



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

Mestrado em Engenharia Mecânica

José Antonio Poletto Filho

**VIABILIDADE ENERGÉTICA E ECONÔMICA DA
INCINERAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO
CONSIDERANDO A SEGREGAÇÃO PARA
RECICLAGEM.**

BAURU - SP
Maio - 2008



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

Mestrado em Engenharia Mecânica

José Antonio Poletto Filho

**VIABILIDADE ENERGÉTICA E ECONÔMICA DA
INCINERAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO
CONSIDERANDO A SEGREGAÇÃO PARA
RECICLAGEM.**

Dissertação apresentada à UNESP –
Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia, Campus de
Bauru para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador:

Prof. Dr. Celso Luiz da Silva

BAURU – SP
Maio – 2008

Agradecimentos

A Deus pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

Ao Prof. Dr. Celso Luiz da Silva, pela orientação, apoio e dedicação.

A todos os professores do curso de pós – graduação, pelos ensinamentos.

Aos ilustres componentes da Banca de Avaliação, por participarem desta importante etapa de minha formação.

*Ao meu filho, Gustavo, pelas
pescarias que deixamos de fazer.*

Dedico

Se quisermos ter menos lixo, precisamos rever nosso paradigma de felicidade humana. Ter menos lixo significa ter...

“... mais qualidade, menos quantidade
mais conteúdo, menos embalagens
mais cultura, menos símbolos de status
mais esporte, menos material esportivo
mais tempo para as crianças, menos dinheiro trocado
mais animação, menos tecnologia de diversão
mais sabedoria, menos informação
mais carinho, menos presente
mais charme, menos maquiagem...”

Gerard Gilhreiner – lixologo Austríaco – 1992

POLETTO, J. A. "VIABILIDADE ENERGÉTICA E ECONÔMICA DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO CONSIDERANDO A SEGREGAÇÃO PARA RECICLAGEM". 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

Resumo

A exploração abusiva da energia originada de fontes não renováveis traz danos irreversíveis ao ambiente. O Brasil é dependente dos derivados do petróleo e das hidroelétricas. Diante desse contexto é necessário um estudo sobre outras fontes alternativas. Conciliar a geração de energia com possibilidade também de mitigar o impacto da geração de lixo seria resolver dois problemas de uma só vez. O objetivo do presente trabalho é analisar a recuperação de energia do Resíduo Sólido Urbano (RSU) através do Processo de Incineração. Leva em consideração a tendência atual de segregação (separação) de plásticos, papel e papelão, vidro e metais, e sua influência nos fluxos de massa e energia no Sistema de Incineração de RSU. Para o seu desenvolvimento foram utilizadas informações relativas à geração do RSU da cidade de Bauru e o software Combust. Os resultados obtidos permitiram estimar o Poder Calorífico Teórico do RSU típico e também deste resíduo quando se considera a separação de papel/papelão e plásticos para fins de reciclagem.

Palavras Chave: Energia alternativa; Incineração de RSU; Geração de energia; Poder Calorífico; Segregação.

POLETTI, J. A., "ENERGY AND ECONOMIC FEASIBILITY OF INCINERATION OF MUNICIPAL SOLID WASTES CONSIDERING THE SEGREGATION FOR RECYCLING". 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

Abstract

The abusive exploration of the originated energy of no-renewable sources brings irreversible damages to the environment. In Brazil, it is dependent mainly of the derived of petroleum and of the hydroelectric ones. With base in that fact, the subject of the sources of energy is subject on the agenda globally. On the other hand, the wastes generation and the consequent environmental contamination, comes increased in an alarming way. Conciliate the generation of energy with possibility of mitigating the impact of the wastes generation it would be to solve two problems of only one time. The objective of the present work is to analyze the recovery of energy of the Municipal Solid Wastes (MSW) through of the Incineration Process. It considers the actual tendency of segregation of plastics, paper and cardboard, glass and metals, and your influences in the mass and energy flows in the Incineration System of MSW. For the development of this work were used relative information to the MSW generation of Bauru city and the Combust software. The obtained results allowed esteeming the Theoretical Calorific Power of MSW typical and also of this residue when it is considered the paper / cardboard and plastics separation for recycling.

Keywords: Alternative Energy; Incineration of MSW; Generation of Energy; Calorific Power; Segregation.

Lista Figuras

Figura - 3.1	Investimento em ciclos de co-geração	25
Figura - 3.2	Aterro Bandeirantes	28
Figura - 3.3	Composição do lixo norte-americano	30
Figura - 3.4	Quantidade de lixo gerada em alguns países	31
Figura - 3.5	Geração per capita de lixo	31
Figura - 3.6	Composição média do RSU no Brasil	34
Figura - 3.7	Sistema de captação de metano – Aterro Bandeirantes	55
Figura - 3.8	Sistema de coleta de chorume – Aterro Bandeirantes	56
Figura - 3.9	Hierarquização das destinações dos RSU	60
Figura - 3.10	Composição da coleta seletiva no Brasil	62
Figura - 3.11	Câmara de combustão de incinerador de forno rotativo	65
Figura - 3.12	Planta incineradora para geração de eletricidade	71
Figura - 3.13	Esquema representativo de dupla câmara de combustão ..	73
Figura - 3.14	Filtro de mangas	81
Figura - 3.15	Fluxo de passagem dos gases	81
Figura - 3.16	Válvula de limpeza	82
Figura - 3.17	Precipitador eletrostático	82
Figura - 3.18	Precipitador eletrostático	83
Figura - 3.19	Câmara de spray	84
Figura - 3.20	Secador spray	84
Figura - 4.1	Tela inicial do Software Combust	91
Figura - 4.2	Diagrama de blocos da simulação a reação de combustão através do Software Combust	93
Figura - 5.1	Comparação entre produção energéticas das três alternativas	98
Figura - 5.2	Comparação econômica das três hipóteses	100

Lista Tabelas

Tabela - 3.1	Poder calorífico de diferentes combustíveis e dos principais componentes do lixo	24
Tabela - 3.2	Parâmetros técnicos e econômicos de ciclos utilizados em centrais de co-geração	25
Tabela - 3.3	Composição percentual do lixo em diferentes cidades do Brasil	33
Tabela - 3.4	Composição percentual do lixo na cidade de SP	34
Tabela - 3.5	Distribuição típica para composição gravimétrica dos RSU em função do estágio de desenvolvimento do país ..	35
Tabela - 3.6	Massa específica dos resíduos domiciliares, comercial, industrial e agrícola	36
Tabela - 3.7	Porcentagem dos componentes encontrados nos RSU	38
Tabela - 3.8	Conteúdo energético do RSU	39
Tabela - 3.9	Composição física do RSU	42
Tabela - 3.10	Característica de alguns materiais recicláveis	43
Tabela - 3.11	Valor médio do PCI de alguns componentes do RSU	43
Tabela - 3.12	Energia necessária para a manufatura de materiais da embalagem	44
Tabela - 3.13	Índice de produção per capita de RSU em função da população	46
Tabela - 3.14	Composição dos RSU doméstico - orgânicos	47
Tabela - 3.15	Composição dos RSU doméstico - inorgânicos	47
Tabela - 3.16	Composição típica dos resíduos do aterro sanitário de Bauru, modificada	48
Tabela - 3.17	Principais gases do efeito estufa	53
Tabela - 3.18	Potencial de conservação de energia por ton. Reciclada ..	59
Tabela - 3.19	Incineração do RSU nos países desenvolvidos, (com e sem aproveitamento de energia)	68
Tabela - 3.20	Características de alguns incineradores instalados no Brasil	68

Tabela - 3.21	Tecnologias para a redução das emissões provenientes da incineração de RSU.....	79
Tabela - 3.22	Eficiências de redução de alguns contaminantes pelo processo de absorção com <i>spray dryer</i>	85
Tabela - 3.23	Produção de lixo por município	88
Tabela - 4.1	Massa segregada pela cooperativa	89
Tabela - 5.1	Porcentagem em massa	95
Tabela - 5.2	Contribuição energética de cada componente do RSU, sem considerar a segregação – Alternativa 1	96
Tabela - 5.3	Contribuição energética de cada componente do RSU	96
Tabela - 5.4	Contribuição energética da cada componente do RSU – Alternativa 2	97
Tabela - 5.5	Contribuição energética de cada componente do RSU – Alternativa 3	97
Tabela - 5.6	Comparativo energético entre as três alternativas estudadas	98
Tabela - 5.7	Potencial teórico de geração de energia	99
Tabela - 5.8	Resultado financeiro das 3 alternativas	100

Lista de abreviaturas

3R	Reduzir, reutilizar, reciclar
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANG	Aterro não Gerenciado
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP	Conferência das Partes
EPA	Environmental Protection Agency
FAE	Formas Alternativas de Energia
GEE	Gases do efeito estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	Global Warning Power
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDL	Modelo de Desenvolvimento Limpo
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
P/P	Porcentagem em Peso
PCH	Pequenas Centrais Hidroelétricas
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
RSU	Resíduo Sólido Urbano
UNICEF	United Nations Children's Fund
UQA	Unidade de Quantidades Atribuídas
URE	Unidade de redução de Emissão
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis
WTE	Waste To Energy

Lista de símbolos

PCS	Poder Calorífico Superior	(kcal/kg)
PCI	Poder Calorífico Inferior	(kcal/kg)
C	Carbono	
H	Hidrogênio	
O	Oxigênio	
N	Nitrogênio	
NO_x	Óxido de Nitrogênio	
SO_x	Óxido de Enxofre	
S	Enxofre	
hab.	Habitante	
T_{te}	Total Teórico de Energia	
η	Eficiência de uma planta de incineração	
m_{RSU}	Massa de RSU	
K	Fator de Conversão de Unidades (kcal para kWh)	

Sumário:

		LISTA DE FIGURAS	08
		LISTA DE TABELAS	09
		LISTA DE ABREVIATURAS	11
		LISTA DE SÍMBOLOS	12
1.0		INTRODUÇÃO	15
	1.1	<i>Justificativa</i>	18
2.0		OBJETIVOS	20
	2.1	<i>Objetivo Geral</i>	20
	2.2	<i>Objetivo Específico</i>	20
3.0		REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
	3.1	<i>Resíduo Sólido Urbano</i>	21
	3.2	<i>Definição e Classificação de Resíduo Sólido Urbano</i>	26
	3.3	<i>Caracterização do RSU</i>	29
	3.4	<i>Composição do RSU</i>	32
		3.4.1 <i>Propriedades Químicas</i>	37
	3.5	<i>Destinação Final do RSU</i>	40
		3.5.1 <i>Aterro de RSU</i>	45
		3.5.2 <i>Aterro no Brasil</i>	48
	3.6	<i>Princípios e Mecanismos do Protocolo de Kyoto</i>	50
	3.7	<i>O Efeito Estufa e o Protocolo de Kyoto</i>	52
	3.8	<i>Geração de Energia a Partir do RSU</i>	56
	3.9	<i>Aproveitamento do RSU</i>	57
	3.10	<i>Potencial de Geração de Energia Elétrica a partir do RSU no Brasil</i>	61
	3.11	<i>Incineradores</i>	62
		3.11.1 <i>Incineração</i>	63
	3.12	<i>Integração de Incineradores de Lixo com Central de Co-geração</i>	67

3.13	<i>Tecnologia controlada do RSU</i>	69
3.13.1	<i>Dioxinas e Furanos</i>	72
3.14	<i>Normas de Desempenho de Incineradores</i>	75
3.15	<i>Normas de Emissão</i>	75
3.16	<i>Impactos Ambientais da Tecnologia de Incineração Controlada de RSU</i>	77
3.17	<i>Tecnologia de Redução e Controle das Emissões de Poluentes</i>	78
3.17.1	<i>Material Particulado e Metais Pesados</i>	80
3.17.2	<i>Gases ácidos SO₂, HCL, HF</i>	83
3.17.3	<i>Compostos Orgânicos Voláteis</i>	85
3.17.4	<i>Óxidos de Nitrogênio - NO_x</i>	86
3.18	<i>Análise dos Impactos Ambientais das Tecnologias de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos ..</i>	87
4	MATERIAIS E MÉTODOS	89
4.1	<i>O Software Combust</i>	90
4.1.1	<i>Combustão Estequiométrica</i>	92
5	RESULTADOS E ANÁLISES	94
5.1	<i>Alternativa 1</i>	95
5.2	<i>Alternativa 2</i>	96
5.3	<i>Alternativa 3</i>	97
6	CONCLUSÃO	101
7	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	103
ANEXO - A	PLANILHA DE RESULTADOS PARA A ALTERNATIVA 1	114

1. INTRODUÇÃO

A palavra **lixo**, derivada do termo latim *lix*, significa "cinza". Segundo o dicionário Aurélio, lixo é definido como sujeira, aquilo que se varre de casa, do jardim, da rua, se joga fora; entulho, sujeira, imundice, coisa inútil, sem valor.

Lixo, na linguagem técnica, é sinônimo de resíduos sólidos e é representado por materiais descartados pelas atividades humanas. Desde os tempos mais remotos até meados do século XVIII, quando surgiram as primeiras indústrias na Europa, o lixo era produzido em pequena quantidade e constituído essencialmente de sobras de alimentos. A partir da Revolução Industrial, as fábricas começaram a produzir objetos de consumo em larga escala e a introduzir novas embalagens no mercado, aumentando consideravelmente o volume e a diversidade de resíduos gerados nas áreas urbanas.

O homem passou a viver a era dos descartáveis em que a maior parte dos produtos — desde guardanapos de papel (só de guardanapos de papel o Brasil joga fora 15.000 toneladas por ano), latas de refrigerante, até computadores (obsolescência programada) — são inutilizados e jogados fora com enorme rapidez.

Durante muitos anos a população, influenciada pelos meios publicitários, adotou uma postura consumista, e foi induzida a produzir lixo sem ter noção e preocupação com a destinação final e de que forma é disposto.

A cultura do descarte, o consumo exagerado e a obsolescência programada têm gerado toneladas de lixo que, na maioria das vezes, não têm destinação adequada. A sustentabilidade do planeta está diretamente ligada à mudança de padrões de consumo, e a diminuição da produção de resíduos faz parte deste cenário. A solução para este problema não é simples, nem única. Reduzir, reciclar, reutilizar, compostagem, incineração, aterros, produção de energia, entre outros meios, podem ser usados para diminuir a quantidade de lixo.

Alem do problema com a disposição final dos resíduos sólidos, também existe a preocupação com o esgotamento das reservas de petróleo, deve-se planejar um mundo sem petróleo. Os suprimentos de petróleo se formaram em unidades de tempo geológico - milênios, eras, - mas estão sendo consumidos em unidades de tempo humano - séculos, décadas, anos. Com a taxa atual de consumo mundial de 20 bilhões de barris por ano, estimam-se mais setenta anos de petróleo abundante.

É provável que o consumo aumente à medida que os países em desenvolvimento atinjam padrões de vida mais altos. É difícil prever o que acontecerá, em termos sociais, políticos e econômicos, quando nos aproximarmos da última gota do produto, mas não é difícil imaginar, para quem conhece o passado de turbulências, guerras e conflitos que sempre envolveu sua posse e sua exploração. Precisamos aproveitar as reservas existentes para um prudente e meticuloso planejamento do futuro - um futuro sem petróleo.

Conforme boletim da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, durante praticamente 10.000 anos, desde o início da civilização, a humanidade se contentou em viver consumindo, em média, míseros 20 watts/dia de energia por pessoa – o equivalente, hoje, a manter acesas 24 horas por dia uma pequena lâmpada de árvore de Natal.

Com o advento do petróleo, o mundo passou a esbanjar energia e o consumo “per capita” cresceu de maneira explosiva. Em poucas décadas, havia alcançado um patamar dezenas de vezes maiores que o dos séculos anteriores até atingir a marca atual, de 2.000 watts/dia por pessoa.

Portanto, a utilização do RSU para produção de energia vem ajudar a minimizar dois problemas cruciais pra a sobrevivência do homem na terra: a destinação final do lixo e a produção de energia a partir deste resíduo.

Alem dos fatores expostos acima, segundo a Agenda 21 (AGENDA 21):

Aproximadamente 5,2 milhões de pessoas, incluindo 4 milhões de crianças, morrem por ano de doenças relacionadas com o lixo. Metade da população urbana nos países em desenvolvimento não tem serviços de despejo de lixo sólido. Globalmente, o volume de lixo municipal produzido deve dobrar até o final do século (já ultrapassamos esta marca) e dobrar novamente antes do ano 2025.

A sociedade moderna pode ser caracterizada por jogar as coisas fora. Mais de 10 % do custo dos alimentos é causado pelas embalagens, que representam 50% do volume e 30% do peso do lixo.

Ao mesmo tempo, o crescimento acelerado das metrópoles fez com que as áreas disponíveis para colocar o lixo se tornassem escassas. A sujeira acumulada no ambiente aumentou a poluição do solo, das águas e piorou as condições de saúde das populações em todo o mundo, especialmente nas regiões menos desenvolvidas.

O não aproveitamento dos resíduos sólidos e a quase absoluta inexistência de iniciativas de redução de resíduos na sua origem, revelam a existência de uma crise na relação entre meio ambiente e desenvolvimento sustentável. Este descaso revela a falta de compromisso, dos governos, do empresariado e da população em garantir as condições básicas de reprodução das gerações futuras.

A Agenda 21, documento elaborado por 170 países na Conferência Rio 92, aponta uma série de medidas e estratégias de manejo dos resíduos, o princípio dos “3Rs” - reduzir, reutilizar, reciclar - mas até o momento não foi amplamente debatida na sociedade, nem tampouco implementada sob forma de políticas públicas pelos governos.

Na Suíça, a quantidade de lixo é tarifada em função de selos que são vendidos para serem colados nos sacos de lixo. Sem o selo, o saco não é coletado. Como o sistema de cobrança é diferente para os materiais recicláveis, fica mais barato separá-los do restante do lixo.

Em algumas cidades da Holanda, a população é obrigada a dispor seu lixo em recipientes adquiridos junto às prefeituras; em outras os domicílios possuem recipientes para lixo com códigos de barras. Estes recipientes são pesados por caminhões coletores computadorizados, que registram a quantidade de lixo produzida em cada domicílio. A tarifa de limpeza é cobrada de cada estabelecimento em função desta pesagem.

Como os efeitos da disposição inadequada de lixo podem transcender as fronteiras de um município - como as emissões de um incinerador ou a contaminação de um lençol freático num lixão - é interessante que o equacionamento do problema seja pensado de forma intermunicipal ou consorciado. No Espírito Santo, por exemplo, a usina de Vitória processa os resíduos também de um município vizinho que, em contrapartida, aceita em seu território a disposição do rejeito deste processamento.

O equacionamento da problemática do lixo depende, em última análise, da criação de políticas públicas específicas. Embora as prefeituras sejam as responsáveis pela coleta e destinação do lixo, elas não têm poder para interferir diretamente na sua geração, isto é, nos processos industriais, produtores de bens de consumo. Portanto, a menos que se tenha uma Política Nacional de Resíduos Sólidos, tendo sua minimização (3R) como princípio, as municipalidades continuarão a arcar com todo o ônus do tratamento deste lixo.

Há no Brasil, duas propostas para a criação de uma Política Nacional de Resíduos Sólidos. Ambos os projetos de lei ainda estão em fase de discussão. Tentou-se criar, também, um Programa Nacional de Reciclagem, que infelizmente não saiu do papel. Por outro lado, existe uma Política Nacional de Saneamento; instituída em setembro de 1995, na qual há um Programa de Apoio à Gestão dos Sistemas de Coleta e Disposição de Resíduos Sólidos. Entretanto, este documento não faz menção alguma a programas de coleta seletiva de lixo.

A destinação incorreta do lixo urbano compromete o meio ambiente, causando poluição do solo, do ar e dos recursos hídricos. A redução da quantidade de resíduos sólidos urbanos a ser depositada em aterros sanitários amplia suas vidas úteis e soluciona um dos grandes problemas da atualidade, a escassez de áreas para novos depósitos de RSU. Em alguns casos são disponibilizados subprodutos, como adubo e cinzas, que podem ser utilizados em outras aplicações.

1.1 JUSTIFICATIVA

No contexto da biomassa, mais recentemente, começou a ser considerado, no Brasil, os sistemas de geração de energia elétrica a partir dos Resíduos Sólidos Urbanos (REIS, 2003). É importante lembrar que com objetivo de construir um modelo de desenvolvimento sustentável, a questão do tratamento do resíduo de qualquer tipo e proveniência, é hoje um dos principais desafios da humanidade. Analisando de uma forma global, a geração de energia elétrica a partir do RSU é um dos componentes da Gestão Integrada de Resíduos, apresentando outro aspecto importante, que é a geração de energia. Este trabalho tem como proposta realizar um diagnóstico e análise da implantação de sistema de tratamento térmico dos RSU gerados na cidade de Bauru, com recuperação energética.

As estratégias de sustentabilidade ambiental buscam compatibilizar as intervenções humanas com as características dos meios físico, biológico e socioeconômico, minimizando os impactos ambientais, por meio do manejo adequado do RSU. Não é concebível hoje um projeto de tratamento de RSU sem a reciclagem de energia. Segundo Menezes, Gerlach, Mendes (2000) pode-se afirmar que 1 tonelada de RSU equivale a 200 kg de carvão ou 250 kg de combustível, 30 t

de água quente ou ainda 500 kWh de energia elétrica. O calor recuperado pela incineração pode representar cerca de 6 a 7 % da energia consumida pela população que gera o RSU, sendo que esta energia recuperada tem sido utilizada para:

- Gerar água quente para o próprio processo e distribuição a hospitais, piscinas municipais e sistemas de calefação;
- Gerar vapor para uso industrial;
- Gerar energia elétrica para uso na planta e distribuição local;
- Gerar frio convertido a partir do vapor, para uso em sistemas de condicionamento de ar para indústrias, shopping centers, aeroportos, etc.

Contudo deve ser prevista a influência da segregação dos componentes do RSU que tem algum valor no mercado de reciclagem e tem alto poder calorífico, como por exemplo, papel, papelão, plástico, entre outros.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS:

- Entender a formação e a composição média do RSU e fazer um estudo sobre a possibilidade de gerar energia a partir destes resíduos.
- Estimar o **Poder Calorífico Inferior** dos RSU gerados no município de Bauru, levando-se em consideração a questão da segregação de papéis/papelão e plásticos.
- Realizar uma estimativa teórica aproximada da quantidade de energia que poderia ser obtida diariamente na combustão dos RSU do município de Bauru

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Quantificar e caracterizar o RSU de Bauru;
- Rever conceitos sobre o processo e equipamentos de incineração para tratamento de RSU com recuperação energética;
- Avaliar a quantidade de energia gerada por todo o RSU coletado comparativamente com o RSU diminuído do material separado para reciclagem.

Para este estudo será proposta 3 alternativas:

- **Alternativa 1:** calcular a energia gerada com a totalidade do RSU não considerando a segregação, isto é, deixando 100% do RSU para incineração.
- **Alternativa 2:** calcular a energia gerada pelo RSU tomando como base para a segregação os percentuais encontrados na bibliografia, que devem estar próximo do real.
- **Alternativa 3:** calcular a energia gerada pelo RSU retirando-se todo o material reciclável.
- Comparar economicamente as alternativas propostas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUO SÓLIDO URBANO

Conforme relatado por Lima (1995), na América do Norte, em 1920 havia cerca de duzentas unidades de incineradores em funcionamento, solucionando o problema de 150 cidades. Na Europa, havia implantado mais de 300 equipamentos absorvendo o lixo urbano de mais de 280 cidades.

No Brasil, a cidade de Manaus, Amazonas, foi a primeira a implantar um incinerador, no ano de 1896 e desativado em 1958, por não atender mais as necessidades locais. Em Belém - PA, no início do século XIX, foi também instalado um incinerador semelhante ao de Manaus, sendo desativado em 1978, por problemas de manutenção. Em São Paulo - SP, em 1913 foi instalado um incinerador com capacidade de processar 40 toneladas de lixo por dia, provido de sistema de recuperação de energia, que consistia de caldeira e alternador.

Atualmente, o problema dos Resíduos Sólidos Urbanos é tratado pela sociedade em geral como um indicador da saúde pública. Os RSU, mais conhecidos como lixo, são provenientes de restos de atividades humanas consideradas pelos geradores como inúteis ou indesejáveis, podendo apresentar-se na forma sólida, semi-sólida ou semi-líquida (IPT, 1998).

A atual situação do Brasil, que necessita de investimento em usinas capazes de gerar eletricidade e do Programa Nacional de Biodiesel, lançado em novembro de 2004, é muito favorável ao aproveitamento energético de Formas Alternativas de Energia (FAE). A Lei 10.438, de abril de 2002, estabelece mercado cativo de 3.300 MW, até o ano de 2006, divididos igualmente entre PCH, energia eólica e biomassa, e 10% da matriz energética nos próximos 20 anos para estas fontes de energia. Conforme Rosa (2001) e Firjan (2004) a utilização destas fontes de energia coíbe a reincidência de uma crise no setor elétrico.

De acordo com Oliveira, (2000) e Rosa et al, (2003), o lixo, para a geração elétrica e o biodiesel, principalmente para propulsão veicular, mas, em alguns casos,

também para geração elétrica apresentam qualidades adicionais à biomassa cultivada.

As principais vantagens do RSU para geração de energia são:

- Os equipamentos e insumos necessários para sua produção são de origem nacional e, por este motivo, cotados em moeda brasileira;
- São intensivos em mão-de-obra, uma vez que requerem triagem do lixo, para obter biomassa residual e reciclável;
- Está disponível, normalmente, junto aos consumidores, o que reduz o custo de transporte, seja da energia ou do combustível;
- Contribuem para a redução da poluição.

Conforme o Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior, o potencial de geração de empregos diretos decorrentes do aproveitamento energético de resíduos, o qual pode demandar um milhão de trabalhadores, deve-se à implantação de um programa de coleta seletiva, uma vez que as usinas termelétricas de aproveitamento do lixo e as de processamento de biodiesel são pouco intensivas em mão-de-obra.

Motta e Chermont (1996) sugerem para a redução do lixo gerado na fonte, reutilização do material produzido, reciclagem, uso de aterros devidamente preparados e a recuperação de energia através de incineração como formas de minimizar a quantidade de lixo gerado.

A incineração, apesar de alguns aspectos negativos para o meio ambiente sob a forma de poluentes do ar, ainda tem sido a melhor alternativa adotada em países da Europa para diminuir o volume de lixo a ser depositados nos aterros, prolongando a sua vida útil. Recentemente, têm sido realizados estudos para o aproveitamento da incineração como fonte de energia termoelétrica.

Entre as vantagens deste processo pode-se citar:

- Uso direto da energia térmica para geração de vapor e/ou energia elétrica;
- Geração de energia a partir do RSU sem ruído e sem odor;
- Área para instalação reduzida;

Entre as desvantagens, temos:

- Inviabilidade do uso de RSU com menor poder calorífico;
- Umidade excessiva que prejudica a combustão;
- Necessidade de equipamentos auxiliares para manter a combustão;
- Metais tóxicos que podem ficar concentrados nas cinzas;
- Possibilidade de emissão de dioxinas e furanos, cancerígenos;
- Altos custos de investimento, operação e manutenção.

