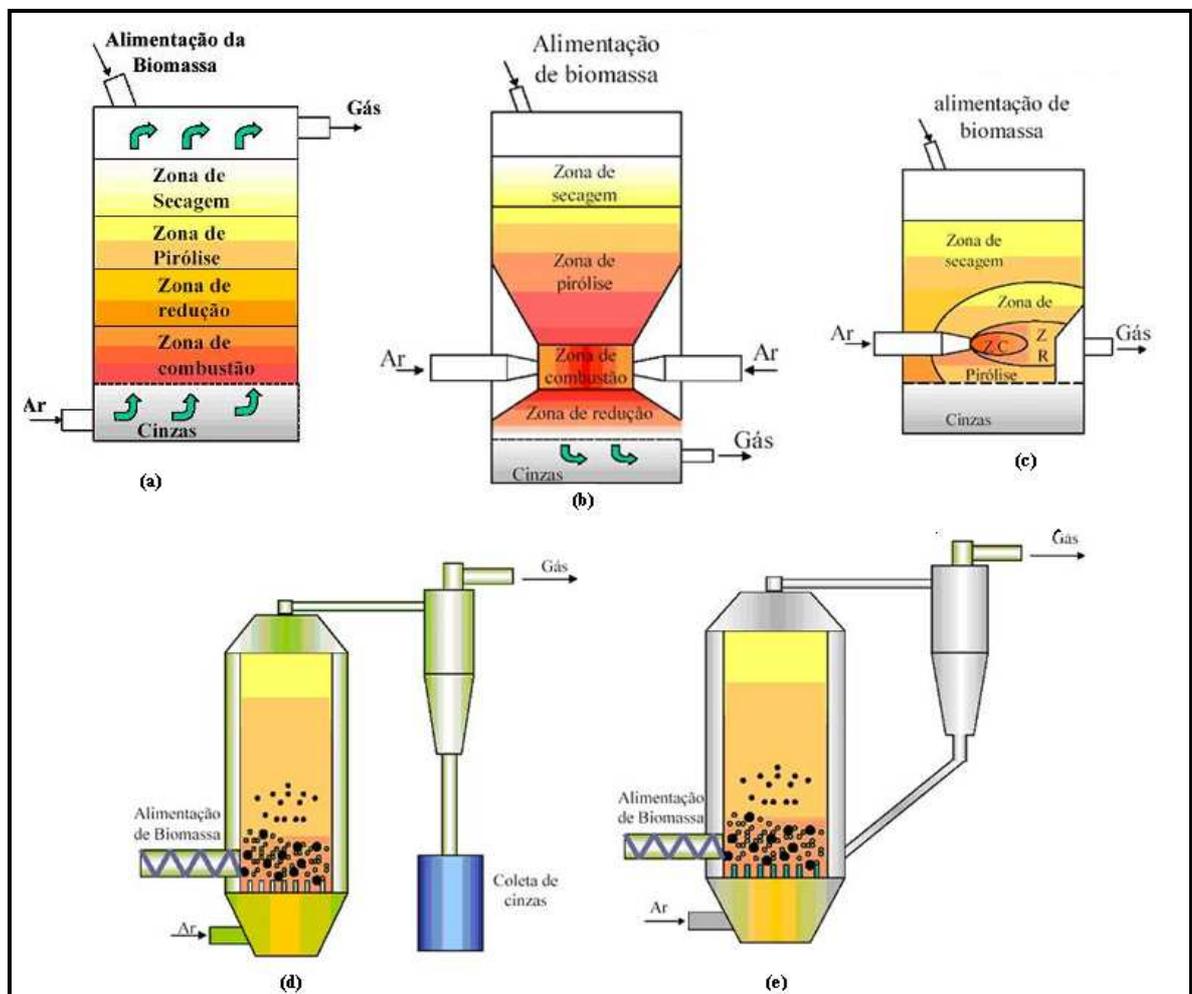


Figura 2.12 - Direção do movimento relativo da biomassa e do agente gaseificador: (a) contracorrente; (b) concorrente; (c) fluxo cruzado; (d) leito fluidizado; (e) leito circulante.

Fonte: Martins (2006)

No gaseificador, parte do combustível entra em combustão como em uma fornalha e o fornecimento de ar é controlado de modo a evitar que a combustão se estenda a toda a carga (característica principal do processo). Utiliza-se como oxidante para o processo de gaseificação o ar atmosférico ou oxigênio puro. Os sistemas que utilizam oxigênio puro permitem produzir um gás de maior capacidade calorífica, sendo também mais rápida a sua produção; no entanto, os custos de produção aumentam devido à necessidade de oxigênio puro (Martins, 2006).

O processo de gaseificação ocorre normalmente em quatro etapas físico-químicas distintas, com temperaturas de reação diferentes:

- Secagem da biomassa: essa fase apresenta um controle de temperatura para garantir a secagem da biomassa e não a sua decomposição (Martins, 2006).

- Pirólise: fase onde ocorre a decomposição química por calor na ausência de oxigênio. Os resíduos que alimentam o reator pirolítico podem ser provenientes do lixo doméstico, do processamento de plásticos e industriais. O processo consiste da trituração destes resíduos que deverão ser previamente selecionados. Após esta etapa, os resíduos serão destinados ao reator pirolítico, onde através de uma reação endotérmica ocorrerão as separações dos subprodutos em cada etapa do processo que fornecem a energia necessária para os processos seguintes. As reações de pirólise começam a ocorrer a temperaturas em torno de 400 °C, de acordo com Farret (1999).

- Combustão: combinação de uma fonte combustível com o oxigênio, sendo esse processo em geral exotérmico e auto - sustentável. A reação de combustão ocorre em torno de 900 e 1300°C (Farret, 1999).

- Redução: Os gases quentes da zona de combustão passam em seguida para a zona de redução, sempre adjacente, acima ou abaixo, onde na ausência de oxigênio ocorre o conjunto de reações típicas que originam os componentes combustíveis do gás produzido, conforme Silva *et.al.* (2001).

Esses processos são ordenados de acordo com as características do projeto e ocorrem em regiões separadas dentro do gaseificador. De acordo com Martins (2006).

O gás obtido pode ser utilizado como combustível em um grupo motor-gerador (baixas potências até cerca de 600 - 1000 kW), em turbinas a gás (acima de 1 MW) ou ainda queimado conjuntamente a outros combustíveis em caldeiras (Martins, 2006).

Conforme Peres (2001), as substâncias que devem ser controladas para que se possa utilizar o gás em um motor alternativo ou turbina são o alcatrão, cinzas volantes e os óxidos de nitrogênio. Se utilizado um grupo motor-gerador para converter o gás em

eletricidade, pode-se utilizar o gás frio. Assim ele passa por resfriamento e limpeza. As tecnologias aplicadas para a limpeza dos gases dependem do uso aos quais estes se destinam e do ponto no processo a ser aplicada a tecnologia (antes, durante ou depois da gaseificação).

Dentre as vantagens do processo de gaseificação, conforme Silva *et. al.* (2001), se encontram:

- Alta eficiência térmica, variando de 60% a 90%, dependendo do sistema implementado;
- Energia limpa produzida com a queima dos gases;
- A demanda de energia pode ser controlada e, conseqüentemente, a taxa de gaseificação pode ser facilmente monitorada e, também, controlada.

Dentre as desvantagens encontram-se (Silva *et.al.*, 2001):

- Os resíduos devem ser limpos, sem a presença de terras ou outros elementos que possam comprometer o processo de gaseificação;
- Se não completamente queimado, o alcatrão, formado durante o processo de gaseificação, pode limitar suas aplicações.

2.3.4 - Outras Tecnologias Utilizadas

2.3.4.1 - Tecnologia Biomassa - Energia - Materiais (BEM)

Este processo, totalmente desenvolvido no Brasil, visa utilizar o aproveitamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, sendo 70% deles transformados em cellulignina catalítica – combustível para geração elétrica com poder calorífico de 4.500 kcal/kg – e os demais 30% convertidos em uma solução de açúcares, sendo a terça parte convertida em furfural – insumo da indústria petroquímica, atualmente importado pelo Brasil ao preço de US\$ 1,500.00 por tonelada – e o restante em um fertilizante com alta concentração de potássio e livre de contaminantes, em função do processo dispor de uma fase com temperatura elevada e presença de ácidos, cuja combinação tornou viável aprovação em todos os testes realizados pela agência ambiental do estado de São Paulo (CETESB), para Licenciamento Operacional.

A estratégia desenvolvida pelos detentores das patentes desta tecnologia pode ser classificada como bastante conservadora, na medida em que delineia seu incremento gradual, mas também demonstra sua responsabilidade junto ao consumidor, uma vez que a principal fonte de consumo da cellulignina – principal produto do sistema – é a geração elétrica, setor sobre o qual este grupo não detém conhecimento, levando-os a

considerar a segurança de parcerias com especialistas nesta atividade, com vistas a não gerarem estoques de cellulignina sem escoamento definido – o que acabaria por constituir uma mudança da destinação de resíduos sólidos de vazadouros ou aterros para silos.

O potencial de geração elétrica da tecnologia BEM usando como insumo os resíduos sólidos urbanos é de 30 TWh, que considerando a perda evitada, na média 10%, pode chegar a 33 TWh.

2.4 - Combustíveis Provenientes das Tecnologias Existentes

2.4.1 - Biogás

É um gás inodoro que queima sem deixar fuligem, mas, devido à presença de gás sulfídrico (H_2S), apresenta um odor típico (ovo podre), que pode ser usado para detectar vazamentos. É armazenado sob baixa pressão ($0,009 \text{ kg/cm}^2$) e não pode ser levado a longas distâncias, usualmente 50 a 150 m, sem utilizar compressor segundo Ferraz *et. al.* (1980). A quantidade de metano existente no biogás regula seu poder calorífico que, normalmente, se situa na faixa de 5.000 a 7.000 kcal/ Nm^3 , isto em função da sua pureza (Ferraz, 1980).

Traduzindo em termos práticos, a Tabela 2.7 apresenta a equivalência de 1 metro cúbico de biogás com os combustíveis usuais.

Tabela 2.7 - Equivalência do biogás com outros combustíveis usuais

1 m³ de biogás corresponde	0,61 litros de gasolina
	0,57 litros de querosene
	0,55 litros de óleo diesel
	0,45 kg de gás liquefeito
	0,79 litros de álcool combustível
	1,538 kg de lenha

Fonte: Ferraz (1980)

Conforme Marriel (1996), quanto mais puro, maior é o seu poder calorífico, que pode atingir em torno de 12.000 kcal/m^3 , com a retirada de CO_2 .

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono prejudica o processo tornando-o menos eficiente, estas substâncias entram no lugar do combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. Pode ocorrer combustão incompleta, falha de alimentação, perda de potência e corrosão

precoce provocada pela presença do gás sulfídrico (H_2S), diminuindo tanto o rendimento quanto a vida útil dos equipamentos (Marriel, 2000).

De acordo com Costa (2006), existem diversas alternativas de purificação aplicáveis ao biogás, devendo ser definida a mais adequada para a aplicação energética que se pretende. Por exemplo, para a aplicação no ramo automotivo, é necessária uma etapa de purificação, onde o biogás passa por um filtro de óxido de ferro, responsável pela retirada dos traços de enxofre. Livre do H_2S o biogás é enviado ao compressor de baixa pressão, que tem por finalidade forçar a passagem do biogás através de uma torre de absorção de CO_2 . Nesta torre, água pressurizada é pulverizada em pequenas gotículas para facilitar a absorção do CO_2 . Esse processo resultará na dissolução do CO_2 , formando H_2CO_3 , que é enviado para a caixa de eliminação, que tem por finalidade separar o gás carbônico da água, onde o CO_2 é liberado para a atmosfera.

Após esse processo a água é recalçada para a torre de absorção e o metano purificado é submetido ao processo de armazenamento.

Devido ao modo como é gerado, o biogás contém alto teor de umidade. Qualquer resfriamento do gás durante o processo freqüentemente causa condensação da fase líquida quando o gás entra no equipamento de conversão, sendo crítica a situação ao se tratar de turbina a gás. A remoção do condensado, seguida do aquecimento do gás, produz um gás seco cuja a temperatura é superior ao seu ponto de orvalho. O mesmo efeito pode ser criado pelo uso de um dissecante. Comprimindo o gás seco e resfriando-o em seguida, produz mais condensado. Mais uma vez, o gás deve ser resfriado, separado e reaquecido, ou passado por um dissecante (Costa, 2006).

Além disso, fabricantes de microturbinas nos EUA perceberam recentemente a presença de uma impureza no biogás até então desconhecida. Trata-se da siloxina, um composto de sílica proveniente de produtos de higiene pessoal e cosméticos. Sua presença acarreta, ao longo do tempo, problemas nos rotores de turbinas e motores pela formação de grãos de sílica (areia) no interior dos equipamentos, devido a elevada temperatura, segundo Capstone (2001).

2.4.2 - Gases Resultantes da Gaseificação

O poder calorífico dos gases combustíveis derivados dos resíduos urbanos é baixos, entre 5 e 6 MJ/Nm^3 , quando comparados ao de outros combustíveis, como destilados e o gás natural, entre 35 e 40 MJ/Nm^3 , segundo Neto (2000).

Os sistemas que utilizam oxigênio puro permitem produzir um gás de maior capacidade calorífica, sendo também mais rápida a sua produção; no entanto, os custos de produção aumentam devido à necessidade de oxigênio puro (Neto, 2000).

Conforme Silva (2002), o gás obtido pode ser utilizado como combustível em um grupo motor-gerador (baixas potências até cerca de 600 - 1000 kW), em turbinas a gás (acima de 1 MW) ou ainda queimado conjuntamente a outros combustíveis em caldeiras. Modernamente, está sendo desenvolvida a tecnologia de gaseificação para utilização de células a combustível.

O gás resultante da gaseificação possui um baixo teor de enxofre, ao contrário do gás gerado a partir do carvão. No que diz respeito à emissão de gás carbônico, considera-se o ciclo de consumo-produção desse gás nulo, tendo em vista que toda biomassa consumida pelo processo de gaseificação uma vez esteve na natureza, também contribuindo para a sua absorção, não aumentando a taxa presente na atmosfera (Silva, 2002).

Os principais componentes da mistura de gás formado são: o CO, CO₂, H₂ e, dependendo das condições, CH₄, hidrocarbonetos leves, N₂ e vapor de água em diferentes proporções, conforme Farret (1999).

De acordo com Peres (2001), as substâncias que devem ser controladas para que se possa utilizar o gás em um motor alternativo ou turbina são o alcatrão, cinzas volantes e os óxidos de nitrogênio. Se utilizado um grupo motor-gerador para converter o gás em eletricidade, pode-se utilizar o gás frio. Assim ele passa por resfriamento e limpeza. As tecnologias aplicadas para a limpeza dos gases dependem do uso aos quais estes se destinam e do ponto no processo a ser aplicada a tecnologia (antes, durante ou depois da gaseificação).

2.4.3 - Outros Combustíveis Advindos das Tecnologias

Outros combustíveis recuperados através das tecnologias de tratamento dos resíduos urbanos são os gases resultantes da incineração e o bio-óleo advindo do processo de gaseificação.

À medida que os resíduos são queimados, como no processo de incineração, uma fração da sua massa é transformada em gases. Estes gases podem atingir uma temperatura de aproximadamente 1000^o C, tal que os compostos orgânicos existentes, podem quebrar as suas ligações separando-os nos seus constituintes elementares. Estes elementos combinam-se com o oxigênio formando gases estáveis que, por sua vez, são aspirados através de uma Caldeira de Recuperação, onde é produzido vapor com índices aproximados de 45 Bar de pressão e 420° C, segundo Coutinho *et. al.* (2003).

De acordo com Menezes *et. al.* (2000), o vapor gerado pela caldeira poderá acionar um Turbo-gerador com potência efetiva de aproximadamente 3,2 MW, gerando em média 0,6 MW de energia elétrica por tonelada de lixo tratado.

Os gases de exaustão produzidos pelo processo de combustão são primariamente compostos por dióxido de carbono, oxigênio, azoto e vapor de água.

Dependendo da composição dos resíduos, no entanto, estes gases podem também conter constituintes indesejáveis, sub-produtos do processo de combustão, como são os gases ácidos (HCl, HF, SO₂, e NO_x), dioxinas e furanos, partículas potencialmente contaminadas com metais condensados (Cd, Hg), compostos orgânicos não voláteis e produtos da combustão incompleta dos resíduos, como por exemplo, o CO, para Coutinho *et. al.* (2003).

Os níveis que estes sub-produtos podem atingir são altamente dependentes do tipo de tecnologia específica de cada unidade e dependem igualmente de uma série de outros fatores como a composição dos resíduos, do tipo de sistema de incineração, assim como dos parâmetros de operação (por ex., temperatura e velocidade dos gases de exaustão), (Coutinho *et. al.*, 2003).

Existem diversas maneiras de purificação dos gases e subprodutos advindos da incineração, entre eles as técnicas adotadas pela Usina Verde S/A, onde os gases exauridos da Caldeira de Recuperação são neutralizados por processo de lavagem em circuito fechado (lavadores e tanque de decantação), não havendo a liberação de quaisquer efluentes líquidos. Esse processo ocorre em dois estágios: no 1º estágio, ocorre a lavagem e redução da temperatura com o uso de spray jets; no 2º estágio os gases resfriados são forçados a passar por “barreiras” de solução de lavagem criadas por hélices turbinadas existentes no interior dos lavadores, ocorrendo o chamado “polimento dos gases”.

A solução de lavagem proveniente dos lavadores é recolhida em tanques de decantação onde ocorre a neutralização com as cinzas do próprio processo, hidróxido de sódio e a mineralização (decantação dos sais), retornando posteriormente ao processo de lavagem. Restará no decantador um precipitado salino (concentração de cálcio e potássio) e material inerte, que pode ser utilizado em substituição à areia, na fabricação de tijolos e pisos (Usina Verde, 2008).

Os gases limpos, após passagem por eliminador de gotículas (demister), são liberados para a atmosfera pela chaminé.

Contrariamente à maioria dos sistemas de limpeza dos gases e vapores da incineração de lixo urbano adotados no Mundo, que utilizam, principalmente, ‘filtros de manga’ de elevado custo de aquisição e manutenção, a rota tecnológica patenteada pela Usina Verde para a neutralização dos gases e vapores tem como base uma solução de

água alcalinizada com as cinzas do próprio processo e hidróxido de cálcio (Usina Verde, 2008).

Já o Bio-óleo, assim batizado pelos cientistas da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), foi produzido por pesquisadores do Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) e da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), é um líquido negro obtido por meio do processo de gaseificação, no qual os resíduos são submetidos a altas temperaturas em um ambiente isolado com pouco ou nenhum oxigênio. É utilizado principalmente como combustível para aquecimento e a geração de energia elétrica, segundo a revista Ciência Hoje (2008).

O Bio-óleo pode substituir o diesel, mas sua aplicação ideal não é em veículos, e sim como alternativa na geração de energia. Devido à diferença de poder calorífico, é preciso uma quantidade de bio-óleo duas vezes maior do que de diesel para fazer funcionar um motor de caminhão. No entanto, em uma unidade estacionária de geração de energia, onde pode haver grandes tanques de armazenamento, isso não é um inconveniente (Ciência Hoje, 2008).

Assim como o petróleo, o bio-óleo tem uma constituição química complexa e alguns de seus compostos podem ser isolados, modificados e usados para diversas aplicações. Embora difíceis de serem isolados, os compostos derivados do bio-óleo (como a vanilina, essência retirada da baunilha, atualmente produzida a partir do bio-óleo na França) atingem alto valor de mercado e têm importantes funções (Ciência Hoje, 2008).

3 - METODOLOGIA

As grandes concentrações de resíduos urbanos gerados, principalmente dos recicláveis, e a grande necessidade de energia para o processo de reciclagem, acabam por enfatizar a importância de uma ferramenta para planejar não só a destinação dos resíduos como também tornar a geração de energia fundamental para a reciclagem dos resíduos, tanto pelo fato de ser uma fonte renovável como de estar reciclando a mesma que estava sendo desprezada junto a esses materiais.

Essa ferramenta de planejamento auxilia na organização das tecnologias de forma que a quantidade gerada seja compatível com a necessidade de consumo em um processo de reciclagem, além de contribuir para projetos de destinação e uso dos resíduos urbanos.

O uso da ferramenta metodológica para auxiliar na gestão dos resíduos de forma a gerar energia e utilizá-la na reciclagem, além de ser economicamente viável, pelo fato de a energia advinda dessas tecnologias de geração poder ser utilizada diretamente, o que acaba por reduzir seu valor em venda pela metade quando comercializada a concessionária local, ainda é vista como um ganho ambiental, principalmente pela matéria orgânica, presente em maior porcentagem na composição dos resíduos urbanos, que ao se decompor sem nenhum tratamento acaba por emitir grandes quantidades de gases de aquecimento atmosférico e pelos resíduos estar sendo tratados e dispostos de forma adequada.

