

MARCELO RODRIGUES DE HOLANDA

**“AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CO-
GERAÇÃO A PARTIR DE RESÍDUOS
SÓLIDOS MUNICIPAIS NA REGIÃO DE
GUARATINGUETÁ”**

MARCELO RODRIGUES DE HOLANDA

**“AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CO-
GERAÇÃO A PARTIR DE RESÍDUOS
SÓLIDOS MUNICIPAIS NA REGIÃO DE
GUARATINGUETÁ”**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho”, Campus de Guaratinguetá, para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

Guaratinguetá - SP

1998

DEDICATÓRIA

**Aos meus pais, que sempre me deram amor
e carinho em todos os momentos
da vida**

AGRADECIMENTOS

À DEUS, pela vida e pela força sem a qual não conseguiria atravessar os momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri, pelo excelente apoio durante a realização deste trabalho.

A minha noiva, Janislaine, pela compreensão nos momentos de ausência.

Ao Prof. Sílvio Jorge Coelho Simões, do Departamento de Engenharia Civil, e ao aluno Alexandre Antonello, pela troca de informações e de referências.

Aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá, pela orientação quanto à bibliografia.

A todos os colegas de estudo, pela amizade e companheirismo.

PENSAMENTO

O SENHOR é o meu pastor:
nada me faltará.
Davi
(Salmo 23)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE NOMENCLATURAS	12

CAPÍTULOS

1	UMA VISÃO GERAL SOBRE A QUESTÃO ENERGÉTICA	14
1.1	Introdução	14
1.2	Perspectivas de aproveitamento energético	15
1.3	Objetivos deste trabalho e sumário dos capítulos	17
2	ASPECTOS BÁSICOS SOBRE OS RESÍDUOS SÓLIDOS MUNICI- PAIS	19
2.1	Os resíduos na História da humanidade	19
2.2	Resíduos sólidos municipais	22
2.3	Técnicas de manipulação e/ou processamento de resíduos	37
2.4	Os problemas gerados pelos resíduos sólidos municipais (ambientais, sócio-econômicos, de saúde e outros)	49
3	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS MUNICIPAIS	54
3.1	Introdução	54
3.2	Aspectos gerais da co-geração	55
3.3	Aspectos importantes para a implantação da co-geração	60
3.4	Revisão da literatura sobre os resíduos sólidos municipais	62
4	CICLOS E CONFIGURAÇÕES	78
4.1	Introdução	78
4.2	Ciclos e configurações disponíveis para a prática de combustão/inci- neração	78

CAPÍTULOS

4.3	Comentários	93
5	ESTUDO DE CASO PARA A REGIÃO DE GUARATINGUETÁ	94
5.1	Introdução	94
5.2	Apresentação geral dos dados	94
5.3	Análises técnica e econômica	104
6	CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		131
RESUMO		135
ABSTRACT		136
ANEXO - Aspectos sobre a emissão de poluentes na geração de energia		137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Custo diferencial em ciclos a vapor	17
Figura 2.1 - Diagrama representativo das etapas do sistema de manejo de resíduos sólidos municipais	38
Figura 3.1 - Ciclos térmicos de co-geração	57
Figura 3.2 - Regimes de co-geração : (a) “topping”; (b) “bottoming”	58
Figura 3.3 - Níveis de geração em regime “bottoming” e “topping”	59
Figura 3.4 - Um compreensivo sistema de recuperação de recursos	67
Figura 3.5 - Modelo esquemático de decomposição “in situ”	68
Figura 3.6 - Métodos de classificação de resíduos	71
Figura 3.7 - A porcentagem de incineração de resíduo em vários países europeus	74
Figura 4.1 - Diagrama de fluxo da unidade de recuperação de recursos em Palm Beach	79
Figura 4.2 - Diagrama de um ciclo de turbina à gás com aquecimento dos gases de exaustão e queima suplementar	80
Figura 4.3 - Diagrama de fluxo da caldeira de leito fluidizado circulante	82
Figura 4.4 - Diagrama de fluxo de uma “super usina elétrica” com queima de resíduo municipal (400 toneladas/dia, 220 MW)	83
Figura 4.5 - Diagrama da Estação Energética Takahama	85
Figura 4.6 - Configuração geral de uma unidade de incineração de resíduos com co-geração	87
Figura 4.7 - Configurações de sistemas de recuperação do calor de exaustão ...	87
Figura 4.8 - Esquema simplificado de um incinerador de resíduo sólido (Caso de referência)	89
Figura 4.9 - Configuração de um gerador de vapor com recuperação de calor paralelo à uma caldeira de incineração (Caso 1)	90

Figura 4.10 - Configuração de uma caldeira de incineração com superaquecimento (Caso 3)	91
Figura 4.11 - Configuração de um gerador de vapor com recuperação de calor paralelo à uma caldeira de incineração, tendo um desvio para a exaustão (Caso 4)	91
Figura 5.1 - Mapa da Região de Guaratinguetá	95
Figura 5.2 - Fluxograma da evacuação dos resíduos sólidos municipais ...	100
Figura 5.3 - Ciclo a vapor com caldeira convencional e turbina de contra-pressão	105
Figura 5.4 - Configuração proposta para a alternativa 2	118

GRÁFICOS

Gráfico 5.1 - Comparação entre a $\dot{m}_c$ e a $\dot{m}_{v(r)}$ para o sistema de cogeração que opera com $P = 6,3 \text{ MPa}$ e $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$	123
Gráfico 5.2 - Comparação entre a $\dot{m}_c$ e a $\dot{m}_{v(r)}$ para o sistema de cogeração que opera com $P = 4,2 \text{ MPa}$ e $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$	124
Gráfico 5.3 - Comparação entre a $\dot{m}_c$ e a $\dot{m}_{v(r)}$ para o sistema de cogeração que opera com $P = 2,1 \text{ MPa}$ e $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição física dos resíduos sólidos urbanos relativos a várias localidades	28
Tabela 2.2 - Valores da massa específica média do lixo urbano em diversos lugares do mundo	32
Tabela 2.3 - Poder calorífico inferior de vários resíduos sólidos	33
Tabela 2.4 - Valores de umidade dos componentes do lixo urbano de uma comunidade	34
Tabela 2.5 - Dados percentuais dos combustíveis de resíduos sólidos comunitários	35
Tabela 2.6 - Produção “per capita” média diária do lixo urbano gerado em diversos lugares	36
Tabela 3.1 - Comparação dos métodos de classificação de resíduos sólidos utilizados nos Países Baixos entre 1960 e 1978, descrita conforme à porcentagem de população auxiliada pelos métodos dados	65
Tabela 3.2 - Condição da eficiência de usinas elétricas com queima de resíduo municipal no Japão	72
Tabela 3.3 - Características das unidades de combustão de resíduo municipal: EUA, 1992	72
Tabela 3.4 - Porcentagem de projetos por produto combustível primário ..	73
Tabela 3.5 - Incineradores e orçamentos para as cidades grandes e para os complexos industriais na Coreia	77
Tabela 4.1 - Resumo dos resultados da análise feita entre as plantas integradas	92
Tabela 5.1 - Dados estatísticos dos municípios do CIRG	98
Tabela 5.2 - Quantidades de resíduos sólidos na Região do CIRG	101

Tabela 5.3 - Composição dos resíduos sólidos municipais na Região do CIRG	103
Tabela 5.4 - Dados da análise termodinâmica	106
Tabela 5.5 - Dados da análise técnica para a alternativa 1	109
Tabela 5.6 - Resultados finais da análise econômica para a alternativa 1	116
Tabela 5.7 - Dados da análise técnica para a alternativa 1, considerando a incineração da capacidade total de resíduo urbano gerado	117
Tabela 5.8 - Resultados finais da análise econômica para a alternativa 1, considerando a incineração da capacidade total de resíduo urbano gerado	117
Tabela 5.9 - Dados da análise técnica para a alternativa 2	126
Tabela 5.10 - Resultados finais da análise econômica para a alternativa 2 ..	127

ANEXO

Tabela A1 - Análises física e química das cinzas da planta de incineração Ivry	138
Tabela A2 - Concentração de metais pesados constituintes do lixo urbano .	139
Tabela A3 - Concentração de metais pesados presentes nas cinzas encontradas na entrada, no interior e na saída do precipitador eletrostático da unidade de incineração Issy	140
Tabela A4 - Porcentagem de unidades de incineração que utilizam os equipamentos de controle da poluição do ar por ano nos EUA	143

NOMENCLATURAS

C_{comb}	Custo específico do combustível em relação à potência suprida pelo combustível
CM_{cald}	Custo de manutenção da caldeira
CM_{STS}	Custo de manutenção do sistema com turbina a vapor
CV_{conv}	Custo anual da energia térmica gerada por caldeira convencional
E_c ou S	Energia térmica produzida na cogeração e consumida pelo processo
E_{comb}	Potência suprida pelo combustível
E_p ou E	Energia elétrica produzida na co-geração
E_v	Energia térmica consumida na forma de vapor
FS	Fator de serviço (número de horas anuais efetivamente operacionais)
h_1	Valor ideal da entalpia no ponto (1)
h_2'	Valor real da entalpia no ponto (2)
h_3	Valor ideal da entalpia no ponto (3)
h_4'	Valor real da entalpia no ponto (4)
h_c	Entalpia do vapor na saída da turbina de condensação
k	“Payback” (período de retorno)
$\dot{m}_c$	Vazão de vapor para o condensador
$\dot{m}_{\text{comb}}$	Vazão de combustível
$\dot{m}_p$	Vazão de vapor consumida no processo
$\dot{m}_v$	Vazão de vapor
η_{gc}	Eficiência de geração de calor

η_{ge}	Eficiência de geração de energia elétrica
η_{global}	Eficiência global
PCI	Poder calorífico inferior
P_{el}	Preço da energia elétrica
$\$_{comb}$	Custo do combustível
$\dot{W}_{bomba}$	Potência da bomba
$\dot{W}_{eixo}$	Potência de eixo da turbina

SUBSCRITOS

g ou GN	gás natural
máx	máximo
mín	mínimo
r ou R	resíduo sólido municipal
TG	turbina a gás
TV1	turbina a vapor de contra-pressão
TV2	turbina a vapor de condensação

CAPÍTULO 1

UMA VISÃO GERAL SOBRE A QUESTÃO ENERGÉTICA

1.1 Introdução

Dada a sua condição de tecnologia energeticamente eficiente, discutir co-geração implica necessariamente retomar o histórico da Conservação de Energia naquele que é, talvez, o ponto comum dos trabalhos de engenharia aplicada à questão energética: a crise do petróleo da década de 1970, na qual todos os países sem exceção se viram de um momento para o outro em meio a uma brutal necessidade de alteração no perfil de consumo dos derivados de petróleo.

Passadas duas décadas, algumas importantes questões permanecem atuais:

- a discussão geopolítica do mundo árabe ainda ocupa grande espaço na mídia, tendo como pano de fundo a disputa por posições que privilegiam os grandes blocos econômicos mundiais;
- o consumo desenfreado do petróleo e seus derivados, assim como do carvão para a geração termelétrica, traz consigo a eliminação de produtos tóxicos gasosos e particulados na atmosfera, gerando grande preocupação para com o futuro do planeta em termos de meio ambiente.

Não seria por outra razão além da manutenção da atual ordem mundial que as grandes potências mundiais se vêm impelidas a combater as tentativas de domínio dos acessos as grandes reservas de petróleo do Oriente Médio por parte de governos ditatoriais e/ou com tendências religiosas concentradoras; as crises mundiais do Golfo Pérsico, em 1991 numa operação dita "cirúrgica" pelos aliados ocidentais e mais recentemente no começo deste ano, numa disputa envolvendo a inspeção de palácios iraquianos em busca de armas

bacteriológicas e que somente se encerrou com a intervenção pessoal de um dirigente da ONU (Organização das Nações Unidas), comprovam a tese da disputa de um grande mercado de energia.

Em termos da preservação do meio ambiente, muito se tem discutido e acordado sem que necessariamente as questões sejam resolvidas e as resoluções cumpridas; em 1992 realizou-se no Brasil a Conferência das Nações Unidas para o Ambiente e Desenvolvimento, RIO-92, que produziu como principal resultado um documento chamado de Agenda 21, no qual se procurou definir padrões de qualidade desejáveis para o meio ambiente. Entretanto, em meio a esse esforço e aos que se seguiram, muito claramente se percebe que o desenvolvimento econômico prepondera sobre a questão ambiental e social, a despeito da formal aceitação de seus termos por parte de representantes dos países envolvidos.

Em meio a tudo isso, novas questões são levantadas: em artigo recente no jornal Folha de São Paulo (10/05/98), o professor Rogério César de Cerqueira Leite alertava acerca do fim do petróleo, de acordo com um trabalho publicado na revista *Nature* de março deste ano, no qual seus autores, Collin J. Campbell e Jean H. Laherrère, afirmam que o declínio de sua produção se dará em um período de cinco a dez anos, à revelia das previsões otimistas que vêm sendo feitas de longa data que têm em conta a disponibilidade dessa fonte energética por mais quarenta ou até sessenta anos.

O presente estudo foi desenvolvido tendo em vista a questão premente da oferta de combustíveis fósseis e a necessidade de se discutir o problema causado pela deposição dos resíduos sólidos em áreas economicamente rentáveis à luz de técnicas eficientes de aproveitamento da energia.

1.2 Perspectivas de aproveitamento energético

Está claro para uma parcela da população, principalmente aquela que se dedica ao estudo do aproveitamento dos recursos naturais, que a continuar-se o processo de exaurimento dos mesmos muito dificilmente as futuras gerações poderão ter acesso a eles.

Uma das primícias da Conservação de Energia é a manutenção da qualidade de vida das populações através de um uso mais racional das fontes energéticas disponíveis - daí a necessidade de uma maior dedicação à pesquisa de novas formas de transformação da energia (seja a partir da melhoria da eficiência de conversão, seja pela recuperação de formas energéticas até então desprezadas) e da produção de novas fontes combustíveis renováveis.

Nesse último contexto, é importante assinalar que as necessidades vitais da população humana conduzem a sérios problemas que, considerados sob nova ótica, podem se transformar em soluções adequadas para o atual panorama energético. A espécie humana necessita de produtos agroindustriais para sua subsistência, o que implica na geração de subprodutos residuais na forma de biomassas vegetais decorrentes do corte e da transformação dos alimentos, assim como de outros subprodutos de diversas ordens, não apenas agroindustriais, que se constituem no chamado resíduo sólido ou lixo urbano.

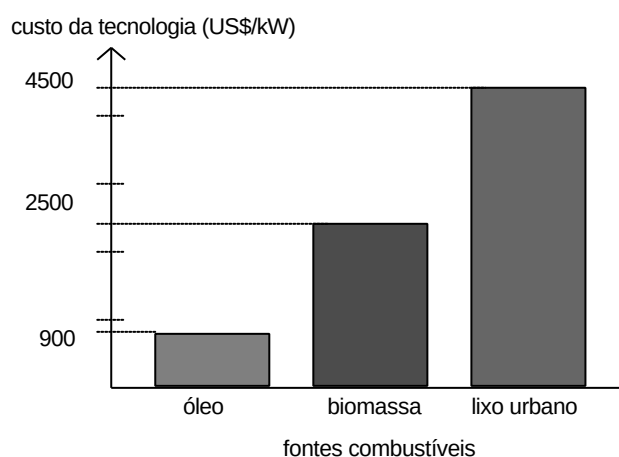
Uma linha de pesquisa que vem merecendo a atenção de importantes centros universitários e de pesquisa é a gaseificação de biomassas e carvões para sua aplicação em conjuntos a gás e ciclos combinados. O emprego desses sistemas com queima de gás natural já é relativamente difundido nos Estados Unidos, porém em decorrência das incertezas na disponibilidade e preço no longo prazo desse combustível já se encontram adiantados os estudos voltados à gaseificação de carvão e biomassa, o primeiro assinalado como CIC/STIG (*coal-integrated gasifier/steam injected gas turbine*) e o último como BIG/STIG (*biomass-integrated gasifier/steam injected gas turbine*).

A gaseificação é um processo químico de conversão de materiais sólidos em gases combustíveis, gases redutores ou gases para síntese química. Historicamente, seu desenvolvimento sofreu forte retração pelo advento de combustíveis derivados do petróleo,

porém suas técnicas são conhecidas desde o século 18. Hoje, especialmente por sua flexibilidade e atendimento a restrições ambientais, a gaseificação volta a ser uma tecnologia em discussão, operando entre 2 e 4 MPa (dependendo das necessidades na entrada do combustor) e com temperaturas de cerca de 1500 °C.

As dificuldades quanto à disponibilidade de terras que permitam abrigar aterros sanitários, especialmente em países com grande densidade populacional em áreas limitadas, como é o caso do Japão e do Líbano, dentre outros, têm lhes forçado a perseguir novas soluções para sua deposição; a incineração associada à geração de energia tem sido uma das possibilidades aventadas, tanto de forma restrita aos resíduos sólidos como em associação com o gás natural. Como problema comum entre as diversas propostas encontram-se os elevados custos associados aos equipamentos de geração, à aquisição de componentes específicos para a adequada movimentação, seleção e combustão do lixo, etc.

Entretando, se forem considerados os custos diferenciais das diferentes fontes combustíveis num contexto de transformação da realidade atual quanto à disponibilidade e preço, é razoável imaginar-se que em futuro próximo a viabilidade dos sistemas para combustão de lixo urbano possa justificar essa solução; a figura 1.1 ilustra a comparação entre três combustíveis possíveis de serem utilizados no ciclo a vapor, evidenciando os custos diferenciais atuais existentes entre as três tecnologias e que favorecem, nesse momento, a primeira mas que podem, ao longo do tempo, se tornar menores permitindo a penetração das outras fontes combustíveis.



Fonte: Balestieri, 1997

Figura 1.1 Custo diferencial em ciclos a vapor

1.3 Objetivos deste trabalho e sumário dos capítulos

Em 1993, um grupo de técnicos alemães desenvolveu para a Região de Guaratinguetá uma proposta de consórcio integrado das oito cidades próximas, avaliando as condições técnicas e econômicas para o aproveitamento do lixo urbano; como resultado dessa avaliação foi divulgado junto à comunidade local um relatório identificando potencialidades para a incineração dos resíduos e compostagem, fornecendo-se um levantamento preliminar dos principais valores envolvidos na questão.

Com base no que se apresentou neste capítulo e nas informações apresentadas no referido relatório, são objetivos deste trabalho identificar as condições técnicas e econômicas mais favoráveis para as quais a geração combinada de eletricidade e de vapor para emprego em processos industriais a partir da queima de resíduos sólidos urbanos pode se mostrar interessante para o atendimento prioritário de empresas de reciclagem de produtos localizadas em um polo industrial próximo às instalações da unidade termelétrica.

O Capítulo 2 relata uma visão global de vários aspectos básicos sobre os resíduos sólidos municipais.

O Capítulo 3 apresenta as definições acerca dos aspectos gerais da co-geração, juntamente com uma revisão da literatura nacional e internacional sobre os resíduos urbanos.

No Capítulo 4 apresentam-se propostas de alguns autores sobre os ciclos ou configurações que exercem a prática de combustão/incineração de resíduos sólidos municipais, relatando vários aspectos e os possíveis aproveitamentos das diferentes energias produzidas.

O Capítulo 5 traz, num estudo de caso para a região de Guaratinguetá, informações sobre a situação geral dos resíduos municipais na mesma e as análises técnica e econômica de duas propostas de configurações de combustão/incineração associadas à geração de energia elétrica e de vapor, queimando apenas lixo urbano (ciclo à vapor) ou em associação com o gás natural (ciclo combinado).

Finalmente, no Capítulo 6 apresentam-se algumas conclusões à respeito deste trabalho e possíveis recomendações acerca da continuidade da presente pesquisa.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS BÁSICOS SOBRE OS RESÍDUOS SÓLIDOS MUNICIPAIS

2.1 Os resíduos na História da humanidade

A geração de resíduos depende, predominantemente, do estágio cultural das civilizações. Figueiredo (1995) retrata que desde o aparecimento do homem até os dias atuais, a geração de resíduos e seus problemas associados sempre acompanharam as sociedades humanas, sendo que em alguns momentos os desdobramentos dessa união se apresentaram de forma trágica, como é o caso da peste bubônica desencadeada no século XIV, em função da falta de saneamento das cidades européias da época, dizimando milhões de pessoas.

Partindo das sociedades primitivas, no período paleolítico, (aproximadamente 10.000 a.C.), quando o nomadismo era a característica predominante juntamente com a coleta de elementos naturais e a caça, a geração de resíduos estava associada às funções fisiológicas e necessidades básicas do homem, como alimentação, vestuário, confecção de alguns utensílios, etc.

Com o maior domínio do homem sobre o meio ambiente, superando as dificuldades impostas pela natureza e explorando mais intensamente o ambiente natural, surgiram as primeiras atividades agropastoris, havendo, dessa forma, um controle parcial sobre as fontes de sua alimentação, tanto pelo cultivo do solo quanto pela criação de animais. De acordo com Sales Filho e Figueiredo (1989), com essas características o homem entra no período neolítico (aproximadamente entre 10.000 e 4.000 a.C.) e a forma de vida nômade evolui para formas de vida mais sedentárias; passam a ser gerados, então, dois tipos de resíduos, os agrícolas (orgânicos e dispersos, portanto facilmente incorporados ao meio ambiente) e os resíduos sólidos municipais ou “lixos urbanos” (orgânicos e concentrados).

A revolução neolítica, caracterizada pelo desenvolvimento progressivo das atividades agrícolas e pastoris, foi responsável pela significativa multiplicação da espécie humana neste período, além de garantir melhorias significativas nas condições de vida do homem e o aumento da expectativa de vida. Dessa forma, a revolução neolítica motivou o aumento das concentrações humanas, culminando com o surgimento das primeiras cidades, o que implicou no desenvolvimento de atividades tipicamente urbanas, como o artesanato e o comércio, bem como na necessidade de produção de alimentos para o abastecimento destas comunidades. Adicionado a essas informações, ocorreu nessa época o surgimento do período denominado Idade dos Metais, caracterizado pelo aparecimento da metalurgia, representando um marco nas relações do homem com a natureza. A partir de então, além de extrair os elementos naturais, o homem passa a alterar suas concentrações através dos processos de “purificação” dos metais.

Em virtude disso, baseados numa análise mais profunda de todos esses fatores, testemunhou-se um aumento das taxas de geração de resíduos, predominantemente orgânicos, de forma concentrada, o que motivou o aparecimento dos primeiros problemas associados aos resíduos sólidos municipais (problemas de saúde pública, odores, atração de animais e insetos, doenças, etc), obrigando cidades inteiras a se transferirem em virtude dos problemas citados, oriundos do acúmulo de resíduos.

Durante a Idade Antiga (de 3.000 a.C. a 476 d.C.) muitos povos enriqueceram às custas do trabalho escravo, principal fonte de riquezas desse período, aumentando seus territórios e se transformando em grandes estados, tais como Egito, Grécia, Roma e outros. Juntamente com o fortalecimento desses estados, surgem as primeiras grandes cidades e com elas os primeiros graves problemas relacionados aos resíduos sólidos municipais. Figueiredo (1995), destaca como um exemplo desta afirmação as cidades helênicas (Atenas e Delfos), onde “a ausência absoluta de melhoramentos sanitários era escandalosa, quase suicida, com o lixo e os excrementos humanos depositados nas ruas”.

Já na Idade Média, com relação aos problemas relacionados aos resíduos sólidos municipais, não se observa nenhuma alteração qualitativa mais significativa. Apenas para se ter uma idéia da situação catastrófica dos resíduos sólidos municipais e das condições de saneamento das cidades européias desse período, surge no século XIV a peste bubônica.

Com a denominação de “peste negra” e motivada pela proliferação de ratos nos meios urbanos, ela se abate sobre os países da Europa dizimando milhões de pessoas.

Com o advento da Revolução Industrial, aproximadamente no século XVIII, houve uma mudança no pensamento econômico, quando então a preocupação com o meio ambiente era inexistente e as relações de mercado deveriam ser estabelecidas pela livre concorrência, reguladas pela lei da oferta e da procura, a qual passou a desempenhar um papel fundamental nas relações entre o homem e a natureza.

A partir de então, o capitalismo assumiu um poder absoluto nas relações econômicas e sociais, aumentando significativamente a classe dos trabalhadores assalariados, em decorrência de falência das pequenas indústrias e manufaturas.

Face à essa situação, os países do Terceiro Mundo, submetidos a mecanismos econômico-financeiros impostos pelos países ricos, foram forçados a intensificar a extração e exploração predatória de seus recursos naturais, para o suprimento do mercado externo, desenvolvendo, assim, conforme Figueiredo (1995), atividades caracterizadas por um consumo intenso de energia e altamente geradoras de resíduos, ficando resguardado aos países ricos o desenvolvimento tecnológico, principalmente em alguns setores considerados de ponta (a informática e a mecânica fina).