A incineração é o processo físico-químico pelo qual se transforma a matéria por efeito do aumento da temperatura. Entre os processos de incineração, podem-se distinguir: **cremação** que é a transformação da matéria direta por aplicação da chama e **pirólise** que consiste na decomposição térmica dos resíduos.

Em geral, no processo de incineração podem-se distinguir três fases:

- **Combustão:** fase na qual os resíduos são tratados a diferentes temperaturas, de acordo com o processo escolhido;
- **Pós-Combustão:** fase na qual os gases produzidos na combustão são tratados a temperaturas elevadas (1.200°C) com excesso de ar;
- **Depuração:** fase em que os gases são esfriados tratados por diferentes processos com finalidade de eliminar contaminantes e partículas em suspensão.

A recuperação de energia durante o tratamento térmico do lixo pode ter como objetivo:

- A geração de eletricidade;
- A geração de vapor para aquecimento doméstico ou para processos industriais;
- O resfriamento de água em máquinas de absorção para fins de condicionamento de ar;
- A cogeração ou trigeração com a “produção” simultânea de eletricidade e/ou vapor, e/ou água fria para condicionamento de ar.

A título de comparação tem-se na **Tabela 3.1** o poder calorífico para os combustíveis mais utilizados e para alguns dos principais componentes do lixo.

Tabela 3.1 - Poder calorífico de diferentes combustíveis e dos principais componentes do lixo, (EPA)

Combustível ou componente	Poder calorífico, MJ/kg
Carvão (antracita)	31,9
Carvão (bituminoso)	32,7
Turfa	8,4
Fuel Oil N°. 2	42,12
Gás Natural (MJ/m ³)	41,53
Resíduos sólidos municipais misturados	11,23
Papel misturado	15,91
Papel de jornais	18,60
Papel corrugado	16,48
Correspondência antiga	14,24
Revistas	12,28
Resíduos de alimentos misturados	5,54
Embalagens de leite	26,50
Polietileno	44,19
Polistireno	38,41
Plásticos misturados	32,99
Pneus	32,29
Folhas de árvores (50% umidade)	8,27
Folhas de árvores (10% de umidade)	18,68
Ervas (65 % de umidade)	6,29
Madeira verde	4,91
Madeira de construção	17,08

No planejamento de centrais de co-geração, muitos parâmetros importantes devem ser considerados, tais como: as emissões de poluentes de acordo com o combustível empregado em cada caso, os custos de investimento, eficiência do processo, entre outros. Tais parâmetros variam conforme a tecnologia de geração escolhida. A **Figura 3.1** ilustra a comparação entre três combustíveis no ciclo típico a vapor, evidenciando os investimentos em cada um deles, que favorecem, no momento, a primeira (BALESTIERI, 2002).

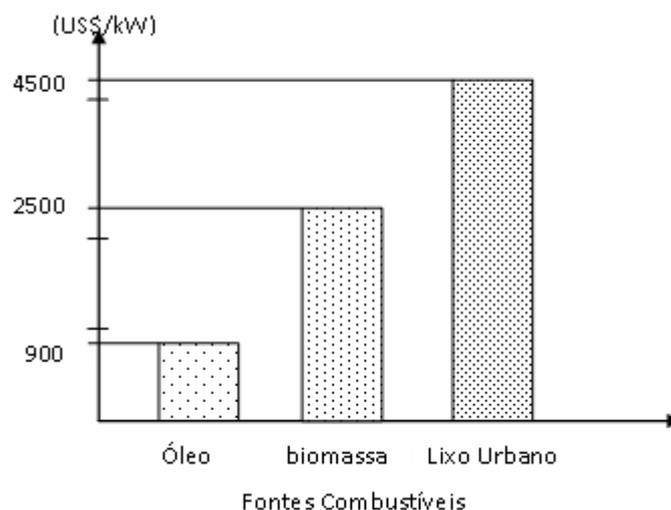


Figura 3.1 – Investimento em ciclos de co-geração

A **Tabela 3.2** fornece valores de eficiência, custo de investimento específico por unidade de potência elétrica e valores de emissões médias de diferentes tecnologias (HOLANDA, 2003).

Tabela 3.2 - Parâmetros técnicos e econômicos de ciclos utilizados em centrais de co-geração

Ciclo térmico/ combustível	Investimento (US\$/kW)	Emissão SO ₂ (kg/MWh)	Emissão CO ₂ (kg/MWh)	Emissão NOx (kg/MWh)
Vapor/óleo.	840-1000	0,36	277	0,18
Vapor/carvão.	1300-1800	2,16	330	Nd
Vapor /RSU	4500	0,14	90	0,36
Vapor/Biomassa.	2100-2600	nd	nd	0,18
Gás/gás natural.	550-900	0,007	198-240	0,18
Gás/biomassa gaseificada.	1700-2000	nd	nd	0,18
Combinado/gás natural.	550-850	0,007	198	Nd
Diesel/gás natural.	1240	0,007	198	3,6

3.2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO

Definição de resíduo sólido urbano dado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 10.004 (ABNT 1.987):

Resíduo nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividade da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamento e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviáveis o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Uma das questões mais importantes atualmente é a disposição de resíduos sólidos municipais. Todos os anos, os norte-americanos jogam nos aterros 81 milhões de toneladas de papel, 44 milhões de toneladas de alimentos e resíduos domésticos, 15 milhões de toneladas de metal, 13 milhões de toneladas de vidro e 19 milhões de toneladas de plásticos (HINRICHS, KLEINBACH, 2003).

A montanha mais alta da costa oeste dos EUA é o aterro "Fresh Kills", que recebe cerca de 24.000 toneladas de lixo por dia, descarregando 7 milhões de litros de chorume por dia no lençol freático (HINRICHS, KLEINBACH, 2003).

Conforme Aguiar e Pelicioni (2004), o Brasil possui muitas deficiências do ponto de vista do saneamento básico, os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística no ano de 2000, mostram que cerca de 230 mil toneladas de resíduos geradas anualmente, cerca de 22% são destinados a lixões, 75% são destinados a aterros controlados.

Em função da periculosidade oferecida por estes resíduos, são divididos em três categorias, segundo a NBR 10.004:

➤ **Resíduo perigoso (classe I)**: são os que apresentam riscos ao meio ambiente e exigem tratamento e disposição especiais, ou que apresentam riscos à saúde pública. São resíduos biológicos; sangue e hemoderivados; restos cirúrgico,

perfurante ou cortante e animal contaminado, ou ainda com características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade.

➤ **Resíduos não inertes (classe II)**: aqueles que apresentam combustibilidade, solubilidade ou biodegradação, podendo acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente; não Classe I; não Classe III. Resíduo radioativo; farmacêutico ou químico perigoso.

➤ **Resíduos inertes (classe III)**: são aqueles resíduos que, submetidos ao teste de solubilização (NBR 10.0006), não apresentam nenhum constituinte solubilizado em concentração superior aos especificados no item 8 da norma NBR 10.0004.

Qualquer atividade de trabalho, por força da norma, deve classificar os seus resíduos em **Classe I, II** ou **III**. Esta classificação não tem conotação direta com a tecnologia de destino final do resíduo.

Alem da classificação, segundo a NBR 10.0004, podemos também classificar os resíduos segundo a sua origem:

➤ **Resíduo da construção civil**: os entulhos poderiam ser considerados como resíduo urbano.

➤ **Resíduo de serviço de saúde**: Os serviços hospitalares, ambulatoriais, farmácias, são geradores dos mais variados tipos de resíduos sépticos, resultados de curativos, aplicação de medicamentos que em contato com o meio ambiente ou misturado ao lixo doméstico poderão ser patógenos ou vetores de doenças, devem ser destinados à incineração.

➤ **Resíduo de serviço de transporte**: proveniente de portos, aeroportos, terminais rodoviários, ferroviários e portuários, postos de fronteira e outras estruturas de apoio ao transporte, bem como do uso da rede viária;

➤ **Resíduo agrícola:** são os resíduos das atividades de agricultura e da pecuária. Embalagem de agrotóxicos, ração, esterco animal. As embalagens de agrotóxicos, pelo alto grau de toxicidade que apresentam, são alvo de legislação específica.

➤ **Resíduo atômico:** Produto resultante da queima do combustível nuclear, composto de urânio enriquecido com isótopo atômico 235. A elevada radioatividade constitui um grave perigo à saúde da população, por isso deve ser enterrado em local próprio, inacessível.

No município de São Paulo, a geração diária de resíduo é de aproximadamente 15 mil toneladas, sendo 11 mil de origem domiciliar e varrição.

A cidade conta com dois aterros sanitários, três estações de transbordo, duas usinas de compostagem e dois incineradores. Aproximadamente 92% dos resíduos gerados são enviados para os dois aterros sanitários.

O Aterro Bandeirantes na cidade de São Paulo, **Figura 3.2** (GOOGLE EARTH) é considerado um dos maiores do mundo, recebendo cerca de 7.000 toneladas de resíduos por dia, 50% do total produzido na cidade. Sua utilização começou há quase 30 anos e a previsão é que armazene mais de 30 milhões de toneladas de lixo.



Figura 3.2: Aterro Bandeirantes.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

O RSU pode ser caracterizado através do seu peso específico, volume gerado, composição química, umidade e poder calorífico. Esta caracterização é importante para dimensionar o sistema de coleta como um todo. O peso específico é importante para dimensionamento das características da frota de veículos coletores, o número de estações de transbordo e os incineradores. O volume gerado é determinante para previsão do número de veículos coletores, sua capacidade e características técnicas assim como o pessoal. Da composição química tem-se informações quanto ao teor de oxigênio, hidrogênio, carbono e enxofre, determinando assim a quantidade de ar necessária nos incineradores, câmaras, e demais componentes do sistema.

Poder Calorífico de um combustível é a energia liberada pela combustão total à pressão constante de um quilograma de combustível.

Poder Calorífico Superior é a quantidade de calor liberada para queimar completamente um quilograma de combustível, resultando gás carbônico e água no estado líquido.

Poder Calorífico Inferior o resultado da combustão é gás carbônico e vapor d'água.

A diferença entre o PCS e o PCI é a entalpia de vaporização da água originada na combustão.

De acordo com Silva (1998), o poder calorífico do RSU pode ser determinado experimentalmente ou a partir das porcentagens em massa dos diferentes componentes (papel, matéria orgânica, tecidos, etc.).

A partir da análise elementar (% em massa de C, H, O, S e umidade) pode-se utilizar fórmulas empíricas validas para unidades no S.I., tais como:

Fórmula de Mendelejev:

$$PCI = 340 * C + 1030 * H - 110 * (O - S) - 25 * W \quad (1)$$

Fórmula de Dulong para combustíveis sólidos

$$PCS = 339,6 * C + 1418,9 * \left(H - \frac{O}{8}\right) + 94,2 * S \quad (2)$$

Anualmente a quantidade de Resíduo Sólido Urbano gerado aumenta a uma taxa de 2,3% ao ano e a área disponível para os aterros vem se reduzindo drasticamente. Na **Figura 3.3** tem-se a composição média do lixo norte-americano, segundo Hinrichs, Kleinbach, (2003).



Figura 3.3 – Composição do lixo norte-americano.

As **Figuras 3.4** e **3.5** fornecem informações sobre a geração de RSU para diferentes países. (EPA, 2007).

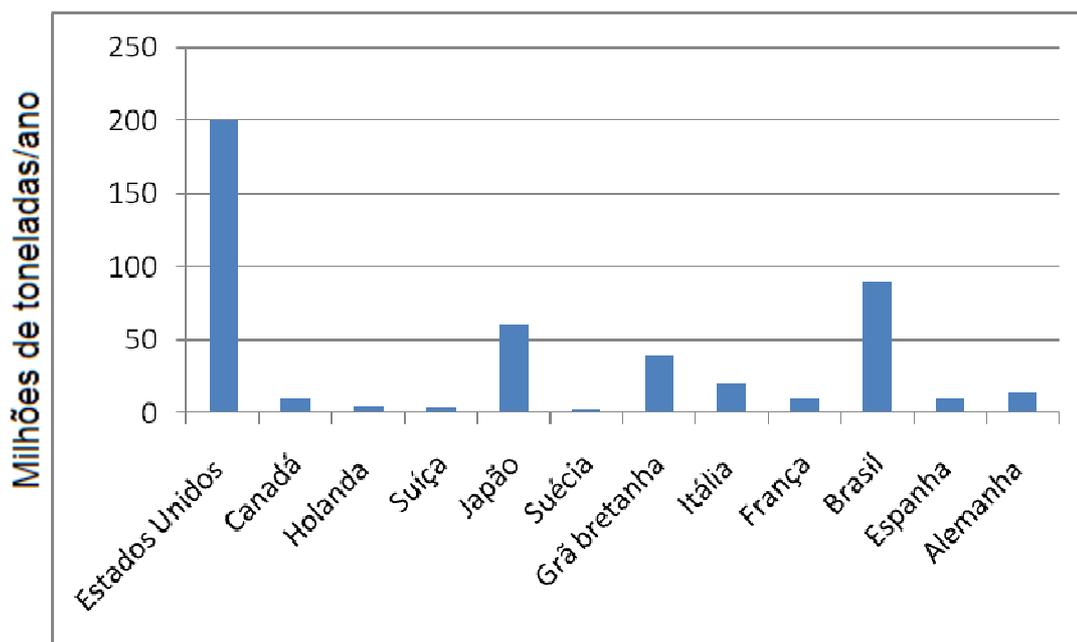


Figura 3.4 - Quantidade de lixo gerada em alguns países.

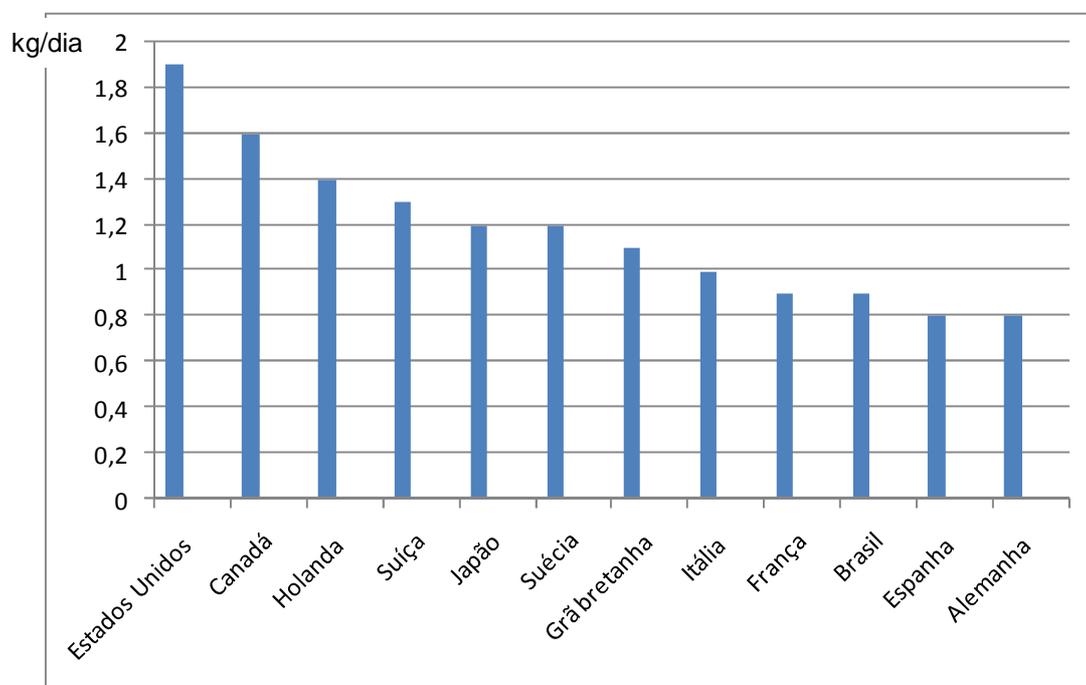


Figura 3.5: Geração “per capita” de lixo.

3.4. COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

A composição típica dos resíduos sólidos urbanos considerados não especiais, em geral é assim classificada:

- **Grupo 1:** papéis, plásticos, vidros e metais, oriundos de embalagens;
- **Grupo 2:** material orgânico, oriundo de restos alimentícios (cascas e sobras) e poda de árvores, têxteis, borrachas; e,
- **Grupo 3:** inertes.

As participações destes três grupos são de 35%, 60% e 5% (IPT, 1998), respectivamente, em países ainda em desenvolvimento, enquanto os desenvolvidos têm os dois primeiros valores invertidos. Os recicláveis participam da seguinte maneira: 25% papel, 5% plástico, 2% vidro e 3% metais (IPT, 1998).

A presença de cascas de alimentos no lixo demonstra uma característica cultural, que transita entre a desinformação e o desperdício, pois já foi comprovada a capacidade nutritiva destas partes dos alimentos, muitas vezes superior à parte tradicionalmente consumida, em um planeta no qual existem milhões de pessoas passando fome. Também o encaminhamento de embalagens para o lixo demonstra uma assimetria de informação, uma vez que as indústrias que produzem estas embalagens compram, há mais de cinquenta anos, as embalagens usadas, cuja reciclagem consome menos insumos e energia que a utilização de matéria-prima nova.

O aumento da oferta de alimentos pré-processados amplia a presença de embalagens, ao mesmo tempo em que reduz a parcela de material orgânico, explicando parte da inversão das participações destes itens presentes no lixo.

De acordo com Rosa et al (2003), a partir da década de 80, sobretudo nos países integrantes do G7 (grupo dos sete países mais ricos), foi dada grande importância à coleta seletiva e à reciclagem do lixo, em virtude do aumento do custo das ações de tratamento e disposição final dos resíduos, decorrente das normas sanitárias e ambientais mais restritivas, apesar de a idéia não ser nova. Este

aumento de custo proporcionou a oportunidade de aplicação de novas rotas tecnológicas, além das que vinham sendo usadas para o aproveitamento energético e a proteção sanitária.

Segundo dados do IBGE (2002) cerca de 70% dos distritos que possuem limpeza urbana ainda depositam o seu lixo a céu aberto, são quase 6.000 lixões existentes no país.

Na **Tabela 3.3** tem-se a composição do lixo em diferentes cidades do Brasil (LIMA 1994; LIMA, 1995).

Tabela 3.3: Composição percentual do lixo em diferentes cidades do Brasil.

Componente	Belo Horizonte	ABCD, 1.972	São Paulo, 1.988	ABCD, 1.992	São Paulo, 1.991	Rio de Janeiro, 1.979
Papel	10,7	21,8	28,4	4,4	13,1	33,7
Papelão	2,8	4,1	-	2,5	-	-
Vidro	2,2	2,1	3,1	1,2	1,7	33,6
Madeira	0,6	1,9	1,6	0,4	0,8	1,1
Mat. Orgânico.	64,4	43,5	52,5	74,6	62,0	20,7
Metal ferroso	2,5	3,9	4,9	2,7	2,9	3,0
Metal não ferroso	0,2	0,3	-	0,4	0,6	0,2
Tecidos	1,5	3,4	2,3	3,5	5,2	3,6
Couro	0,2	0,9	0,7	0,3	-	-
Plásticos duros	1,8	-	-	2,0	-	3,1
Plásticos outros	4,7	4,3	5,6	7,5	11,1	-
Borracha	0,4	0,6	-	-	-	-
Folhagem	5,4	4,1	-	-	-	-
Inertes	2,6	9,1	0,9	0,5	2,6	1,0

Na **Tabela 3.4** têm-se a composição do RSU na cidade de São Paulo, segundo dados do IPT (1998).

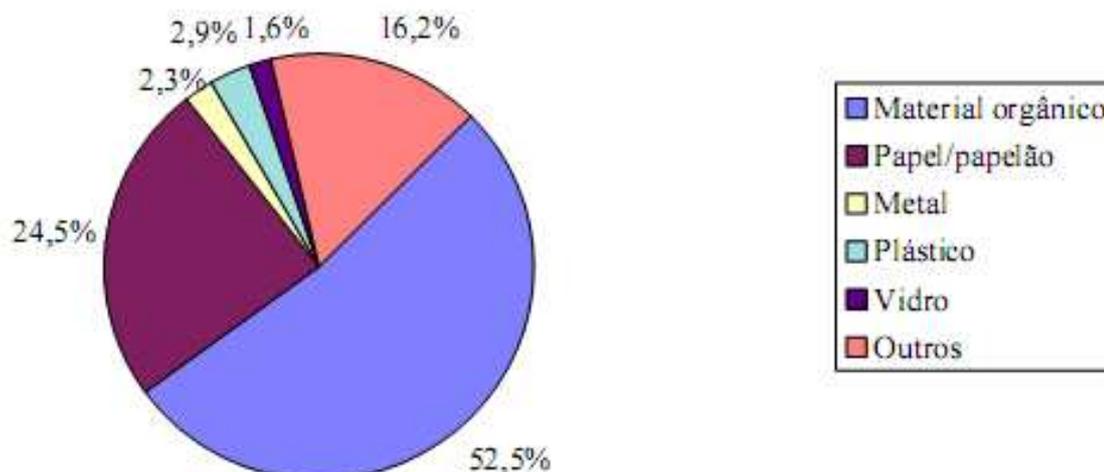
Este parâmetro é importante uma vez que a quantidade de cada componente e a umidade tem influência direta no Poder Calorífico do RSU,

Os valores demonstrados nesta tabela são compatíveis com a composição observada em alguns municípios brasileiros

Tabela 3.4: Composição do RSU na cidade de São Paulo.

Componente	Porcentagem em Peso (base úmida)
Matéria Orgânica	37,8
Papel e Papelão	29,6
Material Ferroso	5,4
Trapos, Couro, Borracha.	2,2
Plástico	9,0
Vidro, Terra, Pedra.	14,6
Madeira	0,8
Metal não ferroso	0,1
Diversos	0,5

Segundo o Tiveron (2001) e IPT (2000) na **Figura 3.6** encontra-se a composição média do RSU no Brasil.

**Figura 3.6:** Composição média do RSU no Brasil.

A composição física dos resíduos sólidos domésticos é importante para a seleção e operação de equipamentos e instalações, na otimização de recursos e

consumo de energia e na análise e projeto de aterros sanitários. Essa composição, por outro lado, varia com a localidade e com o grau de desenvolvimento da população. Tal variação é nítida quando se efetua uma comparação entre diferentes países e respectiva renda “per capita”, como ilustrado por Tchobanoglous; Theisen; Vigil (1993) na **Tabela 3.5**.

Tabela 3.5: Distribuição típica para composição gravimétrica dos resíduos sólidos domésticos em função do estágio de desenvolvimento do país.

Componente	Países de baixa renda “per capita”	Países de média renda “per capita”	Países de alta renda “per capita”
Orgânicos			
Resto de alimento	40 - 85	20 - 65	6 - 30
Papel e papelão	1 - 10 (soma)	8 - 30 (soma)	20 - 45 e 5 - 15
Plásticos	1 - 5	2 - 6	2 - 8
Têxteis	1- 5	2 -10	2 - 6
Borracha e couro	1- 5	2 - 10	0 - 2
Podas e madeira	1- 5 (soma)	1 - 10 (soma)	10 - 20 e 1- 4
Inorgânicos			
Vidros	1-10	1-10	4 - 12
Metais em geral	1- 5	1- 5	3 -12
Terra, pó, cinzas	1- 40	1 - 30	0 - 10

Infelizmente, existe muita dificuldade na definição de padrões para a massa específica dos resíduos, devido a sua não uniformidade, e a questão das condições em que o mesmo se encontra (compactado ou não), muitas vezes não é bem definida. Contudo, Tchobanoglous; Theisen; Vigil (1993) apresenta valores referenciais para massa específica e umidade dos diversos tipos de resíduos, como mostrado na **Tabela 3.6**.

Tabela 3.6: Massa específica e umidade dos resíduos domiciliares, comerciais, industriais e agrícolas.

Tipo de Resíduo	Massa Específica kg/m ³		Umidade % em peso	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
Domiciliar (não compactado)				
Resto de alimento (misturado)	131-481	291	50-80	70
Papel	42-131	89	4-10	6
Papelão	42-80	50	4-8	5
Plásticos	42-131	65	1-4	2
Têxteis	42-101	65	6-15	10
Borracha	101-202	131	1-4	2
Couro	101-261	160	8-12	10
Resto de jardim	59-225	101	30-80	60
Madeira	131-320	237	15-40	20
Vidro	160-481	196	1-4	2
Latas (aço)	50-160	89	2-4	3
Alumínio	65-240	160	2-4	2
Outros metais	131-1151	320	2-4	3
Poeira, cinzas, etc.	320-1000	481	6-12	8
Cinzas	650-831	745	6-12	6
Tralhas	89-181	131	5-20	15
Resto de jardim (domiciliar)				
Folhas	30-148	59	20-40	30
Gramma (cortadas)	208-291	237	40-80	60
Gramma (úmidas)	591-831	593	50-90	80
Resto de jardim (pedaços)	267-356	297	20-70	50
Resto de jardim (composto)	267-386	326	40-60	50
Doméstico				
No veículo compactador	178-451	297	15-40	20
No aterro				
Normalmente compactado	362-498	451	15-40	25
Bem compactado	590-742	599	15-40	25
Comercial				
Alimentos (úmidos)	475 - 949	540	50 - 80	70
Equipamentos	148 - 202	181	0 - 2	1
Engradado de madeira	110 - 160	110	10 - 30	20
Ornamento vegetal	101 - 181	148	20 - 80	5
Tralhas (combustíveis)	50 - 181	119	10 - 30	15
Tralhas (não combustíveis)	181 - 362	300	5 - 15	10

Continuação da Tabela 3.6.

Construção e demolição				
Demolição misturado (não combustível)	1.000 -1.599	1.421	2 - 10	4
Demolição misturado (combustível)	300 - 400	359	4 - 15	8
Construção misturado (combustível)	181 - 359	261	4 - 15	8
Concreto	1.198 -1.801	1540	0 - 5	-
Industrial				
Lodo químico (úmido)	801 - 1.101	1.000	75 - 99	80
Cinzas	700 - 899	801	2 - 10	4
Tiras de couro	101 - 249	160	6 - 15	10
Tiras de metal (pesado)	1.501-1.999	1.780	0 - 5	-
Tiras de metal (leve)	498 - 899	739	0 - 5	-
Tiras de metal (misturado)	700 - 1.501	899	0 - 5	-
Óleos, piche, asfalto	801 - 1.000	949	0 - 5	2
Pó de serra	101 - 350	291	10 - 40	20
Têxteis	101 - 220	181	6 - 15	10
Madeira	400 - 676	498	30 - 60	25
Agrícola				
Agrícola (misturado)	400 - 751	561	40 - 80	50
Animais mortos	202 - 498	359	-	-
Frutas (misturadas)	249 - 751	359	60 - 90	75
Esterco (úmido)	899 - 1.050	1.000	75 - 96	94
Vegetais (misturados)	202 - 700	359	60 - 90	75

3.4.1 Propriedades químicas

A composição do RSU é influenciada por vários fatores: número de habitantes, poder aquisitivo, nível educacional, hábitos e costumes da população, condições climáticas e sazonais, e mudanças na política econômica de um país.