3.1 - A Ferramenta Metodológica

A ferramenta metodológica desenvolvida para auxiliar no planejamento de destinação dos resíduos urbanos e no aproveitamento desses materiais, principalmente resíduos orgânicos, para a geração de energia e o reaproveitamento energético para processamento dos resíduos urbanos recicláveis é estruturada por procedimentos detalhado a seguir (Figura 3.1):

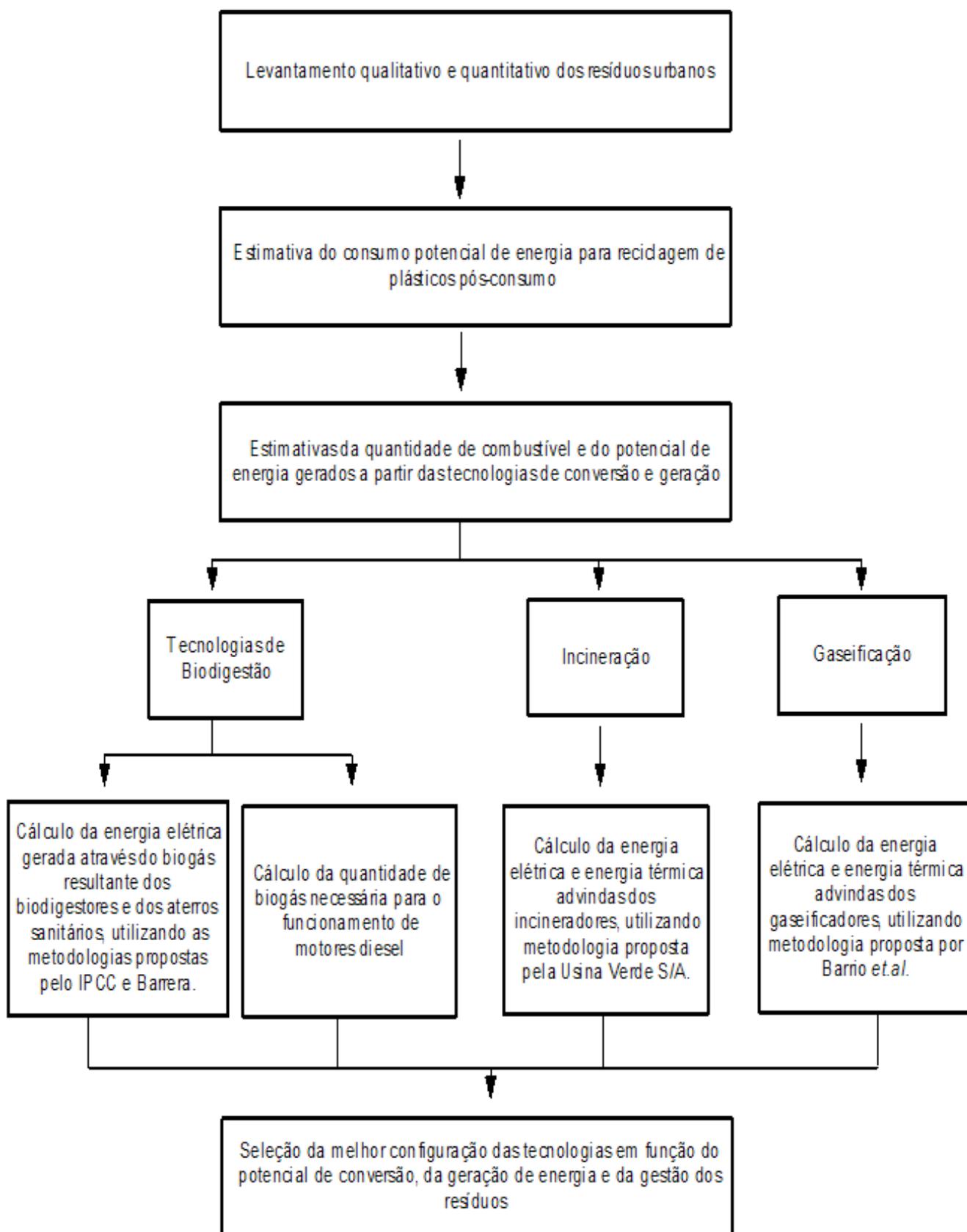


Figura 3.1 - Fluxograma Metodológico

3.2 - Detalhamento dos Procedimentos Utilizados na Ferramenta Metodológica

Para que o desenvolvimento de uma ferramenta metodológica seja coerente é essencial que sua estrutura seja bem caracterizada de modo a resultar em dados eficientes e precisos. Deste modo a ferramenta aqui desenvolvida foi estruturada segundo os processos descritos a seguir.

3.2.1 - *Levantamento Qualitativo e Quantitativo dos Resíduos Urbanos*

O ponto de partida para desenvolver um projeto de aproveitamento energético é o conhecimento da matéria-prima disponível.

Quando se trata de resíduos urbanos é necessário que se conheçam duas características essenciais, que podem ser determinadas através de um estudo de campo, ou recorrendo a uma revisão bibliográfica: a composição, pois sem esta, é praticamente impossível se efetuar a gestão adequada dos serviços de limpeza urbana e um reaproveitamento dos resíduos, bem como a quantidade de cada material, o qual através destes dados possamos analisar a viabilidade de aplicação do projeto em um município isolado ou a necessidade de se fazer consórcios entre cidades.

Antes de iniciar a caracterização, faz-se necessária a realização de um estudo detalhado sobre o sistema de limpeza pública do município em questão. Tal estudo busca conhecer o número de setores de coleta, frequência da coleta, características dos veículos coletores, distância dos locais de tratamento e de disposição final e quantidade de resíduos gerada.

A partir desses dados, é possível definir o número total de amostras para caracterizar fisicamente os resíduos sólidos, mas caso não seja possível a amostragem em todos os setores de coleta existentes, o que se faz é agrupá-los, utilizando-se fatores tais como características das edificações, densidade populacional, poder aquisitivo, costumes da população e tipo de acondicionamento dos resíduos.

Definido o número de amostras e os pontos de amostragem, inicia-se a amostragem propriamente dita, seguindo metodologias nacionais e internacionais existentes.

Cada metodologia é criada com um objetivo central, buscando conhecer previamente a origem dos resíduos a serem analisados e que objetivos se pretende alcançar com a caracterização, valorizando mais alguns aspectos em detrimento de outros.

A caracterização é realizada com base nas informações do sistema de gestão, variando em função dos objetivos, infra-estruturas existentes e características do sistema, sendo, portanto, um trabalho realizado em função de situações particulares do local de estudo, tornando difícil a comparação de resultados entre diferentes sistemas de gestão.

Dentre as metodologias nacionais encontram-se a de Martins *et. al.* (2000) e a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1990), conforme descritas abaixo:

- **Método de MARTINS *et.al.* (2000)**

Essa metodologia propõe que a pesquisa seja realizada em três fases, correspondendo, no Brasil, as estações chuvosa (novembro/março); fria (abril/julho); e quente/seca (agosto/outubro). Em cada fase, deverão ser realizados os seguintes procedimentos:

1) Coletar e analisar, no mínimo, 4 amostras de, aproximadamente, 7m³ cada, recolhidas, respectivamente, no centro comercial e em bairros predominantemente residenciais de população operária, de classe média (comerciários, funcionários, prestadores de serviço autônomo, etc.) e média-alta (comerciantes, profissionais autônomos de nível superior, industriais, etc.), bairros esses a serem previamente identificados e selecionados de comum acordo com a equipe da Prefeitura.

2) Antes de iniciar a coleta das amostras, a tara do caminhão deverá ser aferida e devidamente registrada em formulário próprio, através de sua pesagem na mesma balança a ser utilizada durante a realização dos trabalhos, sem nenhuma carga e, inclusive, sem o motorista e os ajudantes.

3) Ao completar-se a coleta da amostra, o caminhão deverá ser coberto com lona, de modo a impedir o derramamento de resíduos nas vias públicas e dirigir-se para pesagem.

4) Após a pesagem, o caminhão deverá dirigir-se imediatamente para o local definido para a realização da triagem, para descarga dos resíduos coletados.

5) Após a descarga (a ser feita com o possível cuidado, no sentido de se evitar o rompimento dos sacos de lixo), revolver os resíduos, ainda acondicionados, quarteá-los, mesclá-los entre si, dois a dois (Figura 3.2), e, novamente, revolvê-los conjuntamente, procedendo-se, após isso, a novo quarteamento:

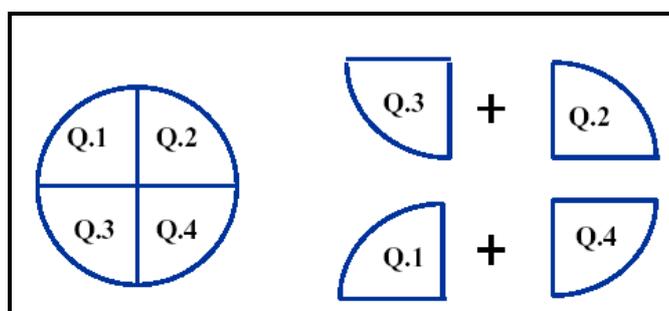


Figura 3.2 - Quarteamento de resíduos urbanos

Fonte: Martins *et. al.* (2000)

6) Depois desse procedimento, desensacar e revolver os resíduos componentes de cada quartil, com auxílio de pás, enxada e gadanhos. Feito isto, novamente os quartis devem ser mesclados entre si, dois a dois (conforme sistemática descrita no item 6) e conjuntamente, após o que se deverá proceder ao quarteamento final.

7) Selecionar, dois quartis opostos (1 e 4; ou 2 e 3) para a etapa de triagem (qualitativa) e classificação (quanti-qualitativa). Descartar os dois quartis não selecionados.

8) Feita a triagem e a classificação dos materiais dos dois quartis selecionados, pesar os materiais com uso de balança, após sua deposição nos tambores.

9) Todas as atividades supracitadas devem ser acompanhadas por um coordenador da equipe de campo, profissional esse que deverá se incumbir do lançamento dos dados da caracterização dos resíduos no formulário próprio.

- **Método de CETESB (1990)**

Para analisar a composição física dos resíduos sólidos, a CETESB (1990) recomenda o procedimento de amostragem apresentado na Figura 3.3 e descrito em seguida.

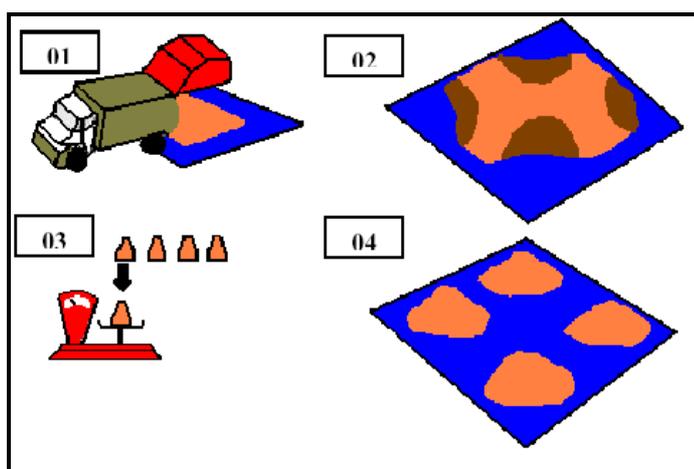


Figura 3.3 - Amostragem para análise da composição física dos resíduos urbanos

Fonte: CETESB (1990)

1) Descarregar o caminhão ou caminhões no local previamente escolhido (pátio pavimentado ou coberto por lona);

2) Coletar quatro amostras de 100 litros cada (utilizar tambores), três na base e laterais e uma no topo da pilha resultante da descarga. Antes da coleta, procede-se ao rompimento dos receptáculos (sacos plásticos, em geral) e homogeneizar, o máximo possível, os resíduos nas partes a serem amostradas. Ainda, considerar os materiais rolados (latas, vidros, etc.). Caso a quantidade inicial de lixo seja pequena (menos que 1,5 t), recomenda-se que todo material seja utilizado como amostra;

3) Pesar os resíduos coletados;

4) Dispor os resíduos coletados sobre uma lona. Este material constitui a amostra, a ser utilizada para a análise da composição física dos resíduos. Tal procedimento utiliza o método do quarteamento, que segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004) consiste em um “processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes. As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado”. Ainda, de acordo com essa norma, como existe risco à saúde do trabalhador, é necessário o uso de equipamentos de proteção individual (EPI).

Esses passos devem ser realizados para cada setor, ou seja, para cada conjunto de bairros do município agrupados de acordo com o nível sócioeconômico.

A composição física dos resíduos é obtida após a análise da amostra, por meio da triagem, separando os materiais por classes relevantes como vidro, plástico, papel/papelão, matéria orgânica, metais ferrosos, metais não ferrosos.

Separado os materiais, eles são pesados por classe e calculam-se, posteriormente, as porcentagens individuais, conforme Equação 3.1.

$$\text{Material (\%)} = \frac{\text{Massa da Fração Material (kg)} \times 100}{\text{Massa Total da Amostra (kg)}} \quad (3.1)$$

Em relação as metodologias internacionais podemos citar duas mais conhecidas e utilizadas: o Método Padrão Americano (American Standard Methods - ASMT) e o Método de MAYSTRE *et. al.* (1994).

- **Método Padrão Americano (American Standard Methods - ASMT)**

De acordo com Cruz (2005), esse método tem por objetivo estudar os resíduos não processados, ou seja, os resíduos urbanos indiferenciados, coletados nas residências, comércio, instituições, escritórios. Para analisar a composição física dos resíduos urbanos, o potencial de redução na geração e de reciclagem, as variações sazonais e geográficas, os resíduos domésticos *versus* os resíduos comerciais, essa metodologia adota o seguinte procedimento:

1) Coleta de dados e informações sócio-econômicas do município, em questão, e do seu sistema de limpeza urbana;

2) Período de amostragem – de uma a duas semanas consecutivas, de cinco a sete dias por semana, repetindo a amostragem por vários meses devido às variações sazonais.

3) Definir oito categorias e doze componentes;

4) Amostragem:

- Definição estatística do número de amostras, por fórmula de cálculo da ASTM;
- Seleção aleatória dos veículos de coleta.

5) Após a coleta, a amostra é quarteada até obter 90-140 kg;

6) Separam-se manualmente os componentes individuais da amostra;

7) Análise laboratorial dos resíduos;

8) Análise dos resultados obtidos.

- **Método de MAYSTRE *et. al.* (1994)**

O enfoque dessa metodologia são os resíduos domésticos. Para analisar a composição física desses resíduos, recomenda-se o seguinte procedimento:

1) Coletar as informações sócio-econômicas da população e do sistema de limpeza urbana do município em estudo;

2) Definir o período de amostragem – Pré-campanha (escolha da quantidade mínima representativa de amostras a caracterizar): 1 semana; Campanha de identificação: 4 semanas por trimestre e Campanha complementar: 2 semanas;

3) Proceder ao ensaio-piloto, para aferir quais as classes de categorias a considerar na classificação e para estudar os estratos urbanos em função da quantidade de resíduos produzidos;

4) Definir as medidas de higiene e segurança;

5) Organizar os procedimentos e as instalações para a triagem;

6) Amostragem:

- Cálculo da quantidade mínima representativa de amostras;
- Método de seleção aleatório: estratos homogêneos – aproximação aleatória simples; estratos heterogêneos – aproximação aleatória estratificada, primeiro divide-se a população em grupos e depois escolhe-se, em cada estrato, uma amostra aleatória simples;

- Coleta das amostras: Pré-campanha – 2 toneladas, Campanha de Identificação – 11 toneladas por trimestre e Campanha complementar – 5 toneladas.
 - Número de amostras: coleta bi-semanal: 800-1000 kg em duas amostras de 400-500 kg em ambos os dias da semana; coleta tri-semanal: 900-1200 kg em três amostras de 300-400 kg nos três dias da semana; coleta semanal: 600-700 kg.
- 7) Após a coleta da amostra, descarregar o caminhão no local previamente definido;
 - 8) Coletar uma amostra de 100 kg;
 - 9) Pesquisar cada saco de resíduos domésticos para aferir a quantidade de resíduos contidos em função do volume do saco;
 - 10) Abrir os sacos de resíduos na mesa de triagem para a classificação por categorias;
 - 11) Pesquisar os recipientes de cada categoria;
 - 12) Repetir essa operação para cada amostra;
 - 13) Analisar os resultados da composição física dos resíduos sólidos domésticos.

Quando os dados já existem ou uma pesquisa a campo não é realizada, recorrem-se a pesquisa literária e a revisão bibliográfica, baseada em artigos técnicos, relatórios, dissertações de mestrado, teses de doutorado, a fim de caracterizarmos a matéria prima a ser utilizada no estudo desenvolvido, como realizado no presente trabalho.

Em posse dessa quantificação e qualificação dos resíduos urbanos, é possível a separação dos dados referentes aos resíduos recicláveis entre eles os plásticos para serem utilizados no decorrer do estudo.

3.2.2 - Estimativa do Consumo Potencial de Energia para Reciclagem de Plásticos Pós-Consumo

Para estimar o consumo de energia a ser gasta no processo de reciclagem de plásticos é necessário que sejam levantados dados referentes ao consumo específico de energia elétrica (GJ/tonelada), geralmente através de contatos com empresas fabricantes dos equipamentos, em todas as etapas dos processos de reciclagem e a quantidade de material disponível para processamento.

Segundo dados da empresa KIE máquinas e plásticos Ltda. (2008), foram possíveis no presente estudo, determinar o consumo de energia (GJ/tonelada) em cada equipamento da linha de reciclagem de plásticos de acordo com o processo de reciclagem ideal para cada tipo desse material (Figura 3.4), bem como criar um diagrama, contendo dados de potência (cv – cavalo vapor) para os diferentes tipos de plásticos.

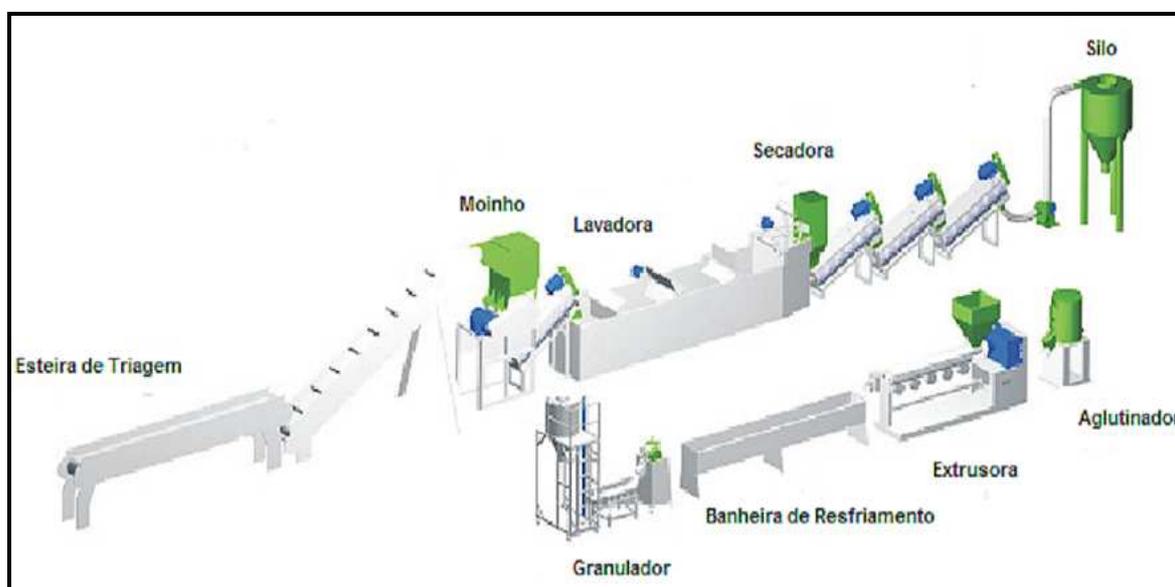


Figura 3.4 - Linha de reciclagem de plásticos

Fonte: KIE (2008)

3.2.3 - Estimativas da Quantidade de Combustível e do Potencial de Energia Gerados a partir das Tecnologias de Conversão e Geração

Atualmente há diversas tecnologias utilizadas para geração de energia a partir dos resíduos, bem como as formas possíveis de realizar a conversão energética. Para isso, faz necessário um estudo comparativo entre os diversos modelos (biodigestão, incineração e gaseificação), como realizado neste trabalho, para que obtenhamos quantidades suficientes de combustíveis e conseqüentemente valores consideráveis de energia útil a ser aproveitada.

Em função da fundamentação teórica e da coleta de dados importantes para o desenvolvimento do estudo, é possível dar prosseguimento ao mesmo, bem como avaliar a quantidade de combustível e energia gerada por cada uma das tecnologias, como mostrado abaixo:

A) Tecnologia de Biodigestão

Um dos experimentos desenvolvidos nessa área encontra-se em Caieiras-SP, segundo a planta mostrada a seguir (Figura 3.5), utilizando o conjunto moto-gerador

LANDSET (Figura 3.6), desenvolvida pela empresa Brasmetano, para produção de eletricidade a partir do biogás de aterros sanitários.

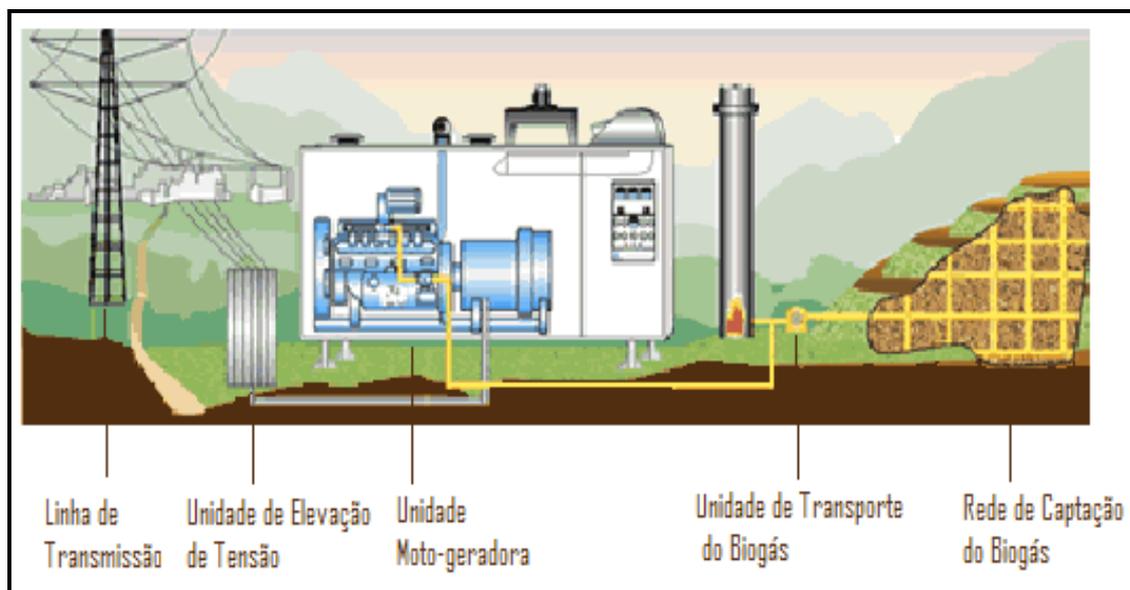


Figura 3.5 - Sistema integrado de captação e conversão de biogás de aterros sanitários em energia elétrica

Fonte: Brasmetano (2008)



Figura 3.6 - Moto-gerador LANDSET

Fonte: Brasmetano (2008)

A.1 - Cálculo do Potencial de Biogás Proveniente da Matéria Orgânica em Aterros Sanitários e Biodigestores

Para determinar a quantidade de biogás advindos da decomposição da matéria orgânica, diversos métodos são reconhecidos.