Com relação aos materiais utilizados pela indústria, os novos requisitos operacionais, que começaram a vigorar a partir do século XX, principalmente após a Segunda Guerra Mundial, com a intensificação tecnológica, exigiram a produção de metais com características especiais e de alto grau de pureza: plásticos, borrachas, materiais especiais para a indústria eletrônica e muitos outros de uso específico. Com isto, agravou-se a questão de geração dos resíduos sólidos municipais, só que agora, não degradáveis naturalmente; surgem, então, os resíduos industriais ou artificiais, compostos por estes mesmos materiais.

Como os resíduos artificiais não se inserem na dinâmica natural do planeta, passam a representar na maior parte dos casos uma ameaça ao equilíbrio da biosfera e à civilização humana presente e futura, colocando em risco os seres vivos e as próprias fontes de suprimento do homem.

Um outro aspecto que também contribuiu para o agravamento da questão da geração resíduos sólidos municipais nesse período diz respeito ao fato de o desenvolvimento de tecnologias ligadas à produção de materiais artificiais não ter sido acompanhado de uma

preocupação com a reintegração dos mesmos ao meio ambiente e, portanto, de um desenvolvimento tecnológico neste sentido.

Além dos novos requisitos da indústria emergente, um aspecto importante está relacionado à redistribuição espacial das populações que se deu em decorrência desse processo de industrialização. Neste sentido, em um curto período de tempo observou-se em todo o mundo ocidental uma maciça migração do homem do campo para os meios urbanos industrializados, provocada pelo êxodo rural, o que resultou em graves problemas sociais e de saúde pública e um agravamento da questão dos resíduos sólidos municipais, em função das altas concentrações em que passaram a ser gerados e liberados.

Portanto, segundo estudos feitos por Leme (1984), os impactos ecológicos que não eram considerados nas sociedades primitivas porque a produção de lixo era reduzida e a possibilidade de assimilação ambiental era grande, passaram a exigir considerações capazes de limitá-los após o desenvolvimento tecnológico decorrente da revolução industrial registrada no mundo.

Desenvolvimento tecnológico este, que, nos dias atuais, modifica o modo de produção dos resíduos sólidos municipais e a eles próprios. Como exemplos destas modificações se encontram as embalagens plásticas e os alimentos congelados, os primeiros influenciando decisivamente na disposição final do lixo porque são materiais não-biodegradáveis e os últimos porque reduzem consideravelmente os resíduos de alimentos.

2.2 Resíduos sólidos municipais

2.2.1 Conceito e origem

No decorrer da história, a população humana tem aumentado e se espalhado rapidamente; como consequência, os resíduos gerados como subprodutos de suas atividades transcendem a capacidade de adaptação do meio ambiente, que passa a não mais incorporar estes elementos em seus ciclos originais. A humanidade se defronta então com um fluxo de elementos artificiais e em altas concentrações, muitos deles tóxicos ou nocivos à vida na biosfera, que são depositados a todo momento nas várias regiões e subsistemas do planeta e que, em função da própria dinâmica da natureza, retornam ao ciclo de vida da raça humana

nas formas de poluição, radiação, contaminação de alimentos, chuva ácida, efeito estufa, destruição da camada de ozônio, etc.

A idéia usual de resíduo, lixo ou “o que sobra”, decorre da agregação aleatória de elementos bem definidos que agrupados se transformam em uma massa teoricamente sem valor comercial e com um potencial de agressão ambiental variável segundo a sua composição. Mais do que isso, o potencial de agressão ambiental não pode ser estabelecido como o somatório de cada elemento individual, mas sim pelo conjunto combinado que compõe o lixo. Assim, a massa de resíduos de uma sociedade tem sua origem na agregação desses componentes que, além de salientar o potencial de risco de cada elemento, dificulta ou mesmo impossibilita a reintegração dos mesmos ao meio natural.

A estreita dependência da geração de resíduos com o consumo sugere uma investigação nos espaços onde as atividades humanas se dão de forma mais intensa, tanto do ponto de vista da concentração dos atores, quanto da diversidade de suas atuações. Neste sentido, as concentrações urbanas representam um papel importante não apenas pela significativa parcela da população mundial inserida neste contexto mas também pelas peculiaridades dos problemas relacionados aos resíduos sólidos municipais decorrentes da dinâmica urbana.

Por conseguinte, antecede à conceituação de resíduo sólido municipal ou lixo urbano uma discussão a respeito da delimitação do que seja espaço urbano. Classicamente, a definição de espaço urbano passa pela divisão de uma sociedade através de suas características estruturais, funcionais, de forma ou geoespaciais. Analisados através de uma ótica mais ampla, “os espaços” onde o homem se insere no planeta estão sujeitos a ações múltiplas, que variam de intensidade em função das peculiaridades de cada sociedade e de seus aspectos regionais. Desta forma, um aglomerado populacional ou uma cidade podem abrigar as mais diversas atividades, que vão desde as tipicamente agrícolas e industriais até atividades comerciais, culturais e de lazer.

Quanto à conceituação de resíduo sólido municipal, seria interessante considerar não apenas um único conceito mas algumas denominações atribuídas em nível mundial por muitos autores; o primeiro a ser focado será Leme (1984), que destaca que os resíduos sólidos municipais são apresentados nos estados sólidos e semi-sólidos, sendo resultantes das atividades do homem e dos animais, do aproveitamento inicial das matérias-primas (durante a

confeção de utensílios primários e secundários) e da disposição final, estando abandonados como imprestáveis ou indesejáveis.

Conforme Philippi Júnior (1988), os resíduos sólidos municipais, oriundos das atividades humanas, são assinalados como “materiais residuais” quando seu proprietário ou produtor não os considera mais com valor suficiente para conservá-los, podendo, desse modo, influir na qualidade do ambiente e na saúde do homem, ou seja, na saúde pública, bem como na preservação dos recursos naturais.

De acordo com Schalch, Leite e Gomes (1990), resíduos sólidos municipais são aqueles provenientes de sistemas de tratamentos de água (lodo, lama), os gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição (cinzas e refugos de pequeno e grande porte), bem como determinados líquidos (resíduos de óleo, resíduos alcalinos e ácidos) cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpo de água (rios, lagos), ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Segundo Figueiredo (1995), observando através de uma ótica mais ampla, a conceituação de resíduo sólido municipal pode ser apresentada como um descontrole entre os fluxos de certos elementos num dado sistema ecológico, implicando na instabilidade do próprio sistema. Esse mesmo autor ainda comenta que ao se estudar os resíduos sólidos municipais, um primeiro problema surge da própria definição, pois os materiais gerados a partir de processos industriais e agrícolas muitas vezes são incorporados à massa de lixo urbano, principalmente os resíduos oriundos de processos produtivos artesanais e de pequenas e médias empresas. Portanto, torna-se difícil encontrar uma conceituação para o termo que, ao mesmo tempo englobe todos os parâmetros necessários e satisfaça os mais variados requisitos.

De um modo geral, no que se refere às denominações de “resíduos sólidos municipais”, são muitas as utilizadas na linguagem coloquial e este número aumenta quando se consideram os tipos específicos. Entretanto, a conceituação de “bem pós-utilizado” deve ser explicitada, por ter um significado específico e não ser de uso cotidiano. A diferença básica entre a denominação genérica “resíduo sólido municipal” e a de “bem pós-utilizado” está no fato deste último ter sua origem não como decorrência direta do consumo, mas sim na arbitragem de uma vida útil média estabelecida na própria concepção do produto.

2.2.2 Classificação dos resíduos sólidos municipais

O lixo urbano produzido pelas comunidades é uma mistura heterogênea, que, por sua vez, pode ser classificada segundo vários critérios, conforme expomos a seguir:

Segundo a origem ou local de produção

a) **Lixo domiciliar ou residencial:** proveniente das residências, portanto constituído de restos de alimentação (*garbage*, em inglês), invólucros diversos, varredura, folhagem, excrementos humanos e animais, etc.

b) **Lixo comercial:** proveniente de estabelecimentos comerciais em geral, como escritórios, lojas, hotéis, escolas e outras instituições de caráter educacional, cinemas, teatros, restaurantes, supermercados, quitandas, bares, açougues, etc. É constituído principalmente de papéis, papelão, plásticos, caixas, restos de lavagem, etc.

c) **Lixo industrial:** proveniente de diferentes áreas da indústria, sendo por isso de constituição muito variada.

d) **Lixo público:** constituído pelos resíduos sólidos provenientes da varrição e capinação de vias e logradouros públicos, de poda de parques e jardins, de mercados, de feiras, incluindo estrume e cadáveres de pequenos animais, veículos abandonados, entulhos proveniente de demolições e construções, etc.

e) **Lixo radioativo ou artificial:** são aqueles “produzidos artificialmente por síntese química; não naturais”, constituídos pelos resíduos sólidos provenientes, por exemplo, de usinas atômicas (como o Urânio 235, o Césio e outros).

f) **Lixo hospitalar ou especial:** constituído de resíduos das mais diferentes áreas do estabelecimento, como refeitório e cozinha, área de patogênicos, administração, limpeza, etc.

Quanto à sua natureza, os resíduos hospitalares podem ser classificados como sépticos e não-sépticos; o resíduo de natureza séptica, ou seja, contaminado, que em princípio se recomenda que seja incinerado, provém diretamente do trato das doenças e é representado por:

- gases, ataduras, algodão, etc;
- fragmentos de tecidos ou peças humanas, provenientes das salas de cirurgia, placenta, etc;
- resíduos provenientes da limpeza das salas de operação, de curativos e de internação, principalmente as que abrigam portadores de doenças transmissíveis;
- restos de alimentos dos pacientes.

O resíduo de natureza não-séptica é o lixo restante e se enquadra, de maneira geral, nas características de lixo domiciliar e comercial; por exemplo, é o lixo proveniente dos setores administrativos.

Segundo a zona de produção

- a) **Lixo urbano:** englobando os resíduos domésticos, comerciais, das atividades municipais e outros.
- b) **Lixo rural:** que engloba os resíduos agrícolas.

Segundo o grau de biodegradabilidade

- a) **Facilmente degradáveis:** matéria orgânica em geral.
- b) **Moderadamente degradáveis:** papel, papelão e outros produtos celulósicos.
- c) **Difícilmente degradáveis:** trapo, couro, borracha e madeira.

d) **Não-degradáveis**: vidro, metal, plástico, pedras, terra, etc.

2.2.3 Composição dos resíduos sólidos municipais

O conhecimento da composição do lixo urbano, tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo, é de grande importância para o devido equacionamento do problema do acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e/ou disposição final do lixo, inclusive no tocante ao aspecto econômico-financeiro relacionado à extração de restos aproveitáveis, como papel, sucata, vidro e trapos, e da produção de composto ou utilização da matéria orgânica para rações de animais.

Como exemplo, para os resíduos sólidos municipais provenientes de equipamentos comerciais empregados no manejo de produtos de papel podem ser utilizados cortadores e prensas e a coleta pode ser considerada tendo em vista a separação na fonte, a fim de que se possa prever um programa de reciclagem deste material.

Assinalamos que a composição do lixo urbano varia de local para local, bem como dentro de uma mesma comunidade, conforme será exposto mais adiante. A tabela 2.1 mostra a composição física dos resíduos sólidos municipais de várias localidades.

No Brasil, segundo Figueiredo (1995), a composição dos resíduos sólidos em geral inclui as descargas de materiais sólidos provenientes das operações industriais, comerciais, agrícolas e das atividades da comunidade. Entretanto, não inclui os materiais sólidos dissolvidos nos esgotos domésticos, lamas e outros materiais sólidos dissolvidos ou dispersos em meios líquidos e gasosos.

Em outros lugares, como no Japão, a composição dos resíduos sólidos é mais ampla, abrangendo refugos de pequeno e grande porte, cinzas, lamas, excreções humanas, resíduos

de óleo, resíduos alcalinos e ácidos, carcaças e outros produtos que estejam no estado sólido ou líquido.

Tabela 2.1 - Composição física dos resíduos sólidos urbanos relativos a várias localidades.

LOCAL	ANO	COMPONENTES (% BASE ÚMIDA)							
		MATÉRIA ORGÂNICA	PAPEL	TRAPO	MADEIRA, COURO E BORRACHA	VIDRO	METAL	PLÁSTICO	INERTES
São Paulo	1979	38,3	29,6	2,2 ⁽²⁾	0,8	14,6 ⁽⁵⁾	5,5	9,0	---
Rio de Janeiro	1986	38,6	38,4	3,7	1,9	3,4	3,7	9,7	0,6
Recife	1965	83,0	3,5	0,8	1,8	0,7	1,7	---	0,9
Belo Horizonte	1971	69,9	16,8	2,2	1,4	2,5	3,3	1,9	2,0
Brasília	1972	19,9	27,1	3,6	3,6	3,0	3,2	2,4	4,2
Salvador	1972	63,5	15,5	3,3 ⁽²⁾	---	4,4	5,5	---	7,8 ⁽³⁾
Manaus	1979	51,1	29,0	3,5 ⁽²⁾	2,1	4,7 ⁽⁵⁾	6,8	2,8	---
Curitiba	1980	36,8	24,1	1,6	1,5	3,3	3,2	6,0	3,5
Porto Alegre	1983	74,4	10,6	---	---	1,4	4,2	6,0	0,4
Rio Claro	1985	62,8	15,2	2,2 ⁽⁴⁾	0,6	2,1	3,5	5,5 ⁽⁶⁾	8,1
Campinas	1985	72,3	19,0	2,1 ⁽²⁾	---	0,8 ⁽⁵⁾	2,2	3,6	---
Inglaterra	1966	42,7	15,7	1,8	4,6	5,7	3,7	---	25,8
Santiago - Chile	1950	69,7	14,9	2,6	4,5	---	8,3	---	---
Argentina	1965	65,6	5,0	0,9	1,7	1,8	1,5	0,1	23,4
Paris - França	1966	31,3	29,6	5,7 ⁽⁴⁾	---	3,9	---	1,0	8,5
Áustria	1966	59,7	12,0	1,7	1,0	9,3	3,3	---	13,0
Holanda	1966	54,0	30,0	2,0	2,0	7,0	2,0	---	3,0
Alemanha	1966	59,0	12,0	1,8	2,0	5,0	4,0	---	16,2
Itália	1966	88,2	8,4	1,3	---	0,9	1,1	---	---
Estados Unidos	1968	27,6	42,0	0,6	3,3	10,0	8,0	0,8	7,7
Suíça	1969	67,9	22,6	---	---	3,8	3,5	2,2	---
Montreal	1969	23,1	50,1	---	---	3,9	8,6	5,7	8,6
Espanha	1970	54,2	25,4	2,6	---	4,3	4,1	4,0	5,4
Noruega	1975	47,0	40,5	---	---	3,5	3,0	---	6,0
Austrália	1981	46,1	24,9	1,4	0,1	14,7	8,2	3,0	1,6
Egito	1981	47,2	24,0	2,2	---	1,3	3,0	3,4 ⁽¹⁾	18,9
Etiópia	1981	62,3	2,2	1,5	---	0,5	0,8	1,2 ⁽¹⁾	31,5

Observações: (1) Plástico-Couro-Borracha (4) Trapo-Couro
 (2) Trapo-Borracha (5) Vidro-Terra-Pedra
 (3) Inertes-Folhas (6) Plástico-Borracha

Fonte: Schalch, Leite e Gomes (1990)

Composição qualitativa

O lixo, de forma geral, é constituído de três parcelas distintas, que são:

- **detritos orgânicos em geral** - restos de alimento, vegetais e matéria orgânica em geral.
- **cinzas** - resíduos da queima de determinados combustíveis, como o carvão.
- **detritos inorgânicos e orgânicos relativamente estáveis** - papéis, metais, panos, vidros, plásticos, etc.

A composição qualitativa dos resíduos sólidos municipais, de acordo com Philippi Júnior (1988), pode ser considerada segundo os critérios expostos a seguir:

Segundo os componentes: restos de alimentos, ciscos, cinzas, excrementos de animais, animais mortos, resíduos industriais, radioativos, contaminados, da varrição e capinação de vias e logradouros públicos, restos de poda de árvore e arbustos, de materiais de construção ou de demolição de prédios, veículos abandonados e outros.

Segundo o valor econômico: aproveitáveis (restos orgânicos de alimentos, trapos, vidros, papéis, metais, plásticos) e não aproveitáveis.

Segundo a capacidade de incineração: materiais não combustíveis (vidros, materiais cerâmicos, metais, pedras) e materiais combustíveis (papéis, trapos, plásticos e outros).

Segundo a capacidade de produção de composto: matéria orgânica e inorgânica.

Composição quantitativa

Com base em peso, os resíduos sólidos municipais apresentam a seguinte composição típica: material orgânico e inerte, papel e papelão, vidros e material cerâmico e plásticos.

Variação da composição

A composição do lixo urbano, tanto qualitativa como quantitativa, é muito variável e mesmo até certo ponto imprevisível, particularmente quando não há um controle sistemático da mesma; ela varia de lugar para lugar e, inclusive, entre os diversos bairros de uma mesma cidade.

De modo geral, os fatores que concorrem para essa variação são:

- a) **Características da cidade:** Nas cidades industriais a composição do lixo urbano é diferente daquela apresentada em cidades de veraneio.
- b) **Clima e estação do ano:** Nas cidades de clima frio, onde existem muitas lareiras, a porcentagem de cinzas é maior. Numa mesma cidade, os restos de alimentos no verão são diferentes dos do inverno.
- c) **Hábitos e padrão de vida:** Quanto melhor o padrão de vida mais papéis e plásticos e menos matéria orgânica existem no lixo. A porcentagem de latas e metais é maior nas cidades de padrão elevado; observa-se também que o que caracteriza o grau de desenvolvimento de uma comunidade é a quantidade de papel no lixo. Conforme Philippi Júnior (1988), em países desenvolvidos, como nos Estados Unidos, os veículos abandonados nas vias públicas constituem um sério problema para os serviços de limpeza pública, ao passo que nos países em fase de desenvolvimento, como o nosso, isso ainda não constitui um problema.
- d) **Períodos econômicos:** Existe diferença na composição do lixo urbano entre os períodos de guerra e de paz, ou de depressão e expansão econômica.

e) **Eficiência do serviço de coleta:** Se a coleta for periódica, mas não for sistemática, a população praticamente se vê obrigada a dar destino ao lixo urbano por sua conta e meios, por exemplo, incinerando-o, enterrando-o, ou mesmo erradamente jogando-o em terrenos baldios, o que modificará a composição do lixo coletado.

f) **Tratamentos domiciliários:** Se parte do lixo urbano, constituída por restos de alimentos, for disposta no sistema de esgotos, como ocorre em muitas cidades americanas a partir da instalação de trituradores instalados embaixo das pias de cozinha, ou se houver incentivo ao emprego de incineradores domiciliares, como tem ocorrido em muitos edifícios de apartamentos, ainda que tais práticas em geral não sejam recomendáveis, a composição geral do lixo coletado será alterada.

2.2.4 Características dos resíduos sólidos municipais

As principais características a seguir apresentadas são de interesse no estudo dos problemas dos resíduos sólidos municipais e em geral estão relacionadas à composição do lixo urbano.

Características físicas

As características físicas do lixo urbano são as seguintes: massa específica, poder calorífico, odor e umidade.

A massa específica do lixo urbano é um dado fundamental para o dimensionamento da frota de coleta, das estações de transbordo e dos incineradores. Esse parâmetro varia inversamente com o padrão de vida da população. Uma população de alta renda produz um lixo com alto teor de papéis e plásticos e pouca matéria orgânica: esse tipo de lixo possui uma baixa massa específica.

Para a determinação da massa específica, a qual é feita por meio de amostras coletadas nos resíduos sólidos municipais e que na realidade é uma massa específica aparente, é necessária à avaliação da massa total e do volume de água que deverá ser manejado, devendo ser providenciada em caráter rotineiro pelo órgão responsável pela limpeza pública.

A massa específica do lixo urbano está ligada à sua composição e por isso, varia de acordo com os mesmos fatores que atuam na variação da composição do lixo; pode ser encarada sob dois aspectos:

a) **Massa específica de lixo natural, não comprimido:** seca e úmida.

b) **Massa específica de lixo comprimido:** seca e úmida.

Na tabela 2.2, a título de exemplo, apresentamos alguns valores da massa específica média do lixo urbano.

Tabela 2.2 - Valores da massa específica média do lixo urbano em diversos lugares do mundo.

LOCALIDADES	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
São Paulo	173
Porto Alegre	270
Rio de Janeiro	239
Sub-região Sudeste da Grande São Paulo	184 a 272
Santos	187,6
Fortaleza	253
Belo Horizonte	223
Estados Unidos (*)	180 a 240
Peru - Lima (*)	500
Singapura	180
Índia	330 a 560

(*) lixo compactado

Fonte : Philippi Júnior (1988)

O poder calorífico, que é expresso em kJ/kg de combustível, exprime a quantidade de calor liberada com a queima de um quilo de combustível, que neste caso é o resíduo sólido municipal. O poder calorífico de um combustível pode ser expresso em poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI); esse último apresenta uma quantidade menor que o primeiro, pois foi considerado o calor necessário para vaporizar a água, no caso do lixo tanto aquela apresentada pelo material (água de constituição) quanto a proveniente de sua umidade, bem como a que se forma durante o processo de combustão. Por isso, dependendo

do tipo de destino final que se vai dar aos resíduos sólidos municipais, o poder calorífico é um parâmetro muito importante.

A título de exemplo, Philippi Júnior (1988), assinalou que o lixo de São Paulo, em 1976, apresentava um PCS da ordem de 16.744 kJ/kg. Ainda como exemplo citou que a média considerada do PCS nos municípios da Sub-região Sudeste da Grande São Paulo (1972-1973) acusou 13.291 kJ/kg.

Um outro exemplo, de acordo com Gyftopoulos e Widmer (1982), é que muitos materiais residuais tem um poder calorífico alto e, por isso, podem ser utilizados como substitutos de alguns combustíveis importantes. A tabela 2.3 ilustra esta afirmação mostrando vários destes resíduos com o seu respectivo poder calorífico inferior.

Tabela 2.3 - Poder calorífico inferior de vários resíduos sólidos.

NOME DOS RESÍDUOS	PODER CALORÍFICO (kJ/kg)
Resíduo bituminoso	38.539
Papel de embrulho	16.862
Papelão	15.839
Cortiça	26.375
Sabugo de milho	18.607
Grama (verde)	4.787
Látex	23.258
Revistas	12.211
Caixas de leite	26.352
Nylon	31.678
Parafina	43.309
Filme de polietileno	46.005
Polipropileno	46.191
Poliestireno	41.167
Poliuretano	40.888
Borracha (sintética)	33.981
Sapato de couro	16.839
Resíduo têxtil (não sintético)	18.607
Resíduo têxtil (sintético)	34.888
Resíduos vegetais	4.175
Papel manteiga	26.747
Madeira	20.933
Pedaços de carne	17.730

Fonte: Gyftopoulos e Widmer (1982)

O odor é uma característica relativamente subjetiva, mas que deve ser considerada pelos incômodos que pode apresentar. A umidade é importante, principalmente no projeto e na operação do sistema de incineração e compostagem; influi também na coleta e no transporte dos resíduos sólidos municipais. É considerada, todavia, como um parâmetro crítico para os processos de conversão biológica e termoquímica nos quais os sólidos voláteis são os indicadores de matéria orgânica a decair.

O conhecimento do grau de umidade é necessário para a avaliação do poder calorífico dos resíduos sólidos municipais e para a determinação da potência liberada pela sua combustão. O grau de umidade, em porcentagem, é expresso pelo peso de umidade por unidade de peso do material seco ou úmido e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\text{Percentual de umidade} = (a-b) / a$$

sendo: a = peso inicial da amostra do resíduo quando retirada;

b = peso da amostra após secagem.

A tabela 2.4 mostra dados percentuais de umidade típicas dos componentes contidos nos resíduos sólidos de uma comunidade.

Tabela 2.4 - Valores de umidade dos componentes do lixo urbano de uma comunidade.

Componentes	(% da umidade)	
	Faixa de variação	Média típica
Restos de alimentos	50 - 80	70
Papel	4 - 10	6
Papelão	4 - 8	5
Plásticos	1 - 4	2
Materiais têxteis	6 - 15	10
Borracha	1 - 4	2
Couros	8 - 12	10
Madeira	15 - 40	20
Vidro	1 - 4	2
Folha de flandres	2 - 4	3
Metais não-ferrosos	2 - 4	2
Metais ferrosos	2 - 6	3
Lama, cinzas, tijolos	6 - 12	8
Lixo municipal	15 - 40	20

Fonte : Leme (1984)

Características químicas

As características químicas de maior interesse são principalmente as seguintes: teores de carbono, nitrogênio, fósforo, potássio, matéria combustível e matéria orgânica e pH (a rigor é uma característica físico-química).

A determinação das características químicas dos resíduos sólidos municipais fornece elementos de importância para uma avaliação das opções possíveis de serem consideradas para a recuperação e processamento dos materiais que neles existem, particularmente no caso do processo de transformação do lixo urbano em adubo, denominado composto. O composto atua mantendo a umidade do solo, melhorando ou conservando as condições de fertilidade do solo; contudo, é importante assinalar também, que o composto não é a rigor um adubo químico, pela pouca quantidade de elementos químicos que possui; atua mais ou menos como o esterco de coqueira (Philippi Júnior, 1988).