As informações sobre a composição química dos resíduos sólidos domésticos são de grande importância na avaliação de processos alternativos e opções de reciclagem. A prática da incineração, por exemplo, torna-se viável, dependendo da composição química dos resíduos. O conteúdo energético pode ser determinado em

laboratório, empregando-se calorímetros ou estimado por cálculos baseados na composição elementar de componentes conhecidos dos resíduos domésticos.

Quando há interesse na conversão biológica dos resíduos domésticos, tais como compostos (de compostagem), metano e etanol, as informações dos nutrientes essenciais são de grande importância na manutenção do equilíbrio e da eficiência na conversão.

A **Tabela 3.7** mostra a porcentagem dos componentes encontrados nos resíduos urbanos (KENJI IWAI, 2005)

Tabela 3.7 - Porcentagem dos componentes encontrados nos resíduos urbanos.

Porcentagem em massa base seca (%)						
Resíduos	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinzas
Alimentos						
Gorduras	73,0	11,5	14,8	0,4	0,1	0,2
Resto de alimentos	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Vegetais	48,5	6,2	39,5	1,4	0,2	4,2
Carnes	59,6	9,4	24,7	1,2	0,2	4,9
Papel/Papelão						
Papelão	43,0	5,9	44,8	0,3	0,2	5,0
Revistas	32,9	5,0	38,6	0,1	0,1	23,3
Jornais	49,1	6,1	43,0	< 0,1	0,2	1,5
Papel	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0
Papelão	59,2	9,3	30,1	0,1	0,1	1,2
Plásticos						
Plásticos	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Poliétileno	85,2	14,2	-	< 0,1	< 0,1	0,4
Poliestireno	87,1	8,4	4,0	0,2	-	0,3
Poliuretano	63,3	6,3	17,6	6,0	< 0,1	4,3
PVC	45,2	5,6	1,6	0,1	0,1	2,0
Têxteis, e couros						
Têxteis	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
Borrachas	69,7	8,7	-	-	1,6	20,0

Com base nas porcentagens de Carbono, Hidrogenio, Oxigenio, Nitrogenio, Enxofre, Cinzas indicadas na tabela 3.7 ira se determinar o PCI do RSU com utilização do software Combust.

Na **Tabela 3.8** mostra o conteúdo em massa e a quantidade de energia em kJ/kg do RSU (KENJI IWAI, 2005).

Tabela 3.8 – Conteúdo energético do RSU.

Tipos de resíduos	Percentagem aproximada (em peso)				Conteúdo energético (kJ/kg)		
	Umidade	Material volátil	Carbono Fixo	Não combustível	Como coletado	Seco	Seco sem cinza
Alimentos							
Gorduras	2,0	95,3	2,5	0,2	37.530	38.300	39.161
Resto de alimentos (Misturados)	70,0	21,4	3,6	5,0	4.180	13.916	16.701
Vegetais	78,7	16,6	4,0	0,7	3.970	18.638	19.271
Carnes	38,8	56,4	1,8	3,1	17.731	28.970	30.517
Papel/Papelão							
Papelão	5,2	77,5	12,3	5,0	16.380	17.278	18.240
Revistas	4,1	66,4	7,0	22,5	12.221	12.742	16.647
Jornais	6,0	81,1	11,5	1,4	18.550	19.734	20.032
Papel (misturado)	10,2	75,9	8,4	5,4	15.814	17.610	18.738
Papelão encerado	3,4	90,9	4,5	1,2	26.344	27.270	27.614
Plásticos							
Plásticos (misturados)	0,2	95,8	2,0	2,0	32.799	33.471	37.272
Polietileno	0,2	98,5	< 0,1	1,2	43.466	43.552	44.082
Poliestireno	0,2	98,7	0,7	0,5	38.191	38.265	38.216
Poliuretano	0,2	87,1	8,3	4,4	26.061	26.112	27.317
PVC	0,2	86,9	10,8	2,1	22.690	22.734	23.225
Têxteis, borrachas e couros							
Têxteis	10,0	66,0	17,5	6,5	18.515	20.571	22.858
Borrachas	1,2	83,9	4,9	9,9	25.330	25.637	28.494

3.5 DESTINAÇÃO FINAL DO RSU

Segundo Vieira e Alves (2003), no Brasil, a geração de resíduos sólidos municipais é estimada em 54 mil toneladas/dia com geração “per capita” entre 0,4 e 0,7 kg de lixo/habitante/dia, distribuídos da seguinte forma:

- 76% em lixões a céu aberto,
- 22% em aterros controlados e sanitários e
- 2% em outras destinações, como usina de compostagem e incineração.

O aterro constitui uma destinação final do lixo largamente utilizada nos dias atuais em virtude da sua simplicidade de execução, seu baixo custo e capacidade de absorção diária de grande quantidade de lixo, quando comparadas às demais formas de tratamento do lixo.

Contudo, existem fatores limitantes a esta prática como redução da disponibilidade de áreas próximas aos centros urbanos, riscos ambientais associados à infiltração do chorume e as emissões descontroladas de biogás.

Para Oliveira e Rosa (2003), a reciclagem está relacionada ao reaproveitamento dos materiais com finalidades similares àquelas para as quais tinham sido originalmente produzidos. Como exemplo, os resíduos de papéis, plásticos, vidros e metais podem ser usados como matéria-prima reciclável nas próprias indústrias que os fabricaram. Neste caso ocorre a economia de energia que deixa de ser usada para produzir a matéria-prima substituída pelo material reciclado.

De acordo com Hauser (2006), muitos países desenvolvidos implementaram uma abordagem hierárquica para o gerenciamento do lixo, que cobre geração, transporte e eliminação dos Resíduos Sólidos Urbanos. Segundo este critério deve-se:

- Evitar a produção de lixo;
- Reutilizar o lixo inevitável (reciclagem de objetos);
- Quando não for possível reciclar os objetos, os materiais devem ser recuperados para reprocessamento, desde que isto traga benefícios econômicos e ambientais (reciclagem de materiais);

- A incinerar o lixo para recuperação de energia, quando não for possível reciclar os materiais;
- Por último, o que ainda sobrar deve ser depositado em aterros sanitários que causem o mínimo impacto ambiental possível.

O primeiro passo nesta hierarquia é o mais racional, mas está em conflito com o nosso modelo econômico, que estimula o consumo ao comercializar produtos anunciados e belamente embalados. Por isto, a indústria tem feito um lobby bem sucedido contra as restrições e conseqüentemente, a diminuição do desperdício não alcançou o volume desejado.

A reutilização de objetos, por exemplo, garrafas, é um conceito limitado por preocupações com a higiene e os esforços de transporte, seleção e limpeza.

Apesar da importância destes passos iniciais capazes de reduzir o volume total de lixo produzido e, assim, reduzir a necessidade de transporte e tratamento final do lixo, este estudo enfoca a incineração dos resíduos com recuperação de energia após a seleção e a reciclagem de materiais.

Uma alternativa pode ser as modernas usinas de incineração com recuperação de energia. Estas usinas “do lixo à energia” – WTE, são consideradas a forma mais racional de reaproveitar a energia contida nos componentes orgânicos (naturais e poliméricos) do lixo, já que cada tonelada de lixo pode gerar cerca de 500 kWh de energia elétrica, quantidade equivalente à gerada por 200 kg de petróleo (PORTEOUS, 2005) e suficiente para suprir a demanda mensal de 2,5 lares brasileiros padrão (ANEEL, 2001). Além disso, a combustão de lixo elimina a produção do gás Metano (CH_4) que ocorre no aterro sanitário.

Segundo Lima (1994) a enorme dependência de fontes não renováveis de energia tem acarretado, além da preocupação permanente com o esgotamento destas fontes, a preocupação também com emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, pois, o teor deste gás na atmosfera tem aumentado progressivamente, levando muitos especialistas a acreditarem que o aumento da temperatura média da biosfera terrestre, que vem sendo observado há algumas décadas, seja devido a um “Efeito Estufa” provocado por este acréscimo de CO_2 e de outros gases na atmosfera, já denominados genericamente “gases de efeito estufa”.

Espinola e Tenório (2006) comentam que nos últimos anos a produção por pessoa de lixo nas grandes cidades aumentou de 0,5kg/dia para 1,2kg/dia. Tesseroli

(2003) informa que 85% do lixo são depositados a “céu aberto” nos chamados “lixões”, e 70% das internações em hospitais públicos são devidas a doenças causadas pela falta de saneamento básico.

De acordo com Oliveira (2000) a composição física dos RSU de algumas cidades paulistas, com características semelhantes às de Bauru, está demonstrada na **Tabela 3.9**.

Tabela 3.9 Composição física do RSU (%).

Cidade	Ano	Matéria Orgânica	Papel e papelão	Plástico	Vidro	Metal	Outros
Botucatu	1997	74,11	7,61	8,41	1,99	3,86	4,02
São Carlos	1989	56,7	21,3	8,5	1,4	5,4	6,7
Rio Claro	1985	62,8	15,2	5,5	2,1	3,5	10,9
São Paulo	1993	37,8	29,6	9,0	4,9	5,4	13,3

A reciclagem energética tem estreita relação com a incineração de RSU. Ela é feita a partir de uma instalação de combustão de RSU que difere da usina de incineração porque gera um produto, a energia elétrica e/ou vapor, que pode ser vendida, resultando em receita para o município.

Dados da EPA (1998) mostram que quando a incineração dos RSU tem como objetivo a recuperação de energia deve-se conhecer a composição dos RSU, diretamente relacionada à quantidade de energia a ser recuperada. A umidade e a redução de percentagem de plásticos, por exemplo, diminuem a energia gerada, elevando o custo da tonelada incinerada e conseqüentemente da energia vendida. Ainda de acordo com a EPA (1998) nos Estados Unidos estima-se que 75% (em peso) dos RSU são combustíveis; e no Brasil, a parte combustível dos RSU, varia em torno de 40% (Lima, 1995).

Segundo Barbosa (1995), o valor médio do PCI para os RSU, no Brasil, é de 1.300 kcal/kg (5,44MJ/kg). Segundo Lima (1994), o valor do PCS do RSU no Brasil é de 4.267 kcal/kg (17,86 MJ/kg) e do PCI é 1.285 kcal/kg (5,38 MJ/kg).

As características de alguns materiais recicláveis podem ser reunidas na **Tabela 3.10**. (CEMPRE, 2008).

Tabela 3.10: Características de alguns materiais recicláveis.

Material	Peso no RSU (%)	Reciclagem no Brasil (%)	Preço Médio de Mercado (R\$/t.)	Poder Calorífico (kcal/kg)
Papel ondulado	4,1	60	450,00	1.775
Papel e Papelão	24	37	400,00	1.814
Plástico Rígido	15	15	500,00	4.712
PET	1,4	33	950,00	5.039

O valor médio do Poder Calorífico Inferior de alguns materiais encontrados no RSU está reunido na **Tabela 3.11**, conforme Conesa (2005).

Tabela 3.11: Valor médio PCI de alguns componentes do RSU.

Material	PCI (kcal/kg)
Resíduo de comida	700
Papel/papelão	2.500
Têxtil	3.400
Madeira	4.300
Plástico	5.000

Questões ambientais sérias estão envolvidas na escolha do material para reciclagem, ou deixá-los com os RSU para melhoria do poder calorífico. Por exemplo, uma tonelada de aparas de papel ondulado pode evitar o corte de 10 a 12 árvores provenientes de plantações comerciais reflorestadas.

A fabricação de papel com uso de aparas gasta 10 a 50 vezes menos água que no processo tradicional que usa celulose virgem, além de reduzir o consumo de energia pela metade. Ou ainda a separação ou não do Polietileno de Baixa Densidade que juntamente com o Polietileno Tereftalato possuem alto poder calorífico, mas que liberam gases nocivos ao meio ambiente quando incinerados, podendo-se citar o monóxido e dióxido de carbono, acetaldeído, benzoato de vinila e ácido benzóico.

A geração desses gases exige sistemas de tratamento de gases mais sofisticados e eficientes, implicando na geração de energia mais cara.

A **Tabela 3.12** (SCOTT, 1999) oferece um panorama da energia necessária para a manufatura de materiais para embalagens. Observa-se que os plásticos possuem o menor conteúdo de energia por peso e sabemos que um quilograma de plástico permite manufaturar um número muito maior de embalagens do que, por exemplo, um quilograma de vidro ou metal.

Tabela 3.12: Energia necessária para a manufatura de materiais de embalagem

Material	Energia (kWh/kg)
Alumínio	74,1
Aço	13,9
Vidro	7,9
Papel	7,1
Plástico	3,1

De fato, o conteúdo de energia do plástico é comparável ao conteúdo de energia dos derivados de petróleo, que não só são usados como matéria-prima na produção de plásticos como também queimados para a produção de energia. Assim, é claro que o esforço de coletar, separar e reciclar deixa de ser economicamente rentável quando a recuperação de energia a partir do plástico torna-se uma opção viável.

A energia obtida pode ser empregada para reduzir a incineração de derivados de petróleo, os quais podem ser usados na produção de novos plásticos de qualidade superior se comparados ao material reciclado. Além disso, este processo poupa o esforço e a energia empregados na reciclagem.

Estas considerações levam à opção pela incineração de resíduo sólido urbano com recuperação de energia. Como mencionado anteriormente, há considerável discussão sobre suas vantagens com relação aos aterros sanitários bem gerenciados. A Europa e o Japão fizeram uma clara opção pela incineração (PORTEOUS, 2005). A União Européia (EU) considera o aterro sanitário a última

alternativa, pelo grande impacto negativo sobre o meio ambiente e por não empregar o lixo como um recurso. Recentemente, o aterramento de resíduos inflamáveis foi proibido (COM, 1999). Os críticos (DIJKGRAAF, VOLLEBERGH, HERMAN, 2004) afirmam que a Comissão Europeia se baseia em critérios assimétricos ao comparar as opções.

A última opção, o depósito final num aterro sanitário, não é objeto deste estudo, apesar de ser relevante como opção para o depósito final das cinzas da incineração.

A recuperação de materiais de resíduo sólido urbano para reciclagem é feita em muitos países e certamente tem um lugar importante no sistema de gerenciamento do lixo. Como mostra Oliveira (2004), no caso brasileiro, a recuperação de metais, vidro, plástico e papel podem ter valor social e financeiro. No entanto, há casos em que o esforço e a energia para recuperar, transportar e reciclar os materiais supera o valor criado pelo processo. Isto ocorre especialmente no caso de peças pequenas e sujas de plástico, tais como copos, filmes ou garrafas, amplamente utilizados para embalar alimentos e produtos destinados à saúde.

3.5.1 Aterros de Resíduo sólido Urbano

A solução mais primitiva para a eliminação do lixo é o lixão a céu aberto, que continua a ser predominante em muitos países em desenvolvimento, inclusive no Brasil. Os lixões caracterizam-se pelo depósito indiscriminado de lixo, pelo pouco controle de seu funcionamento e seu impacto ambiental. Os mais nocivos são aqueles localizados nas proximidades de rios e nascentes, do mar ou em áreas onde é possível a infiltração do chorume no lençol freático.

Um aterro operado ou semi controlado costuma ser o primeiro estágio para melhorar a qualidade dos lixões. Os aterros controlados operam com algum tipo de inspeção e controle da entrada dos tipos de lixo, compactam-no e aplicam cobertura com terra. No entanto, não há controle satisfatório do impacto ambiental do chorume ou do gás de aterro sanitário. Isto é especialmente grave porque o chorume pode contaminar o lençol freático. À medida que aumenta o tamanho do aterro, o seu impacto ambiental torna-se cada vez mais intolerável.

O termo aterro controlado descreve uma operação com infra-estrutura apropriada para captar e dar tratamento limitado ao chorume. O lixo é compactado e

freqüentemente coberto com terra, uma atividade que costuma consumir cerca de 50% do orçamento operacional. Há algum tipo de ventilação passiva para reduzir o perigo de explosões ou equipamentos simples de combustão do gás.

O aterro sanitário faz tratamento adequado e contínuo do chorume, captura e queima o gás e tem procedimentos para a cobertura final e monitoramento contínuo após a desativação da operação. Um aterro sanitário com recuperação de energia emprega o gás capturado na produção de energia.

Segundo Hauser (2006), o aterro não gerenciado é caracterizado por ser a céu aberto e aqueles em que não há tratamento do chorume adequado nem queima do metano. A Comissão Européia (EC, 2000) alerta que a produção de chorume e de gás varia em cada caso. A contenção total implica isolamento completo do lixo e exige sistemas ativos de proteção ambiental de longo prazo. Além disso, deve-se considerar que os forros eventualmente vazam, liberando chorume ou gás. Ainda não se sabe em quanto tempo um aterro chega à sua “qualidade final de armazenamento”, em que o local seja seguro sem sistemas ativos de manutenção.

Na **Tabela 3.13** encontra-se a produção de RSU por pessoa baseado no número de habitantes de uma determinada região brasileira (IBGE, 2000).

Tabela 3.13: Índice de produção “per capita” da RSU em função da população.

População (hab.)	Produção de RSU (kg/hab.dia)
Até 100.000	0,4
De 100.001 a 200.000	0,5
De 200.001 a 500.000	0,6
Maior que 500.001	0,7

Bauru é uma típica cidade de porte médio do interior paulista, contando hoje com aproximadamente 347.601 habitantes (IBGE, 2007). Gera diariamente 210.000 kg de RSU, que são destinados para o aterro sanitário, segundo informações da Secretaria do Meio Ambiente da cidade. Considerando os critérios da tabela 3.13, Bauru gera 0,6 kg/hab.dia de RSU, ou seja, aproximadamente 208.000 kg por dia. Foi adotado para esta pesquisa 210.000 kg por dia.

Na **Tabela 3.14** encontra-se uma composição média, obtida com dados americanos, mas que são utilizados na maioria dos trabalhos sobre o assunto (TCHOBANOGLOUS; THEISEN; VIGIL, 1996).

Tabela 3.14: Composição dos RSU Domésticos – Orgânicos.

Componentes	Porcentagem em massa (% - Base seca)					
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinzas
Res. Comida	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel/papelão	44	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8			10,0
Têxteis	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Borracha	78,0	10,0		2,0		10,0
Couro	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Res. Jardim	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Madeira	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5

A estimativa das quantidades por habitante e totais de RSU gerados, bem como sua composição, pode ser divergente, pois depende de vários fatores, tais como: época do ano, tipo de coleta e pesagem, climatologia, entre outros, Tchobanoglous; Theisen; Vigil (1996).

A análise elementar do RSU implica na determinação da porcentagem de Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O), Nitrogênio (N), Enxofre (S), e cinza. Tal análise é importante devido tanto ao aspecto energético, como com relação à preocupação com a emissão de compostos clorados durante a incineração.

Ainda segundo Tchobanoglous; Theisen; Vigil, (1996), na **Tabela 3.15** encontra-se a composição da parte inorgânica que não irá contribuir para o Poder Calorífico do RSU.

Tabelas 3.15: Composição dos RSU Domésticos – Inorgânicos.

Componentes	Porcentagem em massa (% - Base seca) - Inorgânicos					
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinzas
Vidros	0,5	0,1	0,4	<0,1		98,9
Metais	4,5	0,6	4,3	<0,1		90,5
Escórias, etc	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

Segundo Silva (1997) a composição típica aproximada dos RSU depositados no aterro sanitário de Bauru está descrita na **Tabela 3.16**.

Tabela 3.16: Composição típica dos RSU do Aterro Sanitário de Bauru, modificada.

Componente	Massa Úmida (%)	Umidade (%)	Massa Seca (%)	Massa seca Normalizada (%)
Res. de Comida	55,0	70,0	16,50	32,77
Papel e Papelão	21,0	6,0	19,74	39,21
Têxtil e Couro	5,0	10,0	4,50	8,94
Madeira	1,1	20,0	0,88	1,75
Plástico	8,9	2,0	8,72	17,33
Vidro	2,6	2,0	2,55	-
Metais	5,4	2,0	5,29	-
Outros	1,0	5,0	0,95	-
Total	100		59,13	100

Da tabela acima se percebe que a maior parte do RSU é constituída pelo resíduo de comida (55%) e papel/papelão (21%). O plástico é outro componente importante, pois, além de contribuir com 8,9% em massa também tem um Poder Calorífico elevado.

Na coluna Massa Seca Normalizada, encontra-se a porcentagem em massa desconsiderando os componentes que não contribuem para elevar o Poder Calorífico do RSU (vidros, metais, outros).

3.5.2 Aterros no Brasil

O IBGE (2000) realizou uma pesquisa sobre saneamento básico e gerenciamento de aterros no Brasil. Ainda que o estudo contemple o ano de 2000 e preveja melhorias substanciais nos anos seguintes, continua sendo a melhor pesquisa disponível. A seguir, apresenta-se um resumo dos dados relevantes para este trabalho.

O Brasil possui cerca de 5.500 municípios, responsáveis pela regulamentação e organização de seus serviços públicos. A maior parte dos municípios (88%) faz sua própria coleta e eliminação de resíduo sólido urbano.

Para compreender melhor a situação, é interessante visualizar a distribuição da população: só 66 centros urbanos com mais de 300.000 habitantes (1,2% do número total de municípios) concentram aproximadamente 35% da população do país, enquanto cerca de 5.000 municípios (90% do total) com menos de 50.000 habitantes reúnem outros 35% da população. Os restantes 30% vivem em aproximadamente 500 cidades com mais de 50.000 e menos de 300.000 habitantes.

A média de RSU “per capita” aumenta com o tamanho do município. Os habitantes dos povoados produzem menos de 640 g ao dia, os das cidades produzem entre 640 e 840 g de RSU ao dia e os habitantes dos centros urbanos produzem entre 840 e 1.700 g de RSU ao dia.

No total, o Brasil recolheu cerca de 154.000 toneladas de lixo ao dia em 2000, um volume 54% maior que as 100.000 toneladas ao dia de 1989, ao passo que o crescimento populacional foi de unicamente 16%. Segundo o IBGE (2000), aproximadamente 47% em peso (p/p) do volume total de RSU é despejado em aterros sanitários, 22 % (p/p) em aterros controlados e só 30% (p/p) em Aterros não Gerenciados. Isto é, 69% do total de RSU em peso estão sendo adequadamente tratado.

Se analisarmos a situação de acordo com os diferentes grupos de municípios, veremos que 63,6% deles têm lixões a céu aberto e só 32,2% usam aterros adequados (13,8% aterros sanitários e 18,4% aterros controlados) para a eliminação de RSU. Portanto, o estudo mostra que os centros urbanos não só produzem a maior parte do lixo como possuem os locais de eliminação mais avançados, enquanto a situação nos povoados e cidades menores é mais crítica.

Podem-se esperar mais melhorias com a implementação de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo para a construção de aterros sanitários com recuperação de energia ou, pelo menos, a combustão do gás.

Segundo o IBGE (2000), o setor de coleta, eliminação e limpeza urbana emprega cerca de 320.000 pessoas. Além deste emprego formal, o estudo relaciona aproximadamente 24.000 catadores que vivem da coleta e venda de materiais recicláveis obtidos diretamente nos lixões e aterros. Tratam-se de pessoas de todas as idades que vivem e trabalham diretamente nos lixões, em condições

caracterizadas pela imundície, odores repugnantes e animais e insetos vetores de doenças infecciosas. Além dos riscos óbvios dos patogênicos, estes trabalhadores enfrentam sérios riscos de acidentes devido à proximidade com máquinas de transporte e compactação. Para melhorar esta situação, foram criados diversos programas, como o Lixo e Cidadania, liderados pelo UNICEF. Um de seus primeiros objetivos é buscar alternativas para as crianças e capacitar os trabalhadores em outras atividades ou melhorar suas condições de trabalho por meio da criação de cooperativas e associações. Muitos municípios começaram a valorizar a contribuição dos catadores para a recuperação de materiais recicláveis, principalmente porque isto resulta na ampliação do tempo de vida dos aterros. Afinal, não se pode desprezar a importância econômica desta atividade, que permite a muitas famílias sobreviver modestamente quando não encontram alternativas.

Johannessen e Boyer (1999) relatam que em 1997 a renda mensal de um catador era de R\$ 400,00 (U\$370,00) muito acima do salário mínimo de então, que era R\$ 106,00 (U\$98,00). De acordo com o Jornal Folha de São Paulo (2003), a renda média mensal de um catador em 2003 era de R\$ 500,00 (U\$ 175,00) e o mínimo de renda obtido era de R\$ 200,00 (U\$70,00). Em 2002, o faturamento do mercado de reciclagem foi de cerca de R\$ 4 bilhões, dos quais os principais lucros vão para os intermediários e as companhias de reciclagem.

3.6. PRINCÍPIOS E MECANISMOS DO PROTOCOLO DE KYOTO

O lixo depositado nos aterros sanitários é considerado um dos principais geradores de metano e CO₂, os gases mais prejudiciais e causadores do efeito estufa. A captura dos gases gerados, para que sejam revertidos em energia, ou para a simples queima, pode render créditos para serem comercializados no mercado de carbono. O Protocolo de Kyoto tem como objetivo reduzir a emissão de gases que causam o efeito estufa em 5,2 %. Isso será feito através da criação de certificados de redução de emissão transferíveis por investimentos em projetos de mitigação. Essa redução deve ocorrer entre 2008 e 2012 e a base para medir a diminuição é o ano de 1990. Segundo um acordo de 2001, os países que não cumprirem as metas

de emissão até 2012 terão de realizar os cortes previstos mais um adicional de 30%, a partir de 2.013.

A Convenção “Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima” (UNFCCC, 1992) foi definida na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro, em 1992. O principal objetivo da Convenção é estabilizar as concentrações atmosféricas de gases do efeito estufa em níveis que evitem interferências antrópicas (induzidas pelo homem) perigosas no sistema climático. A Convenção ressalta a responsabilidade dos países industrializados e a maior vulnerabilidade dos países em desenvolvimento ante as mudanças climáticas. Em consequência, ela compromete os países industrializados a assumirem a liderança no combate às mudanças climáticas e oferecerem os recursos materiais e técnicos aos países em desenvolvimento para que se adaptem às mudanças climáticas e alcancem o desenvolvimento sustentável.