No presente estudo foram utilizados os conceitos do método proposto pelo IPCC (1996) para aterros sanitários e por Barrera (1993) para os biodigestores, justificadas suas utilizações pelos tipos de dados existentes e pela confiabilidade dos resultados.

Essa estimativa foi realizada para posteriormente determinar a quantidade de energia elétrica que poderá ser extraída dos aterros sanitários e dos biodigestores utilizando biogás, bem como para analisar a viabilidade de utilização do combustível em motores do ciclo diesel (quantidade de biogás gerada suficiente).

Para tanto, através dos métodos citados, foi possível avaliar a quantidade de biogás (Nm^3) produzido em aterros sanitários e biodigestores através da decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos urbanos, conforme mostrado abaixo:

- **Aterro Sanitário:**

$$Q_{\text{Biogás}} = \text{Taxa}_{\text{RSD}} \cdot \text{RSD}_f \cdot \text{FCM} \cdot \text{COD} \cdot \text{COD}_f \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (3.2)$$

onde:

- $Q_{\text{biogás}}$ - Quantidade de biogás (Nm^3 diários);
- Taxa_{RSD} - Taxa de geração de resíduo sólido (kg/dia);
- RSD_f – Fração de resíduo sólido que é depositada em aterros sanitários (%);
- FCM - Fator de correção de metano (Fator adimensional);
- COD - Carbono orgânico degradável (%);
- COD_f - Fração de carbono orgânico degradável que realmente degrada (%);
- F - Fração de CH_4 no gás de aterro (%);
- 16/12 - Fator de conversão de carbono em metano.

- **Biodigestor:**

Para a estimativa em biodigestores foram feitos os cálculos partindo da premissa que para 10 kg de matéria orgânica são produzidos em média 1 Nm^3 de biogás, segundo Barrera (1993).

A.2 - Estimativa da energia elétrica e térmica gerada através do biogás resultante das tecnologias de biodigestão

Para o cálculo da energia térmica e elétrica é essencial o conhecimento do PCI (Poder Calorífico Inferior – kJ/Nm³) do combustível a ser utilizado, que varia de acordo com a quantidade de metano presente na constituição do biogás.

A partir do valor médio do PCI (22320 kJ/Nm³), a energia térmica advinda do biogás no estudo foi realizada de acordo com a Equação 3.3.

$$E_{Térmica} = Q_{Biogás} \times PCI_{Biogás} \quad (3.3)$$

onde:

- E_{térmica} - Energia térmica gerada pelo biogás resultante dos aterros sanitários e biodigestores (kJ diários);
- Q_{Biogás} - Quantidade de biogás gerado (Nm³ diários);
- PCI_{Biogás} - Poder Calorífico Inferior do Biogás (kJ/Nm³).

A energia elétrica gerada através do biogás foi determinada utilizando a metodologia proposta pela CETESB (2002), conforme Equação 3.4, a qual considera um rendimento de 30% para o grupo gerador,

$$E_{Elétrica} = Q_{Biogás} \cdot \eta_{Gerador} \cdot PCI_{Biogás} \quad (3.4)$$

onde:

- E_{elétrica} - Energia elétrica produzida através do biogás em aterros ou biodigestores (kJ diários);
- Q_{Biogás} - Quantidade de biogás gerado (Nm³);
- $\eta_{gerador}$ - Rendimento do grupo gerador (%);
- PCI_{Biogás} - Poder Calorífico Inferior (kJ/Nm³).

A.3 - Estimativa da quantidade de biogás necessária para o funcionamento dos motores ciclo diesel

Para se estimar a quantidade de biogás necessária para funcionamento de motores, na proporção biogás: diesel de 70:30, considerado ideal para que não necessite de modificação no motor ciclo diesel, levando em consideração o consumo médio de diesel, foi possível calcular a quantidade de biogás necessária para alimentação dos mesmos como mostrado a seguir:

$$Q_{\text{Biogás}} = \frac{(\eta_{\text{Diesel}} \times \text{PCI}_{\text{Diesel}} \times Q_{\text{Diesel}})}{(\eta_{\text{Diesel} \times \text{Biogás}} \times \text{PCI}_{\text{Biogás}})} \times (0,70) \quad (3.5)$$

onde:

- $Q_{\text{Biogás}}$ - Quantidade de biogás para alimentar um caminhão (Nm^3/km diários);
- Q_{Diesel} - Quantidade de diesel por caminhão (l/km);
- η_{Diesel} - Rendimento do motor utilizando diesel (%);
- $\eta_{\text{Diesel} \times \text{Biogás}}$ - Rendimento do motor utilizando diesel e biogás (%);
- $\text{PCI}_{\text{Biogás}}$ - Poder Calorífico Inferior (kJ/m^3);
- $\text{PCI}_{\text{Diesel}}$ - Poder Calorífico Inferior (kcal/l).

Em posse da quantidade média de biogás necessário para o funcionamento do motor diesel para cada caminhão de coleta dos resíduos urbanos e da distância média percorrida por esses diariamente foi calculada a quantidade média de biogás consumida por dia para alimentar a frota, como mostrado a seguir:

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{Biogás}} \cdot D_{\text{Média}} \cdot Q_{\text{Veiculos}} \quad (3.6)$$

onde:

- Q_{Total} - Quantidade total de biogás para alimentar a frota (Nm^3 diários);
- $Q_{\text{Biogás}}$ - Quantidade de biogás para alimentar um caminhão (Nm^3/km diários);
- $D_{\text{Média}}$ - Distância média percorrida por cada caminhão (km);
- Q_{Veiculos} - Quantidade de veículos (caminhões).

Uma das tecnologias aplicadas para o aproveitamento de biogás em motores diesel é a desenvolvida pelo CENPES/Petrobrás, a qual não necessita fazer mudanças internas no motor.

B) Tecnologia de Incineração

Quando tratamos de incineração muitas pesquisas foram desenvolvidas e atualmente algumas plantas de incineração fazem parte do cotidiano Brasileiro entre elas a tecnologia desenvolvida pela Usina Verde S/A (Figura 3.7), que nos dá uma visão geral do processo de obtenção de energia elétrica e térmica através de incineradores.

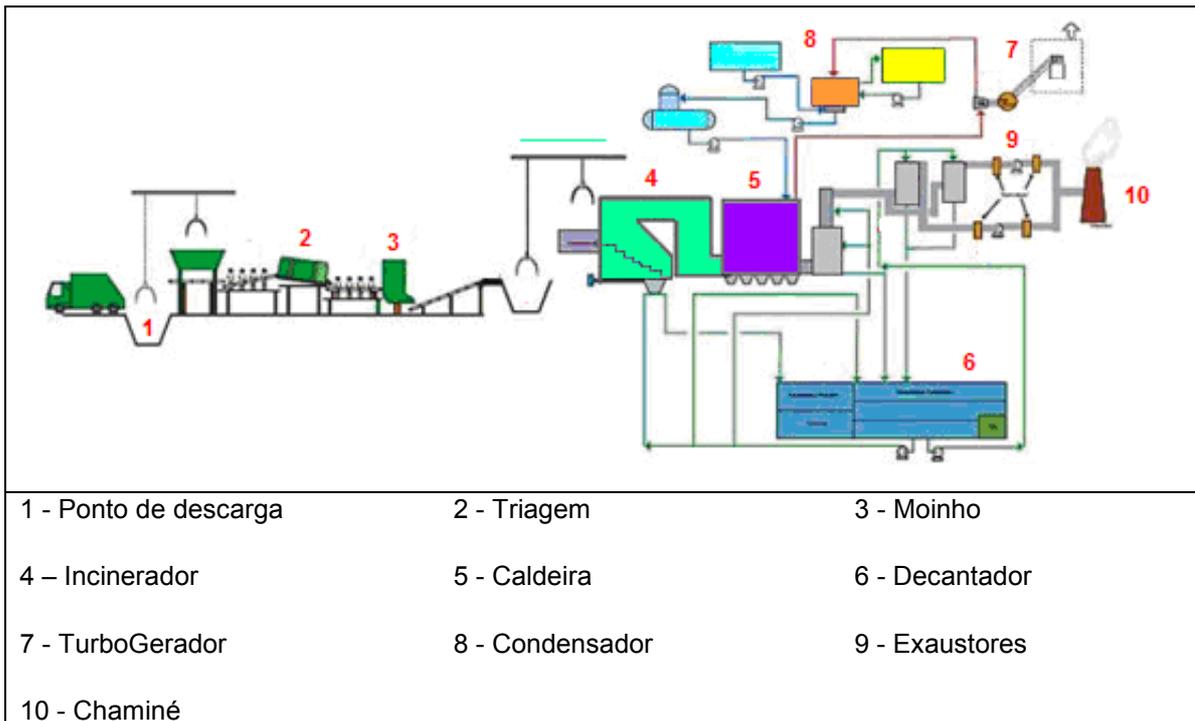


Figura 3.7 - Planta de tratamento térmico e geração de energia elétrica utilizando incineradores

Fonte: Usina Verde S/A (2008)

B.1 - Cálculo da energia elétrica e da energia térmica advindas dos incineradores

Para a obtenção da energia elétrica e da energia térmica gerada através dos incineradores foi utilizado nesse estudo, o equacionamento mostrado a seguir referente ao projeto desenvolvido pela Usina Verde S/A.

Primeiramente foram separados os materiais a serem incinerados, dentre eles, matéria orgânica e outros contaminados com a mesma (resto de banheiro), entulho, trapos, entre outros, sendo dessa maneira previamente separados os materiais que poderão ser reciclados e reutilizados.

Tendo sido separados os materiais para serem processados, temos que a energia contida nos resíduos é de:

$$E_{Resíduos} = Q_{Resíduos} \times PCI_{ResíduosUrbanos} \quad (3.7)$$

onde:

- $E_{Resíduos}$ - Energia contida nos resíduos (kWh);
- $Q_{Resíduos}$ - Quantidade de resíduos que será consumida pelo Incinerador (kg diários);
- $PCI_{ResíduosUrbanos}$ - Poder Calorífico Inferior dos Resíduos Urbanos (MJ/kg).

Já a energia térmica resultante da incineração, foi obtida conforme Equação 3.8, considerando um rendimento de 80% para o incinerador, conforme dados da Usina Verde S/A.

$$E_{T\acute{e}rmica} = E_{Res\acute{i}duos} \times \eta_{Incinerador} \quad (3.8)$$

onde:

- $E_{T\acute{e}rmica}$ – Energia térmica (kWh);
- $E_{Res\acute{i}duos}$ - Energia contida nos resíduos (kWh);
- $\eta_{Incinerador}$ – Rendimento do incinerador (%).

Com a energia térmica resultante da queima dos resíduos urbanos no incinerador foi calculada pela Equação 3.9, estimando um rendimento de 82% para a caldeira, a energia térmica disponível na saída da caldeira e, portanto, na entrada da turbina a vapor.

$$E_{Sa\acute{i}da\ caldeira} = E_{T\acute{e}rmica} \times \eta_{Caldeira} \quad (3.9)$$

onde:

- $E_{Sa\acute{i}da\ caldeira}$ – Energia térmica na saída da caldeira (kWh);
- $E_{T\acute{e}rmica}$ – Energia térmica (kWh);
- $\eta_{Caldeira}$ - Rendimento da caldeira (%).

Para a turbina a vapor foi considerado um rendimento de 30%, conforme literatura, e calculada a energia mecânica segundo a Equação 3.10.

$$E_{Mec\acute{a}nica} = E_{Sa\acute{i}da_caldeira} \cdot \eta_{Turbina_vapor} \quad (3.10)$$

onde:

- $E_{Mec\acute{a}nica}$ – Energia Mecânica (kWh);
- $E_{Sa\acute{i}da\ caldeira}$ – Energia térmica na saída da caldeira (kWh);
- $\eta_{Turbina\ vapor}$ – Rendimento da turbina a vapor (%).

Para o gerador estimou-se uma eficiência típica de 95% de conversão, e com essa eficiência calculou-se a energia elétrica que deverá ser gerada por esse sistema através da Equação 3.11.

$$E_{\text{Elétrica}} = E_{\text{Mecânica}} \cdot \eta_{\text{Gerador}} \quad (3.11)$$

onde:

- $E_{\text{Elétrica}}$ - Energia elétrica produzida pelo processo de incineração (kWh);
- $E_{\text{Mecânica}}$ - Energia Mecânica (kWh);
- η_{Gerador} - Rendimento do gerador (%).

C) Tecnologia de Gaseificação

Diversos são os tipos de gaseificadores, combustíveis a serem utilizados e configurações possíveis de se obter energia elétrica e térmica através dessa tecnologia.

Um dos estudos desenvolvidos na área é o gaseificador Downdraft de pequena escala (Figura 3.8), testado no laboratório da Universidade de Ciência e tecnologia da Noruega, citado por Barrio *et. al.* (2000), o qual utiliza como combustível madeira, e projetado para gaseificar 5 kg/h de madeira, para produção de aproximadamente 12,5 Nm³/h de gás com um PCI de aproximadamente 4,9 MJ/Nm³.

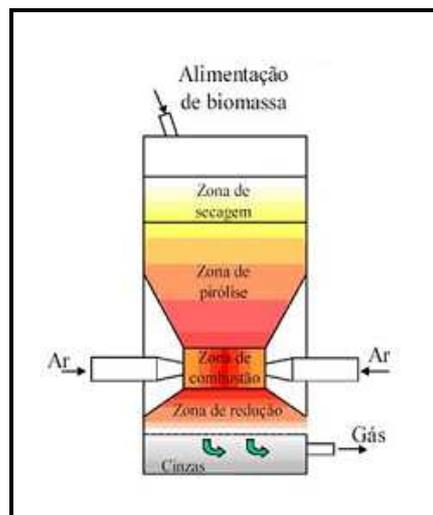


Figura 3.8 - Esquema do gaseificador Downdraft

Fonte: Martins (2006)

C.1 - Cálculo do potencial de gás proveniente da biomassa em gaseificadores

A matéria prima escolhida para o processo foram os restos de podas, predominantemente madeira, devido a posse de dados para esse tipo de biomassa, já que trata-se de um estudo teórico.

Para a estimativa da quantidade de gás produzido através da gaseificação foram feitos os cálculos partindo da premissa que para 1 kg de biomassa (madeira) são produzidos em média 2,5 Nm³ de gás, segundo Barrio *et. al.* (2000).

C.2 - Cálculo da energia elétrica e da energia térmica advindas dos gaseificadores

Para estimar a energia elétrica e a potência térmica advindas dos gaseificadores, os cálculos desenvolvidos nesta seção foram feitos com base em duas configurações proposta por Martins (2006) e utilizando os dados primários do gaseificador Downdraft citado acima, sendo este do tipo leito fixo.

A partir do valor médio do PCI do gás resultante da gaseificação de madeira (4,9 MJ/Nm³), a energia térmica advinda do gás no estudo foi realizada de acordo com a Equação 3.12.

$$E_{\text{Térmica}} = Q_{\text{gás}} \cdot \text{PCI}_{\text{Gás}} \quad (3.12)$$

onde:

- $E_{\text{Térmica}}$ - Energia térmica gerada pelo gás resultante dos gaseificadores (MJ diários)
- $Q_{\text{Gás}}$ - Quantidade de gás gerado (Nm³ diários);
- $\text{PCI}_{\text{Gás}}$ - Poder Calorífico Inferior do gás (MJ/Nm³).

O cálculo da energia elétrica gerada foi desenvolvido utilizando o gás dos gaseificadores em uma turbina a gás acoplada a um gerador ou em um conjunto MotoGerador.

- **Sistema com turbina a gás - gerador**

Considerando um rendimento de 30% para a turbina a gás, conforme literatura, temos através da Equação 3.13 a energia mecânica gerada.

$$E_{\text{Mecânica}} = E_{\text{Térmica}} \cdot \eta_{\text{Turbina_gás}} \quad (3.13)$$

onde:

- $E_{\text{Mecânica}}$ - Energia Mecânica (MJ diários);
- $E_{\text{Térmica}}$ - Energia térmica gerada pelo gás resultante dos gaseificadores (MJ diários);
- $\eta_{\text{Turbina_gás}}$ - Rendimento da turbina a gás (%).

A energia mecânica obtida irá acionar o gerador que resultará em uma quantidade de energia elétrica calculada conforme Equação 3.14, considerando que essas máquinas elétricas têm um rendimento em torno de 95%.

$$E_{\text{Elétrica}} = E_{\text{Mecânica}} \cdot \eta_{\text{gerador}} \quad (3.14)$$

onde:

- $E_{\text{Elétrica}}$ – Energia Elétrica produzida pelo processo de gaseificação (MJ diários);
- $E_{\text{Mecânica}}$ – Energia Mecânica (MJ diários);
- η_{gerador} - Rendimento do gerador (%).

- **Sistema com MotoGerador**

Para o MotoGerador, estimou-se uma eficiência de conversão de 35%, e foi calculada a energia elétrica gerada de acordo com a Equação 3.15, levando em consideração a quantidade de gás resultante dos gaseificadores, bem como seu PCI médio.

$$E_{\text{Elétrica}} = Q_{\text{Gás}} \cdot \eta_{\text{MotoGerador}} \cdot \text{PCI}_{\text{Gás}} \quad (3.15)$$

onde:

- $E_{\text{Elétrica}}$ – Energia Elétrica produzida pelo processo de gaseificação (MJ diários);
- $Q_{\text{Gás}}$ - Quantidade de gás gerado (Nm^3 diários);
- $\text{PCI}_{\text{Gás}}$ - Poder Calorífico Inferior do gás (MJ/Nm^3).

3.2.4 - Seleção da Melhor Configuração das Tecnologias em Função do Potencial de Conversão e Geração de Energia para Reciclagem dos Plásticos e da Gestão dos Resíduos Urbanos

Muitas são as maneiras de gerenciar a questão de disposição e/ou tratamento dos resíduos urbanos, tanto levando em consideração apenas a gestão ou ainda o reaproveitamento da energia contida nos resíduos para reciclagem.

Para isso diversas configurações devem ser analisadas para verificação da mais viável em termos energéticos, ambientais e sociais.

A partir de pesquisas realizadas e de coletas de dados aleatórios em algumas cidades brasileiras com uma faixa populacional de até 100.000 habitantes, e em posse de todos os resultados, foi possível a montagem de diversos fluxogramas contendo maneiras de disposição e/ou tratamento destes que seriam descartados sem nenhum tratamento de modo a obter um melhor aproveitamento energético e uma melhor qualidade ambiental e social para os municípios em que esses resíduos se encontram.

Esses fluxogramas foram montados considerando desde o modelo mais simples de disposição dos resíduos adotados em algumas cidades (100% dos resíduos dispostos

nos aterros sanitários sem nenhum aproveitamento energético ou até mesmo sem reciclagem alguma) até o modelo considerado ideal para disposição e/ou tratamento destes levando em consideração a utilização de algumas tecnologias como as de biodigestores, aterros sanitários, incineradores e gaseificadores.

A partir dos dados, bem como aplicação destes é possível selecionar a configuração com maior viabilidade energética, energia essa aplicada a reciclagem de plásticos, e ambiental, quando aplicada a um município qualquer.

4 - ESTUDO DE CASO

Para uma melhor caracterização e compreensão da ferramenta metodológica desenvolvida foi tomada como estudo de caso a cidade de Itajubá-MG para aplicação da mesma.

4.1 - Localização da Área

O município de Itajubá situa-se no sul do Estado de Minas Gerais (Figura 4.1), sendo que a sede encontra-se entre os meridianos 45° 20' e 45° 30' Oeste (W) e os paralelos 22° 20' e 23° 30' Sul (S), numa altitude de 1746 metros no seu ponto mais alto e de 830 metros no ponto mais baixo, acima do nível do mar, sendo que a área urbana, sem considerar os morros, fica numa altitude média de 842 metros. Ocupando uma área de 290,45 km² de extensão, com população de 86693 habitantes, de acordo com o IBGE (2007), o equivalente a 298,48 hab./km², numa taxa anual de crescimento de 1,26% habitantes por ano.