Observe-se ainda, a importância da relação carbono/nitrogênio (C/N) no controle da produção do composto, bem como sua aplicação. O teor de umidade e o pH são também importantes no controle da produção do composto. O teor de matéria combustível ou orgânica é de grande interesse, respectivamente, no estudo da incineração ou na produção de composto ou de ração.

A tabela 2.5 mostra dados típicos da análise final dos componentes combustíveis dos resíduos sólidos municipais de uma comunidade.

Tabela 2.5 - Dados percentuais dos combustíveis de resíduos sólidos comunitários.

Componentes	(% de peso seco)					
	C	H	O	N	S	Cinza
Restos de alimentos	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	5,0
Papelão	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	10,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8	---	---	10,0
Materiais 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
Adornos de flores	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
Lama, cinzas, tijolos	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

Fonte : Leme (1984)

Características biológicas

Os resíduos orgânicos contém nutrientes protéicos e umidade que, associados à temperatura ambiente, favorecem o desenvolvimento microbiano de várias espécies, entre as quais, muitas podem ser patogênicas.

2.2.5 Quantidade de resíduo sólido municipal produzido por pessoa

A quantidade de resíduo sólido municipal resultante de uma comunidade é estimada em função da sua população ou do número de unidades habitacionais existentes, considerando-se uma contribuição “per capita”.

Deste modo, assinalamos que a quantidade de lixo urbano produzido “per capita”, em muitas cidades aumenta com o passar dos anos. Assim, de acordo com pesquisas realizadas por Philippi Júnior (1988), em alguns municípios da região metropolitana de São Paulo há um aumento de 2% ao ano, em peso.

A determinação da quantidade de lixo urbano “per capita”, que é feita com base em pesquisas realizadas no lixo coletado de várias comunidades e gerado por várias fontes, deve

ser objeto de providências, em caráter rotineiro, pelo organismo responsável da limpeza pública, tornando-se, contudo, um dos dados de grande importância no estudo do acondicionamento, coleta, transporte e tratamento e/ou destino final do lixo, particularmente dos 3 últimos.

Na tabela 2.6, são apresentados alguns valores médios de quantidades de resíduos sólidos municipais produzidos “per capita” e por dia, extraídos de fontes diversas. A quantidade de lixo proveniente de fontes residenciais, que constitui em nossos dias um dos problemas básicos de saúde pública, varia consideravelmente em sua composição e quantidade. As variações dependem do status econômico, composição étnica, costumes sociais, características climáticas, locais, hábitos populacionais e tipos de alimentos, bebidas, etc., cujas embalagens concorrem na formação do lixo gerado.

Tabela 2.6 - Produção “per capita” média diária do lixo urbano gerado em diversos lugares.

LOCALIDADES	kg/hab/dia
São Paulo (*)	0,52
Porto Alegre	0,30 a 0,50
Rio de Janeiro	0,45
Sub-região Sudeste do Grande São Paulo	0,65
Brasília	0,51
Estados Unidos (*)	1,62 a 2,41
Peru	0,56 a 1,03
Europa	0,40 a 0,80
Índia	0,10 a 0,25
Singapura	0,58

(*) resíduos domiciliares e comerciais

Fonte : Philippi Júnior (1988)

2.3 Técnicas de manipulação e/ou processamento de resíduos

2.3.1 Introdução

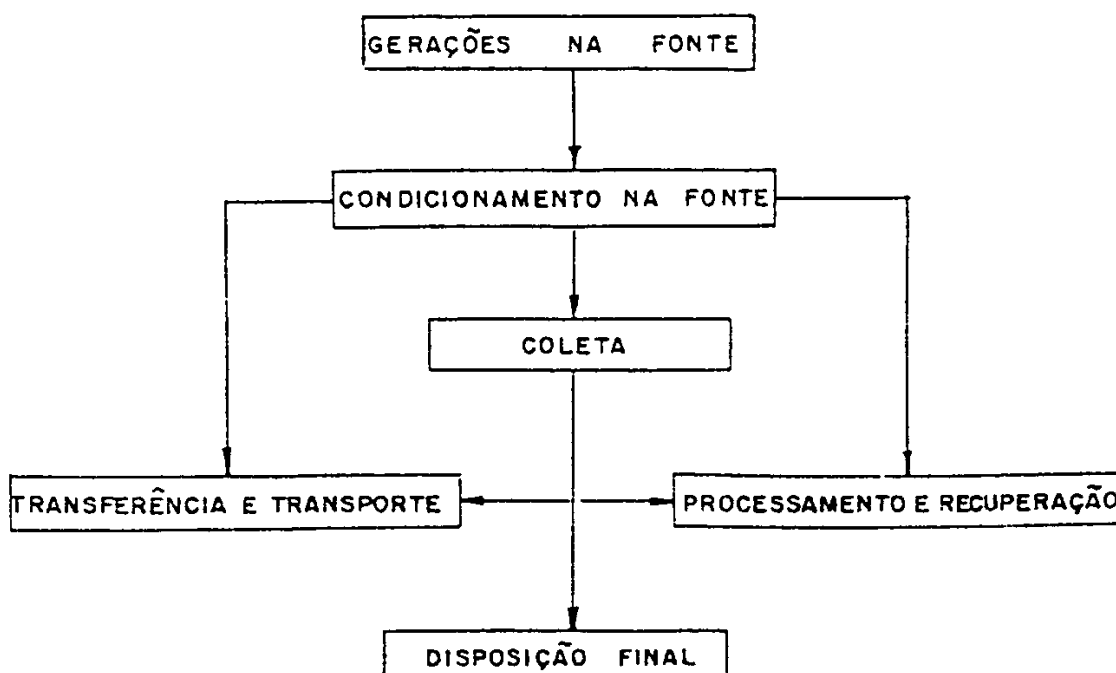
Os problemas inter-relacionados com o manejo dos resíduos sólidos municipais nas sociedades modernas são muito complexos em virtude da quantidade e natureza diversa de seus componentes formadores, do espalhamento das áreas urbanas, das limitações dos recursos econômicos disponíveis, dos impactos tecnológicos e das limitações que surgem para a utilização da energia dos materiais brutos. Em virtude da junção de todos esses fatores têm sido freqüentes as consultas por parte de Prefeituras Municipais com respeito ao destino a ser dado ao lixo urbano.

Diversos caminhos que podem ser seguidos e dentre eles podemos destacar: 1) as usinas de compostagem, cada vez mais solicitadas pelos municípios devido ao crescente interesse pelo composto orgânico; 2) a coleta domiciliar seletiva, passando do estágio incipiente de garrafas e jornais para sistemas mais avançados, com a separação domiciliar prévia de ferro, vidro, papel, plásticos e outros, em função do seu valor e naturalmente dos custos de sua remoção e beneficiamento; 3) a deposição adequada do lixo urbano em aterros sanitários, por ser a solução mais recomendável e econômica para esse tipo de resíduo e por possibilitar a transformação de grotas e depressões em parques e jardins, de forma sanitariamente correta.

As atividades ligadas ao manejo e/ou processamento dos resíduos sólidos municipais desde o ponto da geração até a disposição final podem ser agrupadas em seis fases diferentes, que se acham representadas com o seu inter-relacionamento no diagrama da figura 2.1.

A geração na fonte abrange as atividades nas quais os materiais usados pelo homem são identificados como não sendo mais úteis e abandonados. O acondicionamento na fonte - de grande importância para a manutenção da estética local, de onde o lixo urbano é gerado e

a segurança sanitária da comunidade - também envolve aspectos econômicos e é exigido, tendo em vista a sua impossibilidade de permanência decorrente da sua biodegradação.



Fonte: Leme, 1984

Figura 2.1 Diagrama representativo das etapas do sistema de manejo de resíduos sólidos municipais

A coleta consiste na remoção dos resíduos sólidos municipais e no seu transporte para o local onde o veículo de coleta é esvaziado; a transferência e o transporte envolvem dois estágios: a transferência dos resíduos sólidos municipais contidos num pequeno veículo de coleta para um veículo equipado para um transporte maior e o transporte dos resíduos transferidos aos centros de processamento ou para o destino final, geralmente afastados das fontes de geração por grandes distâncias. A transferência é feita numa estação especial de transferência.

O processamento e a recuperação se fazem através do emprego de técnicas, equipamentos e instalações que melhoram a eficiência das outras fases e permitem que se recuperem materiais ainda úteis, bem como produtos e energia que resultam da conversão.

A disposição final, última fase do sistema de manejo, consiste na deposição conveniente em aterros sanitários de resíduos sólidos provenientes das comunidades diretamente ou resultantes de materiais inúteis do processamento.

A deposição pura e simples dos resíduos sólidos municipais em todos os meios físicos do planeta são práticas condenáveis, tanto do ponto de vista ambiental como de saúde pública, por causarem a degradação do meio físico, inerente às emissões de poluentes, riscos de contaminação das águas subterrâneas e a indisponibilidade permanente, ou de longo prazo, de extensas regiões espaciais, implicando numa redução de áreas para outros usos.

Após esta breve ilustração das diversas maneiras de se manipular e/ou processar os resíduos sólidos municipais, seria conveniente enfocar algumas delas com maiores detalhes e, mais adiante, no Capítulo 4 apresentar alguns ciclos e configurações para a prática de incineração/combustão do lixo urbano, visando uma possível solução para os problemas relativos à questão ambiental e energética.

2.3.2 Acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e/ou disposição final

A manipulação e/ou processamento do lixo urbano se dá nas seguintes fases: **acondicionamento, coleta, transporte e tratamento e/ou disposição final.**

As fases de coleta e do transporte podem ser encaradas conjuntamente, como uma etapa única, ou seja, coleta e transporte.

Acondicionamento

Para que os diferentes tipos de lixo possam ser coletados é necessário que se coloque este material em locais e recipientes adequados. O acondicionamento do lixo visa basicamente atender a aspectos sanitários, pelo controle de vetores tais como ratos e artropódes, e de bem estar, proporcionando conforto e estética.

O acondicionamento inadequado ou impróprio do lixo urbano oferece os meios para a proliferação e desenvolvimento principalmente de moscas, ratos e baratas. O acondicionamento é de responsabilidade direta da população; contudo, é lógico que o

departamento local de Saúde e/ou Serviço de Limpeza Pública deve ter a autoridade necessária para exigir o acondicionamento em condições sanitárias.

Coleta e transporte

A coleta e transporte do lixo urbano é uma parte essencial dentre as atividades desenvolvidas no Serviço de Limpeza Pública; se ela não funcionar bem, se não for feita com frequência sistemática, praticamente de nada servirá o acondicionamento adequado, e devido a um descontentamento da população a mesma procurará dispor o lixo de qualquer maneira, quase sempre imprópria, despejando-o em terrenos baldios, na rua ou em outros locais, o que poderá acarretar, do ponto de vista sanitário, certos danos como a transmissão de doenças. Outro fator, não menos importante e que também será afetado, visto pelo prisma social, é o aspecto estético e de conforto.

O serviço de coleta e transporte do lixo é um problema que está ligado a diversas variáveis e essas, por sua vez, dependem de diversos fatores. Por outro lado, coleta e transporte constituem a fase mais onerosa do problema de manipulação do lixo. Segundo dados americanos pode atingir cerca de 70% a 80% do custo total do Serviço de Limpeza Pública (Philippi Júnior, 1988). A fase de transporte pode considerar-se que se dá juntamente com a coleta dos recipientes; contudo, muitos consideram “transporte” a parte que se dá entre a garagem e o início da coleta e após o término da coleta, até o local de tratamento e/ou disposição final.

Tratamento e/ou disposição final

O tratamento e/ou disposição final do lixo geralmente constitui problema sério, que envolve questões técnicas e econômicas relevantes, principalmente para a saúde pública. É um problema ligado à reutilização de materiais e, portanto, à conservação dos recursos naturais, aspecto este de interesse crescente em muitos países, com destaque aos desenvolvidos, como os Estados Unidos.

O tratamento e/ou disposição final é provavelmente o aspecto mais descuidado do sistema de limpeza pública; em muitas cidades, apesar do acondicionamento e da coleta e transporte, bem como da varrição de vias e logradouros públicos serem satisfatórios, o tratamento e/ou disposição final é muito precário.

O tratamento e/ou disposição final do lixo, quando inadequado, cria problemas sanitários e ocasiona prejuízos econômicos, como a desvalorização de áreas de terreno. Os métodos de tratamento e/ou disposição são particularmente influenciadas pela coleta e transporte do lixo, reciprocamente. De maneira geral, principalmente no caso de vários municípios relativamente próximos, o problema do tratamento e/ou disposição final do lixo deve ser encarado em base regional, envolvendo vários municípios, como é o caso da Região de Guaratinguetá; aliás, no caso das regiões metropolitanas, é atribuição legal do governo metropolitano cuidar do problema do tratamento e/ou disposição final do lixo da mesma.

A seguir, serão apresentados alguns dos métodos recomendados aos resíduos sólidos municipais ou lixo urbano. O tratamento e/ou disposição final dos resíduos sólidos municipais pode ser feito baseado nos seguintes métodos:

- **aterro sanitário**

De acordo com Schalch, Leite e Gomes (1990), é um método de disposição de resíduos sólidos municipais no solo, sem provocar prejuízos ou ameaças à saúde e à segurança, utilizando-se princípios de engenharia de tal modo a confinar o lixo no menor volume possível, cobrindo-o com uma camada de terra ao fim do trabalho de cada dia, ou mais freqüentemente, conforme o necessário.

Sua aplicação é difundida em quase todo o mundo e se apresenta como a solução mais econômica quando comparado a outros processos, como incineração, compostagem e pirólise, que exigem grandes investimentos para a construção e manutenção da estrutura técnico-administrativa de operação.

Convém frisar que tradicionalmente a maioria das cidades brasileiras confunde aterro sanitário com “depósitos”, “lixões”, métodos que, desprovidos de critérios científicos ou ecológicos, são condenados sob o ponto de vista sanitário.

Por contar o lixo urbano com grande parte de matéria orgânica, esta entra rapidamente em decomposição ao ar livre, proliferando moscas, baratas, ratos, urubus, mau cheiro e outros. A falta de movimentação periódica dessa massa orgânica faz com que o oxigênio em seu interior seja rapidamente consumido pela ação bacteriana, dando lugar à decomposição anaeróbica, com desprendimento de gases e a formação de “chorume” (fração líquida escura e ácida e de odor desagradável). Este líquido pode infiltrar-se no solo ou

também ser lixiviado, podendo vir a poluir e contaminar as águas superficiais e subterrâneas. Para que isto não aconteça, em linhas gerais, procura-se coletar os resíduos líquidos dos aterros através de um sistema de drenagem, dispondo-os convenientemente e, inclusive, submetendo-os a um tratamento adequado. Para proteger as águas subterrâneas, entre outras medidas, o fundo do aterro deve estar pelo menos 1,5 metro acima do lençol freático.

Deve-se também tomar precauções com relação aos gases produzidos, principalmente metano, que é inflamável e explosivo, drenando e queimando o gás, ou então dispersando-o na atmosfera, a fim de evitar os seus problemas.

Conforme o exposto, pode-se concluir que a implantação de um aterro sanitário objetiva evitar:

- o aparecimento e proliferação de roedores, moscas, baratas, urubus e outros;
- o estabelecimento de catadores na área;
- o espalhamento de papéis e lixo pelas redondezas, por ação do vento;
- a criação e engorda de animais como porcos, que podem contrair doenças transmissíveis ao homem;
- a poluição das águas superficiais e subterrâneas.

• **compostagem**

A compostagem, produção de composto ou “adubo” orgânico, é uma modalidade de processamento de resíduos muito antiga, utilizada rusticamente já nas primeiras sociedades agrícolas. Ela consiste na transformação de material orgânico através da atividade biológica de microorganismos (como bactérias aeróbicas e anaeróbicas), produzindo por processo metabólico um composto rico em nutrientes indispensáveis aos vegetais.

Os compostos orgânicos, além de fornecerem nutrientes importantes e indispensáveis à produção vegetal, são ainda indicados na prevenção da erosão, na retenção da umidade, no aumento da permeabilidade e na melhoria das propriedades biológicas dos solos. Favorecem também o aperfeiçoamento de sua microestrutura, o fornecimento de alimento balanceado com a ação do húmus presente e a prevenção da lixiviação do nitrogênio orgânico, sem contar sua aplicação como cobertura e estabilização ecológica de terras exauridas pela utilização indiscriminada de fertilizantes químicos. Entretanto, deve ser esclarecido que o composto não

substitui os fertilizantes mas, sim, os complementa graças às suas características químicas, físicas e biológicas.

Esse tratamento geralmente compreende três fases: **triagem, trituração e homogenização e fermentação.**

No processo de triagem procura-se separar os materiais não fermentáveis, ou decompostos mais lentamente (metais, papéis, vidros, trapos e plásticos) e que além disso podem ser vendidos. A trituração da matéria orgânica geralmente é feita em moinhos especiais, por meio de martelos.

A fermentação pode realizar-se por processo anaeróbico ou por processo aeróbico. O primeiro processo é realizado em células fechadas, exigindo várias semanas para a estabilização. O segundo processo, que é o mais utilizado, baseia-se na fermentação em células suficientemente aeradas, em geral com retorno do líquido drenado, para acelerar o processo; requer de 5 a 25 dias.

Do ponto de vista ambiental, a compostagem representa a forma de processamento de resíduos mais consistente e se adapta com rigor à dinâmica cíclica do planeta com os elementos naturais retornando ao meio ambiente natural após o uso, permitindo assim uma reprodução da vida do sistema.

Entretanto, quando observada do ponto de vista energético e inserida na dinâmica da sociedade contemporânea, surgem alguns problemas que inviabilizam sua adoção generalizada como forma de tratamento para os resíduos orgânicos, particularmente os resíduos sólidos municipais e lamas de esgotos.

- **incineração**

Segundo Burnett (1979), a incineração como uma forma de destinação final dos resíduos sólidos municipais originou-se na Inglaterra por volta de 1876 e tinha como objetivo a construção de um local onde se pudesse fazer uma simples deposição do lixo urbano, acompanhada de uma redução considerável na massa do mesmo. É, portanto, uma prática muito antiga, que consistia, na maioria das vezes, em empilhar os resíduos e atear fogo ao ar livre. A cinza resultante do processo era espalhada no solo ou a ele incorporada como elemento auxiliar na agricultura.

Com a expansão das cidades, esta prática rudimentar tornou-se inadequada, primeiro pelos incômodos causados às vizinhanças e, mais recentemente, pelos danos causados pelo processo ao meio ambiente.

Do ponto de vista sanitário, a destruição do lixo urbano pela incineração a alta temperatura (750 °C a 1000 °C) pode ser um dos melhores sistemas para o seu tratamento, desde que não contribua para a poluição do ar; exige, assim, o emprego de equipamentos de controle da poluição do ar.

Basicamente, a incineração consiste num processo de redução de peso e volume do lixo urbano, através da combustão controlada, pois há sempre um resíduo final proveniente da queima, que é geralmente constituído de gases (CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 e vapor de água), cinzas e escórias, que se constituem de metais ferrosos e inertes, como vidros, pedras, etc.

Como todo processo, a incineração apresenta vantagens e desvantagens que podem ser vistas à seguir:

Vantagens:

- a) Transforma o lixo em escória e cinzas de fácil destinação final;
- b) Elimina de forma satisfatória, do ponto de vista sanitário, resíduos hospitalares, alimentos, gêneros ou medicamentos condenados, sobras de laboratórios, animais mortos e resíduos industriais perigosos;
- c) Encurta as distâncias de transportes em virtude da possibilidade de localização do incinerador em áreas próximas aos centros urbanos;
- d) Mantém bom funcionamento, independente das condições meteorológicas;
- e) Possibilita a recuperação da energia contida nos resíduos.

Desvantagens:

- a) Investimento elevado;
- b) Alto custo de operação e manutenção;
- c) Possibilidade de causar poluição atmosférica quando mal projetado e/ou operado;
- d) Exige mão de obra especializada na sua operação.

• reciclagem

A reciclagem ou reutilização de resíduos sólidos municipais, a qual, conforme Figueiredo (1995), pode ser denominada ainda aproveitamento energético indireto, visa o reaproveitamento dos materiais contidos no lixo urbano ou sua conversão em energia. Em linhas gerais, consiste em retirar do lixo urbano os materiais possíveis de serem utilizados novamente, seja no estado em que se encontram, seja como matéria-prima para a elaboração do mesmo material ou de outros produtos, ou, então, a sua utilização para a produção de vapor de água ou energia elétrica, ou mesmo um tipo de combustível.

Conquanto represente claramente uma significativa contribuição para a questão ambiental e deva ser utilizada sempre que possível, essa forma de processamento também não constitui uma solução isolada para o problema dos resíduos sólidos municipais, em função de suas limitações inerentes (problemas ligados aos transporte, a separação mecânica ou manual, a um pré-processamento, que engloba a lavagem, a descontaminação e o condicionamento, dos componentes da massa do lixo urbano). Entretanto, uma sociedade baseada na dinâmica cíclica natural do planeta deverá necessariamente promover com intensidade esta prática.

A importância da reutilização dos resíduos sólidos municipais está baseada em três pontos:

- a) Necessidade de conservar os recursos naturais, principalmente dos recursos naturais não renováveis;
- b) Necessidade de melhor utilizar as áreas e o volume dos aterros sanitários;
- c) Necessidade de procurar outras fontes de energia, aspecto que vem preocupando, particularmente de 1973 para cá, em decorrência da crise do petróleo.

Mas, como todo processo, esse também possui desvantagens, que são:

- a) Dependência com respeito às características dos resíduos sólidos municipais;
- b) Apresenta problemas associados à separação dos materiais e comercialização dos reciclados.

Com relação ao problema da separação de materiais observa-se que seria desejável que os resíduos já fossem separados na fonte de produção, o que ocorre em algumas cidades, segundo Philippi Júnior (1988), principalmente nos Estados Unidos. No tocante ao lixo domiciliar é muito difícil de ser bem executada a separação dos resíduos, de acordo com o tipo dos mesmos; com o lixo comercial e industrial essa separação já é mais simples de ser feita.

Os materiais que se encontram no lixo urbano podem ser reutilizados da seguinte forma:

- **reutilização direta:** consiste no aproveitamento do material nas condições em que é retirado, submetendo-o a pouco ou a nenhum tratamento; é o caso da reutilização de caixas, tambores, garrafas de vidro, partes de máquinas e de automóveis;
- **reutilização indireta:** os resíduos são reprocessados ou submetidos a um tratamento mais ou menos extenso; é o caso de restos de papel e papelão, borracha, plásticos, cobre, alumínio, chumbo, metais ferrosos, vidros e outros. Assim, tratando o papel, podemos fabricar um papel de qualidade inferior, e com as latas podemos novamente fabricar aço;
- **conversão em energia:** mediante a incineração dos resíduos sólidos podemos produzir vapor de água ou energia elétrica, ou então produzir um tipo de combustível, submetendo-o ao tratamento por pirólise, o qual ainda se encontra em fase experimental e será brevemente apresentado em um próximo item.

Os materiais em geral recuperados são os seguintes: papel, papelão, vidro, metais ferrosos (latas), metais não-ferrosos (cobre, alumínio), plásticos, trapos, ração para animais e compostos.

Ainda com relação ao aproveitamento energético indireto de resíduos sólidos municipais, Figueiredo (1995) relata que uma outra concepção consiste basicamente na padronização de bens de consumo recicláveis, como são alguns tipos de invólucros e recipientes, assim como na produção de bens de consumo com destinação pré-determinada para a pós-utilização quando de sua obsolescência ou ao fim da vida útil.

A reutilização de resíduos urbanos deve ser empregada se a quantidade dos mesmos, o custo para sua extração e os preços de venda forem compensadores; contudo, os governos federal ou mesmo estaduais podem ter interesse em promover a reutilização de resíduos visando, por exemplo, à manutenção da qualidade das terras, com composto ou à conservação de determinados recursos minerais, sendo que nesses casos devem sinalizar através de incentivos específicos ou sobretaxas para atividades concorrentes.

- **digestão com lodos de esgotos sanitários**

Em geral, esse método consiste em adicionar o lodo não digerido das Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários ao lixo urbano, nas usinas de compostagem; o lodo, assim, mistura-se ao lixo no processo do tratamento do mesmo dando início à uma fermentação aeróbica. Esta mistura do lodo ao lixo, que pode apresentar algumas vantagens, deve, contudo, ser devidamente experimentada antes do seu emprego mais generalizado.

- **outras modalidades de processamento**

De início, enfocaremos a produção de energia térmica e/ou elétrica, ou ainda, de acordo com Figueiredo (1995), o aproveitamento energético direto, como um dos métodos utilizados no processamento de resíduos sólidos municipais.

O aproveitamento energético direto dos resíduos municipais tem sua expressão máxima na conversão térmica. Nesta modalidade de processamento, uma parcela dos componentes da massa de resíduos, aquela que apresenta boas características para a queima, é tratada como combustível de centrais térmicas. Embora esta não seja uma idéia nova, por já ser utilizada de longa data em regiões de clima frio, a sua difusão generalizada decorre da crise energética evidenciada a partir dos choques do petróleo da década de 1970.