O Protocolo de Kyoto foi acordado em 1997, como uma extensão substancial e obrigatória da Convenção e esboça as regras básicas para a implementação dos objetivos da Convenção. Estas regras foram mais bem desenvolvidas e detalhadas nas reuniões posteriores da COP. Finalmente, em 2001, foi acordado um conjunto de decisões conhecido como o Acordo de Marrakesh. Como parte deste acordo, foram definidos os principais detalhes operacionais dos Mecanismos Flexíveis: Implementação Conjunta, MDL e Comércio de Emissões (UNFCCC, 2003). O MDL e a implementação conjunta foram desenhados para ajudar as partes incluídas no Anexo I a cumprir suas metas de maneira econômica e ambientalmente eficaz. A implementação conjunta permite às partes incluídas no Anexo I do Protocolo de Kyoto implementar projetos que reduzem as emissões em território de outras partes incluídas no Anexo I. As URE geradas por estes projetos são empregadas pelos países investidores do Anexo I para cumprir seus compromissos com o Protocolo.

O Comércio de Emissões permite às partes incluídas no Anexo I adquirir e comercializar as reduções de emissões geradas, além das permissões de emissões não utilizadas de outras partes incluídas no Anexo I. As partes incluídas no Anexo I podem comercializar entre si as chamadas Unidades de Quantidade Atribuídas, permissões para emissões cujo volume varia de acordo com o compromisso do país com a redução de emissões. Se um país conseguir reduzir mais do que o volume exigido, pode vender suas UQAs.

Este sistema comercial deve permitir às partes buscar oportunidades baratas de reduzir as emissões onde quer que ocorram e, portanto, reduzir o custo total do alívio à mudança climática. A lógica por trás dos mecanismos baseados em projetos é que o lugar onde ocorre a redução de emissões é secundário para o clima global, ao mesmo tempo em que a competição aumenta a eficácia econômica (LÜCKGE; PETERSON, 2004). Além do objetivo de minimizar os custos do compromisso para os países do Anexo I, é uma meta explícita do MDL de contribuir para o desenvolvimento sustentável dos países em desenvolvimento.

A implementação de um projeto MDL está subordinada a critérios específicos que visam garantir o desenvolvimento sustentável e a real redução de emissões.

3.7 O EFEITO ESTUFA E O PROTOCOLO DE KYOTO

Segundo Arrhenius (1886), o fenômeno do efeito estufa não era considerado um perigo, mas, sim um fato benéfico, conforme sua afirmação no livro “Worlds in the Making” de 1906 (HINOSTROZA, 2000):

Por influencia do percentual crescente de CO₂, na atmosfera temos esperança de desfrutar de épocas com climas melhores e mais estáveis, sobretudo nas regiões mais frias da terra.

Em 1938, o inglês George Callendar achava que o CO₂ sendo lançado na atmosfera “melhoraria o clima do mundo e fertilizaria as terras cultiváveis”

Ainda segundo Hinostroza (2000), embora haja consenso da maioria dos pesquisadores em reconhecer que o clima global teria se alterado nas últimas décadas, no início dos anos 80 ainda havia afirmações otimistas referente a intensificação do Efeito Estufa, como a de Roger Revelle (dirigente do Scripps Institution of Oceanography):

“As mudanças não trarão grandes acontecimentos; serão alterações ambientais lentas e difusas. A maioria das pessoas nem perceberá.”

Há quem argumente que o problema começou com a chegada da revolução industrial em 1800 e continua até hoje. Ao longo dos cem últimos anos, vem ocorrendo um aumento significativo nas concentrações dos chamados GEE na atmosfera terrestre, fato atribuído principalmente às ações chamadas antrópicas ou induzidas por atividades humanas.

O grande aumento dessas atividades se deu principalmente pela expansão das atividades no setor industrial, agrícola e de transportes, que demandou grande consumo de energia, proveniente da queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural), além do desflorestamento de novas áreas para ocupação e uso da terra com outras atividades.

Com a queima de combustíveis fósseis, somados ao desmatamento e demais atividades responsáveis pela emissão de GEEs à atmosfera, a concentração desses gases aumentou significativamente ocasionando o fenômeno chamado de efeito-estufa (CENAMO, 2004).

O Potencial de Aquecimento Global - GWP (*Global Warning Power*) é a principal medida de comparação entre os diferentes GEE. Tomando-se como referência o CO₂, os demais GEE são estimados, considerando-se diferentes intervalos de tempo (IPCC, 1996). A **Tabela 3.17** apresenta os principais gases do Efeito Estufa (IPCC, 1.996; ALVES e VIEIRA, 1.998).

Tabela 3.17: Principais gases do efeito estufa - (GEE).

Espécies (GEE)	Fórmula Química	Tempo de vida (anos)	Potencial de aquecimento global (GWP)		
			20 Anos	100 Anos	500 Anos
Dióxido de carbono	CO ₂	Variável	1	1	1
Metano	CH ₄	12+/- 3	56	21	6,5
Óxido Nitroso	N ₂ O	120	280	310	170
Ozônio	O ₃	0,1 – 0,3	n.d	n.d	n.d
CFCs	várias	Até 100	n.d	Até 4600	Até 590

GWP dado o horizonte de tempo

n.d. – não disponível

A utilização de aterros sanitários como forma de destinação final dos resíduos sólidos urbanos apresenta-se ainda hoje no Brasil e na maioria dos países do mundo como a principal alternativa encontrada para o lixo.

Com os aterros sanitários, diversos problemas ambientais devem ser considerados, sendo um deles a emissão de gases pela decomposição do material orgânico. Os principais constituintes desses gases são o dióxido de carbono e o gás metano, sendo este último um combustível possível de ser coletado e utilizado como fonte de energia.

O lixo depositado em aterros é apontado, juntamente com o tratamento anaeróbio de esgotos domésticos e efluentes industriais, como uma das maiores fontes de metano liberado para a atmosfera.

Segundo IPCC (1996), os aterros são responsáveis por cerca de 5 a 20% do total de metano liberado por fontes com origem em atividades humanas.

Em Vieira e Alves (2003) foram apresentados resultados do inventário nacional de emissões de metano decorrentes da disposição de resíduos sólidos e do tratamento de águas residuárias no Brasil, para o período de 1990 a 1994, com base na metodologia sugerida pelo *International Panel on Climate Change* em IPCC (1996).

A partir de dados estatísticos de população e fatores estimados de geração de resíduos, chegou-se a uma quantidade de emissões de gás metano por resíduos sólidos no Brasil para o ano de 1990 de 618.000 toneladas, aumentando para 677.000 toneladas no ano de 1994.

O gás metano gerado em aterros, quando não devidamente controlado, seja por meio de sistemas de coleta e aproveitamento, seja pela queima em *flares*, contribui para o agravamento do efeito estufa, desse modo, conclui-se que o gás citado afeta não somente a integridade da região onde é gerado, mas também o meio ambiente como um todo.

Além dos danos causados pelo agravamento do efeito estufa, o biogás gerado pelos aterros e “lixões” pode representar riscos para o ambiente local quando não devidamente controlado, podendo migrar lateralmente para áreas próximas ou mesmo emanar pela superfície, causando prejuízos à saúde humana e à vegetação, decorrentes da formação de ozônio de baixa altitude ou da exposição a alguns constituintes do biogás que podem causar câncer e outras doenças que atacam fígado, rins, pulmões e o sistema nervoso central (EPA, 1991).

Na **Figura 3.7** pode-se observar o detalhe do sistema de captação do gás metano do aterro sanitário Bandeirante, em São Paulo, que é utilizado para geração de energia elétrica.



Figura 3.7 – Sistema de captação de metano. Aterro Bandeirantes.

Ainda segundo EPA (1991), devido às altas concentrações de gás metano no biogás, existe o risco de incêndios e explosões em instalações próximas aos aterros.

Outro efeito negativo da emissão descontrolada de biogás é o inconveniente causado por odores desagradáveis que, segundo a mesma referência, levam a distúrbios emocionais em indivíduos que residem em áreas próximas aos aterros e favorecem a desvalorização das propriedades.

Alem dos problemas citados, também tem-se que considerar o problema da contaminação dos corpos hídricos, fontes de importante recurso, a água, e, ao mesmo tempo, receptores dos rejeitos da vida moderna (MANCUSO, SANTOS, 2003).

A legislação brasileira, atentando para esta necessidade, apresenta, nos diversos estados brasileiros, limites de qualidade para o lançamento nos corpos hídricos que tendem a ser cada vez mais restritivos (VON SPERLING, NASCIMENTO, 1999).

Segundo Oliveira (2004), o aproveitamento energético evita a decomposição espontânea da matéria orgânica, processo que emite gases responsáveis pelo efeito estufa, na fração de 6,5% de metano em peso do lixo disposto. Congregando isto ao

fato de estar sendo iniciado um mercado internacional para comercializar estas emissões evitadas, é possível obter receitas adicionais, variando entre US\$ 1,00/t CO₂ equivalente (a equivalência entre os gases é calculada com base em seu potencial de aquecimento global, tendo sido adotado o dióxido de carbono, CO₂, como unidade), de acordo com a Bolsa de Carbono de Chicago (CCX, 2004), e US\$ 5,00/t CO₂ equivalente, preço máximo proposto por edital do governo holandês (CERUPT, 2002). Em 2007 houve negociações que atingiram a US\$ 25 por tonelada de CO₂ equivalente

Na **Figura 3.8** observa-se o sistema de coleta de chorume no aterro Bandeirantes



Figura 3.8: Sistema de coleta de chorume. Aterro Bandeirantes

3.8 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Além da utilização de matérias-primas novas, para as quais os custos de produção são positivos, existe grande quantidade de biomassa residual, tanto nos

centros urbanos (resíduos públicos, oriundos das atividades domésticas) quanto no meio rural (resíduos privados, advindos da atividade produtiva). O lixo urbano, as cascas de arroz, o bagaço, as pontas e a palha da cana-de-açúcar, configuram-se como poluentes e, portanto, representam custos de tratamento que serão convertidos em custo negativo do combustível, se forem aproveitados para geração de energia.

Ainda na esfera residual, ocupam lugar de destaque os insumos derivados de processos industriais, principalmente da indústria alimentícia, que apresentam potencial químico para transformação em biocombustível. Os mais representativos são os óleos vegetais utilizados na fritura de alimentos, e os ácidos graxos encontrados tanto na gordura animal quanto no esgoto sanitário (este é um resíduo público, enquanto os demais são resíduos privados). A isto se somam os fatos de estarem disponíveis imediatamente, uma vez que não é necessário planejar sua produção, e de sua localização ser a mesma dos consumidores de energia, quer estejam nas cercanias das cidades (uma vez que o lixo é praticamente padronizado em todo o território nacional) ou nas unidades produtivas rurais (onde os insumos são mais específicos), sinalizando para a prioridade de seu aproveitamento

Assim, ao contrário da energia eólica e das PCHs, cuja exploração depende da disponibilidade do recurso natural e cujas áreas para instalação de empreendimentos normalmente ficam longe dos centros urbanos, a biomassa residual pode ser utilizada em usinas instaladas nas áreas de vazadouro de lixo, o que exige menos investimento em linhas de transmissão, ou nas fazendas de cultivo.

3.9 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Conforme Hauser (2006), como aproximadamente 85% do carbono contido nos RSU é bio-derivado, as emissões de CO₂ são neutras para o clima e Porteus (2001) calcula que as emissões antrópicas de CO₂ de uma usina WTE sejam aproximadamente 264 g CO₂ por kWh de eletricidade, ao passo que as turbinas a gás de ciclo combinado, atualmente a tecnologia mais carbono-eficiente na produção de eletricidade com combustíveis fósseis, gera cerca de 400 g de CO₂ por kWh de eletricidade.

Portanto, a diminuição final de GEE com a substituição das usinas de turbinas a gás de ciclo combinado por WTE é aproximadamente 136 g de CO₂/kWh de eletricidade. Além deste efeito, a incineração de RSU evita a geração do metano que ocorreria no aterro.

O volume de metano que pode ser esperado em um aterro pode ser avaliado com uma fórmula desenvolvida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima IPCC (1996). Como o resultado depende de características específicas do lixo e de outras variáveis, as cifras oscilam.

Segundo Vespa (2005), os organismos biológicos que podem ser aproveitados como fontes de energia são chamados de biomassa. O resíduo sólido orgânico que dá origem ao biogás é uma biomassa utilizada para a geração de energia.

No Brasil, a proporção de energia total consumida é aproximadamente 35% de origem hídrica e 25% de origem na biomassa, significando que os recursos renováveis suprem algo em torno de dois terços dos requisitos energéticos do país.

A biomassa é uma forma indireta de aproveitamento da energia solar absorvida pelas plantas, já que resulta da conversão da luz do sol em energia química (BUBU, 2005).

Outra forma possível é a incineração dos resíduos, sendo a técnica mais comumente utilizada para o tratamento térmico de resíduos até os dias atuais. Trata-se da rota tecnológica de destinação de resíduos urbanos mais testada no mundo e a que obtém a maior redução de peso/volume (cerca de 90%). Levantamentos mostram que mais de US\$ 1 bilhão foram investidos na adequação de Usinas somente nos EUA (USINA VERDE, 2008).

Adequadas às exigentes normas ambientais vigentes na expressiva maioria dos Países, dezenas de novas plantas de incineração com recuperação de calor para geração de energia elétrica ou térmica foram construídas nos últimos 10 anos nos EUA, na Ásia e na União Européia.

Atualmente, mais de 130 milhões de toneladas de resíduos urbanos são tratados por ano em cerca de 650 unidades de incineração com recuperação de energia implantada em 35 Países gerando mais de 10.000MW de energia elétrica ou térmica. Entre 1996 e 2001, 117 novas plantas de incineração de resíduos urbanos com recuperação de energia foram construídas, com destaque para países em desenvolvimento da Ásia, ampliando em 7,8 milhões de toneladas a capacidade anual de tratamento de resíduos urbanos.

Ainda de acordo com Oliveira (2000), o fato das duas primeiras rotas requererem mudanças de comportamento da população e dos interesses dos setores econômicos é suficiente para que sejam entendidas como metas futuras. Assim, a reciclagem e a recuperação de energia são as alternativas disponíveis no curto prazo para reduzir a quantidade de resíduos que é encaminhada aos vazadouros de lixo.

A **Tabela 3.18** mostra o potencial de conservação de energia por tonelada de material reciclado. Considerando que cada material tem capacidade técnica de reciclagem mínima de uma vez, e que a incineração de plástico resulta em aproximadamente 3,3 MWh/t de eletricidade, enquanto a de papel oferece 3,5 MWh/t (Rosa et al., 2003), é possível verificar que a conservação de energia obtida pela reciclagem representa, no mínimo, tanto quanto a incineração. Tal fato justifica sua priorização quanto a fonte energética e como objeto de estudo para identificação do coeficiente de reciclagem de cada material.

TABELA 3.18 - Potencial de conservação de energia por tonelada reciclada.

Material	MWh/tonelada
Papel	3,5
Plástico	3,3

Segundo Motta, Chermont (1996) e Oliveira (2000), as rotas para destinação final dos resíduos sólidos podem ser hierarquizadas e, quando utilizado o critério de resíduo final mínimo, sua ordenação será: redução da geração na fonte, reutilização do material produzido, reciclagem, recuperação de energia e aterro sanitário. **(Figura 3.9)**

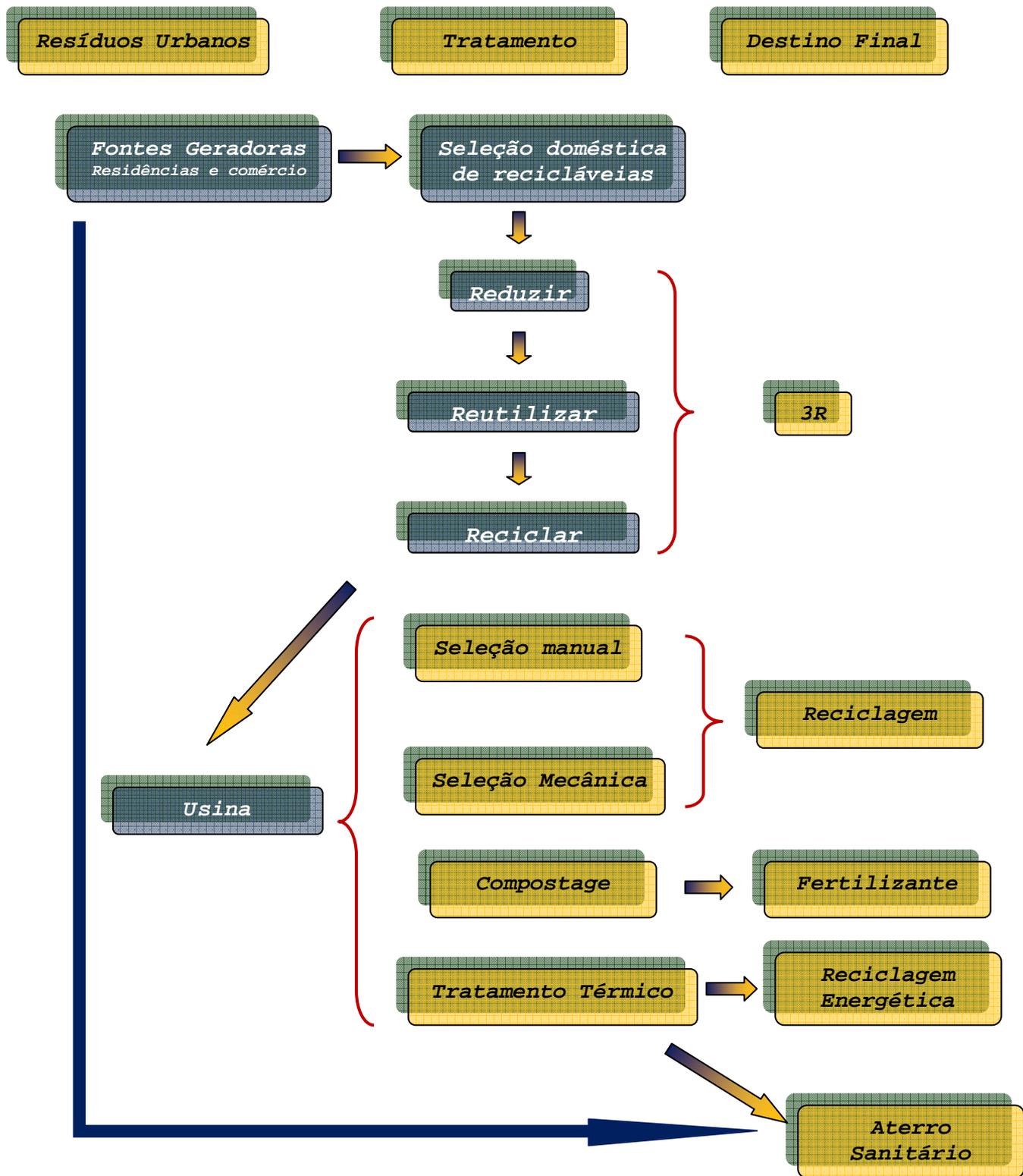


Figura 3.9: Hierarquização das destinações dos RSU.

3.10 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RSU NO BRASIL

Segundo Oliveira (2004), comparando-se os resultados das duas Pesquisas Nacionais de Saneamento Básico realizadas, em 1989 e 2000, é possível verificar que a gestão dos resíduos urbanos no Brasil ainda é ineficaz, apesar de ter melhorado. A disposição de resíduos sólidos a céu aberto no país chegava a 75% em 1989 (IBGE, 1989), tendo passado para 21% em 2000 (IBGE, 2000). A produção “per capita” passou de 1,05 kg/dia para cerca de 2 kg/dia, para os habitantes das grandes cidades, enquanto os habitantes das pequenas cidades tiveram um aumento na faixa de 50% sobre o 0,5 kg/dia de 1.989, totalizando 45 milhões de toneladas anuais (IBGE, 2000).

O potencial estimado por Oliveira e Rosa (2003) para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, no Brasil, foi de 50 TWh, estimando a produção de lixo em 20 milhões de toneladas anuais com base em dados de 1989, da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE. A atualização desta pesquisa, em 2000, quando foi divulgada a produção de 45 milhões de toneladas anuais, elevou este potencial para 120 TWh, cerca de 36% da oferta atual de eletricidade.

Este cálculo considerou 55 TWh referentes à conservação possível com a reciclagem máxima de papéis, plásticos, vidros e metais, 52 TWh decorrentes da geração termelétrica utilizando, integralmente, a fração “não-reciclável” – restos alimentares, resíduos de poda de árvores e de varrição das vias públicas – através da tecnologia de melhor aproveitamento dentre as disponíveis, além de 13 TWh oriundos do reaproveitamento do biogás presente nos vazadouros de lixo existentes.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, a maior do mundo produz cerca de 90 TWh anuais de eletricidade.

Segundo o IPT, 35% do lixo são formados por recicláveis, portanto 15,7 milhões de toneladas. Com a média de conservação de eletricidade de 3,5 MWh/t de reciclável (OLIVEIRA, 2000), o potencial nacional é de 55 TWh/ano.

O lixo brasileiro é composto, em média, por 65% de restos alimentares (estimativa conservadora), 25% papel, 5% plástico, 2% vidro e 3% metais (IPT,

1998). Toda a parte não reciclável, ou seja, os 65% de material orgânico servem como combustível para incineração.

A **Figura 3.10** mostra a composição da coleta seletiva no Brasil segundo dados do CEMPRE (2006).

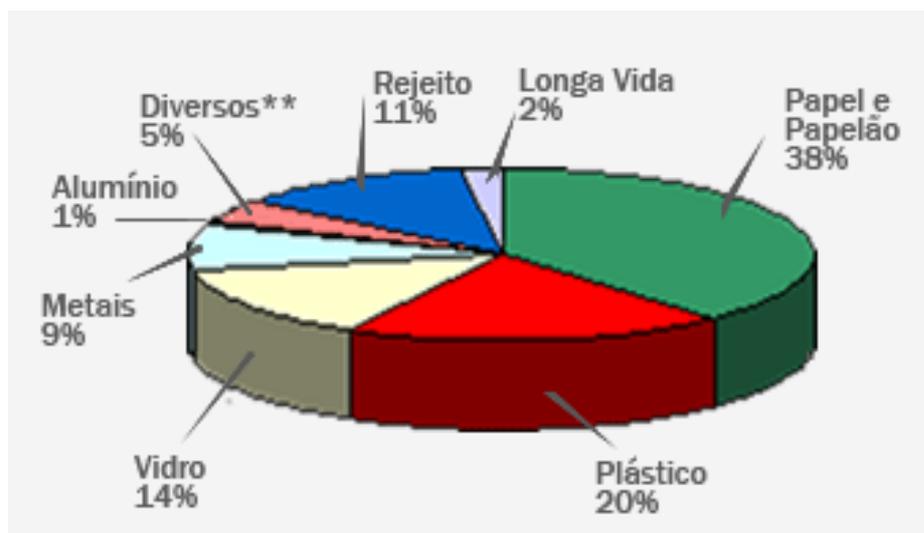


Figura 3.10: Composição da coleta seletiva no Brasil, em peso.

3.11 INCINERADORES

Incineradores são equipamentos projetados para a destruição térmica de resíduos reduzindo seu peso, volume e diminuindo o potencial de periculosidade do resíduo (TOMAZ, 2001), resultando a formação de gás carbônico (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), nitrogênio (N₂), vapor d'água, cinzas e escória (composta, dentre outros, de metais e materiais inertes como vidro, entulho, etc.).

De maneira geral os incineradores devem atender as normas dos órgãos públicos de controle. (CETESB, ABNT, Secretaria do Meio Ambiente, Conama, Ministério do meio Ambiente, etc.)

3.11.1 Incineração

Segundo Hauser (2006), a incineração de RSU é uma maneira eficiente de reduzir o volume de lixo e, portanto, a demanda de espaço para aterramento, especialmente, se cinzas e resíduos sólidos residuais provenientes da incineração e lavagem de gases, forem adequadas para o uso como matéria-prima na construção. Como as usinas WTE podem ser instaladas próximo aos centros de produção de lixo, elas reduzem os custos sociais e financeiros do transporte.

A combustão do lixo representa o método mais eficiente para eliminar as emissões de metano que ocorreriam se os RSU fossem despejados em aterros. Além disso, a recuperação de energia do lixo pode substituir a produção de energia a partir de combustíveis fósseis. Estas são duas maneiras de reduzir as emissões de GEE com a técnica WTE.

Devido aos altos custos de investimento e operação, as usinas WTE apresentam dificuldades para os países em desenvolvimento quando o capital e a mão-de-obra especializada são escassos. Como a incineração de RSU é significativamente mais cara do que o aterramento, os custos devem ser compensados mediante a venda de energia recuperada. Portanto, as características do setor de energia são importantes na consideração das usinas WTE e são desejáveis acordos sobre preços de longo prazo. O fato recente de que as usinas de WTE, nos países em desenvolvimento possam ser instaladas como projetos MDL oferecem uma fonte adicional de receita, mas os riscos devem ser cuidadosamente avaliados.

Em todo o mundo, existem poucos fabricantes experientes de usinas WTE e, caso a planta seja importada, devem-se levar em conta o investimento inicial e as necessidades futuras de divisas para a compra de peças de reposição ou serviços técnicos.

Os principais atrativos da incineração de lixo são os potenciais de redução no seu volume em até 90 % e de recuperação de energia.

As desvantagens são: o alto custo de implantação e a manutenção de um incinerador.

A queima de resíduos vem sendo cada vez mais debatida sob o aspecto ambiental. A eficiência do controle de emissões atmosféricas é muito criticada, em

especial a produção de substâncias tremendamente nocivas como as dioxinas e furanos. A incineração estaria mudando o estado dos resíduos: de sólidos para gasosos. Além disto, a lavagem dos filtros gera contaminação da água. Por fim, resta ainda resíduo sólido (as cinzas e escória).

Rand Haukohl e Marxen (1999) alertam que unicamente os equipamentos bem testados podem ser recomendados, uma vez que a solução de problemas com novas tecnologias é complicada e cara, especialmente quando a especialização é escassa.

Uma operação normal de incineração de RSU tem um limite de capacidade de 30 toneladas métricas por hora e a capacidade mínima recomendada para a operação é de 10 a 20 toneladas por hora, dividida em duas ou mais linhas de incineração, de maneira a melhorar a flexibilidade da usina.

Segundo ABNT (1990), incineração de resíduo sólido é o processo de oxidação a alta temperatura que destrói, reduzindo o volume, ou recuperando materiais ou substâncias presentes. Segundo Lima (1991), a incineração é o processo de redução de peso e volume do resíduo sólido através de combustão controlada em temperaturas elevadas. Os remanescentes são geralmente gases (CO_2 , SO_2 , N_2 , gases inertes provenientes do ar e do próprio resíduo e oxigênio do ar em excesso), água, cinzas e escórias que se constituem por metais ferrosos e inertes, como vidros e pedras. Cita ainda que, havendo combustão incompleta, pode aparecer monóxido de carbono (CO) e particulados que consistem de carbono finamente dividido, lançado à atmosfera como fuligem ou negro de fumo. Se a combustão é realizada em altas temperaturas, pode haver dissociação do nitrogênio, surgindo ainda compostos resultantes da combinação deste com o oxigênio, como o NO e N_2O_5 .