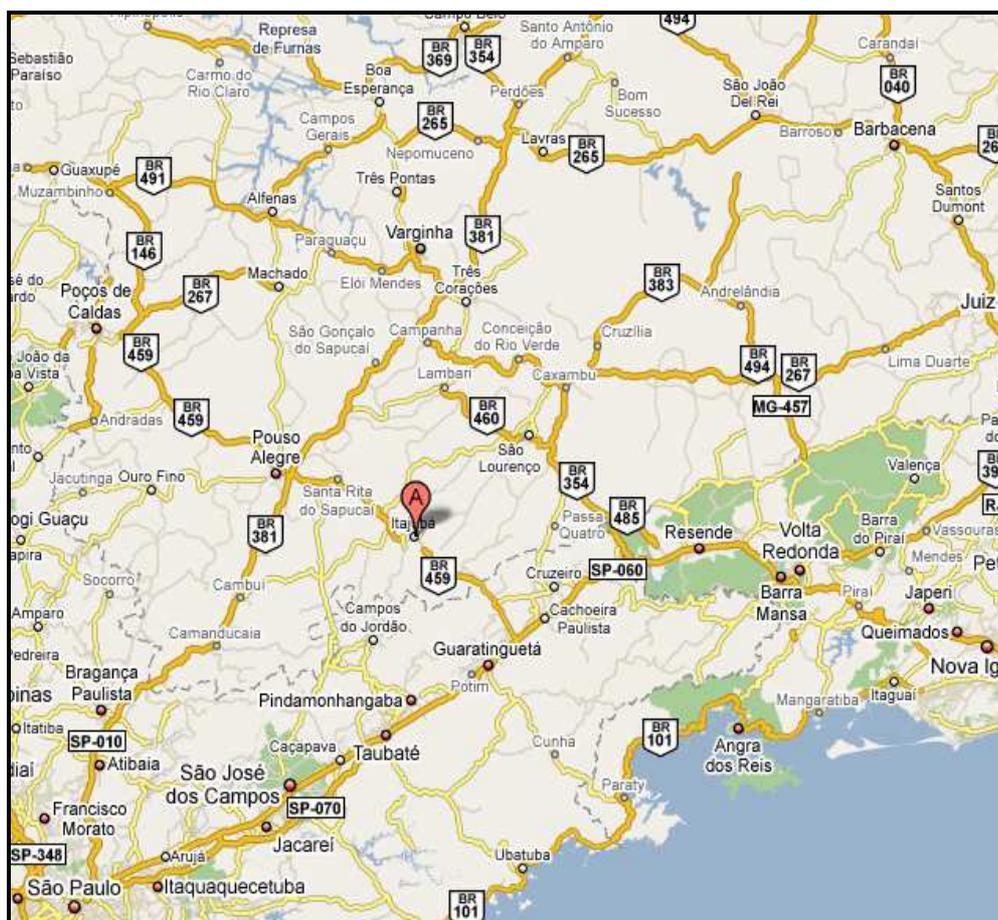


Figura 4.1 - Localização da área de estudo

Fonte: IBGE (2007)

A topografia de Itajubá é do tipo ondulada-montanhosa. O território apresenta-se plano (10%), ondulado (12%) e montanhoso em sua maior parte (78%).

Pertencendo à Bacia Hidrográfica do Rio Grande, o município ainda conta com uma malha rodoviária privilegiada que dá acesso aos maiores mercados do país: São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, fazendo com que Itajubá tenha um dos maiores distritos industriais do sul de Minas, com indústrias de grande e médio porte, gerando aproximadamente 5.500 empregos. Estão instaladas indústrias de vários ramos como autopeças, transformadores de medição, helicópteros, produtos cosméticos, armamento bélico, biomedicina, entre outros, de acordo com Gonçalves (2007).

A cidade possui 57 bairros limitando-se, ao norte, com os municípios de: São José do Alegre e Maria da Fé; ao Sudeste, Wenceslau Brás; ao Sudoeste com o de Piranguçu; a Oeste, Piranguinho e a Leste com Delfim Moreira, exercendo influência direta sobre 14 municípios da micro-região, sendo a sua população equivalente a 0,47% da população mineira.

O clima de Itajubá é variado, ocorrendo, às vezes, no mesmo dia, pela manhã e tarde, o calor de verão e, à noite, uma da temperatura mais baixa.

4.2 - Coleta e Destinação dos Resíduos Urbanos em Itajubá- MG

Conforme Gonçalves (2007), o sistema de limpeza urbana no município é vinculado à Secretaria Municipal de Obras (SEMOP), sendo alguns serviços terceirizados e outros realizados pela própria prefeitura. Os serviços constituem em fiscalização, varrição de logradouros públicos, capina, roçada, poda, limpeza de córregos, coleta regular e disposição final dos resíduos urbanos.

A coleta dos resíduos urbanos em Itajubá é realizada em dias alternados de segunda a sábado na região central e nos bairros, utilizando para esse fim seis caminhões para coleta de resíduos domiciliares, comerciais e da zona rural, sendo cinco dotados de equipamento compactador e um do tipo graneleiro com carroceria de madeira de propriedade de uma empresa terceirizada, segundo a Prefeitura Municipal de Itajubá (PMI, 2008).

O serviço de coleta dos resíduos domiciliares urbanos e comerciais é feito por uma equipe de 25 funcionários, que utilizam uniforme completo, composto de luva, bota, faixa refletora e equipamentos de proteção individual (EPI's), (PMI, 2008).

Segundo Gonçalves (2007), os serviços de varrição, capina e poda na área urbana são executados por uma empresa terceirizada composta de 203 funcionários que utilizam de carrinhos de mão para coleta e acumulam esses resíduos em pontos estratégicos para posterior recolhimento por um dos caminhões da coleta urbana.

A coleta na zona urbana é realizada com veículos coletores com capacidade de quatro toneladas. Cada um percorre aproximadamente 50 km, coletando aproximadamente 53 toneladas diárias, (Gonçalves, 2007). A coleta dos resíduos do serviço de saúde (RSS) abrange todos os estabelecimentos de saúde do município, incluindo hospitais, farmácias entre outros que fazem uso ou geram resíduos incluídas na classe I (perigosos), de acordo com a PMI (2008).

Segundo Gonçalves (2007), a coleta dos RSS é realizada pela mesma empresa que coleta os resíduos domiciliares e comerciais, porém são coletados diariamente por um veículo tipo furgão no período das 7 às 16 horas.

Estima-se que sejam coletados cerca de 530 kg de RSS diariamente, sendo que esses são acondicionados de acordo com as recomendações da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), havendo uma segregação dos resíduos comuns e dos contaminados pelos próprios geradores. Após a coleta, parte dos resíduos são levados para um incinerador localizado em Contagem - MG e o restante é depositado em valas isoladas no depósito de resíduos do município (Gonçalves, 2007).

Quanto aos resíduos de construção civil (RCC), atualmente eles ficam armazenados em um local provisório, para posterior uso no aterro controlado ou na manutenção das estradas rurais, segundo a PMI (2008)

De acordo com Gonçalves (2007), atualmente os resíduos domiciliares urbanos e aqueles provenientes dos serviços de varrição e poda são depositados no aterro controlado de Itajubá (Figura 4.2), mas o município por possuir uma população superior a cinquenta mil habitantes, conforme a Deliberação do Conselho de Política Ambiental (COPAM), nº. 052/2001(MINAS GERAIS, 2001) é convocado ao licenciamento ambiental do sistema adequado de disposição final dos resíduos urbanos.

Dessa maneira foi escolhido um terreno para a implantação do futuro aterro sanitário de Itajubá, localizado na Fazenda da Barra, a aproximadamente 12 km da Praça Dr. Pereira dos Santos, situado no centro do município.

Segundo Gonçalves (2007), o terreno que conta com uma área de 56,93 hectares, tem cobertura vegetal típica de pastagens em quase toda sua extensão, com exceção da existência de duas matas de eucalipto e de uma mata nativa na porção mais alta do terreno.



Figura 4.2 - Aterro controlado de Itajubá-MG

Fonte: Gonçalves (2007)

Dessa área total foi delimitada uma área de 29,95 hectares a ser efetivamente utilizada para a implantação do projeto. O terreno restante, com área de 26,98 hectares, foi definido com área de reserva técnica ou de expansão futura do aterro sanitário (Gonçalves, 2007).

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Gerais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do trabalho.

O presente trabalho permitiu avaliar várias formas de disposição e/ou tratamento dos resíduos urbanos, bem como a composição destes de uma maneira geral, em função da geração de energia e de uma gestão melhorada destes em termos ambientais, sociais e energéticos.

A avaliação das tecnologias de conversão e geração energética apresentadas neste estudo nos relatou uma visão geral da importância de se reaproveitar resíduos, que antes eram vistos como desprezíveis e descartado sem nenhum valor agregado.

Do ponto de vista energético são tecnologias viáveis quando utilizadas em conjuntos, quando aplicada a consórcio de cidades ou até mesmo quando utilizadas individualmente para um determinado fim como, por exemplo, a reciclagem dos resíduos plásticos.

Como a aplicação prática, somente para estudos, destas tecnologias envolve questões não objetivas e muitas vezes de difícil quantificação, caracterização e inviável economicamente, foi realizada uma metodologia baseada em casos já estudados.

Uma observação clara ao desenvolver o estudo, é que a forma de coleta de todos os resíduos sólidos em conjunto e a posterior separação e aproveitamento são inviáveis economicamente tanto pela contaminação dos materiais recicláveis como pela produção de biocompostos de má qualidade.

Desta forma a implantação da coleta seletiva e o reaproveitamento dos materiais recicláveis para os municípios brasileiros são vista como a estratégia mais correta de reaproveitamento dos resíduos sólidos, para geração de energia.

A criação dos fluxogramas, possibilitando o entendimento das mais variadas formas de gestão dos resíduos urbanos adotadas nos municípios brasileiros, acabou por facilitar cálculos e visualização de uma maneira clara e objetiva da disposição dos resíduos e conseqüentemente do seu reaproveitamento energético de maneira eficiente quando se trata de geração e utilização da mesma.

A metodologia adotada quando aplicada, apontando para a priorização do aproveitamento energético dos resíduos urbanos, mostrou-se bastante eficiente e de fácil aplicação.

5.1.1 – Aplicativo de execução da metodologia proposta

Com uma metodologia consolidada foi possível a criação de um aplicativo utilizando macros para realizar a interface entre os programas do Microsoft Office 2007 (Excel e Power Point).

O aplicativo é formado por nove telas, como no modelo (Figura 5.1), através das quais é possível efetuar cálculos e reavaliar as tecnologias para qualquer município, bastando para isso inserir na primeira tela os dados de entrada (composição dos resíduos presentes no município e quantidade de resíduos separados na coleta seletiva) os quais serão utilizados automaticamente para os demais processos nas telas seguintes.

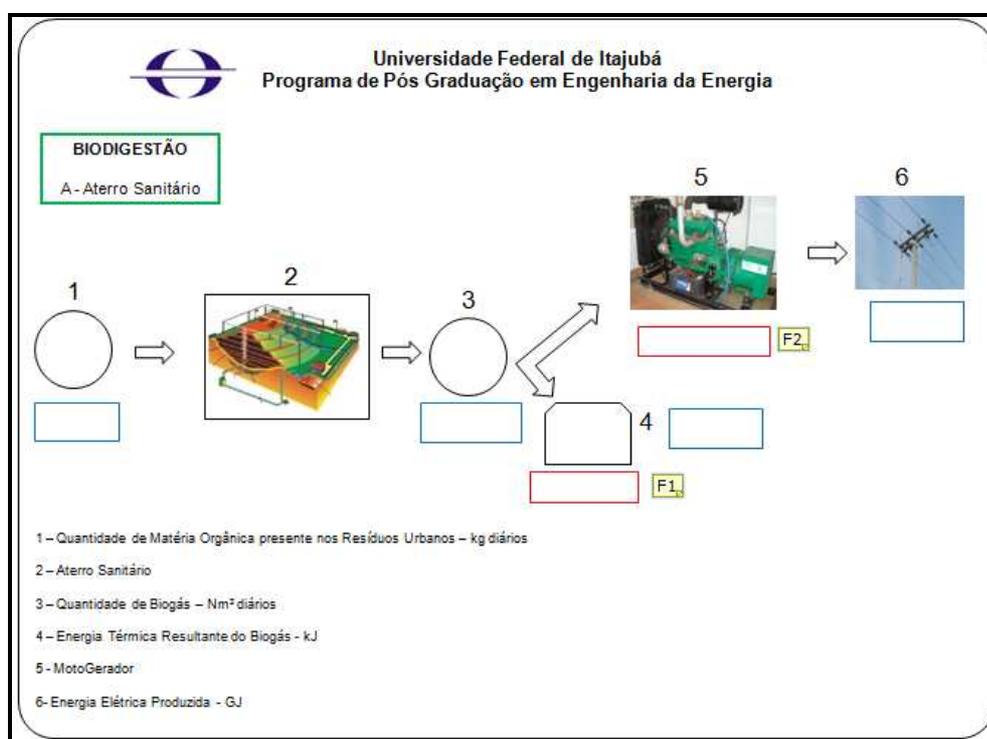


Figura 5.1 - Tela para cálculo de energia térmica e elétrica através do aterro sanitário

Ao entrarmos com o consumo de energia elétrica em cada equipamento de uma linha de reciclagem e com a quantidade de plásticos presentes no município em estudo obtemos através do aplicativo a quantidade final de energia necessária pra reciclar esses materiais diariamente na cidade envolvida.

As telas referentes às tecnologias de reaproveitamento energético dos resíduos urbanos nos fornecem a geração de energia elétrica e térmica a partir dos resíduos urbanos designados na primeira tela do aplicativo, correspondente a composição dos resíduos urbanos descartado no município, apenas inserindo dados como PCI e rendimentos nos locais pré-estabelecidos.

Por fim também é possível obter através do mesmo, a quantidade de biogás necessária para alimentar os caminhões pertencentes a frota coletora de resíduos no município utilizando 70% biogás e 30% diesel, quando entrarmos com dados do tipo: total de caminhões, distância que os mesmos percorrem, rendimento do motor e quantidade de combustível.

Com os resultados obtidos através do aplicativo ficará mais fácil a tomada de decisão a respeito da melhor forma de gestão e reaproveitamento energético dos resíduos urbanos na cidade envolvida principalmente quando se trata da reciclagem de plásticos.

5.2 - Específicos para o Estudo de Caso

5.2.1 - Levantamento Qualitativo e Quantitativo dos Resíduos Urbanos de Itajubá-MG

Os resíduos urbanos da cidade de Itajubá-MG, quantificados e qualificados de acordo com três setores sócio-econômico (A - Renda acima de dez salários mínimos; B - Renda entre cinco e dez salários mínimos; C - Renda superior a dois e inferior a cinco salários mínimos), por Gonçalves (2007), podem ser visto e analisados segundo Tabela 5.1.

O município possui 41,9% de matéria orgânica constituídas principalmente de restos de alimentos e de restos de podas, percentual inferior à média do Brasil, o que pode ser compreendido pelo fato de a composição ter apresentado uma maior porcentagem de material potencialmente reciclável e maior quantidade de outros resíduos, constituídos de restos de banheiro, fraldas descartáveis, entulhos, panos, trapos, isopor, pilhas entre outros, segundo Gonçalves (2007).

O mesmo estudo mostra que 12,9% dos resíduos são plásticos potencialmente recicláveis, quantidade maior do que a média brasileira, devido às pessoas estar consumindo mais plásticos nos últimos anos, principalmente sacolas de supermercado, que são reutilizadas para o acondicionamento dos resíduos, e essa porcentagem vem aumentando gradativamente à medida que vidros e outros materiais são substituídos por estes, o que pode ser observado pela menor quantidade desses outros materiais utilizados para acondicionamentos, principalmente de alimentos na composição dos resíduos urbanos de Itajubá-MG.

Com relação aos papéis, papelão, alumínio e metais não-ferrosos, esse percentual vem gradativamente diminuindo ao longo do tempo, devido principalmente ao alto valor agregado que esses materiais possuem, o que fazem com que sejam previamente separados antes de serem enviados a coleta tradicional, o que não ocorre com os plásticos que mesmo atingindo uma quantidade considerável para serem reciclados, acaba por serem encaminhados aos aterros devido ao alto consumo de energia elétrica necessária para o processo.

Tabela 5.1 - Caracterização dos resíduos urbanos de Itajubá

COMPONENTES		SETOR A (%)	SETOR B (%)	SETOR C (%)	ITAJUBÁ (%)
Restos de Alimentos	Material Orgânico (compostável)	28,1	42,9	33,1	36,4
Restos de Podas		11,7	6,8	3,9	5,5
Papel Reciclável	Material Potencialmente Reciclável	12,0	5,4	6,3	7,0
Papelão		7,0	3,2	5,3	5,4
Plástico Mole		5,2	6,8	9,3	8,0
Plástico Duro		2,8	2,9	3,3	3,1
PET		1,8	1,3	1,8	1,8
Tetra Pak		2,2	1,2	0,5	1,1
Metal (aço)		2,8	2,0	2,0	2,1
Metal (alumínio)		0,1	0,5	0,3	0,4
Metal Não Ferroso		0,0	0,1	0,1	0,1
Vidro		2,6	3,0	2,2	2,5
Trapo	Trapo	2,3	2,5	5,9	3,9
Restos de Banheiro	Restos de Banheiro	7,5	9,0	12,5	10,6
Entulho	Entulho	12,9	9,9	9,1	8,8
Outros	Outros	1,5	2,5	4,4	3,3

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2007)

Através dos dados acima e da Figura 5.2 podemos ver a grande quantidade de matéria orgânica e materiais potencialmente recicláveis presentes nos resíduos domiciliares de Itajubá.

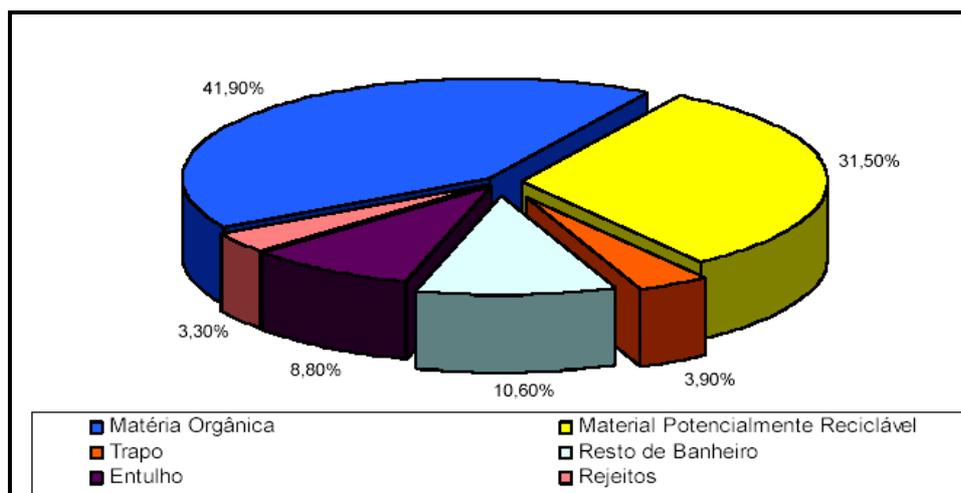


Figura 5.2 - Composição dos resíduos urbanos domiciliares de Itajubá-MG

Fonte: Gonçalves (2007)

Uma pesquisa realizada pelo IBGE (2000) mostrou que a cidade comportava 84.135 habitantes, e produzia aproximadamente 48 toneladas/dia de resíduos urbanos, atualmente Itajubá conta com uma população de 86.693 habitantes segundo IBGE (2007) e produz cerca de 53 toneladas/dia de resíduos, o que nos demonstra que a população na cidade aumentou 3,04% nos últimos sete anos e a produção diária de resíduos aumentou 3,28%.

5.2.2 - Estimativa do Consumo Potencial de Energia para Reciclagem de Plásticos Pós-Consumo de Itajubá-MG

Segundo os dados da empresa KIE máquinas e plásticos Ltda. (2008), foram determinados o consumo de energia elétrica para cada equipamento de reciclagem, conforme mostrado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Consumo de energia nos equipamentos de reciclagem

EQUIPAMENTOS	CAPACIDADE DEPRODUÇÃO (kg/h)	POTÊNCIA (cv)	ENERGIA CONSUMIDA (GJ/tonelada)
Moinho	1200	30	0,67
Lavadora	1500	20	0,04
Secadora	1500	20	0,04
Aglutinador	650	125	0,52
Extrusora	650	200	0,83
Granulador	600	7,5	0,03

A partir dos dados e informações obtidas, foi criado um fluxograma (Figura 5.3), o qual mostra as etapas para reciclagem de cada tipo de plástico, os equipamentos utilizados, bem como, a energia elétrica total necessária para manter as linhas de reciclagem dos diferentes tipos de plásticos presentes no município.

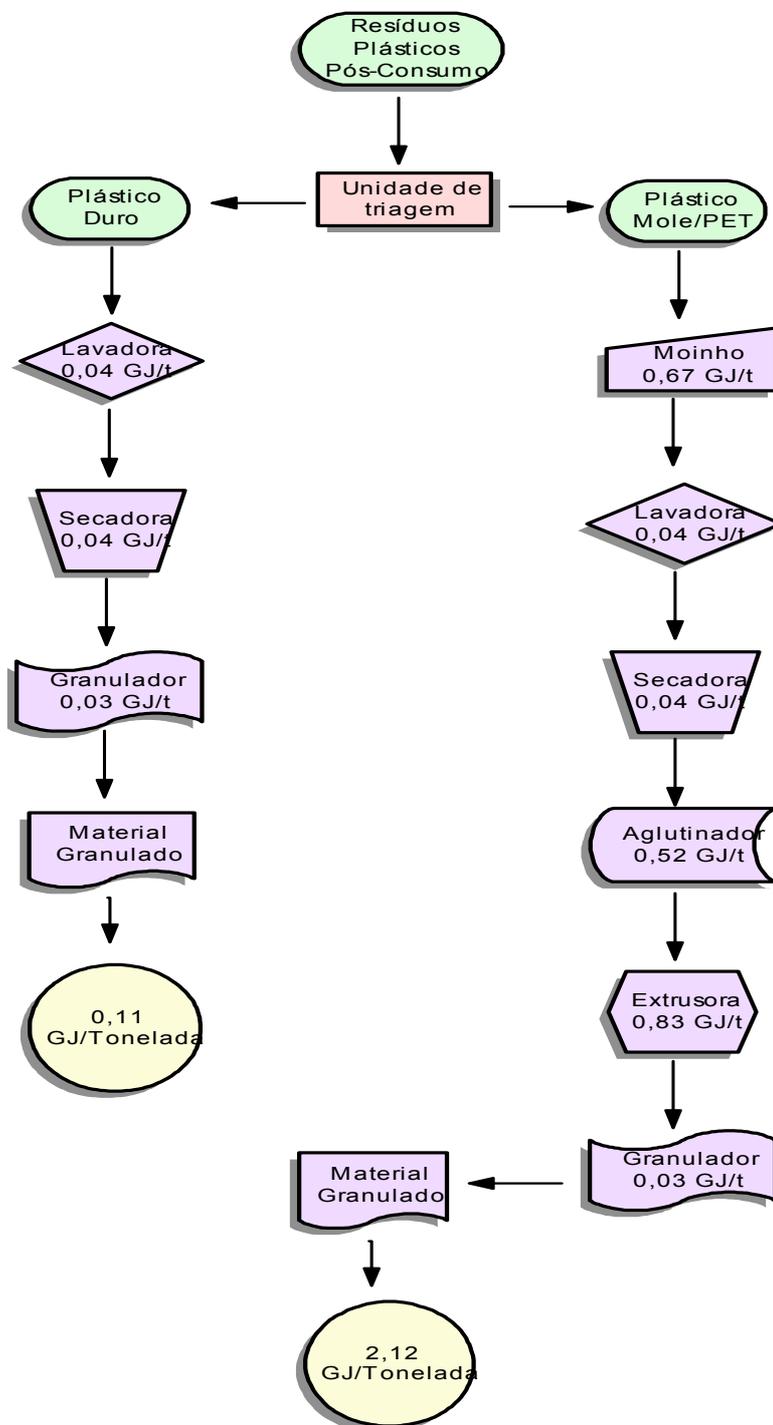


Figura 5.3 - Diagrama contendo as etapas do processo de reciclagem dos plásticos, os equipamentos utilizados e a energia elétrica necessária para o processo

Como Itajubá coleta em média 53 toneladas diárias de resíduos urbanos, de acordo com o levantamento qualitativo e quantitativo dos resíduos da cidade, temos que a

quantidade de plásticos pós-consumo descartada e potencialmente reciclável é de aproximadamente sete toneladas diárias de acordo com a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Quantidade de plásticos diários a serem reciclados

TIPOS DE PLÁSTICOS NO MUNICÍPIO	PORCENTAGEM (%)	QUANTIDADE (TONELADAS)
Plástico Mole	8,0	4,24
Plástico Duro	3,1	1,64
PET	1,8	0,95

Sabendo que a energia necessária para reciclagem de plástico mole e PET é de 2,12 GJ/tonelada e de 0,11 GJ/tonelada para reciclagem de plástico duro, temos que para a cidade de Itajubá são necessários 10,98 GJ para reciclagem de Plástico Mole e PET e 11,15 GJ para a reciclagem de Plástico Mole, Plástico Duro e PET, diariamente.