De imediato, a argumentação apresentada pelos defensores dessa modalidade é forte por somar dois “benefícios” importantes nos dias atuais, quais sejam a geração de energia e a “solução” de processamento para uma parcela dos resíduos sólidos municipais. No entanto,

se analisadas a fundo, essas técnicas, conforme Figueiredo (1995), carregam em seu conteúdo sérios problemas de concepção que se contrapõem à sustentabilidade ambiental do planeta.

Por isso, nesse tipo de processamento de resíduos urbanos temos que ficar atentos as características dos resíduos e às preocupações com a liberação de efluentes gasosos. Apesar destas colocações, o reaproveitamento energético direto pode, em algumas situações específicas, contribuir para a redução de problemas ambientais com origem na geração de resíduos. Em geral, essas situações consistem na utilização específica de resíduos sólidos homogêneos e bem definidos.

Existem outras técnicas que, embora de abrangência limitada, são utilizadas em caráter experimental ou em função de características regionais. Dentre essas técnicas poderiam ser destacados os aterros energéticos e os biodigestores. Os aterros energéticos são uma variação dos aterros sanitários, concebidos de forma a possibilitar a extração e utilização do gás combustível, predominantemente metano, produzido pela digestão dos elementos orgânicos depositados no aterro. As principais limitações desta técnica, segundo Figueiredo (1995), consistem nos problemas tecnológicos associados ao alto consumo energético na compressão do gás para armazenamento, além dos problemas de projeto e operação inerentes à aterragem em si. Quanto à biodigestão, o objetivo é também a geração de combustível a partir da digestão de resíduos orgânicos. Seus problemas são basicamente os mesmos dos aterros energéticos, acrescidos de outros de ordem geral que englobam inclusive fatores culturais.

Por último, ainda em fase experimental, temos o processo pirolítico que, devido a algumas vantagens evidentes, deixou de ser analisado apenas do ponto de vista teórico e tem despertado grande interesse. Segundo Schalch, Leite e Gomes (1990), a pirólise é um processo de decomposição térmica, sob uma atmosfera livre de O_2 , que transforma substâncias complexas em simples pela utilização de calor. Através da pirólise, a matéria orgânica pode ser convertida em diversos subprodutos.

Ocorre em temperaturas inferiores à da incineração, com produção de líquidos e gases de alto conteúdo energético, sem poluição atmosférica apreciável. Logo, os gases produzidos neste tipo de processamento de resíduos urbanos, conforme pesquisas realizadas

por Burnett (1979), podem ser utilizados como combustível em processos convencionais de combustão destinados a geração de calor e trabalho.

A transformação do material pirolisado resulta produtos com alto conteúdo energético, que podem ser divididos em três grupos:

- a) **Gasosos:** compostos por hidrogênio, metano e monóxido de carbono;
- b) **Líquidos:** compostos por hidrocarbonetos, álcoois e ácidos orgânicos de elevada densidade e baixo teor de enxofre;
- c) **Sólidos:** compostos por carbono quase puro e ainda por vidro, metais e outros materiais inertes.

Um exemplo disto, segundo pesquisas realizadas por Schalch, Leite e Gomes (1990), é a pirólise de material celulósico e plástico. No caso da celulose, que é um dos principais componentes do lixo, tem-se observado que a quantidade de componentes líquidos (hidrocarbonetos combustíveis) varia de acordo com a temperatura à qual a pirólise ocorre. Já para a grande variedade de materiais plásticos que servem para os mais diversos usos, existem alguns que são mais freqüentemente encontrados no lixo como as poliolefinas (polietileno), os policloreto de vinila (PVC) e os poliestirenos. A pirólise desses materiais plásticos fornecem como produtos hidrocarbonetos aromáticos e saturados, HCl, CO, CO₂, etileno, estireno, olefinas e outros.

Pode-se destacar, agora, as seguintes vantagens e desvantagens deste processo:

Vantagens:

- a) Se comparado com a incineração, apresenta temperatura de operação menos elevada, e a possibilidade de gerar combustível líquido ou gasoso, proveniente de decomposição pirolítica de substâncias orgânicas complexas;
- b) Redução do volume de gases produzidos, que faz com que as instalações de tratamento tenham um custo mais baixo;
- c) O gás resultante da combustão pode ser estocado para uso posterior.

Desvantagens:

- a) Atualmente, o custo para que se possa aplicar o processo no tratamento de vários tipos de resíduos é muito elevado e, na maioria dos casos, não se tem o custo definido;
- b) Seu emprego na destruição de resíduos de materiais perigosos deve ser estudado minuciosamente, pois os produtos formados podem muitas vezes ser mais perigosos que os processados.

2.4 Os problemas gerados pelos resíduos sólidos municipais (ambientais, sócio-econômicos, de saúde e outros)

O problema dos resíduos sólidos municipais surgiu desde quando o homem começou a abandonar a vida nômade, tornando-se sedentário e fixando-se em determinados lugares. Os primeiros processos de manipulação dos resíduos sólidos urbanos, desde as antigas civilizações, visaram afastar para bem distante tudo o que sobrasse das atividades humanas, devendo ter surgido daí a prática do lançamento dos resíduos sólidos ao ar livre (céu aberto), bem como em cursos de água. Há menção na história antiga quanto ao uso do fogo para a destruição dos restos inaproveitáveis, bem como o seu enterramento.

Há aproximadamente um século começaram a aparecer as soluções consideradas racionais para a solução do problema dos resíduos sólidos municipais, através de processos e sistemas capazes de atender não apenas às questões sanitárias, de conforto e estética, mas também ao aspecto econômico.

Mesmo assim, o problema do lixo urbano vem-se agravando na grande maioria dos países e, particularmente, em determinadas regiões, como consequência do acentuado crescimento demográfico dos centros urbanos, principalmente das regiões ou áreas metropolitanas, da criação ou mudança de hábitos, da melhoria do nível de vida, do desenvolvimento industrial, da geração *per capita* de resíduos sólidos, da evolução qualitativa na composição da massa do lixo e de uma série de outros fatores.

Esse problema vem trazendo preocupações, principalmente nos países desenvolvidos, como Estados Unidos, Inglaterra, França, Alemanha, Suíça, Japão e outros, que vêm dedicando grandes esforços na procura de soluções adequadas. Muitos países em fase de desenvolvimento ou subdesenvolvidos, como vários da América Latina, também vêm-se preocupando em solucionar adequadamente os problemas relacionados aos resíduos sólidos e à limpeza pública, visto que a mesma, notadamente em países em fase de desenvolvimento, é um dos problemas de Saneamento do Meio e que está a exigir maior atenção, especialmente por parte das autoridades governamentais, bem como por parte das entidades de financiamento e das que se ocupam do ensino e da pesquisa. Por essa e por outras razões é que os países em desenvolvimento deveriam aproveitar melhor a experiência advinda do que vem ocorrendo em países desenvolvidos, para não incorrer nos mesmos erros, bem como utilizar os resultados de estudos e pesquisas, incluindo novos processos tecnológicos, que têm sido apresentados.

A importância da solução do problema dos resíduos sólidos urbanos e limpeza pública pode ser encarada sob diversos ângulos, dos quais se destacam os aspectos sanitários (relacionados à saúde humana), os ambientais e os sócio-econômicos, incluindo os relacionados ao bem-estar.

- **Aspectos sanitários**

Entre os vários fatores que aconselham ou mesmo determinam maior cuidado com relação ao problema dos resíduos sólidos cumpre destacar os relacionados à proteção da saúde da comunidade, incluindo o bem-estar da população; esse aspecto da proteção da saúde por si só constitui um motivo preponderante para que sejam procuradas soluções adequadas ao problema da remoção, tratamento e/ou disposição dos resíduos sólidos municipais. Há que se considerar ainda que o lixo urbano ocupa um papel importante na estrutura epidemiológica da comunidade e, conseqüentemente, no nível da saúde pública.

Do ponto de vista sanitário, a importância do lixo como causa direta de doenças não está bem comprovada. Porém, como fator indireto, o lixo tem grande importância na transmissão de doenças através, por exemplo, de vetores como moscas, mosquitos, baratas, roedores (ratos), cães, suínos e aves, que encontram no lixo urbano alimento e condições adequadas para proliferação; segundo Philippi Júnior (1988), estes vetores são responsáveis

pela transmissão de doenças, tais como: febre tifóide, salmoneloses, disenterias, cujo vetor é a mosca; malária, febre amarela, transmitidos pelo mosquito; cólera, amebíase, giardíase, que têm como vetor a barata; tifo murino, leptospirose, diarreias, triquinose, transmitidas pelos roedores e muitas outras doenças transmitidas pelos demais vetores.

- **Aspectos ambientais**

No tocante à poluição ambiental, podemos dizer que a mesma ocorre por qualquer alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente (solo, água e ar), causada por qualquer forma de energia ou por qualquer substância sólida, líquida ou gasosa, ou combinação de elementos despejados no meio ambiente, em níveis capazes de, direta ou indiretamente, ser prejudicial à segurança e ao bem-estar das populações.

Um dos exemplos a serem citados da poluição ambiental é o da fumaça resultante da queima do lixo urbano, podendo criar problemas oriundos de falta de visibilidade; a incineração dos resíduos sólidos municipais sem os devidos cuidados irá aumentar a poluição do ar; a disposição do lixo urbano no solo, de forma inadequada (a céu aberto) e uma rua suja com detritos diversos podem causar, respectivamente, problemas de poluição das águas superficiais ou subterrâneas e problemas de ordem visual.

- **Aspectos sócio-econômicos**

Os resíduos sólidos não representam o valor econômico que se lhes pretende atribuir e os resultados financeiros que deles se podem tirar devem ser encarados como contribuição parcial para a solução do problema econômico-financeiro do custo de instalação, operação e manutenção do sistema. Por outro lado, observa-se também que o aproveitamento econômico dos resíduos sólidos, que está basicamente ligado ao seu tratamento e/ou disposição, relaciona-se intimamente às condições urbanas e regionais; assim, a produção do composto pode ser interessante numa região agrícola e a execução de aterro sanitário ser muito onerosa numa região com lençol freático de água subterrânea muito elevado.

Na apreciação das implicações sócio-econômicas dos resíduos sólidos, existe um aspecto que deve ser devidamente considerado, no equacionamento da solução desse problema. Em casos como na varrição de logradouros públicos e separação de produtos, visando à sua reutilização, em muitos locais é preferível a adoção de processos manuais, particularmente em comunidades de pequeno ou médio porte, tendo em vista atender o

problema de falta de trabalho, principalmente para pessoal não qualificado. Por outro lado, muitas vezes a adoção de processos mais sofisticados, como a varrição mecânica, dada a precariedade de obtenção de peças sobressalentes ou de pessoal qualificado para a manutenção do equipamento, passa a constituir um sério problema para as comunidades.

Outro aspecto sócio-econômico ligado ao problema dos resíduos sólidos, particularmente nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, é o que ocorre no caso da condenável prática de disposição final dos resíduos ao ar livre, quando uma população de baixo nível sócio-econômico é atraída para recolher certos refugos de lixo, em condições inadequadas, expondo-a ao risco de contrair doenças, como também sofrer ferimentos com objetos cortantes, como garrafas quebradas. Na realidade, trata-se de um problema social oriundo, muitas vezes, da falta de trabalho para pessoal não qualificado. O fenômeno agrava-se com a criação de verdadeiras “favelas” ao lado do local de disposição dos resíduos sólidos municipais, com todos os males que advêm desses conjuntos de habitações sub-humanas. Uma solução, segundo Philippi Júnior (1988), encontra-se na instalação de métodos mais adequados de separação de produtos, utilizando pelo menos parte do pessoal que se ocupava desta atividade, como vem sendo experimentado na cidade do México. A “catação”, durante a coleta do lixo, é outro problema a ser enfrentado pelos responsáveis pela limpeza pública.

- **Aspectos relacionados ao bem-estar**

O problema do lixo, do ponto de vista do bem-estar, encarando-se bem-estar do prisma estético e de conforto, é facilmente compreensível, bastando assinalar que o aspecto físico é desagradável à vista, geralmente apresenta maus odores, além de atrair moscas domésticas, baratas e ratos, animais estes que causam repulsa à maioria das pessoas. Junte-se a isso o desconforto causado pelas poeiras e ciscos levantados pelo vento, e já se teriam motivos suficientes para insistir na oportunidade da solução do problema do lixo urbano.

Figueiredo (1995), relata que existem ainda outros tipos de problemas relacionados à questão dos resíduos sólidos municipais nas cidades contemporâneas, principalmente nas consideradas tecnológicas ou o que chamamos de industriais, e que carecem de uma análise detalhada de suas implicações com relação a sustentabilidade do planeta.

Dentre alguns destes problemas, citados por esse mesmo autor, podemos destacar o fato que comumente ocorre nas sociedades modernas, que é a criação e/ou alteração das técnicas de processamento dos resíduos ao longo da história no sentido de manter a associação do consumo à qualidade de vida. Entretanto, do ponto de vista conceitual, poucas foram as alterações e ainda hoje as formas de tratamento da questão podem ser comparadas às suas primitivas antecessoras.

Uma outra observação quanto à questão do lixo urbano está relacionada ao “marketing ambiental” muitas vezes confundido como “planejamento ambiental”, através do qual se procura passar ao público uma imagem de preocupação com o meio ambiente por parte da indústria. Isto é feito com a intenção de associar a imagem de indústria ao comprometimento ambiental, no intuito de atingir uma maior penetração dos produtos no mercado visando, também, o lado econômico e não à questão dos resíduos sólidos municipais em si.

CAPÍTULO 3

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS MUNICIPAIS

3.1 Introdução

O século vinte vem testemunhando grandes mudanças em todos os aspectos da história da raça humana, e uma vez que depois dos alimentos a energia é a segunda maior necessidade do ser humano, as atenções se voltam às mudanças que a humanidade vem sofrendo em decorrência das circunstâncias que culminaram com os problemas energéticos atuais.

Nos primeiros vinte e cinco anos deste século o carvão foi a principal fonte energética dos países civilizados e assim continuaria a ser se a descoberta de grandes quantidades de petróleo não tivesse despertado rapidamente o interesse na facilidade comparativa de sua extração, transporte e conversão para atender a uma grande quantidade de necessidades.

Com a ocorrência da “crise energética”, provocada pela brusca elevação dos preços do petróleo e como conseqüência à pouca preocupação por parte de governantes e empresários quanto às perspectivas de suprimento energético, houve a consolidação dos cartéis dos produtores, desencadeando uma nova postura face à questão energética, decorrente das dificuldades que vários países atravessaram para assegurar o fornecimento de petróleo, até que a manipulação política dos preços durante a década de 1970 provocou e segue provocando uma intensa mudança nos padrões energéticos em termos de oferta e demanda, inclusive abrindo espaço para a energia nuclear, a biomassa e atualmente, ainda em fase de estudos, a possibilidade de utilização dos resíduos sólidos municipais como fonte de combustível, inclusive com o intuito de se avaliar o seu potencial de co-geração, que é o objetivo deste trabalho.

Em uma grande gama de setores produtivos e de serviços dos países ou regiões com verões e invernos rigorosos se observa a necessidade não apenas de energia eletromecânica

mas também de energia térmica para os mais diversificados processos: calefação, secagem, conforto térmico, aquecimento, cozimento, evaporação. Tais necessidades, em associação com outros fatores importantes, como a inexistência de outras fontes de menor custo diferencial e a consciência quanto à necessidade de uma melhor utilização da disponibilidade termodinâmica dos combustíveis, propiciaria o aparecimento da co-geração, isto é, de geração simultânea das energias térmica e eletromecânica como uma forma de suprimento a um custo menor e com maior eficiência.

Dessa forma, a co-geração pode ser definida como uma tecnologia que apresenta potencial de aplicação tanto no setor industrial quanto no setor terciário (especialmente em aeroportos, hotéis e hipermercados), distinguindo-se pelo porte dos sistemas então empregados (Balestieri, 1994).

3.2 Aspectos gerais da co-geração

O conceito de co-geração está associado à prática de uma forma de geração combinada de energias térmica e eletromecânica a partir de uma mesma fonte primária, sendo assim uma forma de Conservação de Energia; é dentro deste contexto que a co-geração, por configurar uma forma racional de se utilizar os combustíveis, surge como alternativa viável para as indústrias que necessitam de calor para o processo que desenvolvem e energia eletromecânica, ou mesmo para o uso de calor residual de termelétricas para aquecimento de recintos (*district heating*), como é o caso dos Estados Unidos e Europa (Balestieri, 1990).

Sua utilização vem apresentando, especialmente nos últimos anos, uma forte tendência de crescimento. A origem desta prática está associada ao desenvolvimento de sistemas para climatização de ambientes (aquecimento e resfriamento).

Atualmente, pode-se supor que seu amplo emprego em nível mundial se deve particularmente às necessidades de calor para fins industriais.

Os principais ciclos utilizados para configurações de centrais de co-geração são:

- **ciclo Rankine;**
- **ciclo Brayton;**
- **ciclo Combinado,**

sendo também importante anotar a existência de um quarto ciclo, o ciclo Diesel, de grande utilização na Europa e Estados Unidos.

O ciclo Rankine pode ser operacionalizado pela existência de caldeiras aquatubulares de alta pressão associadas a turbina de condensação e extração.

O ciclo Brayton faz uso de conjuntos geradores acoplados compressor-câmara de combustão-turbina a gás, nos quais os gases de escape resultantes da combustão são aproveitados nos processos que admitem sua aplicação direta (nos casos, por exemplo, de secagem) ou trocam energia com água para gerar vapor em caldeiras de recuperação.

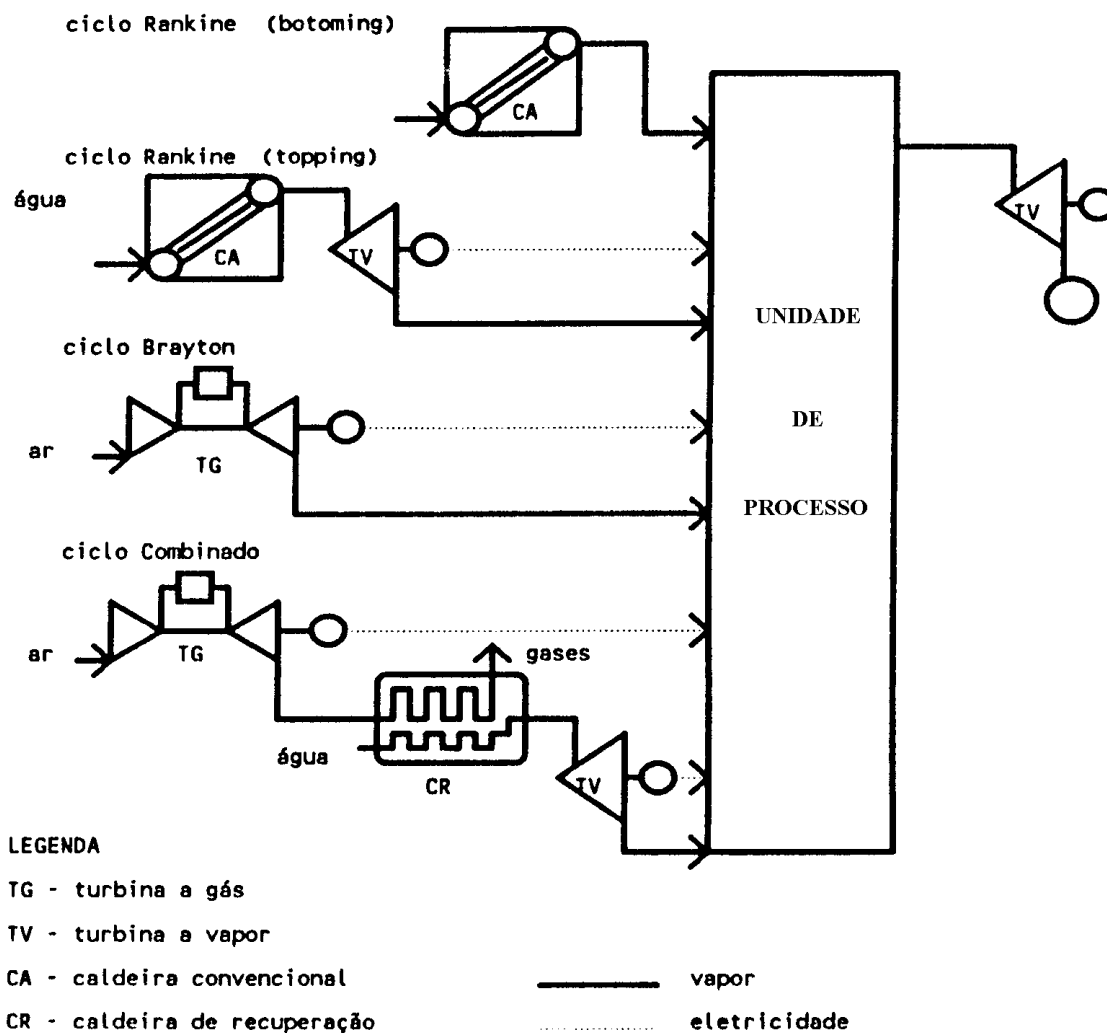
O ciclo combinado mais utilizado no momento é o que acopla turbinas a gás com caldeiras de recuperação e turbinas a vapor, ainda que possa admitir outros geradores. A figura 3.1 apresenta esquemas destes três principais ciclos. Note que apenas a primeira configuração Rankine apresenta regime “bottoming”, sendo as demais “topping”.

A co-geração como modo de geração simultânea de energia elétrica e vapor, em função das necessidades de um determinado processo, poderá se apresentar de acordo com os seguintes regimes:

- **“TOPPING”**: a energia térmica rejeitada no processo de produção de energia elétrica é aproveitada para calor de processo;
- **“BOTTOMING”**: o combustível é usado para gerar calor para processos em altas temperaturas e o vapor recuperado (ainda energizado pela alta temperatura) é utilizado para gerar eletricidade.

Como se observa, os regimes “topping” e “bottoming” diferem pelo fato de que cada um deles assume uma das formas de energia como a primeira a ser gerada, qual seja

eletricidade no regime “topping” e calor de processo no regime “bottoming”. A figura 3.2 ilustra os regimes de co-geração.



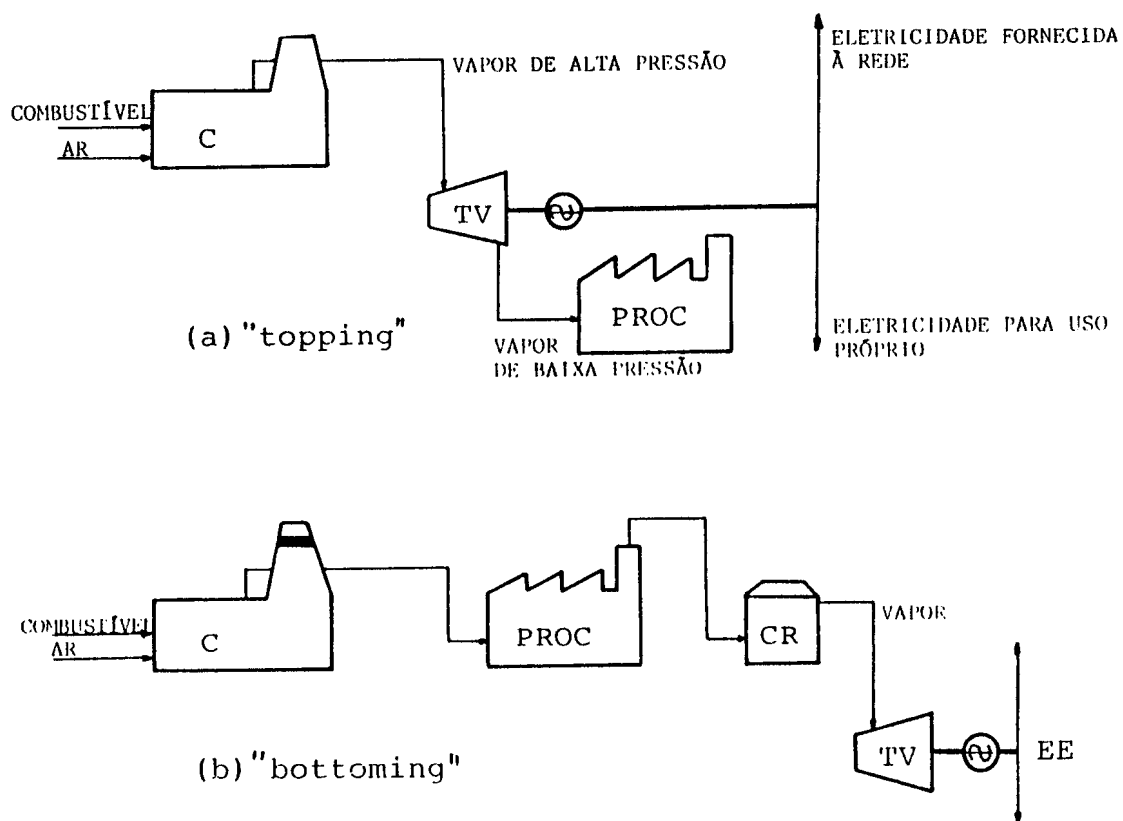
Fonte: Balestieri, 1994

Figura 3.1 Ciclos térmicos de co-geração

O regime “**bottoming**” é de menor campo de aplicação e raramente econômico, uma vez que a energia elétrica é gerada com baixa eficiência, em função do calor ser usualmente liberado com temperaturas baixas, sendo mais lógico usar tal calor para outro processo, desde que exista ou seja pertinente ao processo já existente.