Segundo Dempsey e Oppelt, (1993) qualquer resíduo é passível de ser incinerado, até mesmo água contaminada e lamas.

Diferentes tecnologias de incineração foram desenvolvidas para tratar os vários tipos e as várias formas de resíduos. Uma das mais freqüentemente utilizadas é aquela de fornos rotativos acoplados a câmaras de pós combustão (DEMPSEY; OPPELT, 1993; BRUNNER, 1991, BONNER et.al, 1981; NIESSEN, 1978). Essas unidades, em geral, servem para incinerar resíduos sólidos, líquidos e lamas. Os compostos orgânicos dos resíduos são vaporizados e parcialmente consumidos pela combustão na câmara primária (forno rotativo) e os gases resultantes e grande parte

dos particulados são destruídos ou descontaminados na câmara secundária (**Figura 3.11**), de pós-combustão. (OWENS et al, 1991).

Os incineradores de resíduo domiciliar, que são unidades totalmente fechadas e controladas, podem ser localizados próximos aos sistemas de coleta, evitando o transporte desnecessário dos resíduos à grande distância. São, também, unidades mais compactas (menor requisito de área) em relação aos processos de compostagem e, principalmente, de aterro sanitário (CETESB, 1997).

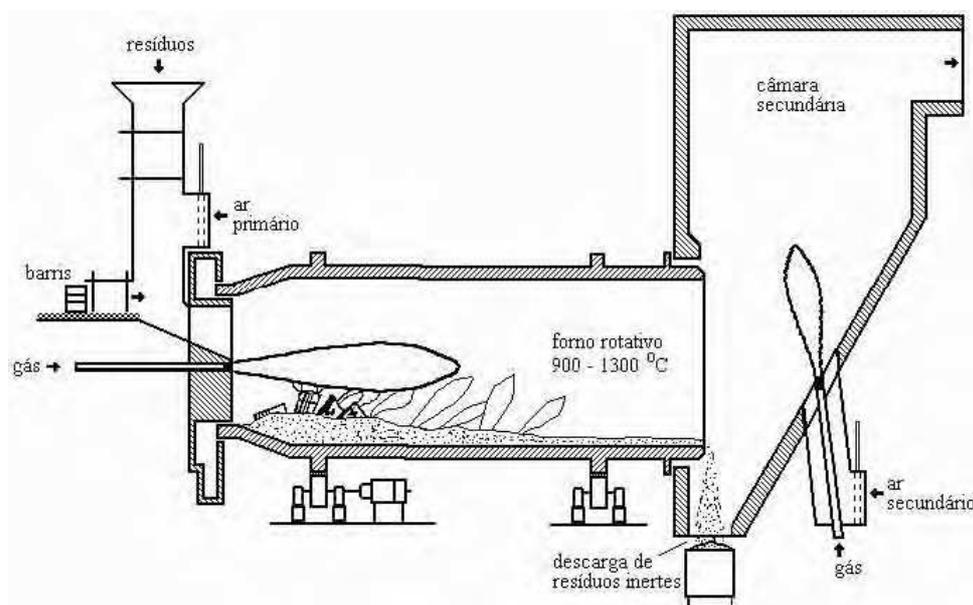


Figura 3.11: Câmara de combustão de incinerador de forno rotativo/pós-queimador típico.

Para Schneider, Rego e Caldart. (2001), os incineradores de resíduo de serviços de saúde têm sido apontados entre os sistemas de combustão como um dos maiores geradores de dioxinas e furanos, havendo, desta forma, a necessidade urgente de se exigir, avaliar e controlar os sistemas de tratamento das emissões gasosas nestas instalações.

Por se tratarem de unidades complexas, com alto grau de automatização e número elevado de dispositivos de controle de processo, que exigem especialização da mão-de-obra, os incineradores requerem valores altos de investimento e custos de operação mais elevados em relação a outros processos. No entanto, os resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) resultantes dessa forma de tratamento, que são descartados no ambiente, têm volumes bastante reduzidos, além de haver a

possibilidade de aproveitamento da energia, liberada na queima, para geração de vapor e eletricidade.

Existem vários sistemas de incineração, podendo ser divididos em dois tipos (CETESB, 1997).

Incineradores Estáticos ou de Batelada

Caracterizam-se por seu funcionamento intermitente e são de fácil operação e tecnologia simples.

Incineradores Dinâmicos ou Contínuos

Caracterizam-se por seu funcionamento contínuo e em geral são mais complexos e sua operação requer maiores atenções.

Os estágios do processo da incineração são os seguintes (CETESB, 1997):

- Alimentação do forno;
- Secagem dos resíduos;
- Combustão dos resíduos;
- Resfriamento e tratamento dos gases e outros produtos da combustão;
- Filtragem e tratamento dos gases;
- Emissão dos gases;
- Emissão de escórias;
- Tratamento de águas residuárias; e,
- Retirada das cinzas e envio para disposição em aterros.

Para Hauser (2006) um fator crucial em uma usina de incineração de RSU é a natureza do lixo e seu valor calorífico, o qual se for muito baixo, pode inviabilizar o projeto. A recuperação da energia e a utilização de outras fontes energéticas como combustível auxiliar, por exemplo, o gás natural pode vir a amenizar os custos operacionais, tornando viável a utilização deste processo.

O tratamento de lixo com um valor calorífico de 6 MJ/kg tem um custo líquido 30% acima do lixo com um valor calorífico de cerca de 9 MJ/kg, e ainda que a escassez de lixo ou as manutenções prolongadas elevam consideravelmente os custos. Para limitar estes riscos, qualquer previsão dos custos líquidos da incineração de RSU deve ser conservadora e acompanhada de análises de risco e de sensibilidade.

Deve-se considerar a situação socioeconômica em muitos municípios pobres, além das atividades organizadas e informais de reciclagem no sistema de manejo de resíduos, pois estas tendem a diminuir a quantidade de papel, papelão e certos tipos de plásticos no lixo.

Rand; Haukohl e Marxen (1999), concluem que a viabilidade dos projetos de incineração de RSU nos países em desenvolvimento é questionável. No final das contas, mesmo para as usinas financiadas por investidores privados, o risco econômico fica com a sociedade atendida pela usina e, portanto, os autores sugerem uma análise de custo benefício completa.

3.12 INTEGRAÇÃO DE INCINERADOR DE LIXO COM CENTRAL DE CO-GERAÇÃO

Conforme Menezes, Gerlach e Menezes (2000), o Brasil engatinha no que diz respeito à implementação de sistemas de incineração de resíduos com recuperação de energia para a geração de eletricidade e energia térmica.

Conforme a **Tabela 3.19** (MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000), a tendência mundial, é a de aproveitar os resíduos urbanos para a geração de energia. Em vários países podem-se encontrar termelétricas movidas a carvão e a lixo, em fornos contínuos, e com o ciclo a vapor integrado na geração de energia elétrica. No Brasil já deveria estar sendo considerada a implantação de termelétricas a lixo e, dessa forma, equacionado ambos os problemas: de energia e do tratamento ambientalmente correto do lixo.

Tabela 3.19: Incineração do RSU nos países desenvolvidos, (com e sem aproveitamento de energia).

País	Geração de lixo (milhões t/ano)	Nº de incineradores	% de lixo incinerado	Recuperação de energia
Suíça	2,9	29	80	80%
Japão	44,5	1.823	72	Principais
Dinamarca	2,6	32	65	100%
Suécia	2,7	21	59	100%
França	18,5	100	41	68%
Holanda	7,1	9	39	50%
Alemanha	40,5	51	30	Não disponível
Itália	15,6	51	17	30%
EUA	180,0	168	19	75%
Espanha	11,8	21	15	24%
Reino Unido	35,0	7	5	25%

O estudo desenvolvido por estes três autores também revela que, no Brasil, o número de incineradores em funcionamento é bem menor do que o da maioria dos países citados na tabela 3.19, isto porque grande parte dos incineradores brasileiros opera em condições ambientais precárias (ou seja, com emissões bastante elevadas) sendo, portanto, desativados e abandonados.

Na **Tabela 3.20** (MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000), têm-se as características de alguns incineradores instalados no Brasil. Esta não tem por objetivo ser exaustiva, nem incluir todos os incineradores existentes, mas apenas dar uma visão de algumas instalações importantes, que se mantêm em funcionamento no momento.

Tabela 3.20: Características de alguns incineradores instalados no Brasil

Planta	Local	Capacidade processamento (ton./ano)	Resíduo Processado	Tratamento dos Gases
BASF	Guaratinguetá SP	2.700	R.S.L.P*, exceção de ascaréis	Lavadores ácido e alcalinos
CETREL	Camaçari Bahia	10.000	Resíduos líquidos organoclorados	Lavadores ácido e alcalinos
CINAL	Marechal Deodoro AL	11.500	R.S.L.P. incl. PCBs e organoclorados	Lavadores ácido e alcalinos

* R.S.L.P. – Resíduos Sólidos, líquidos e pastosos

3.13 TECNOLOGIA DA INCINERAÇÃO CONTROLADA DO RSU

Um processo de incineração não pode existir sem estar conectado a um sistema tecnologicamente avançado de depuração de gases e de tratamento e recirculação dos líquidos de processo. Os gases efluentes de um incinerador carregam grandes quantidades de substâncias em concentrações muito acima dos limites das emissões legalmente permitidas e necessitam de tratamento físico/químico para remover e neutralizar poluentes provenientes do processo térmico.

Hoje já existem no Brasil (MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000) empresas com sólido conhecimento, capacitadas para projetar e instalar sistemas modernos, de forma a garantir que as emissões para a atmosfera ou corpo líquido sejam feitas bem abaixo dos níveis de exigência das leis ambientais brasileiras ou internacionais, mesmo as mais rigorosas.

Conforme Hauser (2006) os impactos ambientais da incineração de lixo dependem também de sua composição e das características de combustão. Em termos da composição química (p/p), uma amostra típica contém cerca de 45% de material orgânico e combustível, 30% de água e aproximadamente 25% de matéria inerte. A matéria orgânica é composta principalmente de carbono (25%), oxigênio (16%) e hidrogênio (3%), mas contém também nitrogênio, enxofre e cloro (todos com menos de 1%). O poder calorífico líquido de uma mostra típica é de cerca de 10.000 MJ por tonelada, que pode ser convertido em cerca de 500 kWh de eletricidade (PORTEOUS, 2001). Já de acordo com Dijkgraaf, Vollebergh e Herman (2004), pode ser obtido cerca de 580 kWh de eletricidade e 315 kWh de energia térmica com a mesma quantidade de RSU. Segundo o Centro Clima (2005), o projeto deve produzir cerca de 500 kWh de energia elétrica líquida por tonelada de lixo incinerado.

Segundo Aranda et al, (2001) 100% do lixo municipal do Japão, 80% do lixo da Suíça e da Alemanha são incinerados. Nos EUA 30 milhões de toneladas de lixo por ano são incinerados. Em Paris, 100% do lixo são incinerados dentro da própria cidade, fornecendo água aquecida para cerca de 70 mil apartamentos. Nos últimos

anos, plantas de incineração de lixo vêm sendo maciçamente instaladas em países do leste asiático como Coréia, Taiwan, Filipinas, Índia e China.

Na **Figura 3.12** (SEDU, 2001) pode-se observar uma planta Incineradora com geração de vapor acoplado a uma turbina de vapor de condensação para geração de eletricidade.

Em países como Estados Unidos, Japão e a maioria dos países europeus, a incineração já é utilizada para queima controlada do lixo.

No Brasil, atualmente, a incineração é utilizada somente para resolver a questão da disposição final de resíduos perigosos e parte dos resíduos hospitalares.

No entanto, essa tecnologia utilizada atualmente no país não se faz uso do aproveitamento energético. Seriam necessários alguns aprimoramentos tecnológicos para permitir esse aproveitamento de forma economicamente viável e ambientalmente correta. Algumas iniciativas nesse sentido estão sendo implementadas em Campo Grande-MS e Vitória-ES.

A concepção moderna de incineração de lixo municipal é uma queima controlada que envolve tipicamente duas câmaras de combustão. A câmara primária é a receptora direta do lixo. Nesse dispositivo, a temperatura de operação varia tipicamente entre 500°C e 900°C. Em todas as configurações, a alimentação de oxigênio nessa câmara é sub-estequiométrica, evitando-se assim gradientes elevados de temperatura. Nessas condições controladas, evita-se a volatilização de grandes quantidades de metais presentes no lixo, como chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, entre outros. Além disso, minimiza-se a formação de óxidos nitrosos, que surgem apenas sob temperaturas mais elevadas.

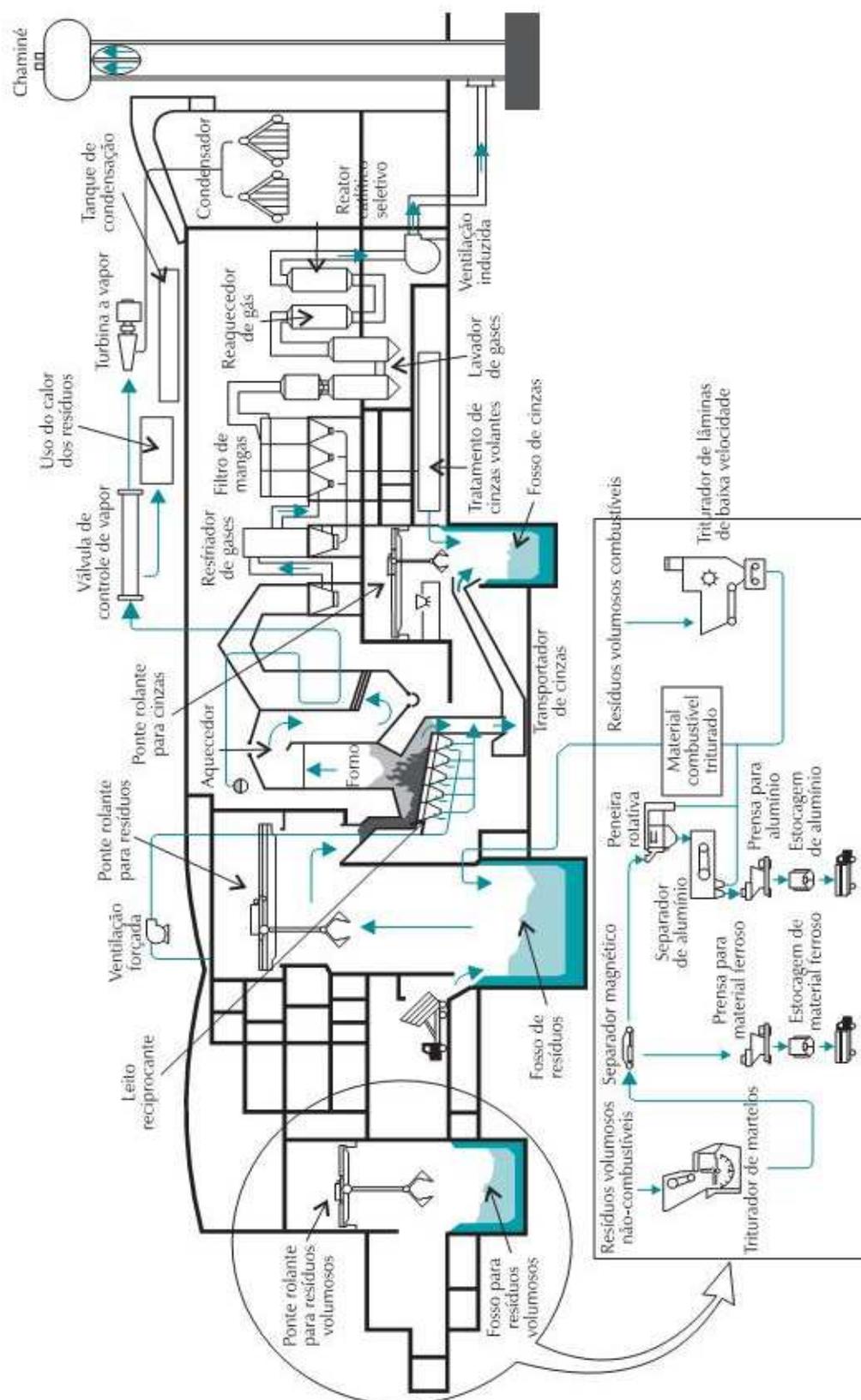


Figura 3.12: Incinerador de RSU.

Segundo Oliveira (2004), ao final da operação, a parte sólida é reduzida à cerca de 4 a 8% do volume original e tem o aspecto de cinza, sendo um material totalmente esterilizado e apto para ser aterrado ou mesmo aplicado à construção civil (tijolos, capeamento de estradas, etc.).

Segundo Henriques (2004), após o processo de incineração, a quantidade de material sólido varia de 12 a 30% em massa (de 4 a 10% em volume) podendo ter a mesma destinação citada anteriormente.

A fase gasosa gerada na câmara primária é encaminhada para a câmara secundária. Nesse caso, a atmosfera é altamente oxidante (excesso de oxigênio) e a temperatura varia entre 1.000°C e 1.250°C, onde os diversos gases gerados na câmara anterior são oxidados a CO₂ e H₂O. Nessa temperatura, a probabilidade de existência de moléculas com grande número de átomos como dioxinas e furanos, compostos altamente nocivos aos seres humanos, é praticamente zero.

No entanto, ambas as câmaras necessitam de injeção de combustível auxiliar, que pode ser gás natural, GLP ou óleo diesel. Vale dizer que os parâmetros de projeto e construção do forno tais como: material refratário, isolante térmico, interface refratário-aço, queimadores, sopradores e a sincronia entre as câmaras são pontos fundamentais para minimizar a quantidade necessária de combustível auxiliar injetado, muitas vezes utilizado somente para a partida do incinerador. Dependendo do poder calorífico do lixo é possível que nenhum combustível seja adicionado.

3.13.1 Dioxinas e Furanos

As dioxinas e furanos são compostos tóxicos de hidrocarbonetos com conteúdo de cloro e existem amplamente na natureza. As dioxinas são produzidas:

- Quase todos os processos de combustão,
- Na fabricação de produtos químicos com conteúdo de cloro,
- Na fabricação de solventes e aromáticos com conteúdo de cloro,

A produção de clorofenóis é o processo que mais contribui para a geração destes compostos. Entre as particularidades que caracterizam essas substâncias cabe destacar as propriedades altamente tóxicas, mesmo em pequenas

concentrações. São substâncias muito estáveis termicamente, só se decompõem em temperaturas bastante elevadas, acima de $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, no caso das dioxinas. Esta elevada estabilidade térmica, anormal por tratar-se de compostos orgânicos, é a razão pela qual sua destruição é problemática no processo de combustão, e sua formação é favorecida em processos térmicos onde estejam presentes compostos clorados.

São bastante inertes quimicamente, dificilmente biodegradáveis e metabolizáveis, transformando-os em contaminantes persistentes quando liberados no meio ambiente.

A **Figura 3.13** (ARANDA, 2001) representa o sistema de incineração com dupla câmara.

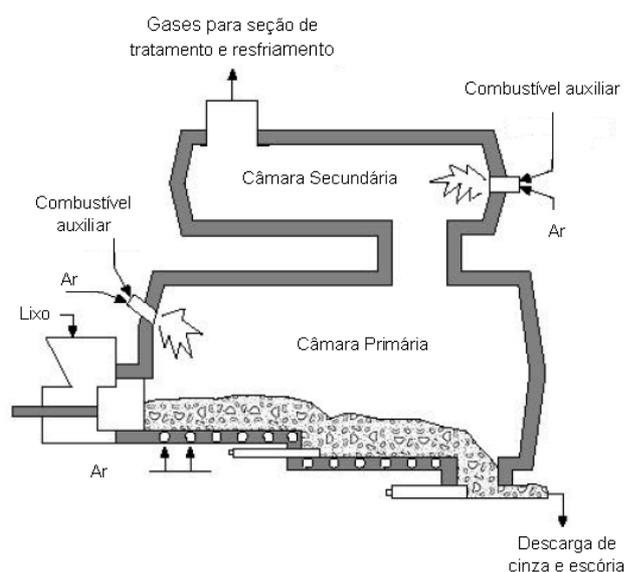


Figura 3.13 - Esquema representativo de dupla câmara de combustão.

Atualmente, existem incineradores no mercado que apresentam grande eficiência de queima com baixo consumo de combustível e baixo teor de emissões. De forma conservadora, os gases que saem da segunda câmara de combustão, apesar da eficiência da queima, carecem ainda de um tratamento adicional, que em muitos casos funciona como uma precaução adicional de segurança.

O tratamento desses gases envolve processos físicos e químicos, havendo uma grande variedade de opções de conformação e equipamentos. A primeira etapa consiste em resfriar os gases que saem entre 1.000°C e 1.200°C da câmara secundária.

Nessa etapa, além de resfriarem-se os gases de combustão gera-se vapor d'água que pode ser utilizado na geração de energia elétrica, sistema de aquecimento ou mesmo sistema de refrigeração.

Em seguida, os gases são neutralizados com a injeção de hidróxido de cálcio (*dry scrubber*), altamente eficiente na neutralização e captura de SO_x e HCl. Os gases já resfriados e neutralizados passam então por um sistema de filtros (filtros-manga) que retiram o material particulado (fuligem, sais e hidróxido de cálcio) de dimensão de até 0,3 μ m. Em algumas conformações utilizam-se outros sistemas, como precipitadores eletrostáticos, lavadores Venturi, ciclones, etc.

Tanto os filtros mangas como os leitos de carvão funcionam tipicamente entre 150 e 200°C. A perda de calor, ao longo do próprio tratamento de purificação de gases, faz com que a temperatura na saída da chaminé seja inferior a 120°C.

Finalmente, os gases passam por um leito adsorvente, à base de carvão ativado (leito fixo ou fluidizado), de alta área superficial que possui tripla ação:

- **Retenção de óxidos nitrosos:** evitam-se picos de geração de NO_x, eventualmente formados por distúrbios na câmara secundária, inibindo que sejam emitidos abruptamente para a atmosfera;
- **Retenção de organoclorados:** ação preventiva quanto à emissão de dioxinas por algum problema na câmara secundária;
- **Retenção de metais voláteis:** O material adsorvente atua como uma “peneira molecular” retendo metais voláteis. Tanto por injeção, como através de um leito fixo, o material adsorvente possui comprovadamente altíssima eficiência na retenção de metais.

Com a incineração controlada de 500 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos, é possível abastecer uma usina termelétrica com potência instalada de 16 MW, o que representa um potencial energético de cerca 0,7 MWh/t (OLIVEIRA, 2004)

A norma brasileira ABNT/NBR-1265: “Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - Padrões de Desempenho”, de 1989, regula os parâmetros de operação e as normas de emissão em incineradores (ABNT, 1989; LORA, 2003).

3.14 NORMAS DE DESEMPENHO DO INCINERADOR (ABNT)

- Deve ser utilizado um excesso de ar no mínimo 7% de O₂ na saída da chaminé;
- A temperatura mínima dos gases na saída da câmara de pós-combustão deve ser de 1.200°C;
- Tempo mínimo de residência: 2 seg, a 1.200°C;
- A temperatura na saída do forno: 1.000°C;
- Tempo mínimo de residência dos sólidos: para o incinerador rotativo – 30 minutos e para incineradores de câmara fixa - 60 minutos.

3.15 NORMAS DE EMISSÃO

- HCl - 1,8 kg/h ou 99% de remoção do HCl para resíduos que contêm mais de 0,5% de Cl;
- HF - 5 mg/Nm³;
- CO - 100 ppm, corrigido para 7% de O₂;
- SO₂ - 280 mg/Nm³, corrigido para 7% de O₂;
- NO_x - 560 mg/Nm³, corrigido para 7% de O₂;
- Material particulado total - 70 mg/Nm³, corrigido para 7% de O₂;
- Cd, Hg - 0,28 mg/Nm³;
- As, CO, Ni, Se - 1,4 mg/Nm³;
- Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, Sn - 7,0 mg/Nm³;
- Dioxinas e furanos - 99,999% de remoção das dioxinas e furanos.

Os padrões de qualidade do ar constituem a tradução legal de limites máximos para a concentração de determinados componentes atmosféricos, fixados com a finalidade de preservar a qualidade do ar, mantendo a emissões dentro de níveis que não prejudiquem a saúde e o meio ambiente em geral.

Para os poluentes do ar a legislação apresenta os padrões de emissão que são os limites legais de emissão para cada poluente, através de chaminés ou dutos, apresentados em termos de concentração e vazão.

A Lei 997/76, regulamentada pelo decreto 8.496/76, estabelece os limites de emissões de poluentes do ar para fontes situadas na Grande São Paulo e Baixada Santista.

Segundo Tomaz e Jardim (2000) não há, até a presente data, uma lei que trate das emissões de poluentes do ar no interior do Estado.

Por outro lado, segundo Schmidt, Menezes, Coimbra (2005) a Constituição da República no seu Art. 225, estatui que:

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Os padrões de qualidade do ar são limites legais de concentração de poluentes no ar ambiente. Estes valores, para cada poluente, são associados aos períodos de amostragem. Padrão de qualidade do ar é um nível ao qual a concentração do poluente deveria ser reduzida para evitar efeitos indesejados, não sendo baseados em tecnologia e sim nos efeitos da poluição do ar.

O Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar foi instituído pela Resolução do CONAMA nº 005/89 (CONAMA, 1989). O objetivo deste programa é a limitação dos níveis de emissão de poluentes para controlar, preservar e recuperar a qualidade do ar em todo o território.

A Resolução do CONAMA nº 003/90 (CONAMA 1990), em conformidade com o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar, fixa os padrões nacionais de qualidade do ar.

Segundo esta resolução "os padrões de qualidade do ar são as concentrações dos poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral". Os padrões de qualidade do ar serão o objetivo a ser atingido mediante a estratégia de controle fixada pelos

padrões de emissão e deverão orientar a elaboração de Planos Regionais de Controle de Poluição do Ar.

Padrões primários para a qualidade do ar são requeridos para proteger a saúde pública com uma margem adequada de segurança. De acordo com o CONAMA (1990), "são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população".

Padrões secundários para a qualidade do ar especificam um nível de concentração de poluentes necessário para proteger o bem estar público de quaisquer efeitos adversos associados à presença dos poluentes no ar. São definidos pelo CONAMA (1990) como "as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral".

3.16 IMPACTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA DE INCINERAÇÃO CONTROLADA DE RSU

No processo de incineração, os gases e substâncias, formados durante a combustão, são purificados antes de serem lançados na atmosfera, obedecendo a rigorosas normas de proteção ambiental.

Os óxidos nitrogenados (NO_x) e o monóxido de carbono (CO) são produzidos em qualquer combustão. Através de um controle da queima e de um sistema de tratamento dos gases que saem das câmaras de combustão é possível reduzir essas emissões a valores tecnicamente toleráveis (ROSA et al., 2003).