O menor gasto energético para a reciclagem dos plásticos duros contidos nos resíduos de Itajubá pode ser explicado pelo fato de estes serem classificados como termofixos e por este motivo ter uma rota de reciclagem diferente dos plásticos mole e PET.

5.2.3 - Estimativas da Quantidade de Combustível e do Potencial de Energia Gerados a partir das Tecnologias de Conversão e Geração Através dos Resíduos Urbanos de Itajubá-MG

Todos os cálculos efetuados foram feitos seguindo as equações proposta na metodologia e todos os resultados alcançados e aqui discutidos são frutos de um estudo puramente teórico das tecnologias avaliadas quando aplicadas a Itajubá-MG.

A) Tecnologia de Biodigestão

A.1 - Cálculo do Potencial de Biogás Proveniente da Matéria Orgânica em Aterros Sanitários e Biodigestores

Através da Equação 3.2 e dos valores descritos por Barreira (1993), a quantidade de biogás produzido em Itajubá-MG, levando em consideração o encaminhamento da matéria orgânica (restos de alimentos e restos de podas) ao aterro sanitário e ao biodigestor, através da decomposição anaeróbia dos resíduos urbanos, pode ser vista na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Produção de biogás pela biodigestão

TECNOLOGIAS DE BIODIGESTÃO	QUANTIDADE DE MATÉRIA ORGÂNICA (kg diários)	QUANTIDADE DE BIOGÁS PRODUZIDA (Nm³ diários)
Aterro Sanitário	22.207	1744
Biodigestor	22.207	2220

Através da análise dos resultados notamos um aumento de 21% de biogás produzido pelos biodigestores quando comparado aos aterros sanitários. Essa diferença pode ser explicada pelo fato dos biodigestores serem mais eficientes e haver maior possibilidade de controle das condições químicas, físicas e biológicas em que estes estão operando.

A.2 - Estimativa da Energia Térmica e Elétrica Gerada Através do Biogás Resultante das Tecnologias de Biodigestão

As estimativas da energia térmica e elétrica gerada através do biogás dependem muito da sua composição, levando em consideração que o PCI do combustível varia muito com a quantidade de metano presente no mesmo, e do rendimento do grupo MotoGerador considerado.

Através da Equação 3.3 e da Equação 3.4, considerando um PCI médio de 22320 kJ/Nm³ para o biogás e um rendimento de 30% para o grupo MotoGerador, obtivemos as respectivas energias diárias como mostrado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Energia térmica e elétrica gerada pela biodigestão

TECNOLOGIAS DE BIODIGESTÃO	ENERGIA TÉRMICA (GJ)	ENERGIA ELÉTRICA (GJ)
Aterro Sanitário	38,9	11,7
Biodigestor	49,6	14,9

Deste modo, a energia elétrica gerada pela utilização do biogás proveniente do aterro sanitário e dos biodigestores são suficientes para suprir a demanda energética necessária para reciclagem dos plásticos presentes na composição dos resíduos urbanos de Itajubá como mostrado na Figura 5.4.

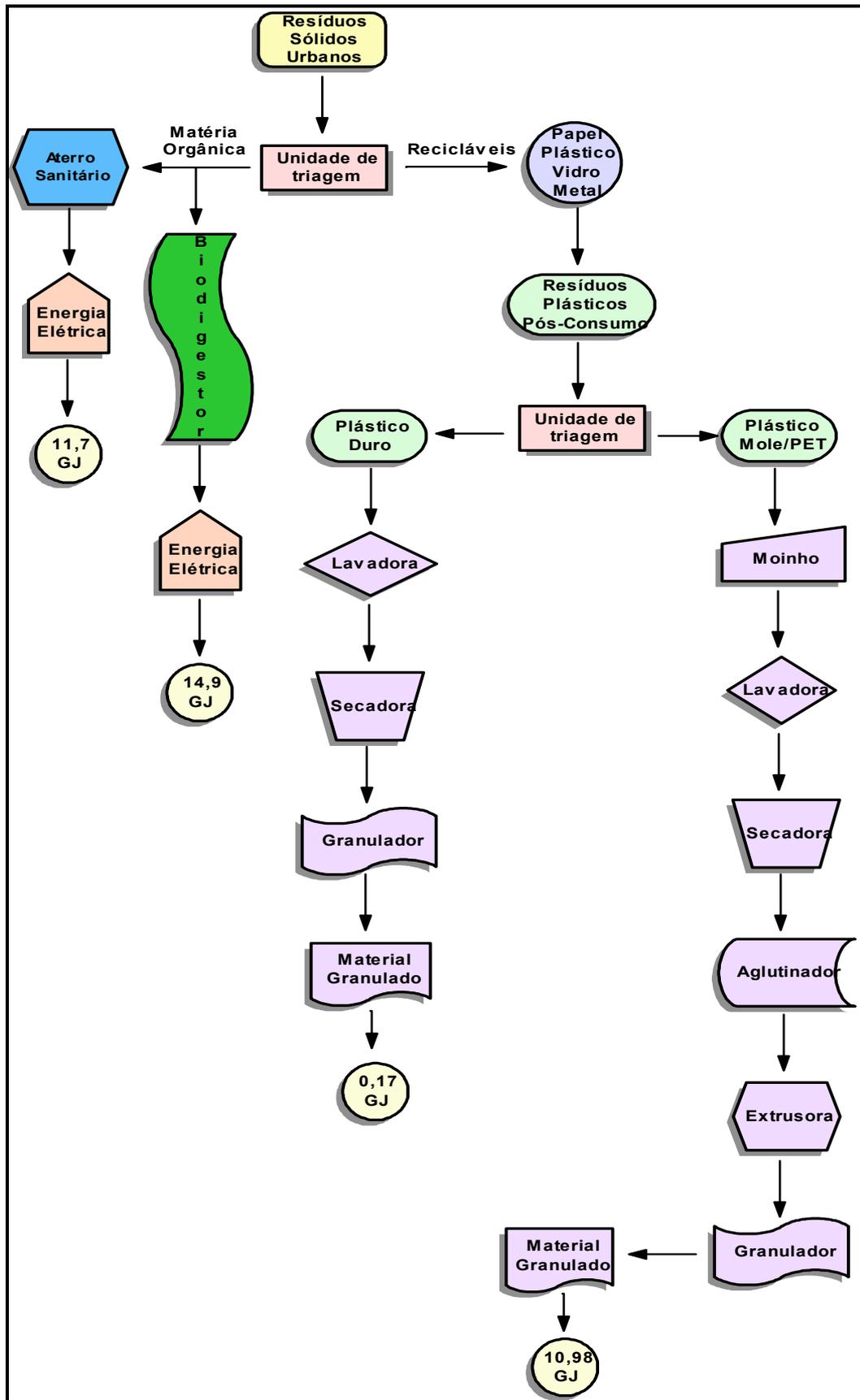


Figura 5.4 - Diagrama de energia produzida com a matéria orgânica e gasta no processo de reciclagem

A.3 - Estimativa da Quantidade de Biogás Necessária para o Funcionamento dos Motores Ciclo Diesel da Frota Coletora de Resíduos de Itajubá-MG

Ao utilizarmos 70% de biogás e 30% diesel no motor de combustão interna (ciclo diesel) de um dos caminhões da frota coletora de resíduos de Itajubá, considerando um consumo médio de diesel de 1,5 l/km, obtivemos através da Equação 3.5, a quantidade de biogás necessária para alimentação do mesmo e, a quantidade de biogás necessária para alimentar todos os caminhões, sabendo que a frota coletora da cidade em estudo é composta de seis caminhões e que cada um percorre em média 50 km diários, de acordo com a Equação 3.6.

De acordo com os dados e resultados obtidos temos que é necessário em média 573 Nm³ diários de biogás para o funcionamento dos caminhões, como mostrado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Quantidade de biogás para alimentar motores ciclo diesel na proporção 7:1

QUANTIDADE DE BIOGÁS PARA ALIMENTAR CADA CAMINHÃO	1,91 Nm ³ /km
QUANTIDADE TOTAL NECESSÁRIA	572,9 Nm ³

O aproveitamento de uma porcentagem de biogás nos motores de ciclo diesel, além de trazer benefícios ambientais como a diminuição de emissões sendo lançada a atmosfera tanto em relação ao metano proveniente da decomposição dos resíduos urbanos como do CO₂ pelo uso dos combustíveis fósseis, vem contribuir com um ganho de ordem econômica, ao ser reduzido um consumo de quase 315 litros de diesel diários.

B) Tecnologia de Incineração

B.1 - Cálculo da Energia Térmica e da Energia Elétrica Advindas dos Incineradores

Considerando que a quantidade de resíduos a serem incinerados no município é de aproximadamente 36 toneladas diárias, constituídos principalmente de matéria orgânica e de materiais não recicláveis, conforme proposto pela Usina Verde S/A, e considerando que não há coleta aos sábados e domingos, tem-se 22 dias de coleta no mês, totalizando aproximadamente 790 toneladas/mês.

Através da Equação 3.8, foi calculada a energia térmica mostrada na Tabela 5.7, resultante do processo de incineração, ao ser considerado um rendimento de 80 % para o incinerador utilizado e um PCI de 1300 kcal/kg, ou seja, 5,44 MJ/kg, valor médio dos diferentes valores de PCI na literatura.

Tabela 5.7 - Energia térmica advinda do incinerador

QUANTIDADE DE RESÍDUOS PARA INCINERAÇÃO (kg diários)	ENERGIA TÉRMICA OBTIDA PELO PROCESSO (GJ)
36.358	158,2

A energia térmica obtida pelo estudo pode ser utilizada de forma direta para obtenção de calor ou reaproveitada em uma caldeira para geração de vapor, que ao ser encaminhado a uma turbina (vapor) acoplada a um gerador nos fornece como produto final, energia elétrica, segundo Equação 3.11, que será utilizada no processo de reciclagem, conforme mostrado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Energias intermediária e elétrica final resultante do processo de incineração

ENERGIA TÉRMICA OBTIDA PELO PROCESSO (GJ)	ENERGIA TÉRMICA GERADA PELA CALDEIRA (GJ)	ENERGIA MECÂNICA GERADA PELA TURBINA A VAPOR (GJ)	ENERGIA ELÉTRICA OBTIDA PELO PROCESSO (GJ)
158,2	129,7	45,4	43,1

C.Tecnologia de Gaseificação

C.1 - Cálculo do potencial de gás proveniente da biomassa em gaseificadores

Levando em consideração a quantidade de resíduos a serem gaseificados (restos de podas), conforme descrito na metodologia e tomando como base a quantidade de gás produzido em função da quantidade de resíduo gaseificada ($2,5 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ de biomassa), conforme valores descritos por Barrio et.al. (2000), temos através da Tabela 5.9, a quantidade de combustível (gás), obtida no processo.

Tabela 5.9 - Produção de gás pelo processo de gaseificação

TECNOLOGIA DA GASEIFICAÇÃO	QUANTIDADE DE RESÍDUOS (kg diários)	QUANTIDADE DE GÁS PRODUZIDA (Nm ³ diários)
	2.915	7.287,5

C.2 - Cálculo da energia térmica e elétrica advindas dos gaseificadores

As estimativas das energias térmica e elétrica geradas através do gás de gaseificação dependem muito da sua composição, levando em consideração que o PCI do combustível varia muito com o tipo de material a ser gaseificado, e do rendimento dos equipamentos de conversão energética considerados.

Através da Equação 3.12, considerando um PCI de 4,9 MJ/Nm³ para o gás gerado, bem como a quantidade deste produzida para o município, obtivemos a energia térmica advinda da gaseificação, como mostrado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Energia térmica gerada pela gaseificação

TECNOLOGIAS DE GASEIFICAÇÃO	QUANTIDADE DE GÁS PRODUZIDA (Nm³ diários)	ENERGIA TÉRMICA GERADA PELO PROCESSO (GJ)
	7.287,5	35,7

A energia elétrica gerada através da tecnologia de gaseificação de Itajubá-MG, considerando as duas configurações, proposta na metodologia, possíveis de obtenção e conversão: sistema com turbina a gás – gerador (Equação 3.14) e sistema utilizando MotoGerador (Equação 4.15), podem ser vistas através da Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Energia elétrica gerada pelo processo de gaseificação

SISTEMA DE GERAÇÃO	ENERGIA TÉRMICA GERADA PELO PROCESSO (GJ)	ENERGIA MECÂNICA GERADA PELA TURBINA A GÁS (GJ)	ENERGIA ELÉTRICA GERADA PELO PROCESSO (GJ)
Turbina a gás-gerador	35,7	10,7	10,2
MotoGerador	35,7	-----	12,5

Deste modo, a energia elétrica gerada pela utilização do gás proveniente da gaseificação quando utilizado um MotoGerador é suficiente para suprir a demanda energética necessária para reciclagem dos plásticos presentes na composição dos resíduos urbanos de Itajubá.

Apesar de a configuração que utiliza MotoGerador ser mais simples que a turbina a gás, e nos fornecer uma maior quantidade de energia elétrica devido ao maior rendimento do conjunto, essa deve ser bem projetada de acordo com algumas variáveis tais como, vazão de gás entre outras, para que o projeto seja verdadeiramente eficiente.

5.2.4 - Seleção da Melhor Configuração das Tecnologias em Função do Potencial de Conversão e Geração de Energia para Reciclagem dos Plásticos e da Gestão dos Resíduos Urbanos

Diversas maneiras são encontradas para disposição, tratamento, reaproveitamento energético e gestão dos resíduos urbanos.

Somente de posse das análises dos dados, é que se pode conhecer o tratamento mais adequado considerando um reaproveitamento energético dos resíduos para produção de energia suficiente que será utilizada para processos eficientes de disposição e/ou tratamento destes, além do que o descaso das autoridades no tratamento dos mesmos pode fazer com que surjam vários problemas de saúde pública e ambiental tais como: transmissão de doenças através de vetores, mau cheiro, contaminação dos rios e lençóis d'água, e grande quantidade de chumbo produzido.

A criação dos fluxogramas mostrados a seguir, bem como a discussão de cada um deles, foram significativos e importantes ao estudo, já que eles refletem o destino do lixo na maioria dos municípios situados no Brasil, principalmente os de pequeno porte, e nos mostram de maneira clara qual a melhor forma de se adequar a gestão dos resíduos a produção de energia para o processo de reciclagem.

O fluxograma A (Figura 5.5), nos mostra a coleta dos resíduos e sua posterior disposição em vazadouros a céu aberto sem nenhum aproveitamento energético e preocupação com questões de ordem ambiental e social, situação da maioria dos municípios brasileiros.



Figura 5.5 - Fluxograma A – Disposição dos resíduos

Esta forma de olhar e lidar com as sobras de nossas atividades cotidianas é resultado de uma visão de gestão de resíduos que trata todos os materiais inservíveis como lixo. Cerca de 90% do total dos 5559 municípios brasileiros jogam seus resíduos de maneira inadequada, a céu aberto ou em aterros controlados, provocando situações de impacto social e de degradação ambiental – contaminação dos lençóis freáticos e dos solos agricultáveis, no caso de áreas rurais, pelo chorume e poluição do ar pela liberação de gases tóxicos. Os poucos municípios, 10% do total, que destinam corretamente seus resíduos para aterros sanitários, investem recursos consideráveis para enterrar matéria prima.

Desta forma, resíduos assim dispostos, além de não agregar nenhum valor econômico que poderia ser alcançado através da separação e reciclagem de materiais ou até mesmo com a fabricação de biocompostos e biofertilizante adquiridos através de processos que utilizam a matéria orgânica tais como compostagem e biodigestão anaeróbica, acabam também por não aproveitar o alto poder energético, quer seja elétrica ou térmica, que as tecnologias de reaproveitamento dos resíduos urbanos nos oferecem, o que no caso de Itajubá-MG, deixariam de ser reciclados em média 6 toneladas de plásticos pós-consumo que iriam acumular no aterro controlado que por sua vez necessitaria de áreas cada vez mais extensas para alojar todos os resíduos do município.

A situação descrita no fluxograma B (Figura 5.6) nos mostra os resíduos sendo coletados e enviados ao aterro sanitário.

Apesar de não ser a melhor forma de disposição dos resíduos (melhor aproveitamento), essa configuração mostra-se mais adequada tanto em termos energéticos como ambientais, já que o aterro sanitário quando bem projetado e construído evita poluição do lençol freático, proliferação de agentes patogênicos e diminuição da emissão de gás metano, principal componente do biogás, que neste caso ao ser coletado, pode tanto ser utilizado para alimentar a frota coletora de resíduos do município em questão, ou quando purificado e encaminhado a um conjunto moto-gerador produzir energia elétrica.

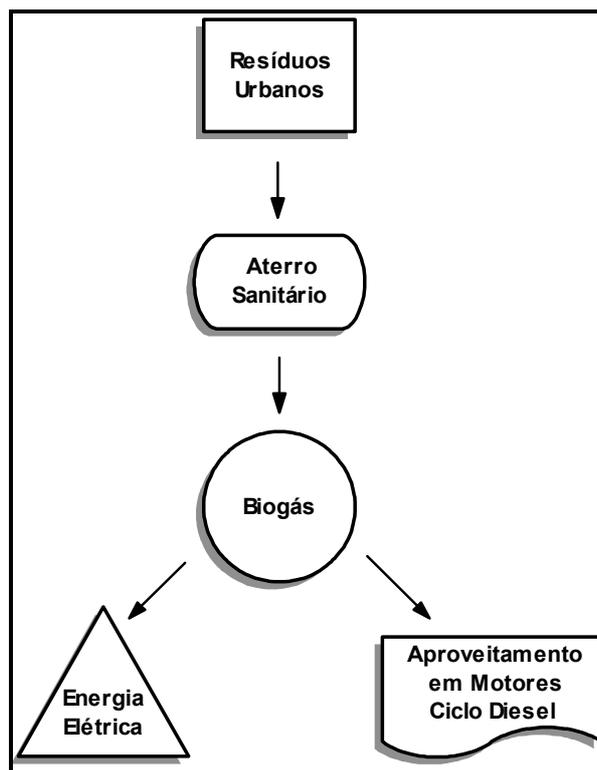


Figura 5.6 - Fluxograma B – Disposição dos resíduos

Essa configuração quando aplicada ao município de Itajubá nos fornece aproximadamente 11,7 GJ (3250 kWh) diários de energia elétrica produzida a partir do biogás, que poderia ser aproveitada dentro do próprio aterro sanitário para reciclagem dos plásticos do município ou um aproveitamento total do biogás nas frotas coletoras de resíduos urbanos no município, já que estes necessitam no total em média 573 Nm³/dia de biogás, ou ainda realizar as duas ações, diminuindo a proporção diesel: biogás nos caminhões, o que traria uma série de benefícios simultâneos, como por exemplo, uma utilização de 50% de biogás, daria pra alimentar um caminhão e ainda reciclar os plásticos, economizando assim 38 litros de diesel diários.

Alguns municípios adotam como parte do sistema de gestão dos resíduos urbanos a triagem pós-coleta como mostra a Figura 5.7.

Papel, vidros, plásticos, metais entre outros, 38% em peso do total produzido, ao retornarem para a cadeia produtiva para serem reciclados com a energia advinda de geração alternativa e descentralizada reduzem gastos públicos, permitindo a aplicação dos recursos financeiros em áreas de maior relevância social, tais como educação e saúde. Além disso, o reaproveitamento dos materiais diminui a quantidade de resíduos destinada a aterros sanitários, aumentando sua vida útil e evitando a ocupação de novas áreas para esta finalidade, aliás, cada vez mais escassas em regiões urbanizadas.