Os ciclos térmicos que podem operar segundo o regime “**topping**” são:

- ciclo com turbina a vapor de extração-condensação;
- ciclo com turbina a vapor de contrapressão;
- ciclo com turbina a gás e caldeira de recuperação;
- ciclo combinado;
- ciclo motor com unidades Diesel.



Fonte: Balestieri, 1990

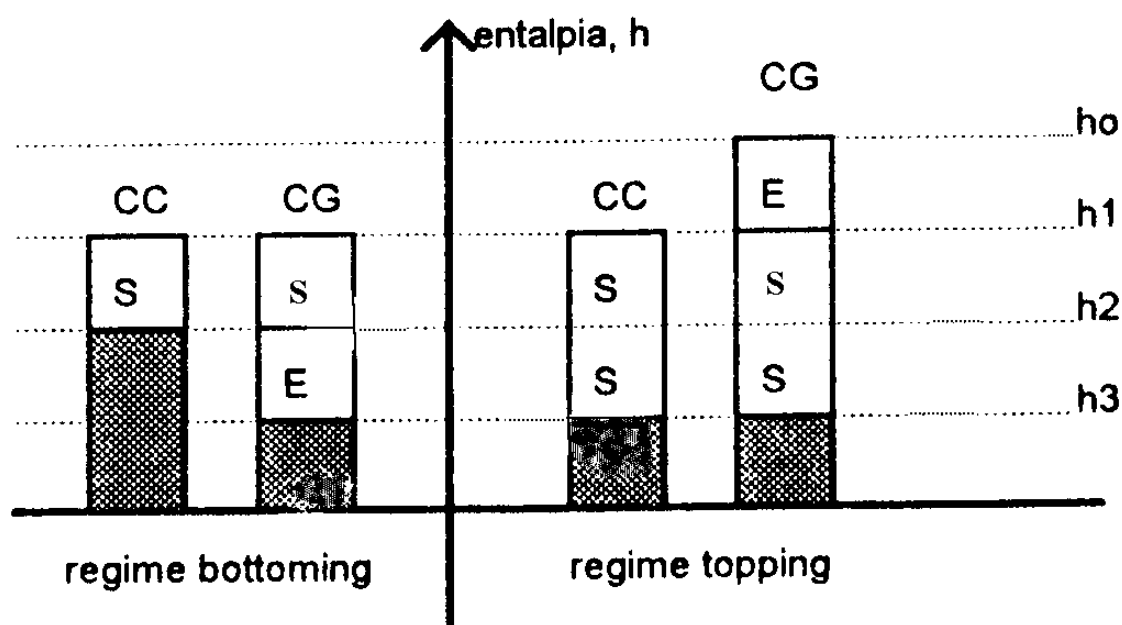
Figura 3.2 Regimes de co-geração: (a) “topping”; (b) “bottoming”

A escolha do equipamento para certo processo, entretanto, irá depender de uma série de fatores, tal como a demanda de eletricidade e vapor do consumidor, a variação desta demanda no tempo, o custo do combustível a ser empregado e parâmetros financeiros associados ao projeto.

A figura 3.3 compara os dois regimes face aos níveis de geração de energias térmica e eletromecânica demandadas, revelando que no regime “topping” faz-se necessário que uma

massa adicional de combustível seja queimada para que o nível entálpico h_0 seja alcançado; isto equivale a dizer que é necessário gerar-se o vetor energético (vapor, por exemplo) a um maior nível de pressão.

Vale ressaltar que, em função de a maioria dos processos industriais demandarem baixos níveis entálpicos, não condizentes como os níveis necessários para a geração eletromecânica, o regime “bottoming” apresenta aplicações limitadas, favorecendo o emprego do regime “topping” na maior parte das aplicações de co-geração.



LEGENDA

CC - central convencional

CG - central de co-geração

 energia rejeitada ao ambiente

Fonte: Balestieri, 1994

Figura 3.3 Níveis de geração em regime “bottoming” e “topping”

Com base nestas informações, então, podemos afirmar que um projeto de central de co-geração conceitualmente adequado é aquele que não só atende às demandas operacionais

prescritas pelo processo mas também consegue garantir o nível de excedentes planejado, nos períodos ajustados pelo processo, com confiabilidade e eficiência.

Nos casos em que isso não é alcançado, as falhas na geração e a queda de eficiência que lhe são decorrentes ocasionam, respectivamente, aumentos nos custos de operação e manutenção devido ao pagamento de multas contratuais e aumento nos custos dos combustíveis utilizados (ainda que a central queime resíduos ou sub-produtos do processo).

As estratégias de operação admitidas para centrais de cogeração, de modo geral, se resumem às quatro apresentadas a seguir:

- atendimento da demanda térmica (paridade térmica);
- atendimento da demanda eletromecânica (paridade elétrica);
- despacho econômico;
- retirada da central de co-geração do sistema.

O atendimento da demanda térmica, no Brasil, é prioritário, uma vez que não é prática consolidada a negociação de vapor; a central de co-geração pode, porém atender parcialmente à demanda térmica, sendo complementado pela unidade auxiliar. O mesmo se aplica ao atendimento da demanda eletromecânica, com importação (Balestieri, 1994).

Na estratégia voltada à demanda eletromecânica, a central de co-geração atende às necessidades da unidade de processo regida pela curva de demanda eletromecânica; o calor liberado como decorrência deste processo é usado para atender a demanda térmica e as caldeiras da unidade auxiliar podem ser usadas como suplemento, se necessário, ou calor pode ser eliminado da planta se houver excesso. A eletricidade pode ser importada se a central de co-geração não for grande o suficiente para atender à demanda, ou suplementada pela central de utilidades.

O despacho econômico corresponde à colocação da central de co-geração em funcionamento apenas nos períodos em que a tarifa paga pela concessionária corresponda a um retorno de interesse do investidor.

A central de co-geração poderá ficar desconectada nos casos em que não houver economicidade em sua operação, ainda que isto implique em custos devido à ociosidade dos equipamentos.

3.3 Aspectos importantes para a implantação da co-geração

Do ponto de vista financeiro, percebe-se uma preocupação por parte dos órgãos reguladores em ceder ao setor privado, desde que qualificados de acordo com seus critérios, a responsabilidade da geração de parte da capacidade que se prevê será necessária para atender ao mercado a partir do ano 2.000.

Três formas de negociação entre as concessionárias e os autoprodutores (termo empregado para designar aqueles que produzem energia elétrica para seu uso exclusivo, e que apresentam potencial para se tornarem cogeneradores pela venda de energia excedente) estão previstas: venda, transporte e permuta.

Na primeira modalidade, a concessionária adquire a energia excedente produzida pelo produtor; no caso da concessionária responsável pelo fornecimento de energia elétrica na área (concessionária local) não apresentar interesse, fica facultada a venda à concessionária supridora da área; o preço a ser pago por essa energia é acordado entre as partes e não pode ultrapassar os custos de expansão dos sistemas interligados.

O transporte consiste em transferir a energia elétrica gerada pelo produtor para utilização em unidade consumidora de sua propriedade situada em outra localidade; não sendo possível o transporte, a permuta pode ser negociada desde que seja do interesse do setor elétrico; os preços são negociados pelas partes.

Percebe-se, também, que o mercado se encontra aberto para a criação da figura do produtor independente, até então inexistente no Brasil. Impulsionado por novas regulamentações, realizam-se no país reuniões e grupos de discussão com vistas à viabilidade de envolvimento de grandes grupos empresariais no setor energético.

Economicamente, quanto menor a potência elétrica gerada na unidade de processo, tanto mais difícil será justificar um projeto de central de co-geração com base nos retornos gerados ou no custo da energia evitada. O valor da energia térmica (vapor) deve justificar os investimentos na planta porque o retorno elétrico está atrelado aos custos dos combustíveis.

Do ponto de vista financeiro, os empreendimentos nacionais para projetos de centrais de co-geração podem contar com os recursos do BNDES - Banco Nacional de

Desenvolvimento Econômico e Social para os itens de investimento fixo, como projeto, materiais e obras, e da FINAME para o financiamento de máquinas e equipamentos (Balestieri, 1994).

Uma unidade de processo com necessidades térmicas bem estabelecidas deve inicialmente determinar se a co-geração irá trazer retornos interessantes para a empresa; numa próxima etapa, decidir pelo tipo de central a ser implantada; finalmente, definir-se pelo financiamento externo ou próprio do projeto e as estratégias econômico-financeiras que melhor se ajustarão às circunstâncias.

Diferentes critérios são empregados na avaliação do investimento em co-geração: (curtos) períodos de retorno do capital imobilizado, (altas) taxas de retorno do investimento, manutenção de taxas adequadas de capitalização para evitar descontroles no custo monetário e manter um fluxo de caixa adequado, o desejo de obter altos níveis de retorno em termos absolutos e em termos dos objetivos específicos para taxa de retorno do capital.

Em diversos países, e mesmo em regiões de um mesmo país, se encontram áreas de grande potencialidade técnica e econômica para a prática da co-geração mas que não podem ser operalizadas por causa de barreiras institucionais; algumas dessas barreiras poderiam ser citadas, como distinção de tarifas impostas aos produtores independentes por grupos monopolistas do setor de geração, a diferença entre o período de retorno para projetos com tomada de decisão centralizada ou descentralizada na área energética, tarifas discriminatórias com reduções para grandes consumidores de eletricidade que praticam autogeração, etc.

Cabe mencionar que a viabilidade de um projeto para central de co-geração depende dos aspectos técnico, econômico/financeiro e institucional, nessa ordem, com a imposição de seus limites num afunilamento, sendo que projetos tecnicamente aceitáveis podem esbarrar em limites econômicos e mesmos aqueles técnica e economicamente viáveis podem esbarrar em restrições institucionais.

Finalmente, para a efetiva disseminação da co-geração enquanto prática favorável ao uso racional da energia e fator de redução de emissão de poluentes no ambiente, é preciso não apenas que sejam vencidas todas as etapas elencadas mas também se faz necessária a disposição da iniciativa privada em investir nessa tecnologia.

3.4 Revisão da literatura sobre os resíduos sólidos municipais

Neste item mostram-se, numa ordem cronológica e baseado na experiência internacional e nacional, aspectos relevantes que se encontram englobados na vasta literatura dos resíduos sólidos municipais; a intenção é destacar a contribuição de alguns autores no que diz respeito à situação geral dos resíduos urbanos.

Segundo Burnett (1979), na Open University foi criado um processo para se fazer a hidrólise da celulose dos resíduos da madeira. A intensão principal era aumentar a velocidade para um tempo de hidrólise de 1-2 minutos em vez de um tempo de 3 horas e meia, mantendo o mesmo rendimento por tonelada de resíduo, fazendo com que o custo de investimento do processo ficasse bem reduzido. Para uma alimentação de resíduo bruto de 250 t/dia, contendo 40% de celulose, o rendimento da produção do etanol era de 22,4 t/dia, tendo este um poder calorífico de 2.700 MJ/kg, isto é, aproximadamente 1/3 do valor do poder calorífico do resíduo celulósico. Contudo, as indústrias destinadas à fabricação do etanol através da hidrólise da madeira, que nesta época tiveram um grande desenvolvimento, se encontram nos dias de hoje praticamente extintas.

Verificou-se, com base nas pesquisas feitas por Gyftopoulos e Widmer (1982), que muitos materiais residuais que eram dispostos sem qualquer outro uso adicional ou eram de alguma forma reaproveitados, poderiam tornar-se, indiretamente, uma das causas da existência de energias residuais, pois alguns destes resíduos ou eram queimados como combustíveis, tal como o pó de serragem das indústrias de móveis, ou reprocessados com um menor consumo de combustível, tal como fragmentos de alumínio, e, desse modo, deixando para trás uma parcela de energia residual que, muitas vezes, era utilizada por tecnologias como a co-geração.

De acordo com relatos feitos por Probert, Kerr e Brown (1987), no Reino Unido os resíduos não-tratados estavam sendo incinerados em grelhas convencionais com uma eficiência global de combustão abaixo ou equivalente à 30%. Alternativamente o resíduo sólido municipal começou a ser fragmentado, o que lhe conferiu uma maior densidade, maior consistência, um poder calorífico elevado (por unidade de volume de combustível) e, ainda, facilitou o manuseio e o transporte dos mesmos para as indústrias de combustão/incineração.

Desse modo, os componentes combustíveis destes resíduos fragmentados começaram a serem processados, em fornos com leito-fluidizado, sob a forma de pedaços de RDF (*Refuse Derived-Fuel*) ou combustível derivado de resíduos sólidos urbanos. Esses, por sua vez, eram incinerados com carvão para melhorar a estabilidade de queima e através da recuperação do calor disponível, podia-se alcançar eficiências térmicas muito altas (aproximadamente 77%). Os autores ressaltam que a combustão de RDF realizada em fornos com leito fluidizado mostrava-se, na época, um método satisfatório para a incineração destes resíduos.

As vantagens da incineração de RDF seriam:

- a) Por causa do poder calorífico do RDF ser aproximadamente duas vezes maior do que o poder calorífico dos resíduos sólidos brutos (sem qualquer tratamento), a taxa de calor liberado era correspondentemente maior.
- b) A taxa de desgaste ou abrasão era menor, devido à ausência de vidro e itens metálicos.
- c) Por ser o RDF um combustível muito puro, os resíduos provenientes da sua combustão eram poucos.
- d) A taxa de corrosão dos produtos resultantes da combustão de RDF é igualmente menor: em média apenas 0,4% de cloretos presentes, comparada com 0,9% quando resíduos sólidos brutos são queimados.

As principais desvantagens deste método seriam os custos energético e financeiro envolvidos no processo de fragmentação dos resíduos sólidos municipais em RDF.

Penner, Wiesenbahn e Li (1987), tentaram mostrar que a incineração de resíduos sólidos municipais, que era mundialmente utilizada, estava tomando-se a opção principal ou dominante na classificação de resíduos sólidos nos Estados Unidos. Isto porque a deposição do lixo nos oceanos era raramente discutida seriamente, por causa da forte oposição pública, e havia a impraticabilidade de seu emprego em cidades do interior. Em relação ao processamento biológico (compostagem) foi visto que esse método poderia ser praticável sob algumas condições, mas por não ser bem definido e nem entendido sua aplicação era realizada em menor escala do que a incineração. É por estas e por outras razões que

durante o ano de 1986, mais de 700 unidades de incineração estiveram em operação na Europa Ocidental, incluindo 110 unidades com capacidade acima de 500 toneladas por dia.

Contudo, para elucidar que o desenvolvimento mundial das mesmas fez com que este processo se tornasse uma tecnologia madura e com um número crescente de fabricantes novos com larga experiência neste tipo de sistema, a tabela 3.1 ilustra o papel que a incineração tem desempenhado na resolução dos problemas afeitos à classificação do lixo urbano na Europa Ocidental (nos chamados Países Baixos).

Tabela 3.1 - Comparação dos métodos de classificação de resíduos sólidos utilizados nos Países Baixos entre 1960 e 1978, descrita conforme à porcentagem de população auxiliada pelos métodos dados.

MÉTODO	1960	70	71	72	73	74	75	76	77	78
Incineração	15	20	20	26	26	26	30	30	30	34
Compostagem	17	13	15	13	18	18	18	18	19	21
Aterragem	68	67	65	61	56	56	52	52	51	45

Fonte: Penner, Wiesenhahn e Li (1987)

Conforme Takiishi (1989), duas tentativas foram feitas com o objetivo de se instalar usinas térmicas a lixo no Estado de São Paulo e não prosperaram por razões diversas. A primeira tentativa, iniciada em 1985, foi um projeto de uma usina térmica desenvolvido pela CESP em parceria com a Equipamentos Villares, tendo por intenção incinerar 1.800 toneladas/dia de lixo e fornecer vapor para a Refinaria de Capuava, não prosseguindo mais por razões políticas. A segunda tentativa, iniciada em 1986, partiu do então prefeito de São Paulo, Jânio Quadros, sendo a meta principal a construção de duas usinas de incineração com geração de energia elétrica - em Santo Amaro e em Itaquera - para queimar 1.800 toneladas/dia e outras duas de compostagem, ficando tal projeto pendente por causa de uma ação interposta na Justiça. Mas, dois grandes consórcios - um liderado por Villares/Cobrasma e outro por Brow Boveri/CBC - chegaram a apresentar propostas com relação a este segundo projeto, cujos parâmetros técnicos serviram de base para que a Prefeitura de São Paulo pudesse argumentar perante a Justiça que as usinas não causariam danos ao meio ambiente, pois seriam dotadas de modernos sistemas de tratamento de agentes poluentes, tecnologias essas de origem dinamarquesa ou alemã que podem ser encontradas

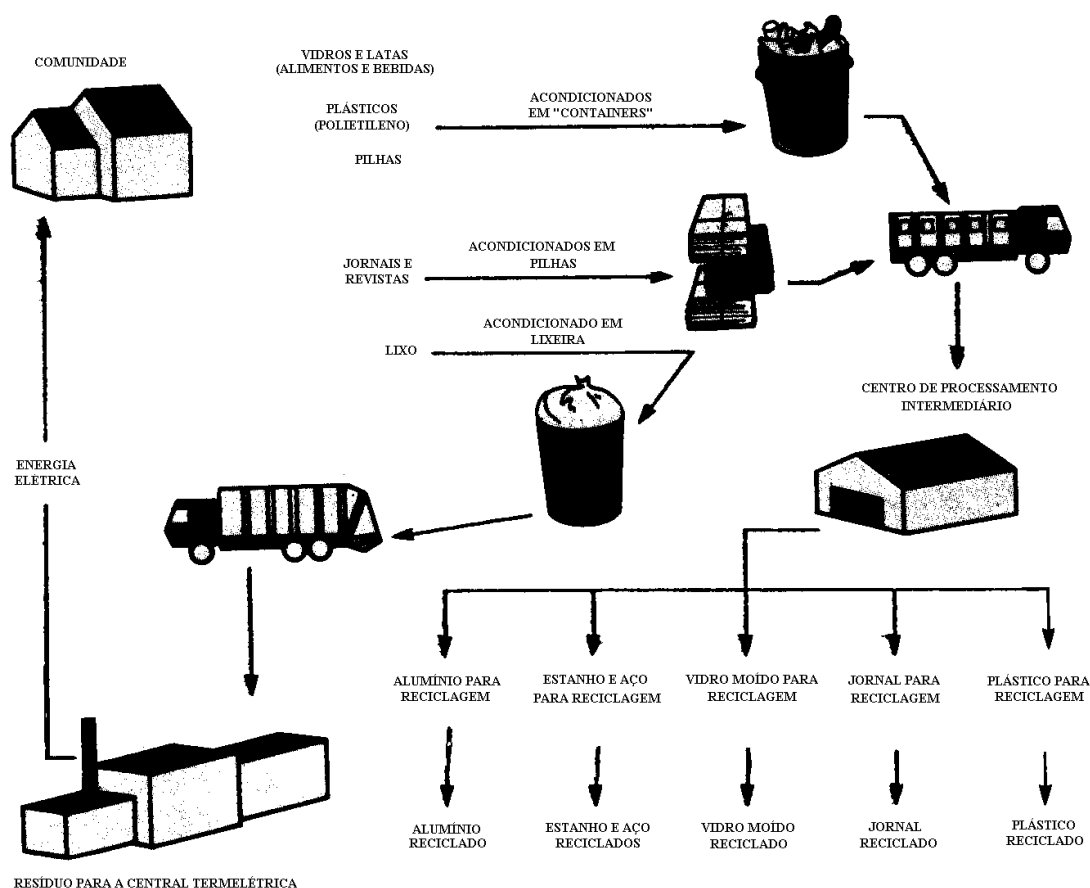
em uso nas unidades de incineração nos países europeus, no Japão e no E.U.A., mesmos nos dias de hoje.

Krol e Dent (1989) enfocaram que a utilização de aterros sanitários no Reino Unido, na Suécia e no Canadá era a opção principal para a disposição dos resíduos sólidos municipais. No Reino Unido, uma quantidade acima de 90% do total de resíduos urbanos era aterrada, sendo que em termos de produção e utilização do gás proveniente de aterros sanitários eles eram os líderes do mercado em relação aos outros dois países, com aproximadamente 5% do estimado potencial econômico em relação à extração destes recursos (10.000 GWh/ano). A Suécia extraía uma porcentagem semelhante (1.000-1.500 GWh/ano) aos recursos existentes no gás de pequenos aterros sanitários, ao passo que no Canadá existiram muito poucos projetos de extração do gás neste tipo de aterro (visto que a maior parte dos aterros sanitários nesse país eram pequenos e de construção remota para as operações de custo-efetivo).

Caldeiras e fornos industriais eram os maiores usuários do gás de aterros sanitários no Reino Unido, embora existissem também projetos envolvendo o aquecimento de recintos e a geração de eletricidade. A maior parte do gás extraído na Suécia era utilizada para fornecer calor destinado às redes de aquecimento distrital.

Nos Estados Unidos, o Instituto de Recuperação de Recursos e o Departamento de Energia, que se encontravam envolvidos nos problemas da classificação dos resíduos sólidos municipais, tinham a opinião de que um sistema integrado combinando redução de resíduos, reciclagem, recuperação de recursos e aterragem era a única solução para tal questão. Através do emprego da técnica de reciclagem, acompanhada de uma separação prévia na fonte, nos projetos destinados à obtenção de energia dos resíduos urbanos, de acordo com Smith (1990), companhias como a Wheelabrator Environmental Systems Inc., American Ref-Fuel, Foster Wheeler Corp., e muitas outras sentiram-se habilitadas para maximizar tal operação e reduzir os custos envolvidos na classificação de resíduos, prolongando desta maneira a vida útil dos aterros sanitários.

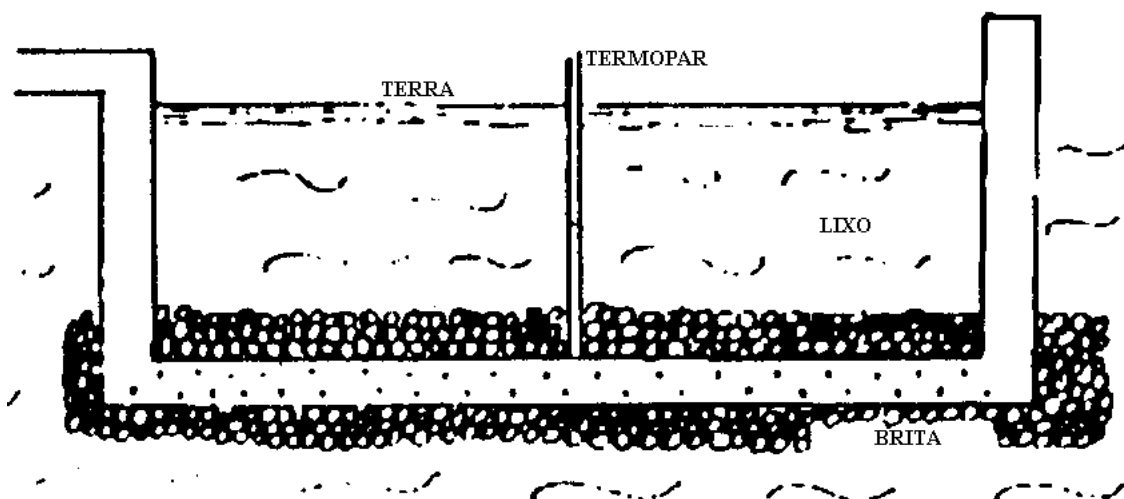
Para que se tenha uma melhor compreensão sobre o funcionamento deste tipo de projeto, que utiliza a energia existente no lixo urbano, a figura 3.4 ilustra um sistema pormenorizado de recuperação de recursos e manejos de resíduos municipais. Deve ser levado em consideração que num projeto como este, construído sobre a ilha de Montreal (Quebec), foi empregado um capital estimado em US\$ 223 milhões, tendo uma capacidade de incineração de aproximadamente 2.200 toneladas/dia de resíduos sólidos, incluindo também a reciclagem e compostagem de uma quantidade superior à 30% do total de refugos produzidos.