Deve-se avaliar também a questão de formação de dioxinas e furanos devidos ao processo de incineração. As altas temperaturas de queima quebram as ligações químicas, atomizando macromoléculas e praticamente anulando a possibilidade de formação de dioxinas e furanos. Utiliza-se adicionalmente, carvão ativado em leitos pós-combustão que adsorvem eficientemente qualquer resquício de dioxinas e furanos, bem como de metais voláteis. Com a utilização de duas câmaras de combustão, funcionando adequadamente, e com o rápido resfriamento dos gases de

combustão, atingem-se níveis de dioxinas abaixo do mais rígido padrão estabelecido internacionalmente. (ROSA et al., 2003).

Nos últimos 10 anos, as modernas usinas termelétricas a lixo ampliaram seus índices de eficiência, particularmente na remoção de duas classes de poluentes: os metais e as dioxinas e furanos. Nos EUA, em 1.987, os incineradores eram responsáveis pela geração de 82% das dioxinas no país (ARANDA et AL., 2.001). Em 2002, esse número caiu para apenas 3%, sem que o total de emissões tenha aumentado significativamente.

Na Grã-Bretanha, por exemplo, estudos do Departamento de Saúde mostram que, entre 1990 e 2000, as emissões de chumbo caíram 97% e as de dioxinas caíram 99%. Nos últimos 4 anos, diversas usinas de incineração de lixo inglesas, como a de Edmonton (Londres), emitiram, em média, 0,04 nanogramas/m³ de dioxinas (mais de 3 vezes abaixo do que é exigido pelos limites brasileiros). (ARANDA et AL., 2.001).

3.17 AS TECNOLOGIAS DE REDUÇÃO E CONTROLE DAS EMISSÕES DE POLUENTES:

Segundo Holanda (2003), na incineração de RSU podem ser produzidos gases contendo partículas de matérias orgânicas (dioxinas e furanos), de metais pesados (Cd, Pb e Hg) e de outros compostos químicos como os óxidos de enxofre e de nitrogênio e os ácidos clorídrico e fluorídrico.

Tais produtos da combustão podem causar a poluição atmosférica, além de alguns deles apresentarem potencial efeito carcinogênico ou contribuírem para efeitos locais, como as chuvas ácidas e o smog fotoquímico.

É necessário que os gases resultantes da queima do RSU em incineradores do tipo grelhas móveis ou forno rotativo, sejam depurados antes de serem lançados na atmosfera através das chaminés.

Devido a ampla faixa e a natureza dos poluentes oriundos de um processo de combustão de RSU, não existe, segundo Daskalopoulos, Badr e Probert (1997), uma única tecnologia disponível que controle satisfatoriamente as emissões de todos os

poluentes em questão; a **Tabela 3.21** (DASKALOPOULOS, BADR E PROBERT 1997).mostra, de forma generalizada, as tecnologias mais utilizadas para cada tipo de poluente.

Segundo Kilgroe (1996), nos combustores dos EUA o que se faz é o emprego do lavador a seco (dry scrubber) seguido por filtro de mangas ou precipitador eletrostático, ao passo que na grande maioria dos incineradores de lixo existentes nos países da Europa a limpeza dos gases é realizada pelo precipitador eletrostático ou filtro de mangas seguido por lavador a úmido (wet scrubber) (PRODAM, 1999).

É interessante dizer que na primeira configuração, denominada de processo semi-úmido, pode-se adicionar mais uma etapa de lavagem (úmida) na busca de maior eficiência; a segunda configuração, chamada de processo úmido, é aquela que agrega um filtro de mangas após o lavador e, assim como a primeira, também faz a injeção de carvão ativado para a remoção de dioxinas, furanos e mercúrio.

Tabela 3.21: Tecnologias para a redução das emissões provenientes da incineração de RSU.

Poluente	Opções tecnológicas de controle
Material particulado	Centrifugação; precipitação eletrostática; filtração ou lavagem lavador úmido.
Ácido clorídrico (HCl)	Lavagem através do lavador a úmido
Ácido fluorídrico (HF)	Lavagem lavador semi-seco
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Lavagem lavador úmido ou seco.
Óxidos de nitrogênio (NOx)	Redução catalítica ou não catalítica.
Mercúrio (Hg), cádmio (Cd) chumbo (Pb).	Igual à material particulado.
Outros metais pesados.	Igual à material particulado.
Bifenóis policlorados	Lavagem lavador semi-seco ou seco.
Dioxinas e furanos.	Igual ao material particulado ou à bifenóis policlorados.

O processo semi-úmido é utilizado para o tratamento de gases com alta concentração de ácidos, a reação da polpa de cal com o gás de escape acontece num secador spray; adicionam-se no gás carvão ativado para a separação das dioxinas, furanos e o mercúrio no filtro de mangas ou no precipitador eletrostático.

O processo úmido é o procedimento de maior eficiência, especialmente em incineradores de grande capacidade. A remoção dos produtos sólidos da reação que acontece no lavador, assim como do carvão ativado injetado antes do filtro de mangas, é realizada neste equipamento.

3.17.1 Material particulado e metais pesados - Cd, Pb e Hg

Segundo Holanda (2003), as emissões de material particulado, Cd e Pb são eficientemente coletadas nos dispositivos que dependem de forças eletrostáticas (precipitador eletrostático) ou de filtração física (filtro de mangas). Já o Hg, que normalmente encontra-se em forma de vapor na temperatura de purificação do gás de escape, precisa de métodos especiais para a sua redução (isto é, a remoção efetiva do Hg, assim como para dioxinas e furanos, necessita do resfriamento do gás de escape num lavador de gás eficiente, além de um filtro de mangas ou de um precipitador eletrostático).

Lora (2000) afirma, para o caso das dioxinas e furanos em particular, que é explicitamente significativo realizar o *quench* (ou seja, o resfriamento rápido do gás de escape num secador *spray*) antes mesmo da injeção de carvão ativado, porque aproximadamente 62 a 82% das dioxinas e furanos são emitidos na forma de vapor e se a temperatura do gás diminui rapidamente até 110°C, tais emissões podem ser reduzidas em até 98%.

O filtro de mangas, **Figura 3.14** (MCINNES, JAMESON E AUSTIN, 1992) é um sistema amplamente aceito para o controle de particulados e traços de metais pesados com diâmetro menor que 0,3 µm; dentre os seus componentes básicos pode-se destacar um meio filtrante, uma armação sustentadora das mangas e um mecanismo de remoção das partículas que ficam acumuladas no pano das mangas.

No interior das mangas encontra-se a gaiola que serve para protegê-la contra colapsos e choques. O pó coletado nas mangas é removido com um pulso de ar comprimido, o qual é injetado nas mangas com uma lança (limpeza on-line).

O fluxo de gás contaminado é bruscadamente interrompido, rapidamente as mangas são infladas, a camada de pó é quebrada e cai nas tremonhas. Portanto o ar comprimido proporciona a limpeza das mangas filtrantes. Esta fase de limpeza é iniciada por um controlador, e pode ser ajustada para trabalhar em relação à perda de carga ou em determinados intervalos de tempo.

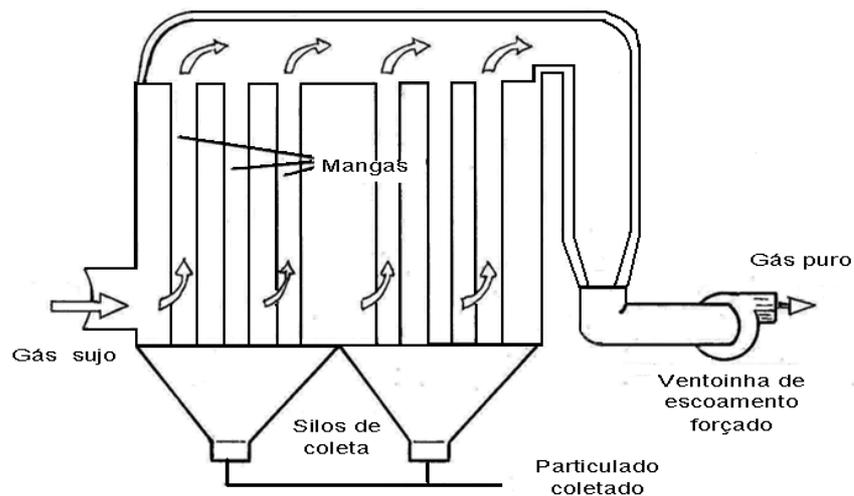


Figura 3.14: Filtro de mangas.

Conforme **Figura 3.15** o gás sujo passa através da manga filtrante do lado externo para o lado interno.

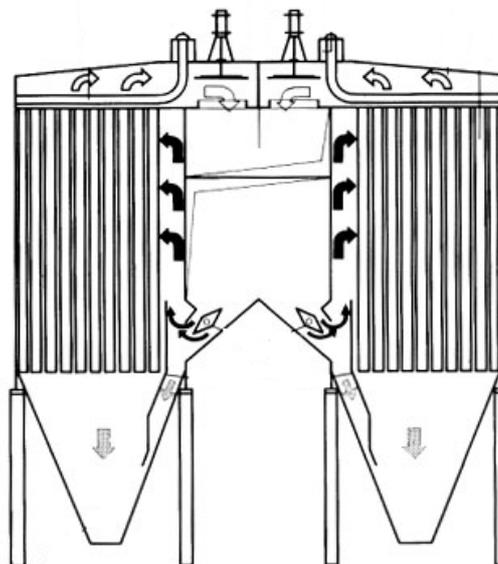


Figura 3.15: Fluxo de passagem dos gases.

Na **Figura 3.16** podem ser observadas as válvulas de controle do ar de limpeza instaladas no plenum de ar limpo

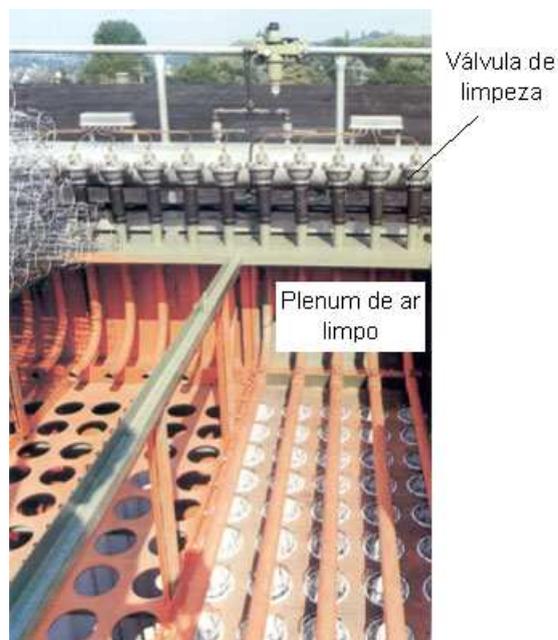


Figura 3.16: Válvulas de limpeza do filtro de mangas.

O precipitador eletrostático é um equipamento voltado para a redução das mesmas emissões controladas pelo filtro manga, só que com diâmetro entre 0,5 - 20 μ m, que utiliza forças elétricas para movimentar as partículas desde o fluxo de gases até os eletrodos coletores, **Figuras 3.17 e 3.18.**(MCINNES, JAMESON E AUSTIN, 1992).

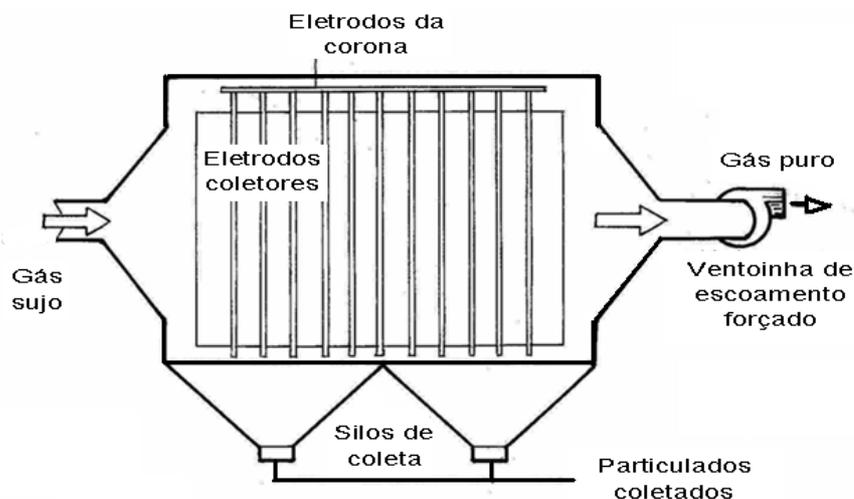


Figura 3.17 - Precipitador eletrostático.

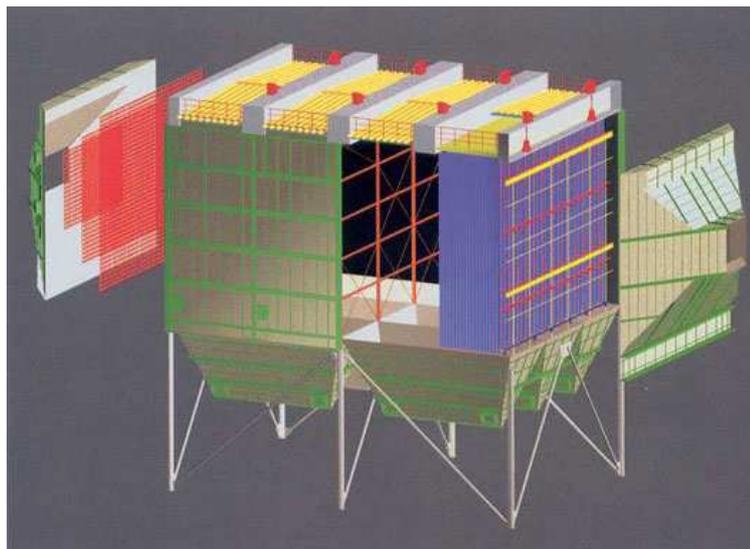


Figura 3.18 - Precipitador eletrostático.

O precipitador é o único dispositivo de controle de particulados no qual as forças de remoção atuam só sobre as partículas e não sobre todo o fluxo de gás. Isto garante uma alta eficiência de separação (99,5%) com uma pequena queda de pressão do gás, de aproximadamente 5 polegadas de H₂O.

3.17.2 Gases ácidos - SO₂, HCl e HF

Segundo McInnes e Royen (1990), há vários tipos de lavadores disponíveis para a redução dos gases ácidos (alguns deles são até capazes de remover simultaneamente materiais particulados), dentre estes se incluem: as torres de nebulização (ou câmaras de *spray*), os lavadores de bandejas e as instalações de leito empacotado (ou torres compactas).

No primeiro tipo, **Figura 3.19** (MCINNES E ROYEN, 1990) a pressão da bomba juntamente com os bocais de nebulização atomizam o líquido de lavagem ou absorvente.

As câmaras de *spray*, em comparação aos outros sistemas, podem remover uma quantidade maior de SO₂, enquanto usam também menos energia; porém, tais lavadores têm uma eficiência de controle de particulados extremamente baixos e não são eficazes na captura de partículas com um diâmetro menor que 5µm.

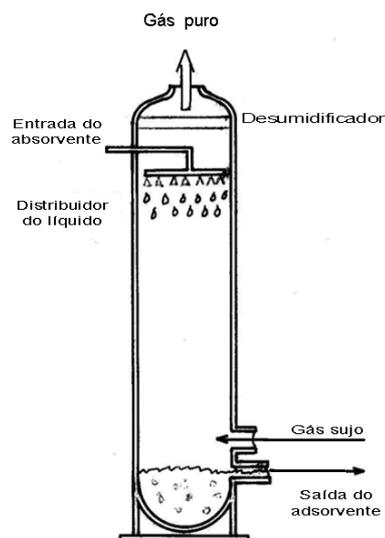


Figura 3.19: Câmara de spray.

As câmaras de *spray*, em comparação aos outros sistemas, podem remover uma quantidade maior de SO_2 , enquanto usam também menos energia; porém, tais lavadores têm uma eficiência de controle de particulados extremamente baixos e não são eficazes na captura de partículas com um diâmetro menor que $5\mu\text{m}$.

O secador *spray*, que é um lavador a seco, **Figura 3.20** (MCINNEN E ROYEN 1.990; LORA 2.000), nebuliza uma lama de cal sobre os produtos da combustão; as gotículas de reagente absorvem o SO_2 e outros gases ácidos, evaporando, finalmente, em virtude do calor do gás de escape, a água que se faz presente na lama. As partículas sólidas são capturadas, em seguida, num filtro manga ou precipitador eletrostático conectado ao próprio secador *spray*.

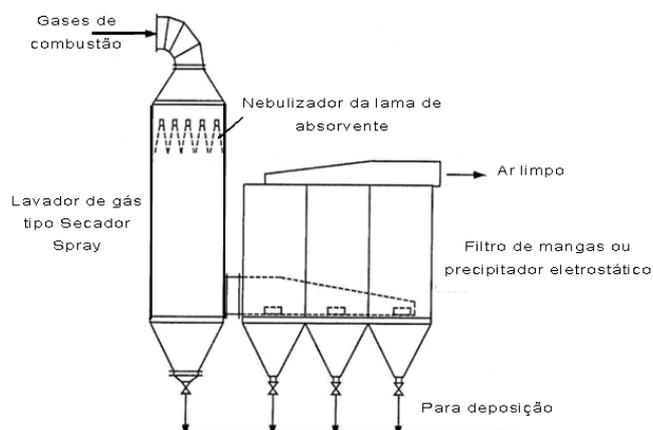


Figura 3.20: Secador *spray*.

Na **Tabela 3.22** encontra-se a eficiência de redução de alguns contaminantes pelo processo de absorção com *spray dryer* (LORA, 2000).

Tabela 3.22 - Eficiências de redução de alguns contaminantes pelo processo de absorção com *spray dryer*.

Poluente	Eficiência de controle (%)
HC	98,0
SO ₂	90,0
HF	96,0
Particulados	99,8
Pb + Zn	99,5
Cd	99,2
Hg	89,2

3.17.3 Compostos orgânicos voláteis

Segundo McInnes, Jelinek e Putsche (1990), várias tecnologias podem ser empregadas no controle das emissões de compostos orgânicos voláteis (benzeno, tolueno e outros) as incinerações (ou oxidações) térmica e catalítica, a adsorção por carvão ativado, a condensação e a absorção.

➤ I - Os incineradores térmicos dependem, sobretudo do contato entre os VOCs e a chama de combustão a uma temperatura alta para efetuarem a oxidação destes contaminantes. Um sistema de incineração térmica geralmente encerra uma câmara revestida com material refratário, um ou mais queimadores, um dispositivo de controle da temperatura e equipamento de recuperação de calor.

➤ II - Na incineração catalítica, um catalisador abaixa a energia de ativação do processo de oxidação fazendo com que a combustão aconteça por volta de 395°C (uma temperatura significativamente menor do que a da incineração térmica).

Num sistema deste tipo, o fluxo de VOCs pré-aquecido passa por um leito catalítico onde o próprio catalisador inicia e promove a oxidação dos contaminantes sem sofrer alterações.

➤ III - A adsorção é um processo pelo qual os VOCs ficam retidos na superfície de sólidos granulares; as partículas do adsorvente são altamente porosas e apresentam razões do tipo superfície/volume muito altas. Materiais tais como carvão ativado, sílica-gel ou alumina podem ser usados como adsorventes, sendo o primeiro o mais comum para a remoção de compostos orgânicos.

Os sistemas regenerativos de adsorção por carvão ativado, podem operar de duas maneiras - adsorção e desorção, sendo que a primeira é rápida e remove todos os VOCs presentes no fluxo.

➤ IV - A condensação é uma técnica básica de separação em que o fluxo de gás contaminado é, primeiramente, trazido à saturação e na seqüência os poluentes são condensados. A conversão da fase vapor para a líquida pode ser realizada tanto por aumento da pressão com temperatura constante quanto por redução da temperatura com pressão constante; geralmente os sistemas de condensação são operados com pressão constante.

A eficiência de redução do condensador vai de 50% a 95% e é influenciada pela pressão parcial dos VOCs, que, por sua vez, é uma função da concentração de orgânicos no fluxo gasoso e da temperatura do próprio condensador. Para uma dada temperatura, as máximas eficiências de controle são alcançadas com as maiores concentrações iniciais. De acordo com McInnes, Jelinek e Putsche (1990), a condensação tem sido muito empregada como um prétratamento dos fluxos de VOCs antes mesmo da adsorção por carvão ativado ou da oxidação (térmica ou catalítica).

➤ V - A absorção é definida como a transferência de massa de componentes selecionados de um fluxo gasoso para um líquido não-volátil. Tais sistemas são, tipicamente, classificados pelo absorvente empregado (água ou um líquido orgânico) e a escolha deste depende da solubilidade dos VOCs e do custo do próprio absorvente.

3.17.4 Óxidos de nitrogênio - NO_x

Wood (1994) relata a formação NO_x (NO imediato) cuja importância não é desprezível em relação aos NO e NO₂, as emissões de NO_x são formadas tanto

pela oxidação do nitrogênio presente no combustível (NO_x do combustível) quanto pela fixação térmica do nitrogênio atmosférico ao ar de combustão (NO_x térmico).

As emissões de NO_x podem ser controladas pelo uso de insumos com baixo teor de nitrogênio (pré-combustão), pela modificação das características operacionais e de projeto das unidades de incineração (durante a combustão) ou pela adoção de dispositivos do tipo *add-on* (pós-combustão), sendo que na segunda opção tem-se a operação com baixo excesso de ar, a combustão fora da estequiometria ou estagiada, os queimadores com baixa emissão de NO_x , a recirculação do gás de escape, a injeção de água e/ou vapor e a redução da temperatura de pré-aquecimento do ar e para a terceira opção a redução seletiva catalítica e a não-catalítica.

3.18 ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DAS TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A decomposição anaeróbica do lixo produz uma mistura de gases composta basicamente por dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). Como o metano é 21 vezes mais impactante do que o CO_2 em termos de aquecimento global, e sua combustão produz este gás, tem sido incentivada em diversos países esta atividade, preferencialmente consorciada ao aproveitamento energético.

A **Tabela 3.23** (IBGE, 2000) mostra a produção de lixo por município e distribuição “per capita” no Brasil. Quando é realizado o aproveitamento energético dos resíduos, está sendo deslocada outra fonte de energia. Como não existe nenhum país independente dos combustíveis fósseis na geração da energia, a parcela deslocada evitará o consumo de combustíveis fósseis e, assim, de emissões de gases do efeito estufa. Esta emissão evitada de dióxido de carbono oriundo da queima de combustíveis fósseis que foram substituídos pelo lixo na geração de energia deve ser somada à mitigação do metano.

Tabela 3.23: Produção de lixo por município.

População	Municípios	%	População	Lixo (t/dia)	Produção “per capita” (kg/dia)
Até 9.999	2644	48,0	13.865.155	9.184,8	0,66
De 10.000 a 19.999	1.382	25,1	19.654.601	11.473,1	0,58
De 20.000 a 49.999	957	17,4	26.674.236	18.281,6	0,64
De 50.000 a 99.999	300	5,4	20.836.724	14.706,1	0,71
De 100.000 a 199.999	117	2,1	16.376.710	13.721,7	0,84
De 200.000 a 499.999	76	1,4	23.200.154	21.177,3	0,91
De 500.000 a 999.999	18	0,3	12.554.978	21.845,3	1,72
Mais de 1.000.000	13	0,2	34.327.295	51.635,2	1,50
Total	5.507	100,0	169.489.853	161.827,1	0,95

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para elaboração deste trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica que incluiu a legislação e levantamento dos dados sobre produção e caracterização do RSU.

Alem da legislação pertinente foram utilizadas as informações constantes em Silva (1997), Tchobanoglous, Theisen, Virgil (1996), Conesa (2005), IPT (1979), e posteriormente foi realizada uma avaliação técnica do tratamento térmico de Resíduo Sólido Urbano com recuperação de energia, através da utilização de incineradores e geradores de vapor.

A cidade escolhida foi Bauru, com população estimada em 347.601 habitantes (IBGE , 2007). Segundo dados do IBGE, em 2001, o município, com 673km² tinha 90.531 domicílios e renda média de R\$ 917,70 (U\$426,00) por habitante, gerando 210.000 kg de lixo por dia (SMA , 2007) dos quais apenas 39.000 Kg por mês são recicladas pela cooperativa de catadores, conforme **Tabela 4.1** (COOPERATIVA DE CATADORES DE BAURU, 2007).

Tabela 4.1: Massa segregada pela cooperativa.

Material	Massa segregada (ton./mês)
Papel	24
Plástico	5
Vidro	7
Sucata	3

Neste trabalho não se considera a porcentagem de vidros, metais e outros, pois, estes são inertes e não colaboram com a estimativa do **Poder Calorífico** do RSU. Esta alternativa está inserida na coluna Massa Seca Normalizada da **Tabela 3.16**, onde os percentuais de Massa Seca são ponderados deixando de se considerar vidros, metais e outros.

No desenvolvimento do presente trabalho adotaram-se três alternativas:

- **1º alternativa:** calcular a energia gerada com a totalidade do RSU não considerando a segregação, isto é, deixando 100% do RSU para incineração
- **2º alternativa:** calcular a energia gerada pelo RSU tomando como base para a segregação os percentuais encontrados na bibliografia, que devem estar próximo do real.
- **3º alternativa:** calcular a energia gerada pelo RSU retirando-se todo o material reciclável.

Além disso, os resultados financeiros obtidos com a comercialização da energia encontrados na adoção das três alternativas anteriores serão comparados com o valor financeiro obtido com a comercialização do material reciclado.

4.1 O SOFTWARE COMBUST

O software COMBUS permite analisar o processo de combustão, compreendendo o balanço de massa, composição dos gases liberados, a quantidade de ar necessária, o balanço energético e o poder calorífico do combustível.

Para realização dos cálculos deve-se saber antecipadamente a fração mássica de cada constituinte do combustível (% em massa de C, H, S, O, N, H₂O, cinzas), lembrando que a fração mássica sempre deverá ser igual à unidade (100%). Outro parametro importante é a quantidade de água, pois, está se calculando o PCI, ou seja, o poder calorífico do RSU úmido. Com o levantamento dos dados de quantidade e composição do RSU, é possível calcular:

- O excesso de ar de combustão a partir do teor de O₂ (ou CO₂) nos gases de combustão.
- Teor máximo de CO₂ nos gases de combustão.

- A temperatura dos gases de combustão em função do excesso de ar de combustão.
- A composição mássica e volumétrica dos gases de combustão, bem como entalpia, calor específico, densidade e massa molecular. Tanto em base seca como em base úmida.
- A vazão mássica, ou volumétrica, dos gases de combustão, secos ou úmidos.
- O poder calorífico, densidade, massa molecular e calor específico. Tanto para teor volumétrico, mássico, base úmida como para base seca.

Na **Figura 4.1** tem-se a tela inicial do software, que mostra além dos dados de entrada a opção de tipo de combustível, que neste caso será sólido.

Caso não haja um determinado componente na constituição do combustível deverá ser inserido zero.