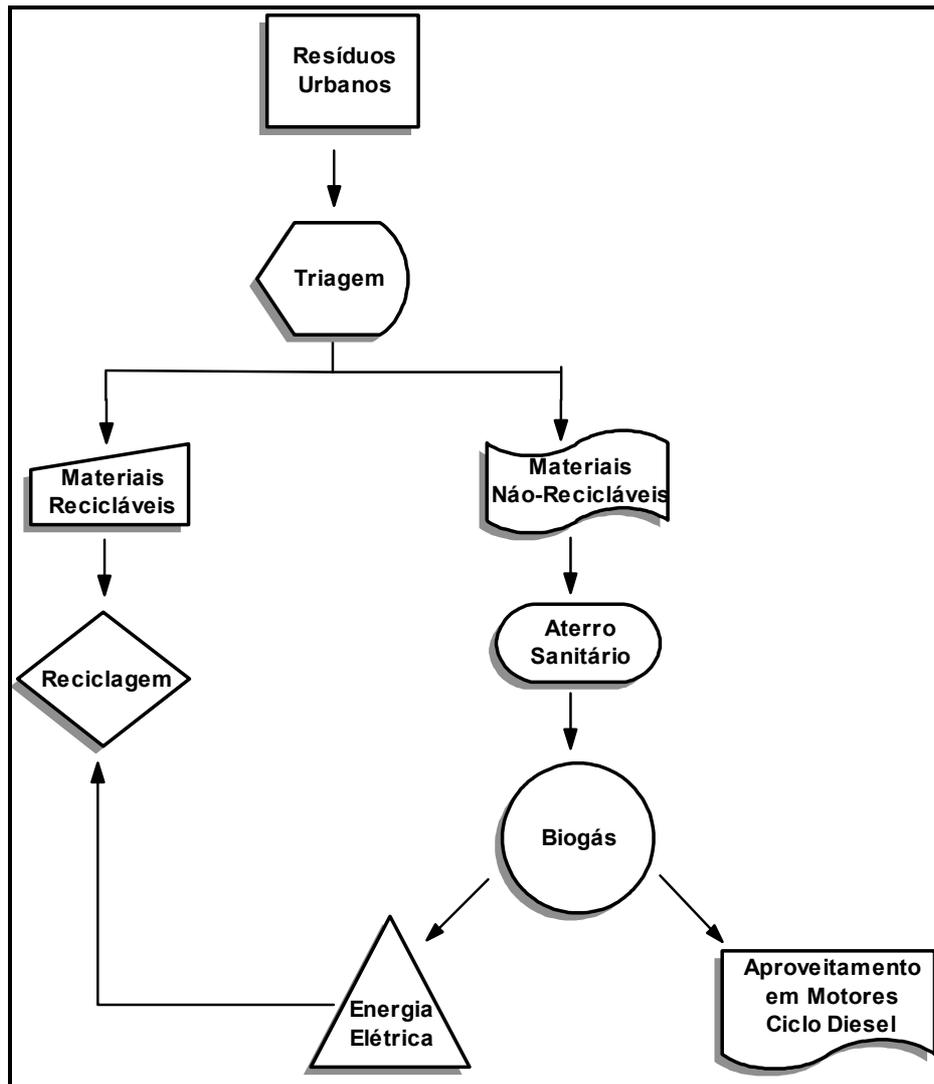


Figura 5.7 - Fluxograma C – Disposição dos resíduos

Uma parcela mínima dos municípios destina seus resíduos para reciclagem, cerca de 135 municípios com sistemas de coleta seletiva no país, de acordo com o CEMPRE (2004), pela alta demanda de energia convencional que esse processo exige, o que acaba tornando inviável a reciclagem. Dessa maneira o reaproveitamento energético para reciclar plásticos pós-consumo demonstrado no fluxograma acima (Figura 5.7) faz com que a reciclagem torna-se viável economicamente.

Podemos neste tipo de arranjo para destinação e/ou tratamento dos resíduos observarmos além de uma revalorização dos materiais através da reciclagem e conseqüentemente um ganho econômico, ambiental e energético por exaurir menos os recursos naturais e poupar energia na fabricação de novos materiais a partir da matéria prima virgem, observarmos a utilização da energia elétrica produzida através do biogás, como mostrada também no fluxograma B (Figura 5.6), para atender a demanda energética da linha de reciclagem desses materiais pré-separados, além da utilização de

parcela do biogás não convertido em energia elétrica como combustível para motores do ciclo diesel.

No local de estudo, o biogás gerado no aterro sanitário é suficiente para produzir energia elétrica (11,7 GJ diários) para manter duas linhas de reciclagem de todos os plásticos pós-consumo do município, com gasto equivalente a 11,2 GJ (3111 kWh) diários, utilizando apenas a tecnologia do gás de lixo.

A reciclagem de plástico proporciona, ainda, economia de petróleo, que é um recurso natural não renovável (1kg de plásticos equivale a 1 litro de petróleo), pois utiliza a metade do necessário para a produção a partir de matéria-prima primária segundo Calderoni (2003). Dentre as vantagens da reciclagem do plástico, deve-se incluir, ainda, o aumento da vida útil e a melhoria da compactação dos resíduos urbanos e do sistema de drenagem de líquidos nos aterros, visto o volume que esse material ocupa.

Outra forma de gestão dos resíduos adotada recentemente é a mostrada no fluxograma D (Figura 5.8).

Neste tipo de configuração ocorre a coleta seletiva dos resíduos no município, onde os responsáveis pela geração destes os segregam em resíduos secos e úmidos, facilitando assim seu encaminhamento ao local de disposição e tratamento adequados.

Através da coleta seletiva pode se obter maior eficácia no aproveitamento dos resíduos, já que estes sendo separados antes da coleta convencional evita serem contaminados e conseqüentemente descartados nos aterros sanitários, contribuindo assim para proteção ambiental e a utilização dos bens renováveis.

Com a separação do material úmido (matéria orgânica), este pode ser encaminhado ao biodigestor que assim como ocorre nos aterros sanitários há aproveitamento do biogás resultante da decomposição anaeróbica tanto para alimentar motores do ciclo diesel, o que no caso de Itajubá-MG seria suficiente para alimentar toda a frota, bem como para produzir energia elétrica, como mostrado nos casos anteriores, e ainda possui a vantagem de produzir como subproduto do processo um composto, que segundo muitos especialistas é tido como um dos melhores fertilizantes, tanto pela alto grau de absorção dos nutrientes necessários por parte das plantas, como pela seu baixo valor econômico.

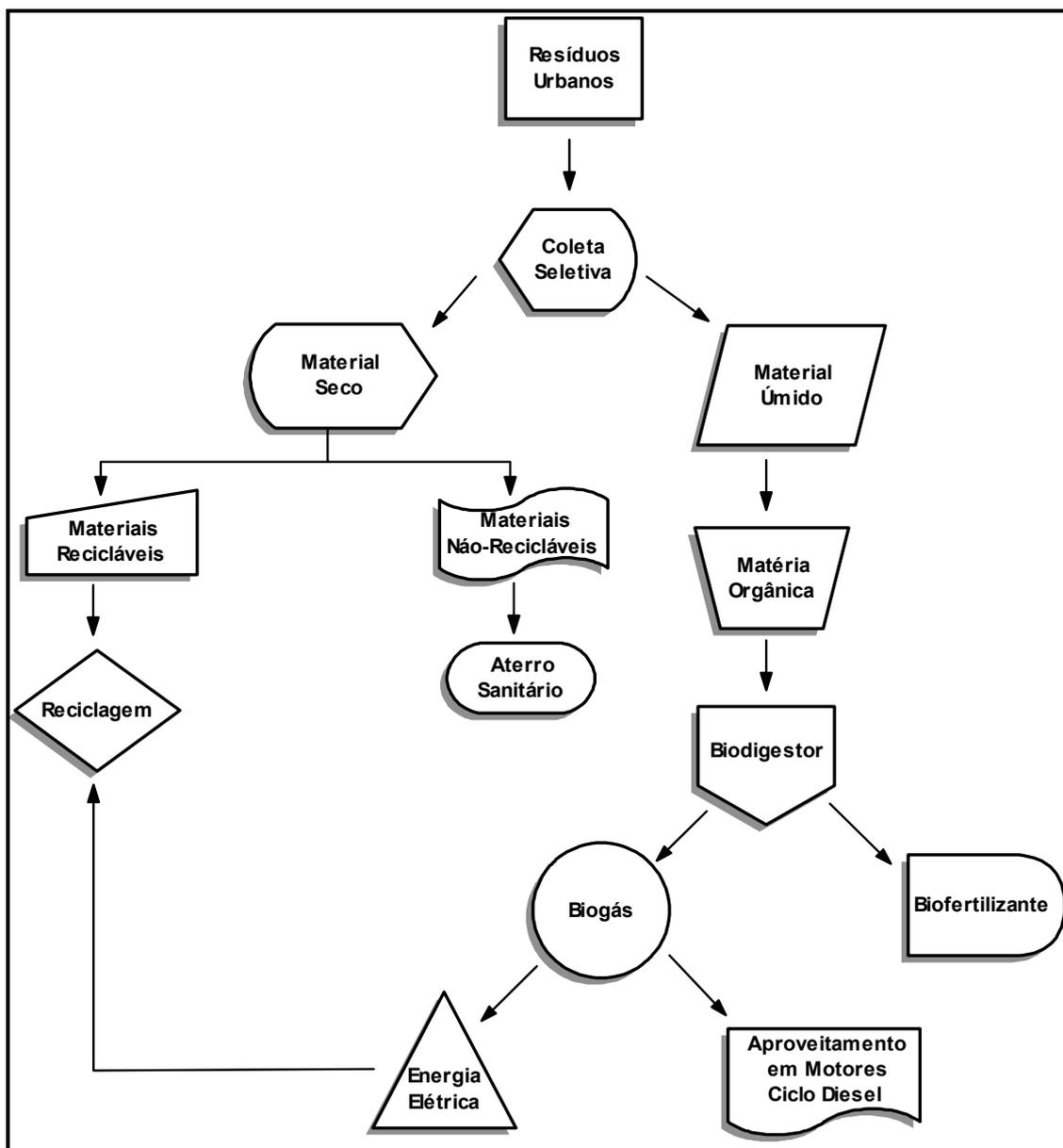


Figura 5.8 - Fluxograma D – Disposição dos resíduos

A biodigestão da matéria orgânica em Itajubá, nos fornece um ganho em relação ao potencial de produção de biogás e conseqüentemente na produção de energia elétrica, aproximadamente 14,9 GJ (4139 kWh) diários, valor um pouco acima de que quando utilizado a técnica do gás de lixo por diversos fatores, entre eles a facilidade de controle do processo em biodigestores.

A energia elétrica produzida além de manter as linhas de reciclagem dos plásticos pós-consumo do município, os 3,7 GJ (1028 kWh) restantes ainda podem serem utilizados para outros fins, tais como, reciclagem de outros materiais, o que aumentaria o volume de matéria-prima recuperada pela reciclagem dos resíduos que se encontra muito abaixo das necessidades da indústria, embora haja uma tendência de crescimento. Mais

do que uma forma de responder ao aumento da demanda industrial por matérias-primas, a reciclagem é uma forma de reintroduzir o lixo no processo industrial.

O biofertilizante, proveniente do processo de biodigestão acoplado na Figura 5.8, apesar de não trazer benefícios energéticos e possuir para seu processamento um elevado custo de investimento inicial, é de grande importância para a agricultura, por ser um composto orgânico, que pode ser aplicado ao solo para melhorar suas características sem ocasionar riscos ao meio ambiente, devido à inativação de patógenos entre outros benefícios, agregando novamente valor econômico e ambiental ao resíduo que seria descartado sem nenhum tratamento.

Como o processo de biodigestão é mais bem sucedido com matéria orgânica previamente separada o ideal para a cidade de Itajubá seria utilizar os resíduos provenientes de feiras de alimentos (Ceasa), por não possuir materiais que diminuam a eficiência do processo ou até mesmo provocar a contaminação do biocomposto formado.

O fluxograma E (Figura 5.9), mostra a incorporação e adoção de uma nova tecnologia para gestão e reaproveitamento energético dados aos resíduos nos municípios, a incineração.

Apesar de ser um sistema que necessita de altos investimentos e controle ambiental rigoroso quando se trata dos gases poluentes emitidos no processo, este pode gerar energia elétrica e térmica, além de destruir todo material perigoso, que no aterro causaria problemas, necessitando para isso de pequenas áreas de instalação.

Neste sistema temos um melhor reaproveitamento energético advindo dos resíduos, tanto por parte da geração proveniente da matéria orgânica que antes eram encaminhados apenas aos biodigestores e aterros sanitários, como da porção seca contaminada com o material orgânico encaminhada aos incineradores.

A porção dos resíduos de Itajubá que podem ser incinerados, equivalente a 36 toneladas diárias, além de nos fornecer aproximadamente 158,2 GJ de energia térmica que poderia ser utilizada em aquecimento, processos de secagem, entre outros, ainda resulta em uma quantidade média de energia elétrica de 43,1 GJ (11972 kWh) ao ser utilizado em um sistema caldeira-turbina a vapor-gerador.

Se utilizarmos essa forma de gestão dos resíduos de Itajubá, obteremos um ganho de energia elétrica, quando comparada à tecnologia do Gás de lixo, e térmica advindas do incinerador além de um ganho ambiental por menos resíduos serem encaminhados ao aterro sanitário sem nenhum valor agregado, gerando poluição e demandando áreas cada vez maiores.

Portanto apesar da incineração nos gerar energia térmica e elétrica, além de suas demais vantagens, essa configuração seria melhor aproveitada utilizando apenas a incineração para materiais contaminados com material orgânico e biodigestores para a porção úmida (matéria orgânica) em si, principalmente pelo alto volume de gases poluentes que deixariam de ser lançados a atmosfera quando comparada a biodigestão.

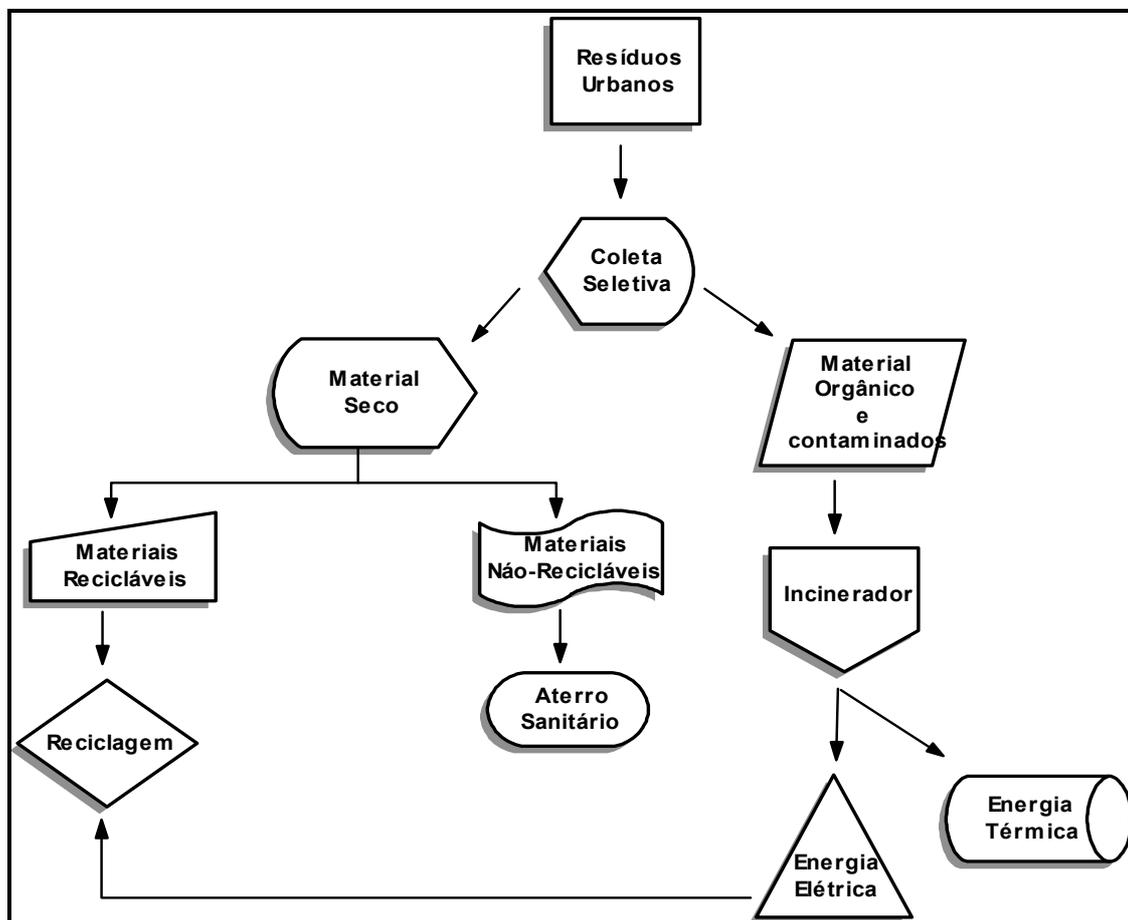


Figura 5.9 - Fluxograma E – Disposição dos resíduos

Os materiais devidamente separados pela coleta seletiva presentes nos resíduos urbanos, podem juntamente serem encaminhados além da reciclagem para o incinerador ou ainda receber outro tratamento, a gaseificação (Figura 5.10).

Esse processo, assim como na incineração, nos fornece energia elétrica e térmica, mas com alguns diferenciais: menos poluição atmosférica devido as tecnologias de controle de entrada de ar nos gaseificadores, menos controle na entrada dos resíduos e uma maior produção energética dependendo do tipo de resíduo a ser gaseificado com menor volume deste sendo enviado ao processo.

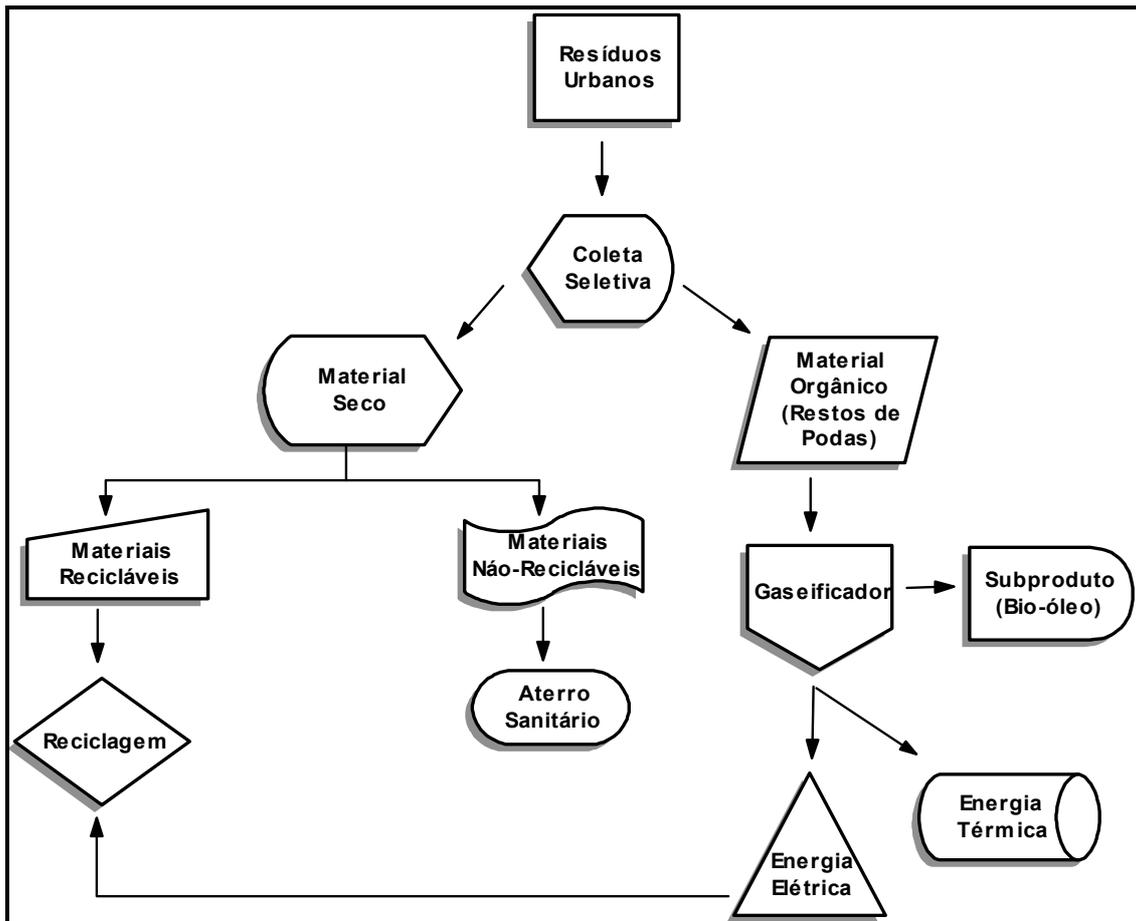


Figura 5.10 - Fluxograma F – Disposição dos resíduos

Quando aplicada a técnica para o estudo de caso, levando em consideração apenas a gaseificação de restos de podas, o processo nos fornece 35,7 GJ de energia térmica e 12,5 GJ (3472 kWh) diários de energia elétrica, considerando nesse caso o uso de um conjunto moto - gerador por esse nos oferecer uma maior eficiência energética quando comprado a turbina a gás e também uma maior viabilidade econômica em relação à mesma.

Pelo estudo pode-se perceber que além de uma maior viabilidade do processo de gaseificação quando comparado incinerador, este ainda fornece uma maior quantidade de energia elétrica, quando se considera a mesma quantidade de material (kg diários) sendo enviada aos dois processos separadamente.

Por outro lado, ao ser utilizado a incineração para processar demais materiais e o gaseificador para tratamento e geração de energia apenas com restos de podas, esse dois processos conjuntamente teríamos um ganho em média de 11,4 GJ (3167 kWh) de energia pra ser aproveitada na reciclagem.

Já o bio-óleo, subproduto proveniente da gaseificação, quando tratado e purificado pode entre outras finalidades ser enviado ao incinerador para ser processado e desta forma gerar energia térmica e elétrica.

De acordo com os cálculos realizados e levando em consideração a quantidade de energia elétrica e térmica advindos das tecnologias descritas acima, temos que a melhor maneira de se dispor os resíduos urbanos de Itajubá-MG, levando em consideração o reaproveitamento energético para a reciclagem dos plásticos pós-consumo, bem como uma gestão mais eficiente em termos ambientais, é a descrita pelo fluxograma G, (Figura 5.11).