Fonte: Smith, 1990

Figura 3.4 Um compreensivo sistema de recuperação de recursos

Mariotoni e Ferruccio (1993) fizeram na cidade de Americana (S.P.) uma comparação, em termos energéticos, entre a eficiência de redução mássica existente na operação de um reator térmico híbrido e a existente em um modelo de decomposição termoquímica “in situ”. O reator térmico híbrido, que possui a função única de incinerar resíduos hospitalares, difere da incineração tradicional pela forma de promover o ambiente necessário para esta degradação térmica, uma vez que o combustível requerido para a geração de altas temperaturas provém do próprio resíduo. O processo de decomposição termoquímica “in situ” é composto de um tubo em “U” com perfurações ao longo dos 7,5m correspondentes à parte horizontal do tubo; enterrado em células de lixo em decomposição cercados por uma camada de pedra, coberto de lixo e impermeabilizado com terra, como ilustra a figura 3.5. Nesse sistema é injetado ar atmosférico (19% O₂) entre as pedras de modo a promover uma região circular de expansão da chama a partir do tubo.



Fonte: Mariotoni e Ferruccio, 1993

Figura 3.5 Modelo esquemático de decomposição “in situ”

Baseados em análises relativas ao período de operação, à quantidade de resíduo hospitalar incinerado, ao índice de redução mássica e ao consumo de energia destes sistemas, os autores puderam concluir que este último método de decomposição térmica é o mais viável, sob o ponto de vista energético, uma vez que o processo que opera segundo um reator térmico híbrido leva 82 horas para incinerar 144,06 m³ de lixo hospitalar, tendo uma eficiência de redução mássica de 82,1% e um consumo de energia calculado em torno de 344,4 kWh.

Ao passo que no sistema de decomposição termoquímica “in situ”, o tempo de 1,5 hora é suficiente para reduzir a mesma quantidade de lixo a índices de redução mássica similares e com um consumo de energia 34 vezes menor (aproximadamente 10,5 kWh).

Segundo Malloy e McAdams (1994), a indústria destinada à destruição de resíduos sólidos municipais nos E.U.A., também conhecida como a indústria que transforma os resíduos em fontes energéticas, passou na década de 1980 por investigações minuciosas em relação ao controle do fluxo nas emissões de poluentes, pois existiam indícios de que tal indústria estava retardando seu próprio ciclo de crescimento. Nesta época encontravam-se em operação bem mais do que 100 indústrias de combustão de lixo urbano nos E.U.A., sendo que 126 destas unidades processavam 31 milhões de toneladas/ano de resíduos, 26 incineradores (sem recuperação de energia) apenas queimavam 1,6 milhões de toneladas/ano e havia, ainda em fase de construção, alguns projetos avançados cuja capacidade estimada de incineração seria da ordem de 11 milhões de toneladas/ano de resíduos urbanos.

Na Comunidade Européia um total de 527 unidades de incineração já estavam na fase operacional, das quais aproximadamente 213 faziam a recuperação da energia residual. No Sudeste da Ásia estimava-se que das 24 unidades de combustão existentes, umas já se encontravam em plena atividade, enquanto outras estavam apenas nas fases de teste ou de construção.

Conforme Wilson, Saba, Nuwayhid e Hamrin (1995), o Líbano, em particular a cidade de Beirute, apresenta alguns problemas com relação a classificação dos resíduos sólidos municipais, isto por ser um país muito montanhoso e com apenas duas planícies: a estreita faixa costeira que se encontra densamente povoada e o leste do Vale Bekaa, onde está localizada a principal zona agrícola, o que torna quase impossível a implantação de aterros sanitários neste país tanto por causa da falta de locais adequados, quanto pela preocupação excessiva em relação à poluição das águas subterrâneas. Pois, baseados em dados experimentais estes autores declaram que este tipo de classificação de resíduos, em Beirute, tem ultrapassado os limites de poluição ambientalmente aceitáveis.

No que diz respeito à composição média dos resíduos sólidos naquela cidade do Líbano, a mesma contém 59% de resíduos orgânicos (resíduos alimentares e vegetais); 17,5% de papel e papelão; 2,4% de metais; 7,8% de vidros; 8,2% de plásticos e 5,1% de outros diversos, apresentando um conteúdo de umidade de aproximadamente 52% e um poder

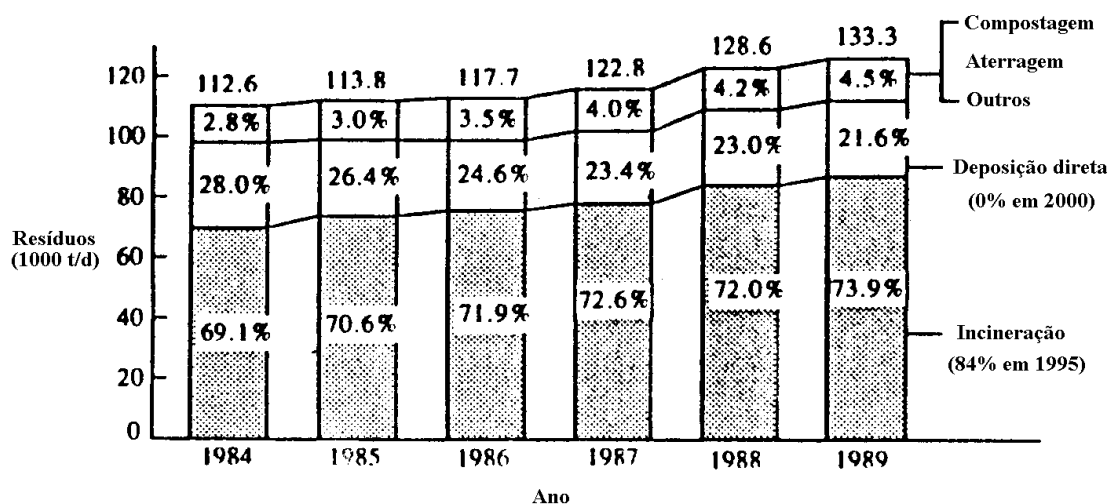
calorífico médio da ordem de 7,67 MJ/kg, e por saber que a mesma não pode ser queimada através da incineração direta, exatamente por causa da proporção elevada de resíduos oriundos de restos de alimentos e de plantas e também pelo alto conteúdo de umidade, é que passa-se a adotar um método que emprega a combinação classificação - separação e reciclagem com incineração como uma alternativa viável no tratamento do lixo urbano. É um sistema constituído por unidades de incineração que, antes de realizarem a queima dos resíduos municipais, fazem a classificação e separação das diversas frações, como por exemplo as não-combustíveis (resíduos alimentares e úmidos, matéria vegetal) que são tratadas por meio da compostagem; as reaproveitáveis (latas, papéis, papelão, plásticos) que são tratadas por meio da reciclagem e as combustíveis não-recicláveis que são queimadas por meio de incineradores que operam segundo um ciclo térmico com turbina a vapor ou a gás, realizando, portanto, a recuperação de energia residual (embora a energia elétrica gerada deva ser encarada apenas como um sub-produto). Essa última fração seria transformada em RDF antes de ser incinerada, fornecendo, assim, uma queima mais rápida e com um controle maior do processo.

Naquela época, em Beirute, as duas maiores unidades destinadas a classificação de resíduos sólidos municipais e que operam segundo este esquema estavam localizadas nos subúrbios meridionais, como o incinerador Amrousiyeh, com uma capacidade de incineração de 250 toneladas/dia, e sobre o litoral do Distrito Central, como o incinerador Normandie, que incinerava o equivalente à 500 toneladas/dia de lixo remanescente.

De acordo com Haneda (1995), no Japão os resíduos são classificados em gerais e industriais. Da quantidade total de 50 milhões de toneladas de resíduos gerais produzidas por ano observa-se que 82% estão relacionadas à fração de combustíveis, 11% à fração de não-combustíveis e o restante compreende os objetos de tamanho grande e que muitas vezes são descartados (como, por exemplo, os aparelhos de uso doméstico). Com relação aos resíduos industriais pode-se dizer que das 253 milhões de toneladas produzidas por ano, 39% estão representadas pelos lixos orgânicos, 26% pelas escórias minerais, 9% pelos ácidos residuais, 6% pelos resíduos de poder calorífico elevado (como o óleo residual (9.000 kcal/kg); os plásticos residuais (7.300 kcal/kg); os restos de papel (3.300 kcal/kg) e de borracha (8.100

kcal/kg) e os cavacos (3.900 kcal/kg)) e o restante (20%) sendo representadas por outras 10 espécies de resíduos industriais que se encontram totalmente misturadas.

Segundo estatísticas fornecidas pelo Ministério da Saúde e do Bem-Estar e pelo Ministério das Indústrias do Japão, para o período compreendido entre 1987-1989 a taxa de crescimento dos resíduos gerais girava em torno de 3,5% ao ano e em contrapartida a taxa de aumento dos resíduos industriais encontrava-se situada numa média de 1,4% ao ano. Foi com base nesses dados e no fato de que aproximadamente 1kg/dia de resíduos municipais era gerado por cada pessoa no Japão que a incineração tornou-se o método principal de classificação do lixo urbano. A figura 3.6 evidencia este crescimento, enfatizando que em 1984 a incineração representou 69% dos métodos utilizados para esta finalidade, já em 1989 alcançou 74% e era esperado para o ano de 1995 que alcançasse a marca de 84%.



Fonte: Haneda, 1995

Figura 3.6 Métodos de classificação de resíduos

Dessa forma, muitas unidades de incineração com uma capacidade estimada em 1.800 toneladas/dia (e que ainda se encontram em plena atividade todos os dias) foram sendo construídas, em muitos casos próximas às vizinhanças de áreas residenciais e sempre sendo controladas com relação aos poluentes atmosféricos, por medidas ambientalmente satisfatórias. Assim, no final do ano de 1991 havia um total de 108 usinas elétricas que faziam

a queima de resíduo municipal. O calor residual obtido pela incineração do lixo urbano era utilizado para as produções de água quente (com o propósito de derreter a neve que ficava empilhada nas estradas e providenciar água aquecida para as piscinas térmicas e instalações em geral) e vapor que, por sua vez, era utilizado para a produção de 320 MW de energia elétrica, com uma geração anual de aproximadamente 2.200 GWh, sendo que todo o excedente de eletricidade era vendido para o exterior.

A tabela 3.2 ilustra como este último problema pode influenciar, também, no desenvolvimento da eficiência térmica bruta nas unidades de incineração de resíduos situadas neste país.

Tabela 3.2 - Condição da eficiência de usinas elétricas com queima de resíduo municipal no Japão.

		Pressão de Vapor (kgf/cm²)	Temperatura de Vapor (°C)	Eficiência (%)
Yokohama Tsurumi	(22.000 kW)	26	290	12,6
Tokyo Meguro	(11.000 kW)	30	300	13,5
Tokyo Ohta 2	(15.000 kW)	30	300	14,7
Saitama East 2	(24.000 kW)	43	380	20,6

Fonte: Haneda (1995)

Berenyi (1996) relatou que a capacidade média projetada das unidades de combustão de resíduo municipal nos Estados Unidos era de aproximadamente 786 toneladas/dia, com uma quantidade de cinza residual estimada em 176 toneladas/dia. Isto porque muitas unidades estavam operando com duas caldeiras com uma capacidade de 300-400 toneladas/dia. Com o auxílio da tabela 3.3 vamos observar que ainda existem outras características básicas destas unidades de combustão que apenas podiam estar na fase de projeto ou que já encontravam-se na fase operacional.

Tabela 3.3 - Características das unidades de combustão de resíduo municipal: EUA, 1992.

	MÍNIMA	MÉDIA	MÁXIMA
Capacidade de combustão (t/dia)	13,00	785,85	4.000
Quantidade de cinza residual (t/dia)	1,00	175,82	935
Produção de energia elétrica (kW)	500	32.130	364.000
Produção de vapor (t/h)	1,13	105,05	1.043,28
Pressão do vapor (kPa)	206,7	3.913,52	16.536
Temperatura do vapor (°C)	100,55	338,88	540,55

Fonte: Berenyi (1996)

Neste país identificou-se até o final de 1992, através do GAA (*Governmental Advisory Associates*) a existência de 171 unidades com recuperação de energia residual que, por sua vez, estavam em estágios avançados de planejamento ou de operação. Por região, o Nordeste possuía projetos com uma extensa capacidade de combustão de 914 toneladas/dia enquanto que os menores, situados na parte Ocidental dos Estados Unidos, queimavam 579 toneladas/dia.

Nos Estados Unidos existem três tecnologias que podem ser utilizadas na realização da combustão de resíduos municipais, tais como: (1) a combustão em massa (*mass-burning*), em que o lixo é queimado ou numa caldeira especialmente projetada, ou num forno refratário ou queimador rotativo; (2) a tecnologia que utiliza o combustível derivado de resíduo (RDF) em que os refugos são ou fragmentados, ou transformados em briquetes (processo para aumentar a densidade) para serem utilizados como combustível em caldeira de leito fluidizado ou como combustível suplementar numa caldeira convencional e (3) a incineração modular, em que o resíduo é queimado numa unidade pequena de pré-fabricação.

As principais formas de energia geradas pelas unidades de combustão de resíduos municipais nos Estados Unidos são eletricidade, vapor, uma combinação de eletricidade e vapor e RDF. Como mostrado na tabela 3.4, existe uma certa estabilidade no crescimento da porcentagem de projetos que produzem apenas eletricidade.

Tabela 3.4 - Porcentagem de projetos por produto combustível primário.

ANO	1982	1984	1986	1988	1990	1992
eletricidade	20,2%	26,0%	37,4%	47,8%	49,8%	49,7%
vapor	62,6%	47,2%	32,6%	28,4%	24,4%	24,0%
eletricidade e vapor	----	13,0%	21,6%	19,4%	18,9%	19,9%
RDF	17,2%	13,8%	8,4%	4,5%	7,0%	6,4%

Fonte: Berenyi (1996)

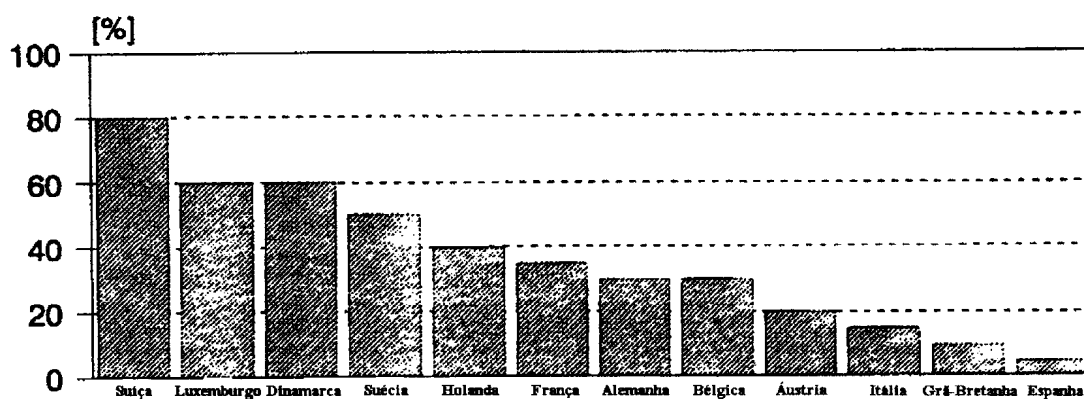
Em 1982 somente 20,2% das unidades geravam eletricidade como produto primário de energia mas, em 1992 esta percentagem aumentou para 49,7%. Tal desenvolvimento originou-se às custas das unidades de produção de vapor. A proporção destas unidades caiu de 62,6% em 1982 para 24% em 1992. Projetos co-gerando eletricidade e vapor encontram-se compreendidos num intervalo de 19-22% desde 1986. A proporção das plantas que produzem apenas RDF com o intuito de atender a uma freguesia localizada em lugares distantes caiu de 17% em 1982 para 6% em 1992.

Logo, existem várias explicações para esta tendência à produção de eletricidade. Enquanto o equipamento gerador adiciona alguns custos iniciais às unidades de combustão de resíduos, a certeza de um comprador estável para a eletricidade produzida torna-se útil na obtenção de um financiamento e na garantia de um fluxo de caixa adequado para o projeto, sendo que uma vez gerada a eletricidade pode ser facilmente transportada. O autor lembra que, nos Estados Unidos, a produção de vapor torna-se viável somente quando os consumidores estão localizados nas proximidades.

Conforme Hartenstein e Horvay (1996), os países do Oeste Europeu são caracterizados por estarem altamente industrializados e por terem uma população muito densa, como por exemplo os Países Baixos e a Bélgica, que possuem até 350 habitantes por quilómetro quadrado. Em média a população europeia produz aproximadamente 300-400 kg de resíduo doméstico por ano e por habitante. Uma das principais consequências da elevada densidade populacional é que estes países encontram-se carentes de espaço físico para a construção de mais aterros sanitários. Em adição, a implantação da incineração de resíduos nas vizinhanças das áreas urbanas é apenas alcançada se forem aplicados desenvolvimentos

tecnológicos sofisticados e que, por sua vez, estejam de acordo com as normas ambientais padrões.

Desde o início do século XX a combustão do lixo urbano na Europa visou a eliminação dos efeitos nocivos causados pelos resíduos não-tratados de aterros sanitários. Desse modo, a contaminação dos lençóis de água, as considerações higiênicas e os odores desagradáveis dos aterros tornaram-se os principais propulsores dessa prática utilizada na classificação de resíduos municipais. Hoje em dia a neutralização controlada dos resíduos, realizada em unidades avançadas de incineração, combinada com uma redução de volume de quase 90% e a utilização do calor residual na produção de vapor e eletricidade funcionam como grandes incentivadores do uso extensivo da combustão de resíduo urbano na Europa Ocidental. A figura 3.7 apresenta a porcentagem de resíduo urbano que está sendo destruída através da incineração em muitos países do Oeste Europeu.



Fonte: Hartenstein e Horvay, 1996

Figura 3.7 A porcentagem de incineração de resíduo em vários países europeus

Pesquisas revelam que há dez anos atrás existiam algumas prioridades a serem seguidas na tentativa de se eliminar os problemas relacionados aos resíduos municipais:

- evitar ao máximo o aumento da quantidade de resíduos;
- reciclar o máximo possível de resíduos;
- neutralizar os resíduos inevitáveis através da incineração e;
- fazer a separação, o tratamento e a reciclagem de resíduos durante e após o processo de combustão.

Os autores acrescentam que algumas organizações, que trabalham na classificação do lixo urbano estão tentando introduzir a reciclagem na Europa pela simples conscientização de que cada consumidor deve realizar uma coleta seletiva. Todavia, estudos recentes mostram que, do ponto de vista ambiental, nenhuma vantagem nítida podia ser atribuída a: (1) reutilização de produtos contra sua reciclagem ou; (2) a reciclagem de produtos contra sua incineração.

Apesar de todos os esforços que foram feitos com o intuito de se evitar o aumento da quantidade de resíduos, este aspecto ainda continua sendo um grande problema e com isso o número de unidades de incineração na Europa Ocidental está crescendo a cada ano.

Por um longo período, a combustão em massa foi considerada uma fonte barata para a obtenção de energia e a tecnologia utilizada foi, e ainda é, um sistema de queima com grelhas seguido por um gerador de vapor. Em atenção à combustão e neutralização de resíduos urbanos, existem também outras tecnologias disponíveis como os fornos rotativos (utilizados na incineração de resíduos sólidos, líquidos e pastosos oriundos das unidades químicas ou dos processos industriais), a combustão em leito fluidizado (utilizada na incineração de resíduos orgânicos provenientes das plantas de tratamento de águas residuais) e a pirólise (que não apresenta vantagens nem econômica e nem ecológica quando é levada em consideração a conversão total do resíduo em energia).

Com base nas pesquisas realizadas por Hunsicker, Crockett e Labode (1996), pode-se observar que na China mais de 1 bilhão de habitantes geram 200 milhões de toneladas de resíduo sólido municipal por ano. Isto é equivalente a quase 0,5 kg de lixo gerado por pessoa/por dia. Em muitas cidades da China os próprios habitantes transportam, ao longo das ruas, seus resíduos para os pontos de coleta. Em Shangai, por exemplo, a cidade mantém *containers* de ferro ou de tijolo com uma capacidade variando entre 2m³ e 4m³ em volume e que beneficiam de 200-300 casas. Em outras localidades, caminhões abertos são utilizados para apanhar os resíduos destes pontos de coleta. Já em algumas partes do país, como em Guiyang, os coletores de lixo utilizam as carroças que são puxadas pelas próprias mãos para apanharem e fazerem o transporte dos resíduos domésticos; isto porque, neste local, as estradas encontram-se limitadas e o custo da compra de um caminhão é muito alto.

O despejo de resíduos à céu aberto constitui um meio primário para a classificação dos mesmos na China. Nas áreas rurais, por exemplo, o lixo ou é empilhado ao longo das

rodovias ou é utilizado como um enchimento para os terrenos mais baixos. Tradicionalmente, após um intervalo de tempo adequado para a decomposição, os agricultores separam e, em seguida, espalham os resíduos municipais em seus campos como se fosse um fertilizante do solo.

A indústria de reciclagem, na China, tem operado com mais de 100.000 unidades de recuperação de resíduos espalhados por todo o país e entre 400-450 unidades de processamento tem-se empregado aproximadamente de 300.000 a 500.000 pessoas. Com isto, surge com os catadores uma economia informal extensa baseada na atividade de revirar as pilhas de lixo para encontrar resíduos recicláveis.

Por causa do conteúdo elevado de alimentos e cinzas, o fluxo de resíduos gerados naquele país possui muita umidade e materiais não-combustíveis sendo, por isso, impróprio para a prática da incineração. Porém, em algumas áreas urbanas, onde o óleo pode ser substituído pelo carvão como uma fonte de aquecimento e onde uma população rica consome mais produtos industrializados e embalados, a incineração está sendo considerada como um método alternativo para a classificação dos resíduos sólidos. Em Shangai, por exemplo, tem-se considerado o desenvolvimento de uma unidade que faz a transformação do lixo em energia através da queima de 300 toneladas de resíduo urbano por dia.

Na Índia as frações de resíduos inorgânicos e alimentares são elevadas, excedendo a 90% da quantidade total de lixo urbano gerado; como na China, a maior parte dos resíduos municipais (acima de 90%) são classificados em aterros sanitários ou depositados em áreas descobertas. A compostagem de resíduos é também praticada na Índia e, até meados de 1985, foi relatado que 25 sistemas mecânicos dessa prática estavam em operação naquele país. A reciclagem encontra-se diretamente ligada na ação de revolvimento dos lixões urbanos. Por exemplo, em Nova Delhi, dez entre milhares de catadores de recicláveis, geralmente crianças, exercem sua função nas caixas de coleta ou em áreas destinadas à classificação de resíduos sólidos.

A combustão de resíduos não é uma prática habitual na Índia e até a conclusão da pesquisa de Hunsicker, Crockett e Labode, 1996, apenas um único incinerador com uma capacidade estimada em 120 toneladas/dia havia sido construído na cidade de Calcutá, permanecendo, desse modo, em operação por um curto período de tempo. Pesquisas relatam

que a cidade de Nova Delhi estava planejando a implementação de uma unidade de transformação de resíduos em energia.

Na Coreia, o Ministério do Meio-Ambiente iniciou em 1986 o controle da taxa de crescimento de resíduos sólidos, com a legalização da Lei de Manuseio de Resíduos, por causa do aumento da poluição e dos problemas ambientais. Em 1991 tal lei foi modificada, classificando os resíduos sólidos em 2 grupos: (a) resíduos gerais, caracterizados como resíduos não-perigosos e (b) resíduos especificados, caracterizados como resíduos perigosos.

Devido aos preços elevados das terras, aos odores desagradáveis e as condições insalubres provenientes dos sistemas de coleta de resíduos desse país, os governantes das cidades locais planejaram aperfeiçoar a coleta de resíduos urbanos através da separação dos resíduos recicláveis e/ou aterragem ou incineração dos resíduos remanescentes. Com isto, decidiu-se construir vários incineradores que seriam localizados nos amplos complexos industriais e nas cidades densamente povoadas. A tabela 3.5 ilustra, de 1992 à 1996, o número proposto de unidades de incineração com os respectivos orçamentos, para as cidades grandes e os complexos industriais situados na Coreia. Nota-se que um total de 50 incineradores foram projetados com um orçamento médio de 60,6 milhões de dólares por incinerador.

Tabela 3.5 - Incineradores e orçamentos para as cidades grandes e para os complexos industriais na Coreia.