The screenshot shows the initial interface of the 'Combust' software. The title bar reads 'Combustión de un mezcla de gases, estequiométrica o con exceso de aire'. The main window title is 'Combustión estequiométrica o con exceso de aire, de un combustible sólido o líquido'. On the left, under 'Fracción Mássica de', there are input fields for Carbono, Hidrógeno, Azufre, Oxígeno, Nitrógeno, Agua, and Cenizas. To the right, under 'Tipo de combustible:', there are radio buttons for 'Combustible líquido' and 'Carbón', with 'Carbón' selected. Below this, there is a text box asking for the 'coeficiente de exceso de aire' and a corresponding input field. At the bottom left is a button labeled 'Ejecutar cálculos'. A large empty area on the right side of the window is intended for the results of the calculations.

Figura 4.1: Tela inicial do software Combust.

4.1.1. COMBUSTÃO ESTEQUIOMÉTRICA

Segundo Bizzo (2002) a quantidade de oxigênio necessária para a combustão completa do combustível é denominado de oxigênio estequiométrico ou ar estequiométrico.

Denomina-se combustão estequiométrica o processo de combinação de todos os elementos redutores que constituem o combustível com o oxigênio estritamente necessário para resultar os produtos oxidados ao grau mais estável de oxidação em condições ambientes (25°C, 1 atm).

Desta forma, a combustão completa pode ser garantida utilizando-se uma quantidade adicional de ar além do estequiométrico, certificando-se que as moléculas de combustível encontrem o número apropriado de moléculas de oxigênio para completar a combustão. Essa quantidade de ar adicional utilizada é chamada de excesso de ar, que proporciona uma melhor mistura entre o combustível e o oxidante, mas deve ser criteriosamente controlado durante o processo de combustão, pois o ar que não participa da combustão tende a esfriar a chama, sem contribuir para a reação. Quanto maior o excesso de ar, maior o volume de gases nos produtos de combustão e conseqüentemente maior a perda de calor pela chaminé, influenciando negativamente na eficiência da combustão.

Com a utilização do software Combust, obtém-se os parâmetros fundamentais do balanço de massa da reação de combustão de acordo com a composição dos combustíveis.

Para determinar os parâmetros fundamentais do balanço de massa da reação de combustão dos componentes do RSU utilizou-se o modelo como apresentado no diagrama de blocos da **Figura 4.2.** (MOREIRA, 2008)

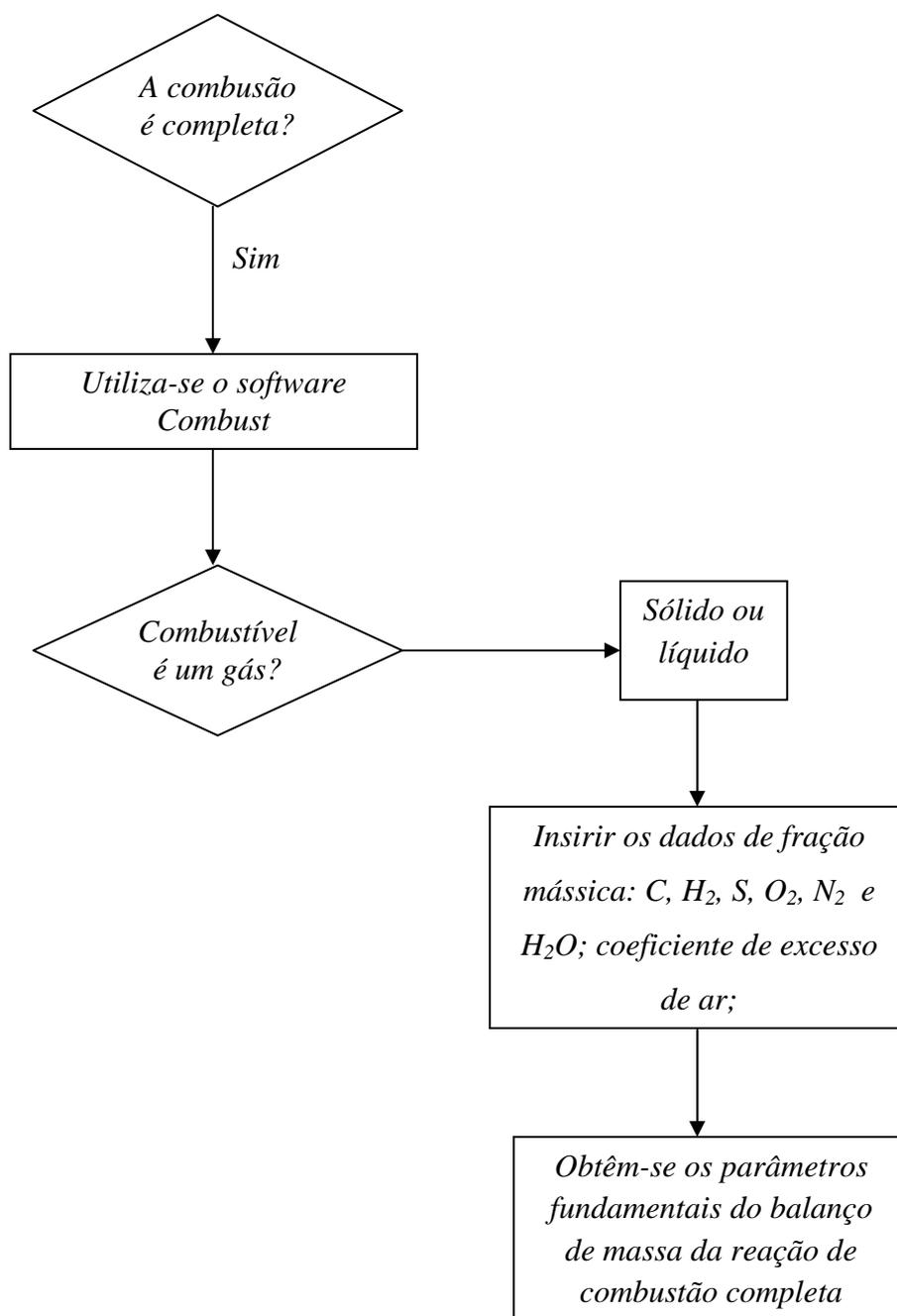


Figura 4.2 – Diagrama de blocos da simulação da reação de combustão através do software Combust

5. RESULTADOS E ANÁLISES

No Brasil, apenas recentemente atentou-se para a importância da recuperação de energia do RSU. Como já destacado na revisão bibliográfica, ainda é usual o tratamento tradicional para coleta e disposição final do RSU, gerando problemas de higiene, poluição das águas subterrâneas pela lixiviação, contaminação pelo resíduo biológico, entre outros.

Examinando de uma forma integrada, a queima controlada dos RSU quando realizada em instalações com dispositivos adequados de controle da poluição do ar, é um dos componentes da Gestão Integrada de Resíduos, permitindo uma solução adequada ao problema, com baixo impacto ambiental.

Com a atual tendência da segregação de materiais que tem algum valor de mercado, encontrados no RSU, surge a questão da variação no Poder Calorífico em função do tipo e qualidade do material segregado. Este procedimento pode influenciar o rendimento de uma usina de recuperação de energia, por exemplo, a redução na quantidade de plásticos presentes no RSU pode elevar o custo da produção de energia, pois diminui o seu poder calorífico.

A determinação da quantidade e composição de RSU produzido em uma cidade, para fins de geração de energia, não é tarefa simples, dependendo de uma série de fatores, tais como: o número de habitantes, a qualidade de vida da população, o tipo de coleta e até das condições atmosféricas locais.

Para determinar a fração mássica de cada componente considerando a porcentagem de umidade montou-se a **Tabela 5.1**, com base nas **Tabelas 3.14 e 3.16**.

Os valores encontrados na coluna “base úmida” foram utilizados no software Combust para o cálculo do PCI, levando-se em consideração a quantidade de água de cada componente do RSU.

As planilhas de resultados para a alternativa 1, obtidas pela utilização do referido software, estão no anexo A, para as outras alternativas a metodologia é a mesma.

Tabela 5.1: Porcentagem em massa.

Componente	Água	Carbono		Hidrogênio		Oxigênio		Nitrogênio		Enxofre		Cinzas	
		Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida
Res.comida	70,0	48,0	14,4	6,4	1,9	37,6	11,3	2,6	0,8	0,4	0,1	5,0	1,5
Papel/papelão	6,0	44,0	41,4	5,9	5,5	44,6	41,9	0,3	0,3	0,2	0,2	5,0	4,7
Plástico	2,0	60,0	58,8	7,2	7,1	22,8	22,3	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	9,8
Têxteis/couro	10,0	55,0	49,5	6,6	5,9	31,2	28,1	4,6	4,1	0,2	0,1	2,5	2,2
Borracha	,2,0	78,0	76,4	10	9,8	0,0	0,0	0,0	2,0	,2,0	0,0	0,0	9,8
Madeira	20,0	47,8	38,2	6	4,8	38,0	30,4	3,4	2,7	0,3	0,2	4,5	3,6

Como comentado na metodologia este trabalho foi dividido em 3 alternativas, que serão analisadas nos tópicos que se seguem:

5.1 Alternativa 1

Nesta alternativa não será considerada a segregação, sendo, portanto incinerado 100% do RSU, menos os materiais inertes como já foi anteriormente comentado.

Com base na **Tabela 5.1** e o software Combust montou-se a **Tabela 5.2**, que mostra a contribuição de cada componente do RSU para o PCI de um quilograma de RSU.

Com base nas informações da **Tabela 5.2** conclui-se que a combustão de um quilograma do RSU da cidade de Bauru, com as características descritas, poderia teoricamente gerar aproximadamente 2.292kcal de energia calorífica.

Conforme salientado na revisão bibliográfica o aumento de alimentos pré-processados amplia a presença de embalagens ao mesmo tempo em que reduz a parcela da material orgânico, o que explica a diminuição do resíduo de comida e aumento de papel e papelão no RSU no caso do lixo da Califórnia.

Tabela 5.2: Contribuição energética de cada componente do RSU, sem considerar a segregação.

Componente	Contribuição (kcal/kg)
Res. de Comida	738
Papel e Papelão	758
Têxtil e Couro	237
Madeira	38
Plástico	521
Total PCI	2.292

Comparando-se a **Tabela 5.2** com a **Tabela 5.3** (TCHOBANOGLIOUS, THEISEN, VIRGIL, 1.996) percebe-se que os valores encontrados estão próximos, principalmente quando se considera as diferenças no modo de viver do povo californiano e dos bauruenses.

Tabela 5.3: Contribuição energética de cada componente do RSU.

Componente	Contribuição (kcal/kg)
Res. de Comida	100
Papel e Papelão	1.593
Têxtil e Couro	104
Madeira	89
Plástico	544
Total PCI	2.430

5.2 ALTERNATIVA 2

Será considerada a separação conforme a **Figura 3.10**, que mostra o percentual de segregação de papel/papelão de 38% e plástico de 20%, segundo informações do CEMPRE. Esta alternativa está demonstrada na **Tabela 5.4.**, onde se encontra a contribuição de cada componente do RSU.

Tabela 5.4: Contribuição energética de cada componente do RSU, considerando a segregação

Componente	Contribuição (kcal/kg)
Res. de Comida	738
Papel e Papelão	46
Têxtil e Couro	237
Madeira	38
Plástico	416
Total PCI	1.898

Como se pode perceber da **Tabela 5.4**, a diminuição dos componentes com maior poder calorífico reduz substancialmente o poder calorífico total do RSU.

5.3 ALTERNATIVA 3

Nesta alternativa será retirada a totalidade da parcela de papel/papelão e plástico, conforme demonstrado na **Tabela 5.5**.

Tabela 5.5: Contribuição energética de cada componente do RSU, considerando a segregação total de papel/papelão e plástico.

Componente	Contribuição (kcal/kg)
Res. de Comida	738
Papel e Papelão	0
Têxtil e Couro	237
Madeira	38
Plástico	0
Total PCI	1.013

Como já era esperada, a redução nas quantidades de materiais bons combustíveis, tais como papel/papelão e plástico, reduzem o Poder Calorífico do RSU, implicando em menor quantidade de energia que pode ser recuperada

Na **Tabela 5.6** encontra-se resumido o conteúdo energético teórico nas diversas alternativas estudadas no presente trabalho.

Tabela 5.6: Comparativo energético teórico entre as três alternativas estudadas.

Componente	Contribuição energética (kcal/kg)		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Res. de Comida	738	738	738
Papel e Papelão	758	469	0
Têxtil e Couro	237	237	237
Madeira	38	38	38
Plástico	521	416	0
Total PCI	2.292	1.898	1.013

Na **Figura 5.1** encontram-se comparadas as quantidades de energia obtidas nas três alternativas estudadas, de acordo com a **Tabela 5.6**.

PCI (kcal/kg de lixo)

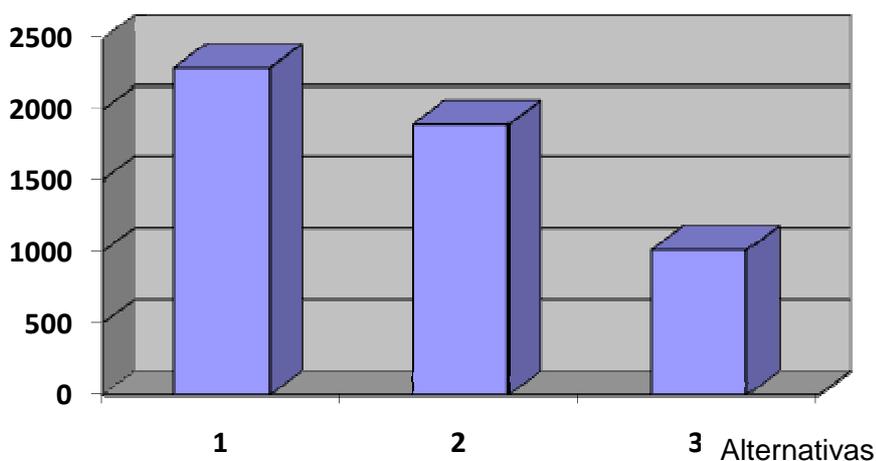


Figura 5.1: Comparação entre produção energética das três alternativas.

A demanda por materiais recicláveis vem aumentando substancialmente nos últimos anos, principalmente devido ao preço alcançado por estes materiais. Segundo Hinrichis e Kleinbach (2003) o preço pago pelos jornais velhos subiu 1.300% entre os anos de 1993 e 1995. Tal fato faz com que os recicláveis sejam segregados do RSU, diminuindo assim o seu poder calorífico e, conseqüentemente, o retorno financeiro das usinas de incineração.

Por outro lado a Gestão Integrada de Resíduos tem como princípio básico ações conhecidas como 3 R's, isto é redução, reutilização e reciclagem objetivando reduzir a geração de resíduos ao mínimo e desta forma, diminuindo também o custo da reparação ambiental causada pela disposição incorreta dos RSU.

Considerando uma produção de RSU de 210 toneladas por dia e eficiência (η) global de uma planta incineradora em torno de 28%, (SILVA, 1998), pode-se deduzir que o potencial teórico de geração de energia de uma cidade do porte de Bauru é de 156.408kWh, 116.566kWh, 49.945kWh para as alternativas 1, 2 e 3, respectivamente. Lembrando que a redução de massa de RSU deve-se a segregação, que retira do resíduo, parte do material que é destinado à reciclagem.

Para a determinação do Total teórico (T_{te}) de energia gerada a partir do RSU utilizou-se a expressão (3), onde K é fator de conversão de kcal para kWh e vale 0,001163:

$$T_{te} = PCI * K * \eta * m_{RSU} \quad (3)$$

A **Tabela 5.7** mostra o potencial teórico de geração de energia do RSU da cidade de Bauru, para as três alternativas estudadas.

Tabela 5.7: Potencial teórico de geração de energia.

Alternativa	PCI (kcal/kg)	kWh	Massa de RSU após a segregação(kg/dia)	Total de energia produzida (kWh/dia)
1	2.292	2,66	210.000	156.408
2	1.898	2,2	189.231	116.566
3	1.013	1,17	152.460	49.945

A **Tabela 5.8** mostra os resultados financeiros das 3 alternativas estudadas. A venda da energia produzida com a incineração do RSU foi estimada com base no valor de R\$ 0,33782 o kWh (ANEEL, 2007). Não estão sendo consideradas nos cálculos questões econômicas, tais como: juros, inflação e depreciação.

O valor da venda do papel/papelão e plástico foi feito com base nos valores referidos na **Tabela 3.10**.

Tabela 5.8 Resultados financeiros diário das 3 alternativas estudadas.

Alternativa	Total de energia produzida (kWh/dia)	Resultados financeiros (R\$/dia)			
		Energia	Papel	Plástico	Total
1	156.408	R\$ 52.837,75	-	-	R\$ 52.837,75
2	116.566	R\$ 39.378,32	R\$ 7.820,40	R\$ 1.158,05	R\$ 48.356,77
3	49.945	R\$ 16.872,41	R\$ 20.580,00	R\$ 5.785,50	R\$ 42.237,91

Na **Figura 5.2** encontra-se a comparação econômica das três alternativas.

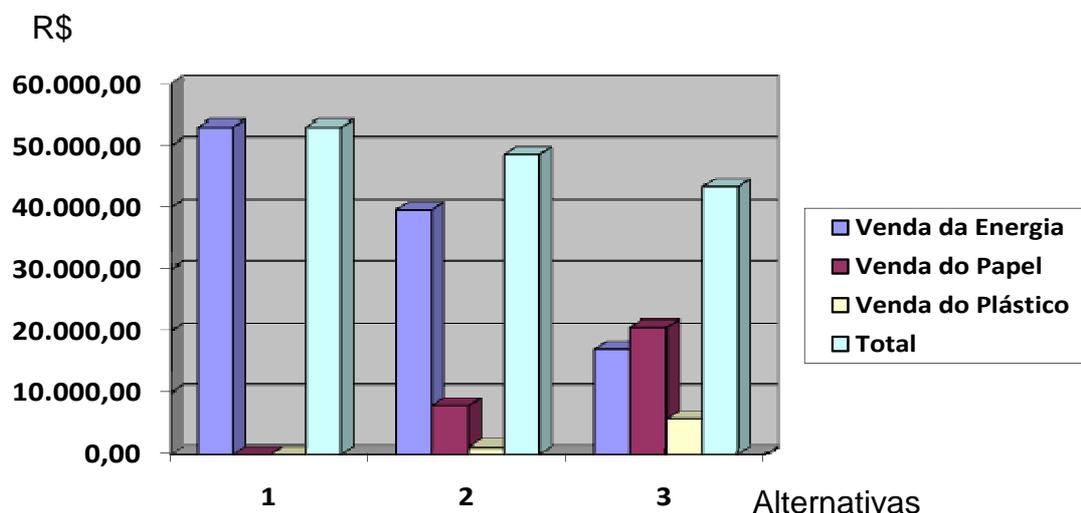


Figura 5.2: Comparação econômica das três alternativas.

Observa-se pela **Figura 5.2** que a alternativa mais vantajosa é a de número um que não considera a segregação dos materiais com maior poder calorífico.

6.0. CONCLUSÕES

- Dentro do quadro atual de aumento da demanda por energia, qualquer sistema alternativo de geração de energia deve ser melhor pesquisado. A proposta de incineração do Resíduo Sólido Urbano do município de Bauru vem de encontro aos ideais de sustentabilidade e diminuição da poluição. Todavia, pode tornar-se inviável com a adoção de sistemática de separação e segregação na origem de materiais com maior valor de mercado, principalmente daqueles que são melhores combustíveis, contribuindo para a redução da quantidade de energia que pode ser recuperada através do processo de incineração controlada.

O aproveitamento dos resíduos urbanos como fonte energética, tem como vantagem a eliminação física de parcela significativa dos resíduos que são enviados aos aterros sanitários. Os aterros têm um alto custo, tanto do ponto de vista do uso de áreas economicamente rentáveis, quanto pelas doenças que os mesmos podem causar à população, além dos problemas sociais e ambientais dele decorrentes.

O processo de incineração trás ao debate reocupações ambientais, principalmente com relação aos poluentes atmosféricos, metais pesados, dioxinas, compostos clorados formados durante a combustão. Além destes problemas existem ainda as cinzas residuais que contém altas concentrações de metais, sendo normalmente dispostas em aterro sanitário.

- O Poder Calorífico do resíduo sólido urbano é gradualmente reduzido na medida em que se reduzem previamente as quantidades de papel/papelão e plásticos, proporcionando temperaturas e eficiência do processo de combustão menores conseqüentemente diminuindo a rentabilidade da usina de incineração. Os valores encontrados pra o PCI foram: 2.292 kcal, 1.898 kcal e 1.013 kcal, para as alternativas 1, 2 e 3, respectivamente, influenciando diretamente o resultado financeiro, concluindo-se que não é interessante do ponto de vista econômico a segregação de papel/papelão e plástico, pois a retirada destes materiais diminui o PCI do RSU.

- Os resultados apresentados pelo software Combust para cálculos de combustão mostraram-se satisfatórios se comparados aos resultados encontrados na bibliografia, demonstrando-se uma importante ferramenta para simular análises de sistemas de incineração.
- Através da simulação realizada pelo software, percebeu-se que a incineração é um método adequado para o tratamento de RSU; pois, esse apresenta uma massa e volume muito significativos podendo ser reduzidos por tal processo, aumentando a vida útil de aterros e reduzindo o impacto ambiental.
- A quantidade teórica de energia que se poderia obter a partir do RSU gerado na cidade de Bauru, de acordo com a alternativa escolhida seria:
 - ✓ Alternativa 1: 156.408 kWh/dia,
 - ✓ Alternativa 2: 116.566 kWh/dia,
 - ✓ Alternativa 3: 49.945 kWh/dia
- Conforme os dados da ANEEL (2001) a demanda de energia elétrica de unidades domésticas brasileiras padrão é aproximadamente 175 kwh ao mês, portanto a energia gerada através da incineração do RSU seria suficiente para atender aproximadamente 26.800, 19.980, e 8.560 residências respectivamente, segundo as alternativas 1, 2 ou 3.

7.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21, **Conferencia das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, 1992, Disponível no site: <http://www6.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas/pdfs/texto_agenda21.pdf>, Acesso em junho 2007

ALVES, J. W. S., VIEIRA, S. M. M. **Inventário Nacional de emissões de metano gerado pelos resíduos no Brasil** – Enabling Brazil to fulfill its commitments to the United Nations on Climate Change, Relatório de atividades do projeto Bra/95/G31, CETESB, São Paulo, 1998.

ANEEL, **Boletim Energia**. Brasília, Superintendência de regulação econômica, 2001. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/BOLETIM_ENERGIA_055.htm Acesso em março de 2007.

ANEEL, **Boletim Energia**. Brasília, Superintendência de regulação econômica, 2007. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/> Acesso em dezembro de 2007.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - Padrões de Desempenho**, ABNT/NBR-1265, 1989

ARRHENIUS, S., A., **Worlds in the Making**, 1886.

AGUIAR, A. O. e PELICIONI, A. F, at. al., **Curso de Gestão Ambiental**, Ed. Manole, 2004.

ARANDA, D.A.G.; RAMOS, A. L. D.; NOVA, G. D.; MARTINS, B. B. **Catalisadores para Tratamento de Gases Tóxicos Provenientes de Incineração de Lixo**. In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Catálise, Bento Gonçalves. IBP, 2001.

ALVES, J. W., **Diagnóstico Técnico Institucional da Recuperação e uso Energético do Biogás Gerado pela Digestão Anaeróbia de Resíduos**, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Resíduo Sólido – Classificação**, NBR 10.004, 1987.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos** NBR 11.175, 1990.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - Padrões de Desempenho**, NBR-1265, 1989

BANDEIRANTE, **Empresa Bandeirante de Energia**. Disponível em: <<http://www.bandeirante.com.br>>. Acesso em: junho de 2006.

BARBOSA, S. R. S., **Qualidade de Vida e suas Metáforas, Uma reflexão Sócio Ambiental**, Unicamp, 1995.

BALESTIERI, J. A. P., **Co-geração: Geração Combinada de Eletricidade e Calor**, Florianópolis: Ed. da UFSC, 2002.

BARRERAS, A. L. M; PUJOL, R. O, **La Combustión, Espanha**, Grupo Editorial Ceac, S.A., 1996.

BIZZO, W. A., **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**, Unicamp, 2002

BIZZO, W. A.; GOLDSTEIN JR., L., **Incineração de Lixo Urbano com geração de Energia Elétrica**. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Campinas. Anais... Campinas: UNICAMP, 1994.

BRASIL, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. CONAMA N.º 005 de 15 de junho de 1989, Publicada no D.O.U, de 30/08/89, Seção I, Pág. 15.048 **Instituir o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR**

BRASIL, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. CONAMA N.º 003 de 28 de junho de 1990 Publicada no D.O.U, de 22/08/90, Seção I, Pág. 15.937 a 15.939. **Estabelece Concentrações de Poluentes Atmosféricos**

BRASIL. Lei 10.438, de abril de 2002, **Dispõe sobre a Expansão da Oferta de Energia Elétrica Emergencial, Recomposição Tarifária Extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)**, 2002.

BRASIL, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. **Programa Brasileiro de Reciclagem**. PBR. Disponível em: <www.reciclagem.ibict.br/pbr> ,Acesso em junho 2007.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), **Regulamenta as Tarifas de Energia Elétrica**, Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifaAplicada/index.cfm>> Acesso em Novembro de 2.007.

BRASIL, MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME, **Balço Energético Nacional**, Brasília, 2003.

BUBU, A.; **Biomassa: uma Energia Brasileira**, 2005, Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br>>. Acesso em março de 2007

BONNER, T. A.; CORNETT, C. L.; DESAI, B. O.; FULLERKAMP, J. M.; HUGHES, T. W.; JOHNSON, M. L.; KENNEDY, E. D.; MCCORMICK, R. J.; PETERS, J. A.; ZANDERS, D. L. **Engineering handbook for hazardous waste incineration**, Monsanto Research Corporation, Dayton, OH, 1981.

BRUNNER, C. R., **Handbook of Incineration Systems**. McGraw-Hill: New York, NY, 1991.

CCX - CHICAGO CLIMATE EXCHANGE, **Bolsa de Créditos de Carbono**, 2004, Disponível em <<http://www.chicagoclimateexchange.com>>. Acesso em Outubro de 2006.

CEMPRE - **Compromisso Empresarial para Reciclagem**. Disponível em <http://www.cempre.org.br/cempre_institucional.php>, Acesso em dezembro 2007.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM, **Gerenciamento Integrado de Resíduos**, 2008.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM, **Ficha Técnica: Papel de Escritório, Papel Ondulado, Plástico Filme, Plástico Rígido**, 2006.

CENAMO, M.C., **Avanços na COP-10 e suas Implicações para o Brasil**, CEPEA - mudanças climáticas, 2004.