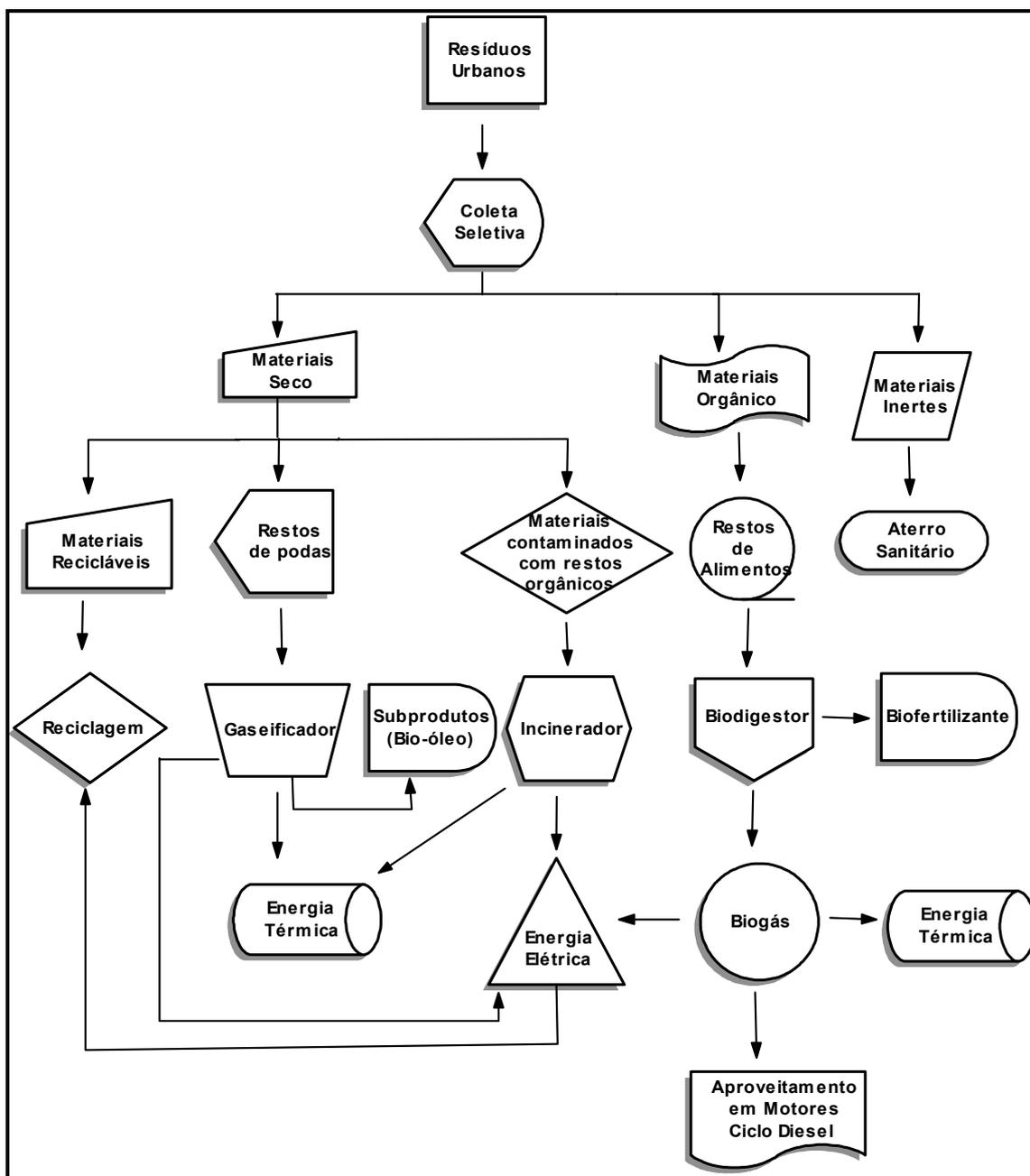


Figura 5.11 - Fluxograma G – Gestão dos resíduos para Itajubá - MG

Dessa maneira, a matéria orgânica, constituída de restos de alimentos, seria encaminhada aos biodigestores, o que geraria aproximadamente 12,9 GJ (3583 kWh) de energia elétrica, os restos de podas seria encaminhada ao gaseificador, gerando 12,5 GJ de eletricidade e os materiais contaminados com material orgânico e tóxicos levados aos incineradores, o que geraria 11,2 GJ (3111 kWh).

Por meio dessa configuração, a cidade de Itajubá-MG, geraria através dos seus resíduos em média 36 GJ (10000 kWh) de energia elétrica, suficiente (11,2 GJ diários) para reciclar os resíduos plásticos pós consumo do município, o que antes não era feito devido ao alto valor econômico gasta nessa reciclagem quando se utilizava a energia convencional advinda das concessionárias, e ainda um aproveitamento de 24,8 GJ (6889 kWh) na reciclagem de outros materiais além da obtenção de biofertilizante, que poderia ser utilizado na agricultura e outros combustíveis como o bio-óleo.

O aterro sanitário nesse caso, apesar de não gerar energia por possuir uma quantidade mínima ou até mesmo zero de matéria orgânica (que geraria o biogás), é de grande importância para deposição dos resíduos inertes como os RCC.

6 - CONCLUSÕES

O aumento dos resíduos urbanos gerados a cada dia, aliada a escassez de energia para um tratamento adequado dos mesmos, faz com que pesquisas sobre geração de energia utilizando resíduos sólidos como matéria prima venham realizando significativos avanços, como alternativa, frente aos métodos tradicionais.

A questão ambiental exige a pesquisa e a aplicação dos métodos tidos como alternativas necessárias, devido ao aumento da produção de resíduos sólidos, a escassez dos combustíveis fósseis, principalmente petróleo, no mundo, bem como os problemas aliados ao uso dessas fontes convencionais de energia.

O uso de energia proveniente dos resíduos urbanos, além das vantagens já descritas, vem de encontro à economia de combustível fóssil (fonte não-renovável) e à redução do risco de déficit e melhora nas estimativas a longo prazo para a sustentabilidade energética do país.

No Brasil ainda são poucas as iniciativas de utilização desse tipo de energia, principalmente pelos elevados custos de implantação, operação, manutenção destas tecnologias, e também por existir uma grande pressão por parte das empresas exploratórias dos combustíveis fósseis, para não perderem mercado.

A reciclagem de plásticos utilizando energia elétrica “reciclada” dos resíduos urbanos é uma alternativa viável para minimizar o impacto ambiental causado pela disposição destes materiais em locais de descarte, bem como pelo alto custo da energia elétrica convencional utilizada no processo. Este tema tem tornado cada vez mais importante, pois, além dos interesses ambientais (economia de energia e poluição) e econômicos, começam a surgir legislações cada vez mais rígidas no sentido de minimizar e/ou disciplinar o descarte dos resíduos sólidos.

Dentre os processos de reciclagem, a mecânica é a mais utilizada no Brasil devido a vários fatores como custo de mão-de-obra, baixo investimento para instalação de uma planta de reciclagem, grande volume de polímero pós-consumo, entre outros, ao contrário dos países da Europa e do Japão que utilizam a reciclagem química e energética, majoritariamente.

Para que o município de Itajubá siga o caminho do desenvolvimento sustentável, é vital que sejam valorizadas as fontes de energia renováveis, menos poluidoras além de uma melhor gestão dos resíduos urbanos. Desta forma, as tecnologias de geração e conversão energética avaliadas no estudo enquadram-se nos quesitos de sustentabilidade e preservação ambiental, tendo em vista a grande quantidade de emissões de metano, proveniente da decomposição anaeróbia do material orgânico,

principalmente restos de alimentos, que deixariam de ser lançadas na atmosfera, quando reutilizado para geração de energia elétrica, sendo esta através de aterros sanitários ou biodigestores, e a menor contaminação pela disposição inadequada dos resíduos urbanos no município.

A utilização de processos de incineração, para tratamento de resíduos contaminados com matéria orgânica e tóxicos além da gaseificação para processar restos de podas e conseqüente produção de energia térmica e elétrica mostram-se também bastantes eficientes para solucionar a problemática dos resíduos e conseqüentemente a geração alternativa e descentralizada de energia.

O estudo possibilitou analisar dados bem como a composição física dos resíduos, o qual permitiu encontrar o percentual médio de plásticos (12,9%), matéria orgânica (41,9%), entre outros, dispostos diariamente pela população envolvida, bem como a determinação da energia térmica e da energia elétrica “reciclada” a partir destes que seriam descartados sem nenhum aproveitamento.

O levantamento de dados sobre equipamentos utilizados na reciclagem de plásticos foi essencial para determinação da demanda energética necessária ao processo tanto para plástico mole e PET (2,12 GJ/tonelada ou 589 kWh/tonelada) quanto para plástico duro (0,11 GJ/tonelada ou 30,6 kWh/tonelada).

A energia elétrica gerada pela utilização do biogás, ao aplicar um estudo de caso no município de Itajubá-MG, possível de se obter no aterro sanitário (11,7 GJ ou 3250 kWh diários) e se for utilizado biodigestores (14,9 GJ 4139 kWh diários), é suficiente para suprir a demanda energética necessária para reciclagem dos plásticos duros (0,17 GJ/dia), bem como os plásticos moles e PET (10,98 GJ diários) descartados diariamente neste município.

Em posse da quantidade de biogás produzida e da energia elétrica gerada pelas tecnologias do gás de lixo ou utilizando biodigestores separadamente, para processar toda matéria orgânica (restos de alimentos e podas), pode-se diagnosticar que há possibilidade da implantação de duas linhas de produção para reciclar plásticos pós-consumo (6,83 toneladas.), que iriam para o aterro controlado da cidade diariamente: uma de plásticos mole e PET e uma de plástico duro, linhas essas que consomem em média no total 2,23 GJ (619 kWh) por tonelada de plástico reciclada, pela análise feita em relação ao gasto energético em cada equipamento utilizado nas mesmas.

Ao se utilizar apenas os biodigestores, por serem mais eficientes, para reciclar somente restos de alimentos e aterros para disposição de materiais inertes, sobrariam 1,7 GJ (472 kWh) de energia elétrica que poderiam ser aproveitada com iluminação ou

outras formas, e ainda como produto final obter o biofertilizante que poderia ser utilizado para aumentar a fertilidade do solo.

A maior eficiência dos biodigestores pode ser explicada pela facilidade de controle das características físicas, químicas e microbiológicas, o que não ocorre nos aterros sanitários. O biodigestor torna-se ainda mais viável em termos energéticos quando há seleção do material orgânico a ele enviado, já que certos materiais como os advindos dos restaurantes não são bem biodigeridos pela grande quantidade de conservantes presentes nesses resíduos.

Ao considerarmos aterro sanitário e biodigestor simultaneamente para produção de energia na cidade referente ao estudo de caso, obtivemos uma perda de energia em relação à utilização de biodigestores separadamente, o que nos dá a opção de utilizarmos o aterro sanitário apenas pra deposição de materiais inertes, tais como resíduos de construção civil.

A utilização do biogás em motores diesel, tal como em frotas coletoras de resíduos, além de diminuir o consumo de diesel utilizado, acaba por acarretar ganhos econômicos e ambientais para o município envolvido, tais como mitigação de gases de efeito estufa e redução do consumo de diesel, já que usaríamos apenas 30% deste, sendo os outros 70% alimentado por biogás que além de ser barato, a queima deste em motores de combustão interna ainda dispõe de calor residual.

Para Itajubá é necessário em média 573 Nm^3 de biogás diariamente para atender a demanda dos seis caminhões coletores de resíduos que percorrem uma média de 50 km diários cada um, o que mostra não ser possível atender toda a frota e ainda obter energia elétrica suficiente para manter as linhas de reciclagem de plásticos pós-consumo.

Utilizando-se da incineração para tratamento de todo material orgânico, bem como para aqueles contaminados, além de aumentar a vida útil do aterro sanitário pela menor quantidade de resíduos a ele encaminhada e necessitar de menores áreas para sua instalação quando comparado a este, nos fornece aproximadamente 43,1 GJ (11972 kWh) de energia elétrica e 158,2 GJ de energia térmica que pode ser utilizada para outros fins, além de geração de energia elétrica, tais como aquecimento e secagem.

A gaseificação através de um sistema moto-gerador nos fornece uma maior eficiência quando comparada a incineração, ao tratar 2 toneladas diárias de material seco (resíduos de podas) presentes nos resíduos urbanos de Itajubá. Por esse processo obtivemos 35,7 GJ referente à energia térmica e aproximadamente 12,5 GJ (3472 kWh) de energia elétrica diariamente.

A implantação do projeto de reciclagem através do aproveitamento energético dos resíduos urbanos em Itajubá trará benefícios sócio-ambientais à cidade do estudo e conseqüentemente a região em torno do município. Dentre estes benefícios podem ser apontados a geração de empregos diretos e indiretos principalmente no processo de reciclagem, redução de odores no aterro, iluminação, melhor gestão dos resíduos sólidos, mitigação de gases de efeito estufa entre outros.

Ao analisar as diversas configurações existentes para destinação dos resíduos urbanos e reaproveitamento energético para geração de energia elétrica e térmica para a cidade de Itajubá e conseqüente reciclagem dos plásticos pós-consumo, temos que a utilização de biodigestores para tratamento dos restos alimentares e obtenção de fertilizante rico em nutriente para ser utilizado como adubo; o gaseificador utilizado para tratamento dos resíduos de podas e obtenção de subprodutos como o bio-óleo para ser utilizados como combustível; o uso de aterros sanitários para deposição apenas dos materiais inertes; e por fim, a incineração para processamento de materiais contaminados e com resíduos orgânicos, todas para produção de energia elétrica e térmica, seria a maneira mais viável ambientalmente, economicamente e energeticamente (36 GJ ou 10000 kWh diários) de disposição e tratamento dos resíduos urbanos de Itajubá-MG.

O estudo realizado, não trata apenas de discutir novas tecnologias para geração de energia alternativa e/ou especificar uma melhor destinação dos resíduos urbanos, mas sim, de discutir uma melhor gestão dos resíduos urbanos baseado em questões energéticas, sociais e ambientais, pois a disposição dos rejeitos nada mais é do que a etapa final de um grande ciclo: aquele em que os produtos utilizados pelo homem para suprir suas necessidades vitais são devolvidos e reintegrados ao ambiente de onde foram retirados, através de técnicas compatíveis, econômicas e ambientalmente favoráveis

A partir da caracterização dos resíduos sólidos urbanos e do plano de gestão estudado, podem-se propor alternativas à prefeitura local para gerenciar todos resíduos produzidos, e ainda mobilizar a população para execução das mesmas, mas tudo isso só será possível com participação dos responsáveis no âmbito de querer solucionar o problema e oferecer uma melhor qualidade social a população.

As idéias apresentadas neste trabalho, bem como a metodologia podem vir a ser aplicadas ou até mesmo sugeridas a outros municípios que, independentemente do seu porte, planejem realizar ações que visem dar uma solução adequada aos resíduos urbanos e realizar ações par um reaproveitamento energético, reaproveitando os resíduos, principalmente ao plástico o qual é insustentável sua disposição em lixões e aterros pelo grande volume que estes ocupam e pelo elevado tempo de decomposição.

Portanto, um modelo de gestão, descentralizada e com participação da sociedade constitui-se numa nova via para o gerenciamento adequado de resíduos urbanos no país tanto em termos econômicos como social, ambiental e energético, pelo reaproveitamento energético advindos dos resíduos urbanos.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**: NBR 8419, Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Resíduos Sólidos – Classificação**: NBR 10.004, Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Incineração de resíduos sólidos perigosos – Padrões de desempenho**: NBR 10.007, Rio de Janeiro, 1989.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Resíduos Sólidos – Amostragem de resíduos**: NBR 10007, Rio de Janeiro, 2004.
- ABEPET, **Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET, Reciclagem de Embalagens PET**. Disponível em: <www.abepet.com.br>, acesso em setembro 2007.
- ABRE, **Associação Brasileira das Indústrias de Embalagens**. Disponível em: <www.abre.org.br>, acesso em outubro 2007
- ALVES, J. W. S., **“Diagnóstico da Repercussão e Uso Energético do Biogás Gerado pela Digestão Anaeróbia de Resíduos”**. Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2000.
- AMBIENTE BRASIL, **“Coleta e disposição final do lixo”**. Disponível em: <www.ambientebrasil.com.br>, acesso em abril de 2008.
- ASHBY, M., **“Material Selection Charts”**. 2003. Disponível em: <[www.materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive charts](http://www.materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts)>, acesso em novembro de 2003.
- BANCO MUNDIAL, **“The World Bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean”**. 2003.
- BARBOSA, L.T., **“Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos no Norte de Minas Gerais: Estudo Relativo à Implantação de Unidades de Reciclagem e Compostagem a partir de 1997”**. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, 2004.
- BARRERA, P., **“Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural”**. p. 11, São Paulo, 1993.

- BARRIO, M.; FOSSUM, M.; HUSTAD, J.E., **“A Small-scale Stratified Downdraft Gasifier Coupled to a Gas Engine for Combined Heat and Power Production”**. Norwegian University of Science and Technology, Departamento of Thermal Energy and Hydro-Power, 2000.
- BEN/MME, **Balço Energético Nacional / Ministério de Minas e Energia**, 2007, disponível em <www.mme.gov.br>, acesso em outubro de 2007.
- BENINCASA, M.; ORTOLANI, A.F.; JUNIOR, L., **“Biodigestores convencionais”**. Jaboticabal, FUNEP, 25p., 1991
- BORBA, S.M., **“Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso”**. Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos para obtenção do grau de mestre em Ciências em Engenharia Civil, 2006.
- BRASILPLAST, **“Feira Internacional da Indústria do Plástico - Plástico Moderno”**. n. 340, fevereiro de 2003.
- BRASMETANO, **“Motogeradores a biogás”**. Disponível em: <www.brasmetano.com.br>, acesso em maio de 2008.
- CAPSTONE, **“Authorized Service Provider Training Manual”** Capstone Turbine Corporation, Califórnia, 2001.
- CEMPRE, Compromisso Empresarial para a Reciclagem. **“CEMPRE Informa”**. nov./dez., São Paulo, 2004.
- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **“Levantamento e Avaliação de Tecnologias de Reciclagem e/ou Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos”**. São Paulo, 1990.
- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **“Emissões de metano no tratamento e na disposição de resíduos. Ministério de ciência e tecnologia”**. São Paulo, 2002.
- CIÊNCIA HOJE, **“Bio-óleo pode substituir diesel na geração de energia Degradação térmica de resíduo agrícola em reator tem benefícios ambientais e sociais”**. Disponível em: <www.cienciahoje.uol.com.br>, acesso em março de 2008.

- CONSONI, A. J.; SILVA, I. C.; GIMENEZ, F., “**Disposição final do lixo**”. In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT; Compromisso Empresarial para Reciclagem - CEMPRE. (Org.). Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 2a ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2001, v., p. 251-290.
- COPAM, Conselho Estadual de Política Ambiental, **Licenciamento Ambiental de Sistema Adequado de Disposição Final de Lixo**: Deliberação Normativa nº 052, Minas Gerais, 2001.
- COPPE, “**Incineração de resíduos sólidos urbanos para evitar a formação de metano em aterro e geração de eletricidade com aproveitamento energético para autoconsumo**”. UFRJ/COPPE, 14 p., Rio de Janeiro, 2004.
- COSTA D. F., “**Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento de Esgoto**”. Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 2006.
- COSTA, D.F.; FERLING, F.F.; Nogueira, F.G., “**Produção de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos**”. Monografia apresentada à disciplina de conclusão de curso (TGI) para obtenção da graduação em Engenharia Química da Fundação Armando Álvares Penteado (FAAP), 2001.
- COUTINHO, M.; MATA P., “**Monitorização Ambiental de uma Unidade de Incineração de Resíduos**”. Instituto do Ambiente e Desenvolvimento, Campus Universitário, 2003.
- CRUZ, M.L.F.R., “**A Caracterização de Resíduos Sólidos no Âmbito da sua Gestão Integrada**”. Braga. 219 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Ciências, Universidade do Minho (Portugal), 2005.
- DIAS, G. F., “**Educação Ambiental: Princípios**”. Editora Gaia, 6º ed. Revisada e Ampliada, São Paulo, 2000.
- DUSTON, T.E., “**Recycling Solid Waste – The First Choice for Private and Public Sector Management**”. Quorum Books, London, 1993.
- ENERGIA RENOVÁVEL, “**Energia renovável e desenvolvimento**”. Disponível em <www.energiarenovavel.org.br>, acesso em: Outubro de 2008.
- ENSINAS, A. V., “**Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas – SP**”. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2003.

- EPA, **“Options for Reducing Methane Emissions Internationally”**. Volumes I-II, International Opportunities for Reducing Methane Emissions, EPA, Estados Unidos, 2007.
- FARRET, F. A., **“Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica”**. Editora UFSM, 1999.
- FERRAZ, J.M.G. & MARRIEL, I.E., **“Biogás: fonte alternativa de energia. Sete Lagoas”**. EMBRAPA-CNPMS, 27p., 1980.
- FERREIRA J.A.; ANJOS L.A., **“Aspectos de saúde pública coletiva e ocupacional associados à gestão dos resíduos sólidos municipais”**. Cadernos de Saúde Pública 2001.
- GASPAR, R. B. L., **“Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR”**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis, 2003.
- GEDEA, Grupo de Estudos e Desenvolvimento em Educação Ambiental, **“Tipos de reciclagem”**. Disponível em <www.cefetrs.edu.br>, acesso em: agosto de 2008.
- GONÇALVES, A.T.T., **“Potencialidade Energética dos Resíduos Sólidos Domiciliares e Comerciais do Município de Itajubá-MG”**. Dissertação apresentada a Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia da Energia, 194p., Itajubá, 2007.
- GRIPP, W. G., **“Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo”**. São Carlos: 1998. 208 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **“Anuário de 2000”**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>, acesso em novembro de 2007.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **“Anuário de 2007”**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>, acesso em setembro de 2008.
- INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, **“Biodigestor Gera Energia a partir do Lixo “In Natura””**. Disponível em: <www.inovacaotecnologica.com.br>, acesso em outubro 2007.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, **“IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas”**. Inventories. OECD, IEA, Revised, Bracknell, Reino Unido, 1996.