ANOS	NÚMERO DE INCINERADORES	ORÇAMENTO (US\$)
1992	13	700 milhões
1993	12	1,1 bilhão
1994	08	500 milhões
1995	06	200 milhões
1996	11	530 milhões

Fonte: Hunsicker, Crockett e Labode (1996)

CAPÍTULO 4

CICLOS E CONFIGURAÇÕES

4.1 Introdução

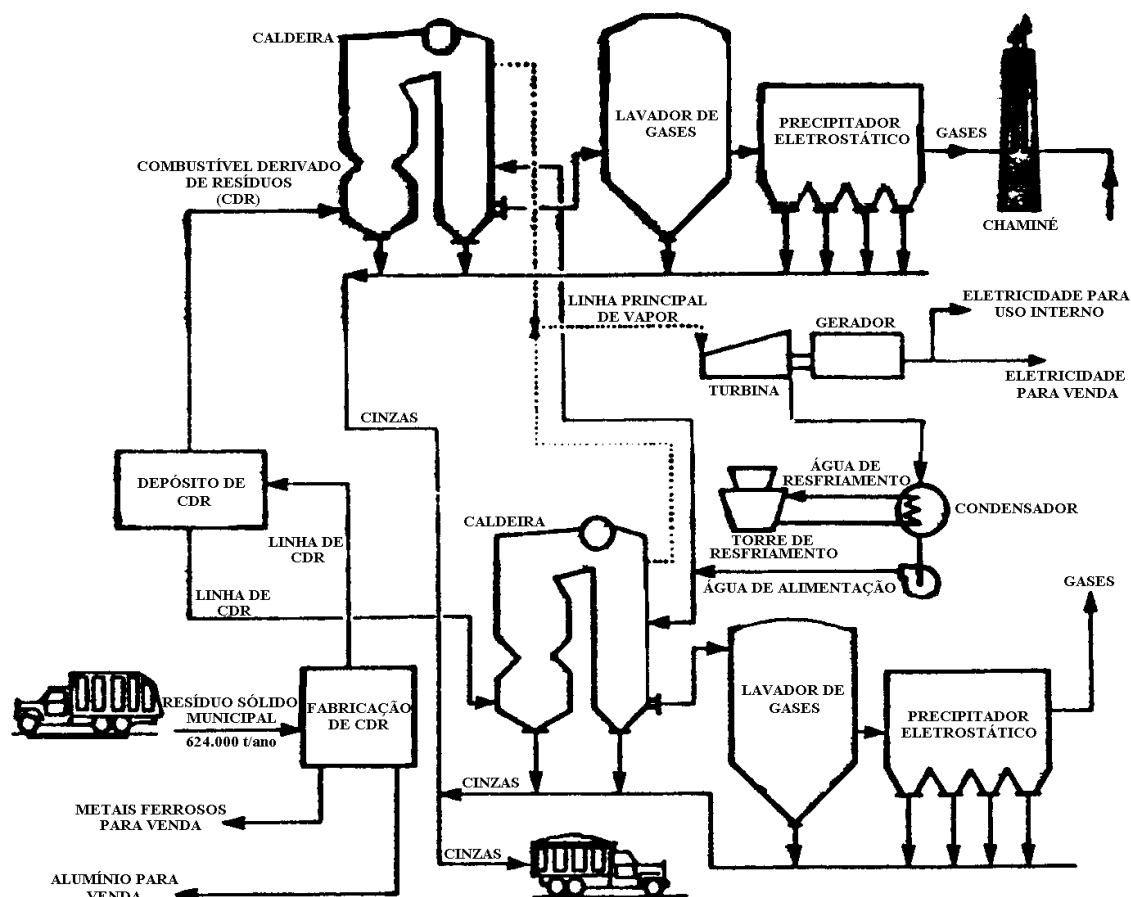
Neste capítulo apresentam-se alguns ciclos e configurações pesquisadas para a prática de incineração/combustão de resíduos sólidos municipais, relatando os diversos aspectos gerais para os vários tipos bem como os aproveitamentos possíveis das diversas energias envolvidas em cada um destes ciclos termodinâmicos; a apresentação dos mesmos se faz em ordem cronológica, identificando-se os autores e comentando as características das configurações propostas, sendo oferecidas ilustrações quando disponível.

4.2 Ciclos e configurações disponíveis para a prática de combustão/incineração

Smith (1990) propôs uma configuração que transformava 2.000 toneladas/dia de resíduos sólidos municipais em combustível derivado de resíduos (RDF), que eram, em seguida, utilizados para a geração de energia elétrica. Durante o processamento dos resíduos urbanos, 90% de metais ferrosos e 60% de latas de alumínio também eram recuperados, isto é, para cada 100 toneladas de lixo municipal processado a unidade recuperava aproximadamente 5 toneladas de metais ferrosos e 1 tonelada de latas de alumínio. A figura 4.1 ilustra tal unidade, que faz a recuperação do conteúdo energético dos recursos do Município de Palm Beach (Flórida).

Para cada 100 toneladas de resíduos sólidos municipais processados a unidade é capaz de produzir 83 toneladas de RDF. Tal configuração costuma operar com três linhas de RDF, sendo que duas delas podem operar com uma capacidade correspondente a 2.000 toneladas/dia. Em adição, consta de duas caldeiras, cada uma com capacidade para queimar 900 toneladas/dia de RDF, equivalente a 1.085 toneladas/dia de resíduos sólidos. O dimensionamento da turbina a vapor permitiu que as caldeiras pudessem ser operadas próximas de um rendimento máximo. Além disso, o autor frisou que a expansão da

capacidade de queima de RDF de 2.000 toneladas/dia para 3.000 toneladas/dia poderia ser realizada desde que fosse acrescentado à unidade uma caldeira adicional e um segundo gerador para a turbina a vapor.



Fonte: Smith, 1990

Figura 4.1 Diagrama de fluxo da unidade de recuperação de recursos em Palm Beach

Nessa configuração cada uma das caldeiras produz 140 t/h de vapor superaquecido à 5,3 MPa e 400 °C, sendo que o mesmo é utilizado para gerar aproximadamente 61,3 MW de energia elétrica, destinada tanto para uso interno da própria unidade quanto para a venda de excedente à Flórida Power & Light.

Wilson, Saba, Nuwayhid e Hamrin (1995) propuseram a configuração de uma unidade avançada de incineração de resíduos sólidos municipais, que opera segundo um ciclo de turbina à gás com aquecimento dos gases de exaustão e queima suplementar. A finalidade

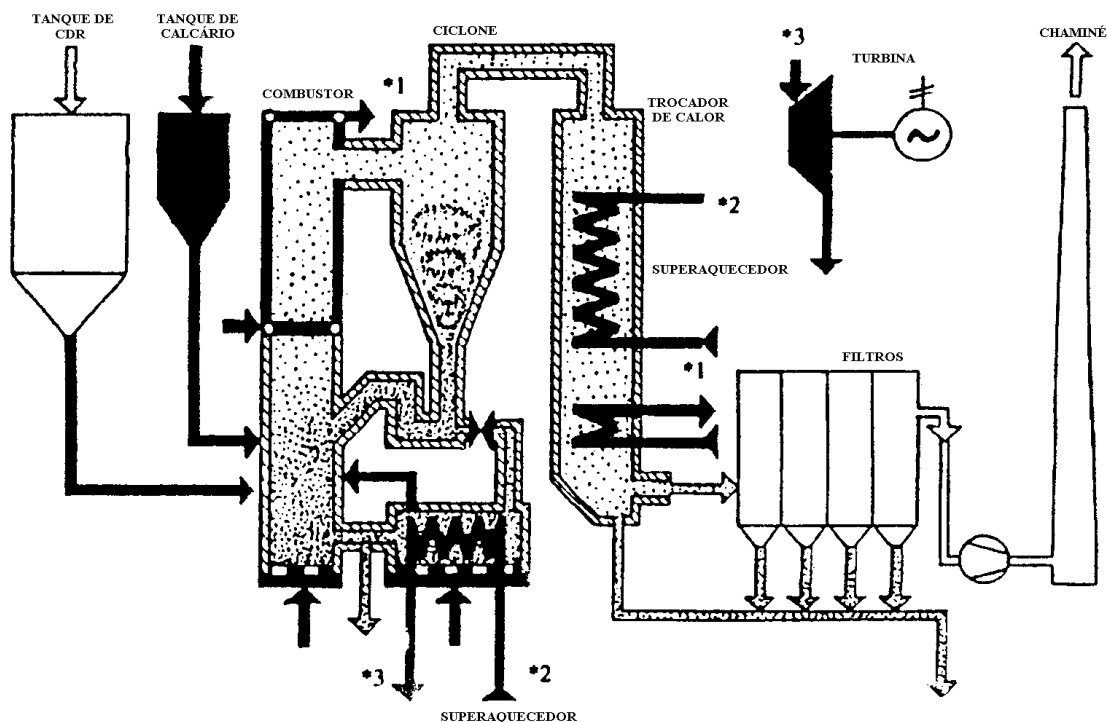
A fase destinada à purificação do gás quente, após o queimador de RDF, tem sido testada experimentalmente, portanto pode não ser requerida em tal configuração com turbina à gás. O trocador de calor é o único componente novo neste ciclo motor proposto, de modo que as superfícies de troca de calor podem ser feitas de cerâmica, segundo o formato de módulos retangulares, com o propósito de suportar as temperaturas elevadas do queimador de combustível derivado de resíduo (RDF) e fazer, quando necessário, a substituição individual desses módulos através de serviços de manutenção sem causar paradas na unidade.

Na caldeira de calor residual faz-se a remoção do calor não utilizado pelos gases de exaustão que saem do trocador, gerando dessa forma vapor ou água quente de baixa qualidade. O lavador de gases utiliza a água do refrigerador para a remoção de cloretos e outros poluentes solúveis e condensáveis provenientes do fluxo de exaustão, realizando assim o resfriamento dos gases para uma temperatura próxima da temperatura atmosférica (aproximadamente 25 °C). O ventilador induzido conta com um motor de baixo custo, que opera sobre o gás frio e úmido. Sua utilização aumenta a eficiência térmica da unidade de incineração pela redução da pressão na turbina e, também, aumenta o processo de alimentação de combustível através de uma redução na pressão do queimador de resíduo sólido para um valor inferior ao da pressão atmosférica.

O uso de um queimador de combustível líquido ou gasoso, como petróleo ou gás natural, também aumenta a eficiência térmica desse ciclo a gás de 51% para quase 60% enquanto reduz a temperatura dos gases, provenientes da combustão de RDF, no interior do trocador de calor de 1.150 °C para 870 °C. Logo, o custo da queima destes combustíveis caros e o custo da incineração de RDF poderiam ser justificados pela eficiência elevada na produção de energia elétrica e pela extensão na vida útil do trocador de calor.

Haneda (1995) propôs uma configuração que se destinava à geração de energia elétrica pela queima de combustível derivado de resíduos (RDF) produzido na Fábrica da Ecomart S.A. localizada em Mudon, nos subúrbios de Geneva. Esta unidade, constituída por uma caldeira de leito fluidizado circulante, opera baseada numa tecnologia que faz a retirada do cloro existente no próprio RDF antes mesmo de ser iniciado o processo de incineração. Tal procedimento é realizado através da combinação física entre o combustível a ser queimado e um composto contendo cálcio (como por exemplo, calcário), chegando a alcançar uma eficiência de até 95% na eliminação desse poluente ambiental. Isto, de uma

forma ou de outra, gera uma certa economia no que diz respeito ao emprego de equipamentos sofisticados para o controle das emissões de HCl e de dióxidos clorados, provenientes dos gases de exaustão da chaminé. A figura 4.3 mostra um diagrama de fluxo desta configuração que, no entanto, representou um progresso significativo no campo da geração de energia elétrica com alta eficiência no Japão.



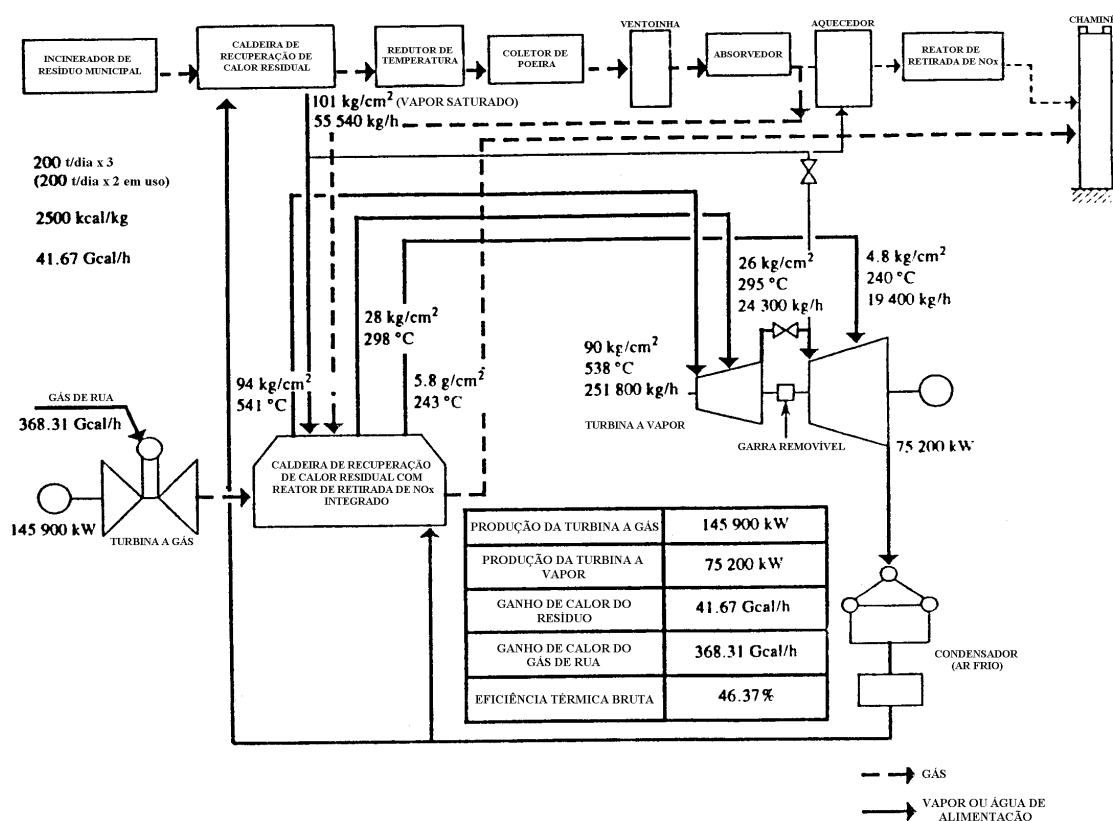
Fonte: Haneda, 1995

Figura 4.3 Diagrama de fluxo da caldeira de leito fluidizado circulante

Quando coloca-se em operação uma unidade deste tipo com uma capacidade de incineração de 390 toneladas de RDF/dia e com uma produção de energia elétrica estimada em 20 MW, consegue-se alcançar uma eficiência de geração de energia em torno de 31,1%. Entretanto, ao se expandir a capacidade de queima desta unidade para quase 1.650 toneladas de RDF/dia e aumentar a produção de energia elétrica para cerca de 100 MW, a eficiência de geração de energia estará próxima de 36,8%.

Esse mesmo autor também propôs um ciclo termodinâmico no qual estava sendo desenvolvida a “super geração” de energia elétrica através da incineração de resíduos

municipais. Para que tal operação pudesse ser efetivamente realizada incluiu-se nessa configuração uma turbina a gás de eficiência elevada, comumente empregada pelas concessionárias de energia, que queima gás natural liquefeito ou óleo pesado contendo um nível baixo de enxofre na sua composição. Esse empreendimento foi feito na condição de aumentar a eficiência de geração de energia elétrica; reduzir significativamente as emissões de NO_x , incluindo a quantidade de NO_x gerada pela turbina a gás adicionada, e de CO_2 ; melhorar a distribuição das fontes convencionais de energia destinadas, principalmente, ao abastecimento das áreas rurais e, por fim, aumentar a auto-suficiência com relação ao fornecimento de eletricidade nas áreas urbanas. A figura 4.4 ilustra o diagrama de fluxo dessa “super usina elétrica” que, além de ser constituída por uma turbina à gás de 150 MW conectada a um incinerador de resíduos com uma capacidade de queima de aproximadamente 400 toneladas/dia, encerra também uma turbina à vapor que apresenta uma produção de energia elétrica estimada em 75,2 MW.



Fonte: Haneda, 1995

Figura 4.4 Diagrama de fluxo de uma “super usina elétrica” com queima de resíduo municipal (400 toneladas/dia, 220 MW)

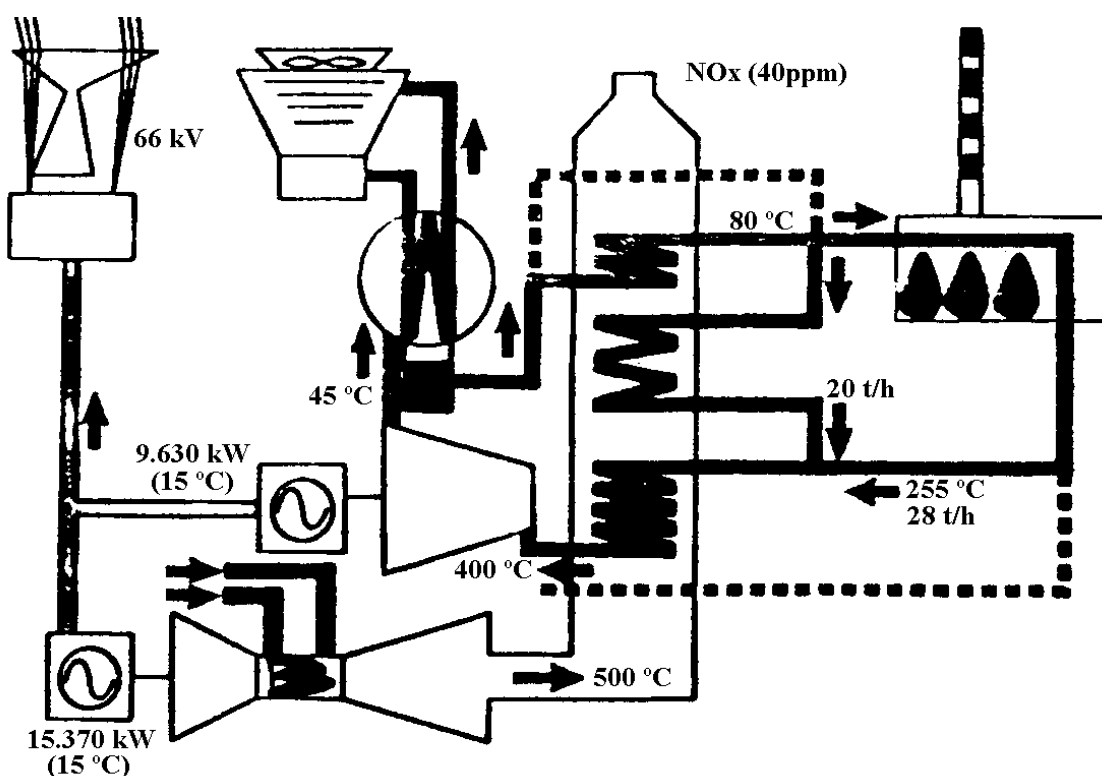
Os gases de exaustão provenientes do incinerador de resíduos urbanos são purificados com relação a todo e qualquer elemento que se mostre nocivo ao processo, com exceção do NO_x que é eliminado numa etapa posterior, através de sua passagem por um coletor de poeiras e um absorvedor do tipo via úmida, sendo introduzidos, em seguida, numa caldeira de recuperação de calor residual para que sejam aquecidos até uns $300\text{ }^\circ\text{C}$, propiciando então condições favoráveis de temperatura para o desenvolvimento da reação de retirada de NO_x efetuada por um reator integrado de eficiência elevada, desenvolvido para unidades que operam segundo um ciclo combinado. Além disso, vapor saturado à uma pressão absoluta de $10,1\text{ MPa}$ e com uma vazão de 55.540 kg/h é inserido no superaquecedor dessa caldeira de recuperação para a obtenção de vapor superaquecido a uma pressão absoluta de $9,0\text{ MPa}$ e temperatura de $538\text{ }^\circ\text{C}$ que seria, por sua vez, utilizado na turbina a vapor de eficiência elevada para a geração de energia elétrica.

Com o passar dos anos, pesquisas baseadas em considerações ambientais, na utilização efetiva da energia não-empregada e no aperfeiçoamento da auto-suficiência do fornecimento de eletricidade nas áreas urbanas levaram à conclusão de que um gerador de turbina a gás de 150 MW com uma eficiência de geração de energia de $49,36\%$, ao invés de um gerador de turbina a gás de 12 MW com uma eficiência de geração de energia de $38,85\%$ era o mais apropriado para o caso de um incinerador de capacidade similar ao deste ciclo.

Em artigo publicado na *Diesel & Gas Turbine Worldwide* (1997) descreveu-se uma configuração proposta pelo Professor M. Hirata do Instituto de Tecnologia Shibaura que incluía a aplicação de sistemas de incineração de refugos adaptados com uma turbina a gás para tentar estimular a eficiência térmica sem a possível ocorrência de alguma alteração nos materiais que constituem os tubos da caldeira. A *New Energy Development Organization* patrocinou o desenvolvimento deste projeto, denominado Super Usina Elétrica de Incineração de Resíduos. Em novembro de 1996 a primeira unidade, conhecida como a Estação Energética Takahama (ver figura 4.5) e construída pela Hitachi Zosen Corporation, iniciou sua operação pelo Departamento de Utilidades Públicas da Prefeitura de Gumma.

Os dois fornos de incineração de resíduos municipais desse sistema combinado, cada um com uma capacidade estimada em 150 toneladas/dia , são utilizados para a geração de energia elétrica através do emprego de uma turbina a vapor. Em adição, uma turbina a gás

aeroderivativa GE, que opera com gás natural como combustível, também foi usada para fornecer gases de exaustão para gerar vapor superaquecido. Portanto, as 28 toneladas/hora de vapor gerado a 255 °C pelos fornos de combustão são enviadas diretamente para o interior de uma caldeira de recuperação de calor, no qual o gás de exaustão da turbina a gás é também introduzido para superaquecer o vapor. Desse modo, o vapor já superaquecido entra na turbina a vapor para gerar 9000 kW de eletricidade. O vapor de exaustão da turbina é, então, introduzido num condensador para a produção de água líquida, da qual 28 toneladas/hora são enviadas outra vez à caldeira de incineração e as outras 22 toneladas/hora diretamente para a caldeira de recuperação de calor transformando-se em vapor novamente.



Fonte: Diesel & Gas Turbine Worldwide, 1997

Figura 4.5 Diagrama da Estação Energética Takahama

Assim, essa usina elétrica consegue a geração global de quase 23,7 MW com uma eficiência térmica em torno de 31,1%, aproximadamente 20% mais quando comparada a um sistema convencional de incineração de resíduos urbanos baseado também na geração de

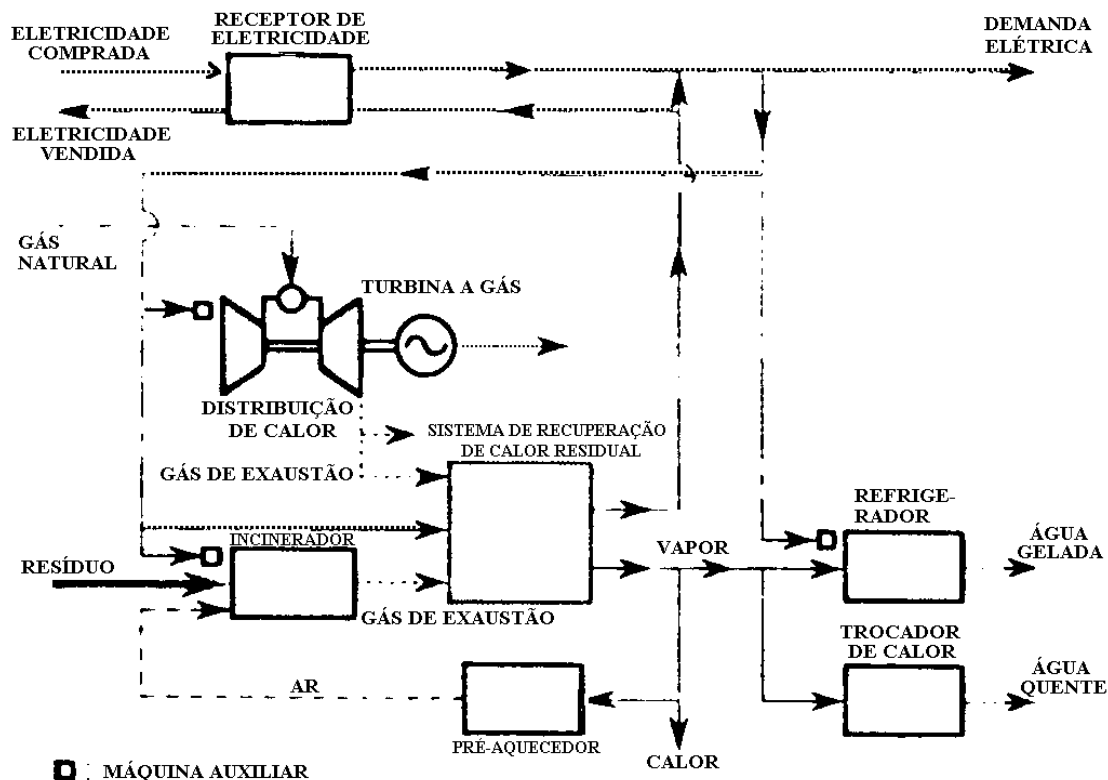
energia elétrica. Uma outra vantagem da Estação Energética Takahama é sua localização adjacente à unidade de incineração.