CENTRO CLIMA, **Small Scale Unfccc CDM PDD - GS WWF**, Usinaverde, Centro Clima, Rio de Janeiro - Brazil – June, 2005

CERUPT, **Fundo Holandês para Créditos de Carbono**, 2002, Disponível em <<http://www.senter.nl>>. Acesso em setembro de 2007.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. **Resíduos Sólidos Domiciliares e de Serviços de Saúde: Tratamento e Disposição Final – texto básico**, São Paulo, CETESB 1997.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL, **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares: Relatório de 2002**, CETESB. São Paulo, 2003.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares: Relatório de 2003**. CETESB, São Paulo, 2004.

COM - COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITY. **Directive 1999/31/EC of 26. Apr. 1999 on the Landfill of Waste**. Official Journal L 182, Disponível em: <http://europa.eu.int/eurlex/pri/en/oj/dat/1999/l_182/l_18219990716en00010019.pdf>, Acesso em janeiro de 2007.

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. CONAMA N.º 005 de 15 de junho de 1989, Publicada no D.O.U, de 30/08/89, Seção I, Pág. 15.048 **Instituir o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR**

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. CONAMA N.º 003 de 28 de junho de 1990 Publicada no D.O.U, de 22/08/90, Seção I, Pág. 15.937 a 15.939. **Estabelece Concentrações de Poluentes Atmosféricos**

CONESA, J., A., **Producción de Energía Eléctrica en Régimen Especial. Incineración de Residuos Sólidos**, Universidad de Alicante Departamento de Ingeniería Química, 2005.

DASKALOPOULOS, E.; BADR, O.; PROBERT, S. D., **Economic and Environmental Evaluations of Waste Treatment and Disposal Technologies for Municipal Solid Waste**, Applied Energy, 1997.

DEMPSEY, C. R.; OPPELT, E. T. **Incineration of Hazardous Waste, a Critical Review Update. Journal of the Air and Waste Management Association**, v.43, n.1, p.25-73, 1993.

DIJKGRAAF, E.; VOLLEBERGH, HERMAN R.J., **Burn or bury? A Social Cost Comparison of Final Waste Disposal Methods**. Ecological Economics,, 2004, Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VDY-4DGY7GG-1/2/0e107085bdfa87ef56ce62d1671f1cce>>, Acesso em dezembro 2006.

EC, **eA Study on the Economic Valuation of Environmental Externalities from Landfill Disposal and Incineration of Waste**. Brussels: The European Commission, 2000, Disponível em: <http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/waste/cowi_ext_from_landfill.pdf> Acesso em: março de 2007.

ENSINAS, A. V., **Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas**, Tese de Mestrado apresentada na Faculdade de engenharia Mecânica da Unicamp, 2003.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY USA,, disponível em <<http://epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl>>, Acesso em Agosto de 2006

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY USA, **Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills – Background Information for Proposed Standards and Guidelines**. Emission Standards Division 1991.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY USA, **Decision Makers' Guide to Solid Waste Management**. Washington DC, Environmental Protection Agency, 2007. Disponível em: <<http://www.epa.gov/garbage/dmg2.htm>> Acesso em: novembro. 2007

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY USA, **Greenhouse Gas Emissions from Management of Selected Materials in Municipal Solid Waste**, 1998. Disponível em <<http://epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl>>, Acesso em Agosto de 2006

ESPINOLA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S., Curso de Gestão Ambiental, **Controle Ambiental de Resíduo**, Ed. Manole, USP

FERREIRA, A. B. H., **Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa**, Ed. Nova Fronteira, 1995.

FIRJAN, **Relatório do Conselho Empresarial de Energia**. Rio de Janeiro, 2004

FOLHA DE SÃO PAULO, **Miséria Reciclada**, São Paulo, Folha de São Paulo, 20 de julho de 2003.

GOOGLE EARTH, 2007, versão 10.1.0.244, Acesso em novembro de 2007

HAUSER, P. D.; **Criação de Valor e Desenvolvimento Sustentável: uma Avaliação da Incineração de Resíduos Sólidos Municipais em Projetos Enquadráveis no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto**, Instituto COPPEAD de Administração, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2006

HENRIQUES, R. M.; **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica**, UFRJ, COPP, 2004.

HOLANDA, M. R.; **Perspectivas da Co-geração com Resíduos Sólidos Municipais sob a Ótica da Gestão Ambiental**, Tese doutorado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2003.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M., **Energia e Meio Ambiente**, Ed. Thomson, 2003.

HINOSTROZA S. M. L., **Política Energética e Desenvolvimento Sustentável: Taxa sobre o Carbono para Mitigação dos Gases do Efeito Estufa no Brasil**, Campinas, S.P., 2000.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, Rio de Janeiro, RJ, 1989.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, Disponível em
<[HTTP://WWW.ibge.net/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/esgotament_sanitario/defaultesgotamento.shtm](http://www.ibge.net/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/esgotament_sanitario/defaultesgotamento.shtm)>., Rio de Janeiro, RJ, 2002.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Pesquisa Demográfica Indicadores**, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

IBGE, PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO,. Rio de Janeiro, IBGE, 2007. Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/pnsb.pdf>> Acesso em: dezembro de 2007

IPCC, INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE INVENTORIES, **Reference Manual** (Vol.3). 1996.

IPT, INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Lixo Municipal – Manual de Gerenciamento Integrado**, 1998, São Paulo.

IPT, INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Lixo Municipal – Manual de Gerenciamento Integrado**, 2^o. ed. São Paulo, IPT/CEMPRE, 2000.

JOHANNESSEN, L., M., BOYER, G., "**Observations of Solid Waste Landfills in Developing Countries: Africa, Asia, and Latin America**". **Urban and Local Government Working Paper Series #3**, World Bank, Washington, DC, 1999. Disponível em:
<<http://www.worldbank.org/html/fpd/urban/publicat/landfilloverview.pdf>> Acesso em: Março de 2007.

KENJI IWAI, C., **Tratamento de Chorume através de Percolação em Solos Empregados como Material de Cobertura de Aterros para Resíduos Sólidos Urbanos**, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial, 2005.

KILGROE, J. D., **Control of Dioxin, Furan and Mercury Emissions from Municipal Waste Combustors**. Journal of Hazardous Materials, 1996.

LÜCKGE, H.; PETERSON, S., **The role of CDM and JI for Fulfilling the European Kyoto Commitments**. Kiel Working Paper No. 1232, 2004 Disponível em: <www.unikiel.de/ifw/pub/kap/2004/kap1232.htm>, Acesso em novembro de 2007.

LIMA, L.M.Q., **Lixo: Tratamento e Biorremediação**, Ed. Hemus, 1995.

LIMA, L.M.Q., **Tratamento de Lixo**. São Paulo: Hemus, 2^a ed., 1991.

LIMA, A.X., **Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica de uma Usina de Incineração de Resíduos Urbanos no ABCD**, São Paulo, 1994.

LORA, E. E. S., TEXEIRA, F. N., MARTINS, A. R. S., **Análise Técnico-Econômica de Diferentes Variantes para a Recuperação de Energia em Processos de Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos Urbanos**, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1999.

LORA, E. E. S., **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**, Brasília, Aneel, 2003.

LORA, E. E. S., **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**, Brasília, Aneel, 2000.

MADEIRA, R. G., **Recuperação Energética em uma Usina Incineradora de Resíduos Sólidos Urbanos Operando em Cogeração**, UNESP, Bauru, 1889.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F., **Reuso de água**, Editores – Barueri, SP, Manole, 2003.

MCINNES, R.; JAMESON, K.; AUSTIN, D., **Scrubbing Toxic Inorganics**, Chemical Engineering, 1992.

MCINNES, R.; ROYEN, R. V. **Desulfurizing fluegases**. Chemical Engineering, 1990.

MCINNES, R.; JELINEK, S.; PUTSCHE, V. **Cutting toxic organics**. Chemical Engineering, 1990.

MDL - MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO, **Guia de orientação. Coordenação Geral**, Ignez Vidigal Lopes. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 2002.

MENDES, L. G. G., **Proposta de um Sistema para Aproveitamento Energético de um Aterro Sanitário Regional na Cidade de Guaratinguetá**, Universidade Estadual Paulista, 2005.

MENEZES, R. A. A., GERLACH, J.L., e MENEZES, M.A. **Estágio Atual da Incineração no Brasil**, ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Pública VII, Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 2000. Disponível em <<http://www.luftech.com.br/arquivos/art07.htm>>, acesso em janeiro 2008 .

MONTEIRO, J. H. P., **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduo Sólido**, Instituto Brasileiro de Administração Municipal, 2.001.

MOTTA, S.R.; CHERMONT, L. **Aspectos Econômicos da Gestão Integrada de Resíduos**, Rio de Janeiro, IPEIA/DIPES, 1996.

MOREIRA, H. B. C.; **Avaliação Energética do Ciclo de Refrigeração por Absorção Utilizando Biogás de Aterro Sanitário e Gás Natural**, Dissertação de Mestrado em engenharia Mecânica – FEB - UNESP, 2008

NIESSEN, W. R. **Combustion and Incineration Processes**. Marcel Dekker: New York, 1978.

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L.P., **Brazilian Waste Potential: Energy, Environmental, Social and Economic Benefits**. Energy Policy, 2003.

OLIVEIRA, L. B. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos e Abatimento de Gases do Efeito Estufa**, Programa de Planejamento Energético. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ., 2000.

OLIVEIRA, L., HENRIQUES, R., PEREIRA, A., **Coleta Seletiva, Reciclagem e Conservação de Energia**, In: Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 2002.

OLIVEIRA, L. B., **Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil**, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2004.

OWENS, W. D.; SILCOX, G. D.; LIGHTY, J. S.; DENG, X. X.; PERSHING, D. W.; CUNDY, V. A.; LEGER, C. B.; JAKWAY, A. L. Thermal analysis of rotary kiln incineration: comparison of theory and experiment. **Combustion and Flame**, v.86, 1991.

PIMENTEIRA, C. A. P., **Aspectos Sócios Econômicos da Gestão dos Resíduos Sólidos**, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

POLETO, J.A.; SILVA, C.L.; **"Influencia da Separação de Resíduos Sólidos Urbanos para Fins de Reciclagem no Processo de Incineração com Geração de Energia"** Artigo publicado no 8º Congresso IberoAmericano de Engenharia Mecânica, Cusco –Perú, 2007.

PORTEOUS; A., **Energy from Waste; A Wholly Acceptable Waste Management Solution**, The Open University, 1998.

PORTEOUS, A., **Why Energy From Waste Incineration is an Essential Component of Environmentally Responsible Waste Management**. Waste Management , 2005.

PORTEOUS, A. **Energy from Waste Incineration – a State of the Art Emissions Review With an Emphasis on Public Acceptability**, Applied Energy 2001.

PRODAM. **Lixo Problema: Solução Incineração**. São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.prodam.sp.gov.br/limpurb/probsol/incinera.html>>, Acesso em Junho 2007.

RAND, T.; HAUKOHL J.; MARXEN U., **Municipal Solid Waste Incineration: Requirements for a Successful Project**, World Bank Technical Paper No. 462. World Bank, Washington, DC, June 1999.

Disponível em:

<http://www.wds.worldbank.org/external/default/main?pagePK=64193027&piPK=64187937&theSitePK=523679&menuPK=64187510&searchMenuPK=64187511&siteName=WDS&entityID=000094946_00072505420045>, Acesso em Março 2007.

REIS, L.B.; FADIGAS, E.A.; CARVALHO, C.E., **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável**, Ed. Manole, 2005.

REIS, L.B., **Geração de Energia Elétrica**, Ed. Manole, 2.003

RODRIGUES F. L GRAVINATTO, M., **Lixo - De Onde Vem? Para Onde Vai?**, Ed. Moderna, 2002.

ROSA, L. P., **O apagão – Por que veio? Como sair dele?** Ed. Revam – 1ª edição – Rio de Janeiro. 2001

ROSA, L.P. et al, **Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos e Óleos Vegetais**. In: TOLMASQUIM, M.T Fontes Alternativas de Energia no Brasil - CENERGIA. 1a Ed. Editora Interciência, 2003.

SMA, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, Bauru, 2007, SP

SEDU/PR., SECRETARIA ESPECIAL DE DESENVOLVIMENTO URBANO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**, 2001, José Henrique Penido Monteiro, et al.; coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro, Disponível em <manual_RSU_httppeessoas.hsw.uol.com.braterros.htm>, IBAM, Acesso em novembro 2007.

STEUTEVILLE, R., **The State of Garbage in America**. BioCycle, April and May, 1995.

SCHMIDT, A. B. MENEZES, C. F., COIMBRA, N. C., **Relatório sobre Legislação Ambiental de Interesse do Setor Elétrico: nível Federal**, Rio de Janeiro: Eletrobrás, Departamento de Meio Ambiente, 2005

SCHNEIDER, V. E., REGO, R. de C.E., CALDART, V., **Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde.**, São Paulo: CLR Balieiro, 2001.

SCOTT, G., **Polymers and the Environment**. Royal Society of Chemistry, 1999.

SCHNEIDER, V. E., REGO, R. de C.E., CALDART, V., **Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde**. São Paulo: CLR Balieiro, 2001.

SILVA, C.L., **Tratamento Térmico de Resíduos**, FEB - DEM UNESP, 1998.

SILVA, C. L.; DRAGHI, L. G. A.; SILVA, C. M., **Avaliação do Potencial de Geração de Eletricidade pela Combustão do Biogás a partir de Dejetos Bovinos**, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, UNESP, Bauru, 2006.

SILVA, C.L., VELO, E.G., **Incineração de Resíduo Serviço de Saúde Utilizando o Biogás de Aterro Sanitário**, XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM 97, Bauru, SP, 1997.

SILVA, C.L., **Apostila de Tratamento Térmico de Resíduo Sólido**, UNESP, 1998.

SILVA, C.L., **Aspectos Energéticos e Econômicos da incineração de resíduo de Serviço de Saúde decorrentes da segregação e resíduos na Origem**, IV Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica – CIBIM, Santiago, Chile, 1999.

SILVA, C.L., HAMADA, J., **Incineração de Resíduo de Serviço de Saúde: Análise Térmica**, XXV Congresso Internacional de Ingeniería Sanitária y Ambiental, Cidade do México, DF, México, 1996.

SIMONELLI, S. B. J., **Levantamento da Geração dos Resíduos de Serviço de Saúde do Campus de Bauru da Universidade de São Paulo**, Pe/FEB/UNESP; 2001.

SÃO PAULO (Estado), SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE COORDENADORIA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL. **Guia Pedagógico do Lixo**. São Paulo. 1998.

TCHOBANOGLIOUS, G. THEISEN, H, S., VIRGIL, S., **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Managements Issues**, McGraw-Hill, Inc. International Ed. 1996.

TOMAZ, E., JARDIM, W., F., **Controle de efluentes Gasosos**, Apostila do curso e Engenharia Ambiental, Unicamp, 2.000.

TOMAZ E., **Tratamento de Rejeitos Sólidos**, Apostila do curso e Engenharia Ambiental, Unicamp, 2.001.

TIVERON, V.P.M., **Gestão de resíduo Sólido no Município de São Paulo no período de 1989 a 2000: atores em processo e conflitos**, São Paulo, SP, Procam, Interunidades em Ciência Ambiental, USP, 2001

UNFCCC. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTIONS ON CLIMATE CHANGE. Rio de Janeiro, Brazil: United Nations, 1992. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>., Acesso em: Março de 2007

UNFCCC. **A Caring for climate - a guide to the Climate Change Convention and the Kyoto Protocol**. Bonn, Germany: The Climate Change Secretariat (UNFCCC), 2003. Disponível em: http://unfccc.int/resource/docs/publications/caring_en.pdf., Acesso em: Março de 2007.

UNICAMP, **O Mundo Sem Petróleo**, disponível em <<http://www.dep.fem.unicamp.br/boletim/BE13/artigo4.htm>>, Acesso em Junho de 2.006.

USINAVERDE, **O Lixo e o Meio Ambiente, Panorama Internacional Gestão de Resíduos Urbanos**, 2008, Disponível em: <<http://www.usinaverde.com.br/lixoemeioambiente.php?cod=2152313A-ACA1-D5D1-D9CF-D81528495D55>>, Acesso em janeiro 2008,

VESPA, I., C., G., **Características Minerais e Energéticas do Lixo Urbano em Processos de Compostagem e Biodigestão Anaeróbia**, Unesp, 2005.

VIEIRA, S, M, M,; ALVES, J.W.S, **Primeiro Inventário Brasileiros de Emissões Antrópicas de Gases do Efeito Estufa**. Relatório de Referência. Emissão de Metanos no Tratamento e na Disposição de Resíduos, São Paulo, CETESB, 2003.

VON SPERLING, M., **Comparison Among the Most Frequently used Systems for Wastewater Treatment in Developing Countries**. Water Science Technology, 1996.

VON SPERLING, M.; NASCIMENTO, L. V., **A Resolução CONAMA 20/86 e as Legislações Estaduais de Classificação das Águas e Lançamento de Efluentes**. 20^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, Rio de Janeiro, 1999.

WOOD, S. C., **Select the right NOx control technology**. Chemical Engineering Progress, 1994.

Anexo A

*Planilha de resultados do Software
Combust para a alternativa 1*

RESÍDUO E COMIDA

Combustión estequiométrica o con exceso de aire, de un combustible sólido o líquido

FRACCIÓN MÁSCICA DE:

Carbono = 0,14	Hidrógeno = 0,02	Azufre = 0,01
Oxígeno = 0,11	Nitrógeno = 0,01	Agua = 0,7
Cenizas = 0,02		

Carbón

Coeficiente de exceso de aire = 1,0

RESULTADOS

Masa mol. combustible = 15,28 kg/kmol
 Masa mol. humos húme. = 25,53 kg/kmol
 Masa mol. humos secos = 31,203 kg/kmol

Densidad humos = 1,14 kg/Nm³

RAC (kg) = 1,88 kg aire/kg comb. con cen.
 RAC (kg) = 1,909 kg aire/kg comb. sin cen.
 RAC (kmol) est. = 1,011 kmol aire/kmol comb.
 RAC (kmol) real = 1,011 kmol aire/kmol comb.

RHHC (kmol) = 1,745 kmol humos/kmol gas
 RHHC (kg) = 2,916 kg humos húm./kg comb. sin cen.
 RHSC (kmol) = 0,995 kmol humos secos/kmol gas
 RHSC (kg) = 2,032 kg humos secos/kg comb. sin cen.
 RHHC (kg/Nm³) = 1,989 kg humos húm./Nm³ gas
 RHSC (kg/Nm³) = 1,386 kg humos sec./Nm³ gas

PCS neto = 21,801 MJ/kg carbón neto
 PCS bruto = 6,213 MJ/kg carbón bruto
 PCI neto = 20,3 MJ/kg carbón neto
 PCI bruto = 5,75 MJ/kg carbón bruto

COMPOSICIÓN HUMOS HÚMEDOS

CO ₂	10,66 %
H ₂ O	43,0 %
SO ₂	0,33 %
O ₂	0,0 %
N ₂	46,01 %

COMPOSICIÓN HUMOS SECOS

CO ₂	18,71 %
SO ₂	0,58 %
O ₂	0,0 %
N ₂	80,71 %

PAPEL PAPELÃO

Combustión estequiométrica o con exceso de aire, de un combustible sólido o líquido

FRACCIÓN MÁSCICA DE:

Carbono = 0,42	Hidrógeno = 0,06	Azufre = 0,0
Oxígeno = 0,42	Nitrógeno = 0,0	Agua = 0,06
Cenizas = 0,05		

Carbón

Coefficiente de exceso de aire = 1,0

RESULTADOS

Masa mol. combustible = 12,08 kg/kmol
 Masa mol. humos húme. = 29,25 kg/kmol
 Masa mol. humos secos = 31,318 kg/kmol

Densidad humos = 1,306 kg/Nm³

RAC (kg) = 4,844 kg aire/kg comb. con cen.
 RAC (kg) = 5,099 kg aire/kg comb. sin cen.
 RAC (kmol) est. = 2,135 kmol aire/kmol comb.
 RAC (kmol) real = 2,135 kmol aire/kmol comb.

RHHC (kmol) = 2,52 kmol humos/kmol gas
 RHHC (kg) = 6,102 kg humos húm./kg comb. sin cen.
 RHSC (kmol) = 2,128 kmol humos secos/kmol gas
 RHSC (kg) = 5,518 kg humos secos/kg comb. sin cen.
 RHHC (kg/Nm³) = 3,29 kg humos húm./Nm³ gas
 RHSC (kg/Nm³) = 2,975 kg humos sec./Nm³ gas

PCS neto = 18,504 MJ/kg carbón neto
 PCS bruto = 16,468 MJ/kg carbón bruto
 PCI neto = 17,113 MJ/kg carbón neto
 PCI bruto = 15,11 MJ/kg carbón bruto

COMPOSICIÓN HUMOS HÚMEDOS

CO ₂	17,45 %
H ₂ O	15,55 %
SO ₂	0,03 %
O ₂	0,0 %
N ₂	66,97 %

COMPOSICIÓN HUMOS SECOS

CO ₂	20,66 %
SO ₂	0,03 %
O ₂	0,0 %
N ₂	79,31 %

TÊXTIL E COURO

Combustión estequiométrica o con exceso de aire, de un combustible sólido o líquido

FRACCIÓN MÁSCICA DE:

Carbono = 0,5	Hidrógeno = 0,06	Azufre = 0,0
Oxígeno = 0,28	Nitrógeno = 0,04	Agua = 0,1
Cenizas = 0,02		

Carbón

Coeficiente de exceso de aire = 1,0

RESULTADOS

Masa mol. combustible = 11,3 kg/kmol
 Masa mol. humos húme. = 29,21 kg/kmol
 Masa mol. humos secos = 30,994 kg/kmol

Densidad humos = 1,304 kg/Nm³

RAC (kg) = 6,487 kg aire/kg comb. con cen.
 RAC (kg) = 6,633 kg aire/kg comb. sin cen.
 RAC (kmol) est. = 2,598 kmol aire/kmol comb.
 RAC (kmol) real = 2,598 kmol aire/kmol comb.

RHHC (kmol) = 2,951 kmol humos/kmol gas
 RHHC (kg) = 7,63 kg humos húm./kg comb. sin cen.
 RHSC (kmol) = 2,546 kmol humos secos/kmol gas
 RHSC (kg) = 6,985 kg humos secos/kg comb. sin cen.
 RHHC (kg/Nm³) = 3,849 kg humos húm./Nm³ gas
 RHSC (kg/Nm³) = 3,523 kg humos sec./Nm³ gas

PCS neto = 24,189 MJ/kg carbón neto
 PCS bruto = 21,238 MJ/kg carbón bruto
 PCI neto = 22,676 MJ/kg carbón neto
 PCI bruto = 19,86 MJ/kg carbón bruto

COMPOSICIÓN HUMOS HÚMEDOS

CO ₂	16,15 %
H ₂ O	13,72 %
SO ₂	0,0 %
O ₂	0,0 %
N ₂	70,13 %

COMPOSICIÓN HUMOS SECOS

CO ₂	18,72 %
SO ₂	0,0 %
O ₂	0,0 %
N ₂	81,28 %

MADEIRA

Combustión estequiométrica o con exceso de aire, de un combustible sólido o líquido

FRACCIÓN MÁSCICA DE:

Carbono = 0,38	Hidrógeno = 0,05	Azufre = 0,0
Oxígeno = 0,3	Nitrógeno = 0,03	Agua = 0,2
Cenizas = 0,04		

Carbón

Coefficiente de exceso de aire = 1,0

RESULTADOS

Masa mol. combustible = 12,43 kg/kmol
 Masa mol. humos húme. = 28,82 kg/kmol
 Masa mol. humos secos = 31,154 kg/kmol

Densidad humos = 1,287 kg/Nm³

RAC (kg) = 4,731 kg aire/kg comb. con cen.
 RAC (kg) = 4,908 kg aire/kg comb. sin cen.
 RAC (kmol) est. = 2,116 kmol aire/kmol comb.
 RAC (kmol) real = 2,116 kmol aire/kmol comb.

RHHC (kmol) = 2,549 kmol humos/kmol gas
 RHHC (kg) = 5,907 kg humos húm./kg comb. sin cen.
 RHSC (kmol) = 2,096 kmol humos secos/kmol gas
 RHSC (kg) = 5,252 kg humos secos/kg comb. sin cen.
 RHHC (kg/Nm³) = 3,279 kg humos húm./Nm³ gas
 RHSC (kg/Nm³) = 2,915 kg humos sec./Nm³ gas

PCS neto = 20,659 MJ/kg carbón neto
 PCS bruto = 15,784 MJ/kg carbón bruto
 PCI neto = 19,246 MJ/kg carbón neto
 PCI bruto = 14,618 MJ/kg carbón bruto

COMPOSICIÓN HUMOS HÚMEDOS

CO ₂	16,13 %
H ₂ O	17,77 %
SO ₂	0,04 %
O ₂	0,0 %
N ₂	66,07 %

COMPOSICIÓN HUMOS SECOS

CO ₂	19,61 %
SO ₂	0,05 %
O ₂	0,0 %
N ₂	80,34 %

PLÁSTICO

Combustión estequiométrica o con exceso de aire, de un combustible sólido o líquido

FRACCIÓN MÁSCICA DE:

Carbono = 0,59	Hidrógeno = 0,07	Azufre = 0,0
Oxígeno = 0,22	Nitrógeno = 0,0	Agua = 0,02
Cenizas = 0,1		

Carbón

Coefficiente de exceso de aire = 1,0

RESULTADOS

Masa mol. combustible = 9,76 kg/kmol
 Masa mol. humos húme. = 29,36 kg/kmol
 Masa mol. humos secos = 30,867 kg/kmol

Densidad humos = 1,311 kg/Nm³

RAC (kg) = 8,194 kg aire/kg comb. con cen.
 RAC (kg) = 9,085 kg aire/kg comb. sin cen.
 RAC (kmol) est. = 3,076 kmol aire/kmol comb.
 RAC (kmol) real = 3,076 kmol aire/kmol comb.

RHHC (kmol) = 3,354 kmol humos/kmol gas
 RHHC (kg) = 10,084 kg humos húm./kg comb. sin cen.
 RHSC (kmol) = 2,96 kmol humos secos/kmol gas
 RHSC (kg) = 9,358 kg humos secos/kg comb. sin cen.
 RHHC (kg/Nm³) = 4,396 kg humos húm./Nm³ gas
 RHSC (kg/Nm³) = 4,079 kg humos sec./Nm³ gas

PCS neto = 29,897 MJ/kg carbón neto
 PCS bruto = 26,369 MJ/kg carbón bruto
 PCI neto = 28,097 MJ/kg carbón neto
 PCI bruto = 24,543 MJ/kg carbón bruto

COMPOSICIÓN HUMOS HÚMEDOS

CO ₂	15,81 %
H ₂ O	11,74 %
SO ₂	0,0 %
O ₂	0,0 %
N ₂	72,44 %

COMPOSICIÓN HUMOS SECOS

CO ₂	17,92 %
SO ₂	0,0 %
O ₂	0,0 %
N ₂	82,08 %