- IPT / CEMPRE, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, **“Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado”**. 2ª ed., 370p., São Paulo, 2000.
- JARDIM, N.S., **“Lixo Municipal – Manual de Gerenciamento Integrado”**. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas; CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem, 1º ed., São Paulo, 1995.
- JUNKES, M. B., **“Procedimentos para aproveitamento de resíduos sólidos urbanos em municípios de pequeno porte”**. Dissertação apresentada a Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção, Santa Catarina, 2002.
- KANAYAMA, P.H., **“Minimização de Resíduos Sólidos Urbanos e Conservação de Energia”**. Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre, São Paulo, 1999.
- KIE, Kie máquinas e plásticos Ltda. Disponível em: <www.kie.com.br>, acesso em setembro de 2008.
- LAENDER, A.T.; RAMIRES, J.C.M.; RUAS, M.A.; MOREIRA, R.C.J., **“Uso do biogás”**. Disponível em: < www.demec.ufmg.br >, acesso novembro de 2008. 20/11/08. 2000.
- LIZÁRRAGA, A., **“Introdução a Gestão Ambiental dos Resíduos”**, Revista Fármacos & Medicamentos, Editorial Racine, 2005.
- LUFTECH, Soluções Ambientais, **“Catálogo e Manual de Incineradores, 2000”**. Disponível em <www.luftech.com.br>, acesso em setembro de 2008.
- MACHADO, A.V.; FILHO, D.A.P., **“Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos em Niterói”**. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999.
- MARRIEL, I.E., **“Biogás: Fonte Alternativa de Energia”**. EMBRAPA/CNPMS, Sete Lagoas (MG). 27p, 1996.
- MARTINS, A.H.M.C.; VELHOSO, C.H.V.; CHENNA, S.I.M., **“Caracterização Qualitativa e Quantitativa dos Resíduos Sólidos Urbanos em Cidade de Porte Médio – Metodologia Proposta”**. 6p. 2000.
- MARTINS, L.S., **“Geração de Energia Através de Biomassa”**. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.
- MAYSTRE, L. Y.; PICTET.J; SIMOS, J., **“Méthodes Multicritères ELECTRE”**. Lausanne, Suisse, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994.

- MMA, Ministério do Meio Ambiente, **“Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil”**. Revista do Programa de Proteção e Melhoria da Qualidade Ambiental, 2004.
- MENEZES, R.A.A.; GERLACH, J.L.; MENEZES, M.A., **“Estágio Atual da Incineração do Brasil”**. Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABLP), Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 2000.
- MORITZ, J.P., **“Current Legislation Governing Clinical Waste Disposal”**. J. Hosp. Infect, V.30, p.521-30, 1995.
- MOUSINHO, P., **“Glossário. In: TRIGUEIRO André (Org.). Meio Ambiente no Século XXI”**. 2ª edição, Rio de Janeiro: Sextante, 2003. p 307-321, 2003.
- NETO, V. C., **“Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em Ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural”**. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 2000.
- NETTO, J. M., **“Manual de saneamento de cidades e edificações”**. 1º ed., Pini, São Paulo, 1991.
- NUNESMAIA, M. F. S., **“Lixo: Soluções Alternativas”**., 152p, Universidade de Feira de Santana, Feira de Santana, 1997.
- OLIVEIRA, L., HENRIQUES, R., PEREIRA, A., **“Coleta Seletiva, Reciclagem e Conservação de Energia”**. Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia, vol. 3, pg. 1461, Rio de Janeiro, 2002.
- OLIVEIRA, L.B., **“Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil”**. Tese Submetida ao Corpo Docente da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- OLIVEIRA, L., REIS, M., PEREIRA, A., **“Resíduos Sólidos Urbanos: Lixo ou Combustível”**. Anais XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.
- OLIVEIRA, N.A., **“A Percepção dos Resíduos Sólidos (Lixo) de Origem Domiciliar, no Bairro Cajuru – Curitiba-PR: Um Olhar Reflexivo a partir da Educação Ambiental”**. Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geografia, Curso de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2006.

- OPAS/OMS, Panamericana Organization the Health/OMS, **“The Health in the Proga”** - MA 21. Washington, D.C., 59p, 1994.
- PECORA, V., **“Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto residencial da USP - Estudo de caso”**. Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 2006.
- PEIXOTO, K.; CAMPOS, V.B.G.; ALMEIDA, M., **“A Coleta Seletiva e a Redução dos Resíduos Sólidos”**. Instituto Militar de Engenharia, 2005.
- PEREIRA, J.T. **“Gerenciamento d e Resíduos Sólidos em Municípios de Pequeno Porte”**. Revista Ciência e Ambiente, número 18, Santa Maria-RS, 42-52p., 2000.
- PERES, S., **“Gás do bagaço de cana: um combustível substituto do gás natural. Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica”**. Foz do Iguaçu, 2001.
- PINTO, A. G., **“Plástico. In: IPT/ CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado”**. p. 181-192, 1995.
- PLASNEC, Resinas Termoplásticas Ltda. Disponível em: <www.plasnec.com.br>, acesso em novembro de 2007.
- PLASTIVIDA, **“Texto sobre os tipos de plásticos”**. Disponível em: <www.plastivida.org.br>, acesso em maio de 2007.
- PMI, Prefeitura Municipal de Itajubá. Disponível em: <www.itajuba.mg.gov.br>, acesso em dezembro de 2008.
- PNSB, Pesquisa nacional de saneamento Básico, **“Comentários sobre os resultados apresentados no tema de Limpeza Urbana pelo Consultor J. H. Penido Monteiro”**. J. H. Penido Monteiro, 2004.
- REAL, J.L.G., **“Riscos Ambientais em Aterros de Resíduos Sólidos com Ênfase na Emissão de Gases”**. Tese para obtenção de grau de mestre em Ciências em Engenharia Civil, 2005.
- RECICLOTECA, **“Sistema de Tratamento de Resíduos”**. Disponível em: <www.recicloteca.org.br>, acesso em dezembro de 2007.
- ROTH, B. W.; ISAIA, E. M. B. I.; ISAIA, T., **“Destinação final dos resíduos sólidos urbanos”**. Ciência e Ambiente, n. 18, p. 25-40, 1999.
- SALGADO, M. G., **“Remediação de áreas degradadas por resíduos sólidos: estudo de caso da cidade de Americana”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil,

- área de concentração Recursos Humanos e Saneamento), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1993.
- SALOMON, K.R., **“Energia da Biomassa”**. Série de Cartilhas sobre Energias Renováveis, 42p., Itajubá, 2006.
- SILVA, J.N.; SOBRINHO, J.C.; SAIKI, E.T., **“Utilização da Biomassa na Secagem de Produtos Agrícolas via Gaseificação dos Gases Produzidos”**. Monografia de Graduação, 2001.
- SILVA, C. P. A., **“Recuperação Energética dos Resíduos de Triagem e Compostagem de Vitória”**. Monografia de Graduação, 2002.
- SINGER, P., **“Os Empresários do Lixo: um paradoxo da modernidade: uma análise interdisciplinar da questão das cooperativas de reciclagem de lixo”**. Ed. Átomo, Campinas, 2003.
- SOUZA, E.; LIMA C.; MEIRELLES, S. I., **“Reciclagem de entulho”**. CPT, Viçosa, 2000.
- STREB, C. S., **“A coleta informal de lixo no município de Campinas – SP: uma análise na perspectiva das questões energéticas e da qualidade de vida”**. Dissertação apresentada a Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Planejamento dos Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL S.A., **“Gestión Integral de Residuos Sólidos”**. Volume I e II, McGraw-Hill, 1994 a.
- TCHBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S. A., **“Composicion y Características, Generacion, Movimento y Control de los Gases de Vertedoro”**. Gestion Integral of the solids wastes, v. 1, Mc Graw Hill. 1994 b.
- TEIXEIRA, P. R. M., **“Análise do Aproveitamento Energético de Gases de Aterros Sanitários - Simulação do Processo de Combustão”**. Dissertação apresentada a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro como parte dos requisitos paa obtenção do titulo de mestre, Rio de Janeiro, 2004.
- TUPY FUNDIÇÕES LTDA, **“Formação de Auditores Internos do Sistema de Gestão Ambiental”**. Tupy Fundições Ltda, Apostila, Joinville, 2003.

- UDAETA, M.E.M., **“Planejamento Integrado de Recursos Energéticos -PIR- para o setor elétrico (pensando o desenvolvimento sustentável)”**. Tese apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de doutor, São Paulo, 1997.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency, **“Air Emission from Municipal Solids Waste Landfill – Background Information for Proposed Standards and Guidelines”**. Emission Standards Division, EPA-450/3-90-011a, USA, 1991.
- USEPA, United States Environment Protection Agency, **“A guide for methane mitigation projects – Gas to energy at landfills and open dumps”**. Draft jan/96, USEPA - Office of air and radiation, editors: Mark Orlic and Tom Kerr, 67 p., 1996.
- USEPA, United States Environment Protection Agency, **“Emerging technologies for the management and utilization of landfill gas”**. Office of Research and Development, EPA 68-D30035, 1998.
- USINA VERDE S/A, **“Tecnologia Usina Verde”**. Disponível em: <www.usinaverde.com.br>, acesso em agosto de 2008.
- VANZAN, A., **“Avaliação dos Serviços de Limpeza Urbana no Brasil”**. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República (SEDU/ PR), 141p., Paraná, 2000.
- WORLD BANK, **“Guindace Noteon Recuperation off Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills”**. 2002.

APÊNDICE

Aplicativo para Execução da Metodologia Proposta para o Reaproveitamento Energético dos Resíduos Urbanos



Universidade Federal de Itajubá
Programa de Pós Graduação em Engenharia da Energia

Quantidade Individual de Cada Componente dos Resíduos Urbanos Kg diários				Quantidade Individual de Cada Componente dos Resíduos Urbanos através da Coleta Seletiva Kg diários			
D A D O S D E E N T R A D A	Resto de Alimentos		Metal (Aço)	Resto de Alimentos		Metal (Aço)	
	Restos de Podas		Metal (Alumínio)	Restos de Podas		Metal (Alumínio)	
	Papel Reciclável		Metal não Ferroso	Papel Reciclável		Metal não Ferroso	
	Papelão		Vidro	Papelão		Vidro	
	Plástico Mole		Tapete	Plástico Mole		Tapete	
	Plástico Duro		Restos de Banheiro	Plástico Duro		Restos de Banheiro	
	PET		Estufo	PET		Estufo	
	Tetra Pak		Outros	Tetra Pak		Outros	



Universidade Federal de Itajubá
Programa de Pós Graduação em Engenharia da Energia

Quantidade Individual de Cada Componente dos Resíduos Urbanos Encaminhados para Processamento Final
kg diários

D
A
D
O
S

D
E

E
N
T
R
A
D
A

Resto de Alimentos		Metal (Aço)	
Restos de Podas		Metal (Alumínio)	
Papel Reciclável		Metal não Ferroso	
Papelão		Vidro	
Plástico Mole		Trapo	
Plástico Duro		Restos de Banheiro	
PET		Entulho	
Tetra Pak		Outros	



Universidade Federal de Itajubá
Programa de Pós Graduação em Engenharia da Energia

R
E
C
I
C
L
A
G
E
M

D
E

P
L
Á
S
T
I
C
O
S

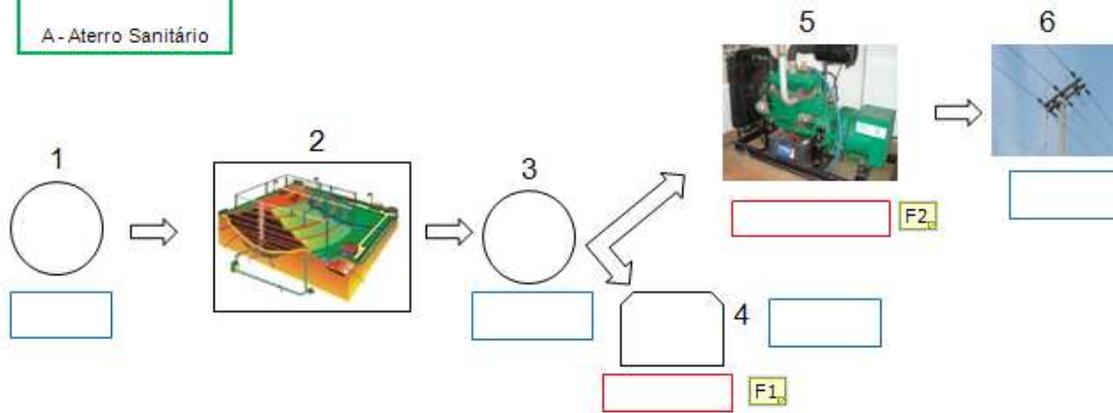
Energia Total Consumida Pelos Equipamentos de Reciclagem de Plásticos Mole e PET	GJ/tonelada	Energia Total Consumida Pelos Equipamentos de Reciclagem de Plásticos Duro	GJ/tonelada
Moinho		Lavadora	
Lavadora		Secadora	
Secadora		Granulador	
Aglutinador		Total	
Extrusora			
Granulador			
Total			

Quantidade Total de Plásticos para Reciclagem na cidade kg diários	Quantidade de Energia Elétrica para Reciclagem dos Plásticos na Cidade kWh/kg	Quantidade de Energia Elétrica Total Necessária kWh/kg
Plástico Mole		
Plástico Duro		
PET		



BIODIGESTÃO

A - Aterro Sanitário

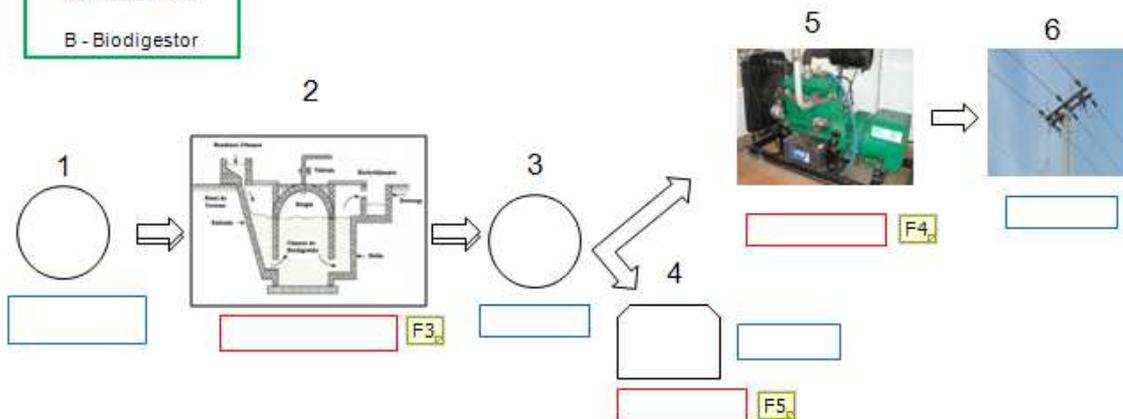


- 1 - Quantidade de Matéria Orgânica presente nos Resíduos Urbanos - kg diários
- 2 - Aterro Sanitário
- 3 - Quantidade de Biogás - Nm³ diários
- 4 - Energia Térmica Resultante do Biogás - GJ
- 5 - MotoGerador
- 6 - Energia Elétrica Produzida - GJ



BIODIGESTÃO

B - Biodigestor

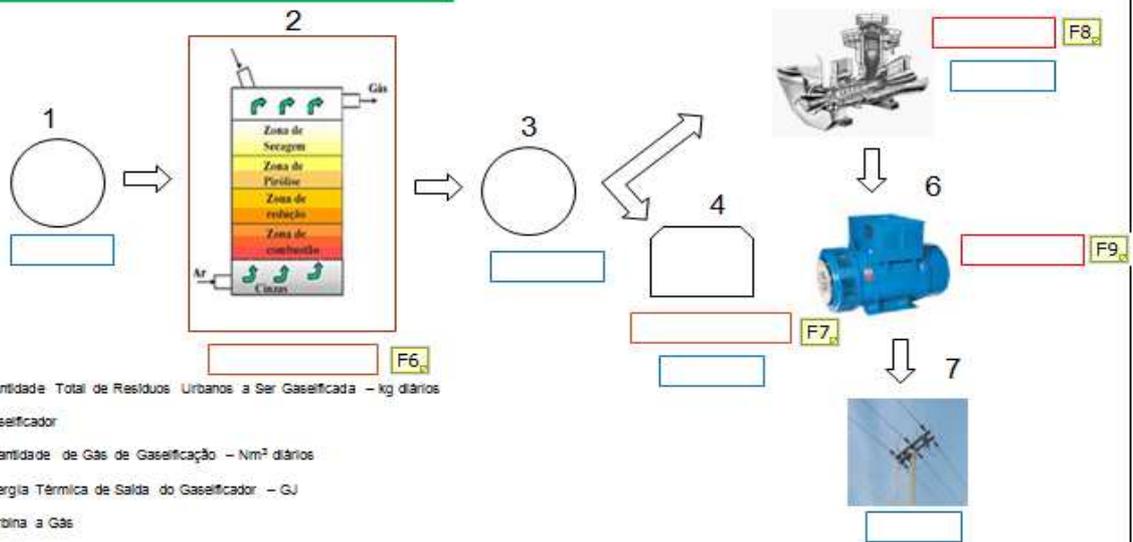


- 1 - Quantidade de Matéria Orgânica presente nos Resíduos Urbanos - kg diários
- 2 - Biodigestor
- 3 - Quantidade de Biogás - Nm³ diários
- 4 - Energia Térmica Resultante do Biogás - GJ diários
- 5 - MotoGerador
- 6 - Energia Elétrica Produzida - GJ



GASEIFICAÇÃO

A – Sistema Turbina a Gás - Gerador

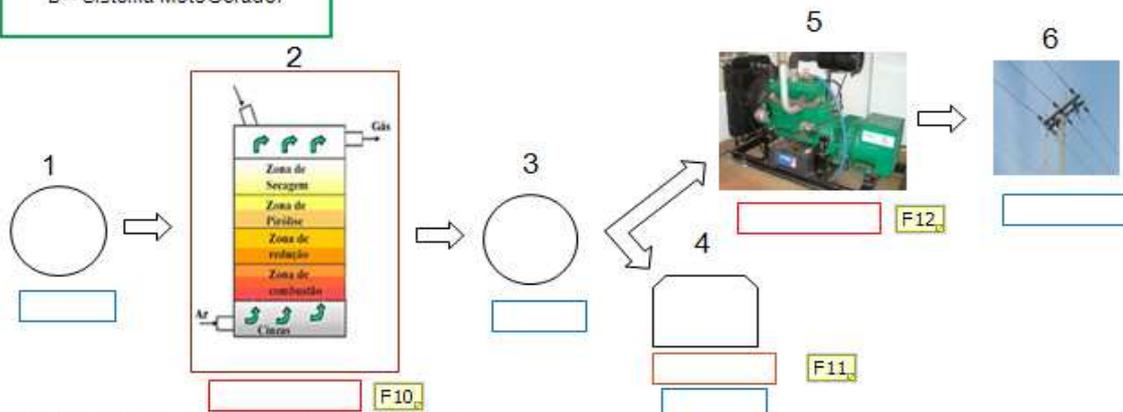


- 1- Quantidade Total de Resíduos Urbanos a Ser Gaseificada - kg diários
- 2- Gaseificador
- 3- Quantidade de Gás de Gaseificação - Nm³ diários
- 4- Energia Térmica de Saída do Gaseificador - GJ
- 5- Turbina a Gás
- 6- Gerador
- 7- Energia Elétrica Produzida - GJ



GASEIFICAÇÃO

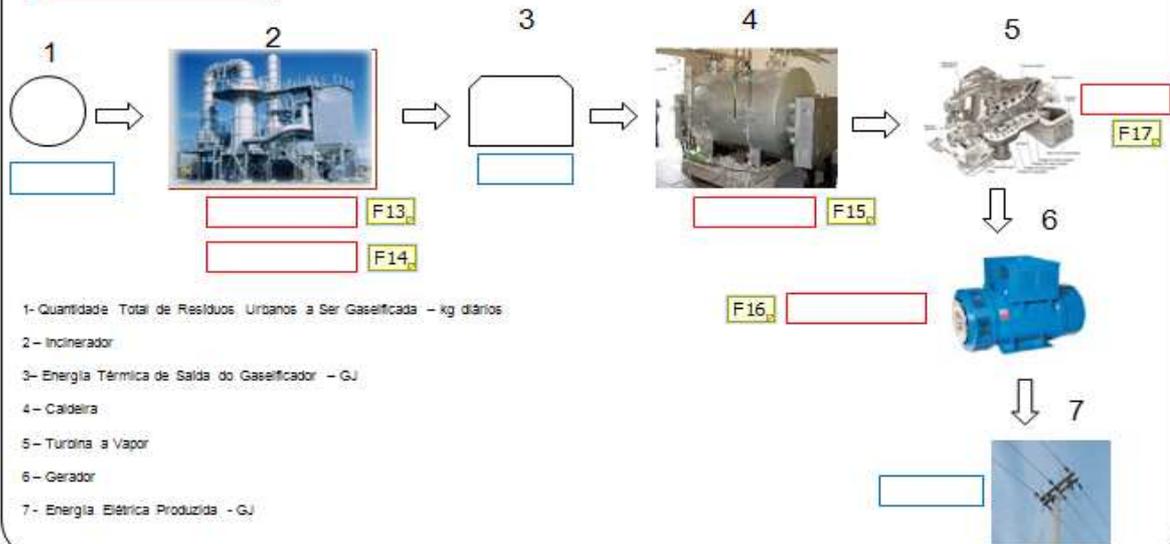
B – Sistema MotoGerador



- 1- Quantidade Total de Resíduos Urbanos a Ser Gaseificada - kg diários
- 2- Gaseificador
- 3- Quantidade de Gás de Gaseificação - Nm³ diários
- 4- Energia Térmica de Saída do Gaseificador - GJ
- 5- MotoGerador
- 6- Energia Elétrica Produzida - GJ



INCINERAÇÃO



APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

Motor do Ciclo Diesel