Existem outras idéias de aplicação de turbina a gás para as unidades de incineração de refugos. O caso desta Estação Energética é de um ciclo combinado (turbinas a vapor e a gás), o qual é adequado para uma unidade de incineração de capacidade ampla. Mas, para as unidades de incineração de capacidade menor, tal como 100 toneladas/dia ou até menos, este tipo de sistema torna-se inviável. O mais aconselhável seria a utilização de um sistema de injeção de vapor em conjunto com a operação de uma turbina a gás com uma temperatura de entrada de 1.300 °C e um rendimento elétrico de 4.000 kW. Tal sistema não possui nem turbina à vapor e nem condensador, empregando apenas esse tipo de turbina a gás, consegue gerar uma energia total por volta de 13 MW e reduzir para um valor limite a concentração de NO_x contido nos gases da chaminé.

Ito, Yokoyama e Shimoda (1997), para pesquisarem os efeitos causados pela co-geração e pelo reaproveitamento energético no processo de combustão de resíduos, propuseram três unidades de incineração de resíduos municipais consideradas a seguir:

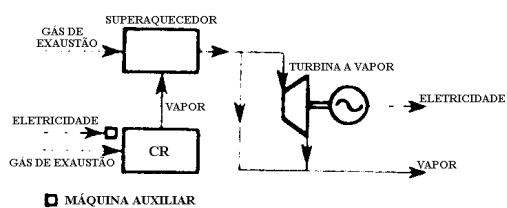
- **Unidade A: super planta de incineração de resíduos com co-geração;**
- **Unidade B: planta convencional de incineração de resíduos com co-geração combinada a uma planta com turbina a gás e que desenvolve também a tecnologia de co-geração;**
- **Unidade C: planta convencional de incineração de resíduos sem co-geração mais uma planta com turbina a gás e que, por sua vez, faz uso da tecnologia de co-geração.**

A figura 4.6 mostra um diagrama esquemático de uma configuração geral que é comum às unidades A e B. Em seguida, as figuras 4.7(a) e 4.7(b) ilustram esquemas para configurações de sistemas que fazem a recuperação do calor residual e que são utilizados nas unidades A e B, respectivamente, e os mesmos ainda indicam algumas diferenças importantes entre estas duas unidades de incineração.

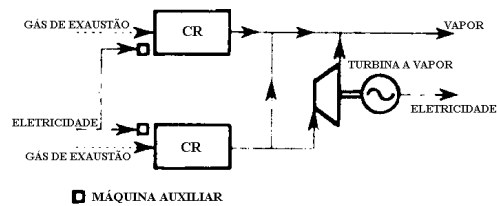


Fonte: Ito, Yokoyama e Shimoda, 1997

Figura 4.6 Configuração geral de uma unidade de incineração de resíduos com co-geração



(a) Super unidade de incineração de resíduos com co-geração (Planta A)



(b) Unidade convencional de incineração de resíduos com co-geração (Planta B)

Fonte: Ito, Yokoyama e Shimoda, 1997

Figura 4.7 Configurações de sistemas de recuperação do calor de exaustão

Na unidade A, os resíduos são queimados em incineradores e o calor de exaustão é reaproveitado nas caldeiras para recuperação de calor residual com o intuito de gerar vapor a uma temperatura baixa. Por outro lado, os geradores de turbina a gás são operados,

utilizando como combustível o gás natural, para gerar eletricidade e calor de exaustão, o qual é empregado para superaquecer o vapor produzido à baixa temperatura. O vapor superaquecido é usado para colocar em funcionamento os geradores de turbina a vapor com uma eficiência de geração de energia elevada. Com isso, o vapor que se encontra a baixa pressão, após ser empregado nas turbinas a vapor, é utilizado para fornecer energia térmica ao aquecimento e resfriamento de bairros (*district heating and cooling*). Trocadores de calor e refrigeradores por absorção de vapor são instalados para fornecer água quente e fria, respectivamente. A eletricidade gerada através da operação de ambos os geradores das turbinas a vapor e a gás é distribuída aos bairros e utilizada para operar maquinaria auxiliar existente na unidade. Uma possível falta de energia elétrica é suprida através de um equipamento que funciona como um receptor da eletricidade vinda de uma companhia externa de abastecimento de energia, sendo que um excedente de eletricidade pode ser retornado à mesma.

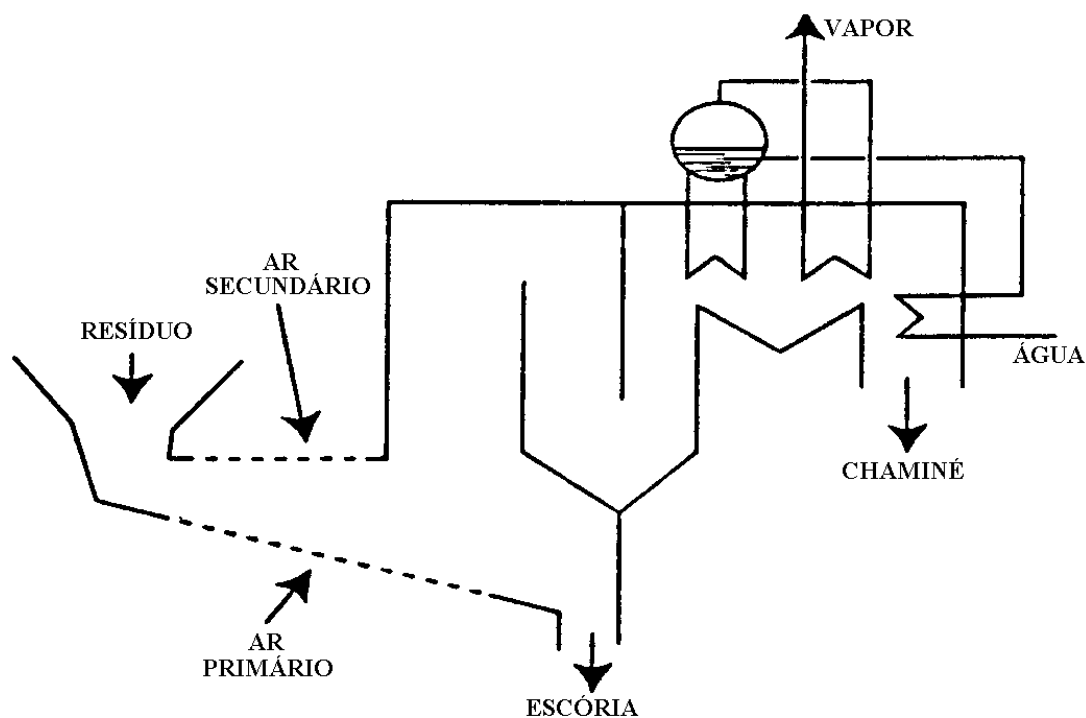
Na unidade B, caldeiras convencionais de recuperação de calor residual são instaladas, ao invés de superaquecedores, para recuperar o calor de exaustão proveniente das turbinas a gás. O vapor gerado nestas caldeiras pelos incineradores de resíduos urbanos é distribuído para as turbinas a vapor. Por outro lado, o vapor gerado por estas caldeiras de recuperação e que, por sua vez, é enviado diretamente para as turbinas a gás é utilizado para o aquecimento e resfriamento de bairros.

Na unidade C, uma unidade de incineração de resíduos equipada com incineradores sem turbinas a vapor e uma unidade com turbina a gás que emprega a co-geração são instaladas independentemente para queimar resíduos municipais e suprir as necessidades energéticas dos bairros, respectivamente.

A capacidade do gerador de turbina a gás na unidade C é mais que suficiente para o fornecimento de água fria e quente, utilizando apenas o calor de exaustão da própria turbina a gás. Entretanto, a capacidade de um gerador para este mesmo tipo de turbina na unidade A e B vem a ser bem menor. Isto porque o calor de exaustão proveniente do incinerador de resíduos pode ser utilizado para a geração de eletricidade e vapor. Comparando as unidades A e B, concluímos que a capacidade do gerador de turbina a vapor da unidade A é 33,8% maior do que a capacidade empregada na unidade B. Isto porque a eficiência de geração de

energia do gerador de turbina a vapor é aumentada fazendo-se o reaproveitamento energético.

Krobitsyn, Hirs e Jellema (1997), para avaliarem o efeito causado pela integração de uma turbina a gás em configurações distintas, fizeram uma comparação entre quatro casos de unidades integradas e um incinerador convencional de resíduos sólidos municipais, o qual encontra-se ilustrado na figura 4.8 como uma referência básica. Estima-se que a quantidade de resíduo processado por todas essas unidades foi da ordem de 230.000 toneladas de resíduo sólido por ano, ou 33 toneladas por hora. Essa quantidade de rejeitos é semelhante a uma entrada de combustível, na caldeira de incineração, de 92 MW, se o poder calorífico inferior do resíduo estiver compreendido na média de cerca de 10 MJ/kg.

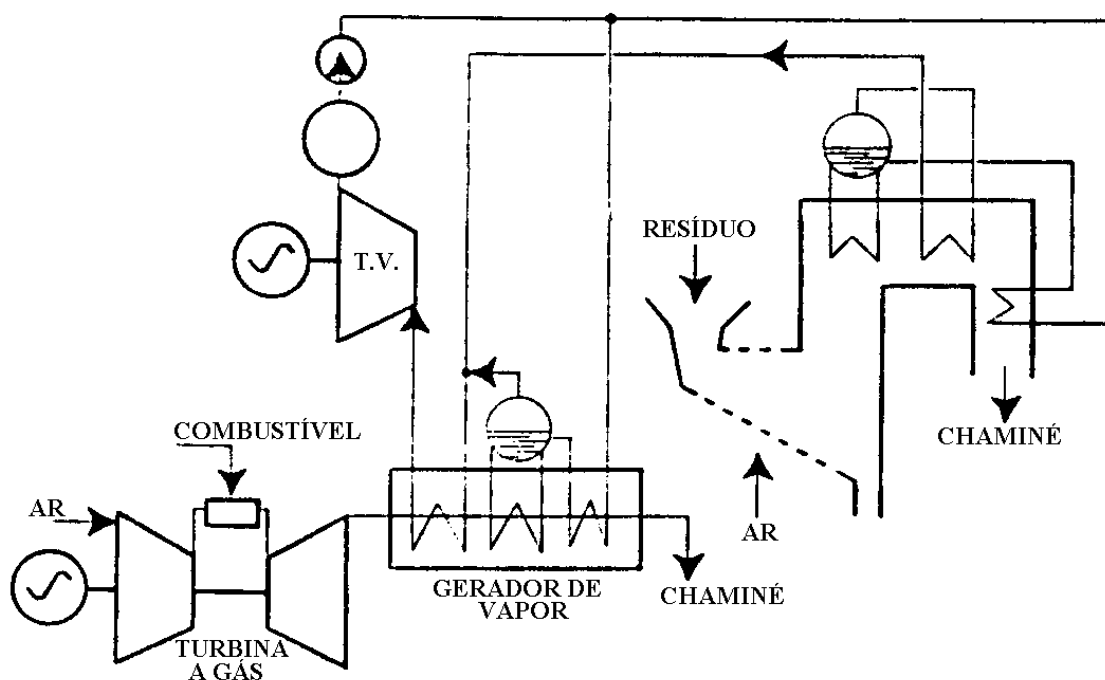


Fonte: Krobitsyn, Hirs e Jellema, 1997

Figura 4.8 Esquema simplificado de um incinerador de resíduo sólido (Caso de referência)

O primeiro caso representa a combinação entre uma unidade com turbina a gás que encerra um gerador de vapor com recuperação de calor e um incinerador de resíduos. O vapor oriundo da unidade de incineração é transposto ao gerador de vapor com recuperação

de calor, onde é superaquecido a 520 °C e, por conseguinte, é enviado a turbina a vapor (ver figura 4.9). Desde então o calor de exaustão proveniente do gerador de vapor tem uma temperatura estimada em 80-100 °C e pode ser utilizado na caldeira de incineração como um ar secundário. Esta modificação do caso anterior (primeiro caso) é classificada como um segundo caso.



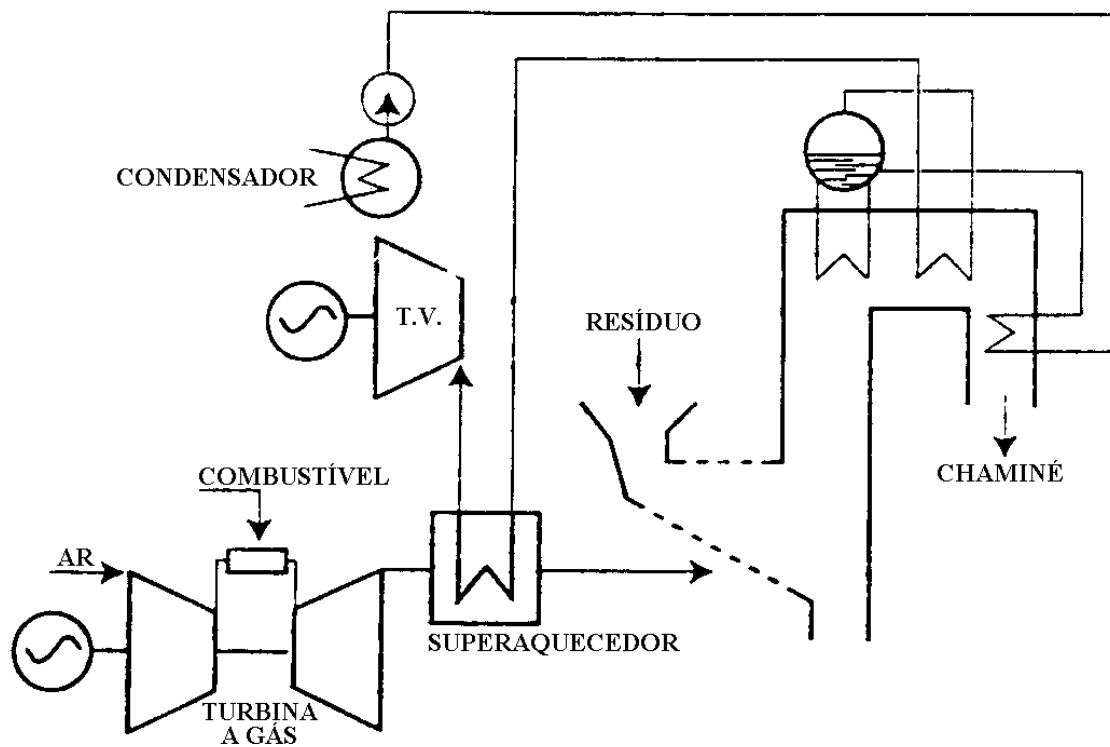
Fonte: Krobitsyn, Hirs e Jellema, 1997

Figura 4.9 Configuração de um gerador de vapor com recuperação de calor paralelo à uma caldeira de incineração (Caso 1)

No terceiro caso, o calor de exaustão da turbina a gás é parcialmente recuperado num superaquecedor para que, em seguida, possa ser enviado ao incinerador de resíduos sólidos municipais (figura 4.10). Nessa configuração, um fluxo grande de vapor oriundo da caldeira de incineração não permite que a temperatura do vapor no interior do superaquecedor ultrapasse cerca de 486 °C.

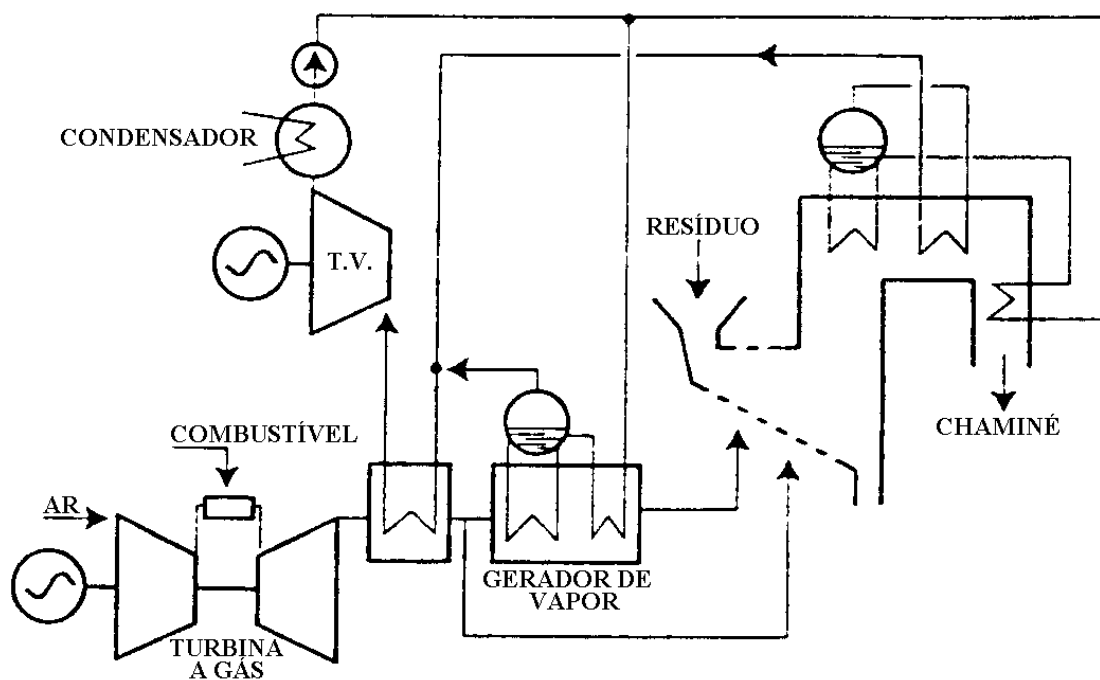
Portanto, um quarto caso constituído por um gerador de vapor com recuperação de calor e um desvio (*bypass*) para a exaustão estava sendo considerado. O diagrama esquemático deste caso é dado na figura 4.11. Nessa planta um vapor superaquecido a 520°

C pode ser conseguido através de um controle na quantidade de gás proveniente da caldeira e que, por sua vez, é conduzido diretamente ao forno pelo desvio.



Fonte: Krobitsyn, Hirs e Jellema, 1997

Figura 4.10 Configuração de uma caldeira de incineração com superaquecimento (Caso 3)



Fonte: Krobitsyn, Hirs e Jellema, 1997

Figura 4.11 Configuração de um gerador de vapor com recuperação de calor paralelo à uma caldeira de incineração, tendo um desvio para a exaustão (Caso 4)

Em todas as configurações integradas, a pressão do vapor na caldeira de incineração foi elevada de 4,0 MPa para uns 8,0-10,0 MPa com o intuito de se tirar maior proveito do superaquecimento. Um resumo dos resultados de toda esta comparação analítica é dado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resumo dos resultados da análise feita entre as plantas integradas.

	Referência	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Entrada de Combustível (MW)					
Caldeira de incineração	92	92	92	92	92
Turbina a gás	0	100,14	101,39	48,44	104,73
Total	92	192,14	193,39	140,44	196,73
Fração de resíduo sólido municipal	100%	47,88%	47,57%	65,51%	46,76%
Fração de gás natural	0%	52,12%	52,43%	34,49%	53,24%
Produção de Energia Elétrica (MW)					
Turbina a vapor	22,92	46,46	46,92	36,89	47,79
Turbina a gás	0	31,96	32,37	15,48	33,44
Total	22,92	78,42	79,29	52,36	81,23
Eficiência baseada no poder calorífico inferior	24,91%	40,81%	41,00%	37,28%	41,29%

Fonte: Krobetsyn, Hirs e Jellema (1997)

Como pode ser observado, a integração de um incinerador de resíduos sólidos municipais com uma unidade com turbina a gás leva a um aumento significativo da eficiência bruta, visto que a mesma, baseada no poder calorífico inferior, melhorou de 24,9% no caso de referência até 41,3% no caso 4. Conforme mostrado na tabela 4.1, o quarto caso expressa o resultado da contribuição de uma turbina a gás, que equivale a 53,2% da entrada total de combustível. O uso do calor de exaustão, proveniente do gerador de vapor com recuperação de calor, como um ar secundário para a combustão no caso 2 tem um efeito pequeno na eficiência total. Já que o objetivo principal de uma unidade de incineração é processar resíduos, a fração de gás natural deveria ser limitada, embora sempre mantendo uma eficiência elevada. Com base nesta afirmação o caso 3 representa uma boa ligação entre a fração de resíduo sólido municipal na entrada total de combustível e a eficiência da planta, sendo que esta é tão alta quanto 37,3% e aquela encontra-se estimada em 65%.

4.3 Comentários

Este quarto capítulo, além de apresentar as propostas de diversos autores sobre os ciclos ou configurações utilizados para a prática de combustão/incineração de resíduos sólidos municipais, serve de base para o Capítulo 5, no qual realizaremos as análises técnica e econômica de um ciclo a vapor e um ciclo combinado, com o intuito de se verificar as eficiências de geração de energia elétrica e calor, a receita anual esperada, o custo de investimento no sistema instalado e o tempo de retorno do capital investido (*payback*).

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO PARA A REGIÃO DE GUARATINGUETÁ

5.1 Introdução

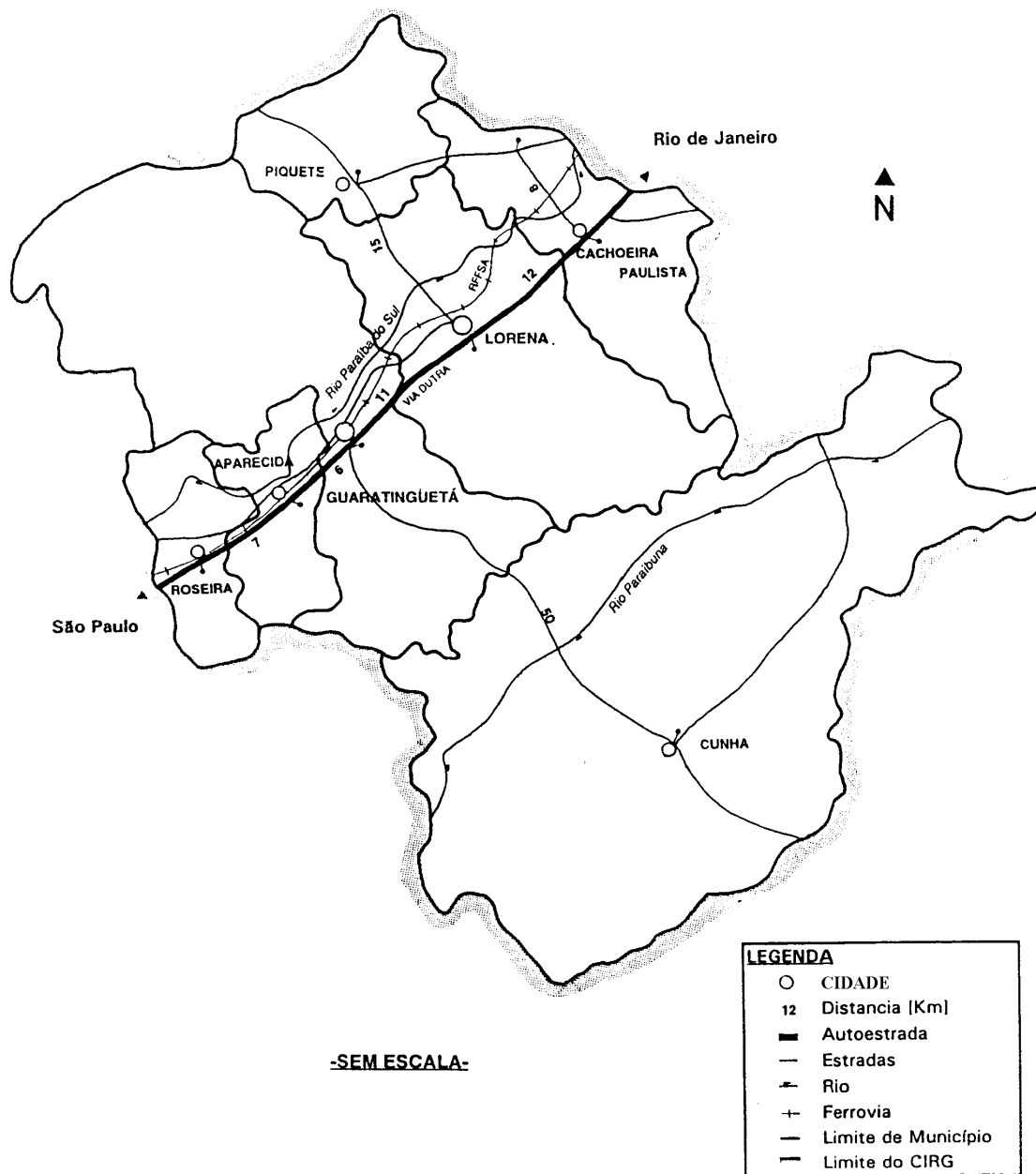
Este capítulo procura apresentar alguns dados relativos à Região de Guaratinguetá e a situação dos resíduos sólidos municipais na mesma (quantidade e composição do lixo produzido e valores estimados para o poder calorífico e para a porcentagem de umidade) e que, por sua vez estão contidos no relatório de dois engenheiros alemães, “Conceito Integrado de Resíduos Sólidos para a Região de Guaratinguetá/Brasil” (Wehenpohl e Pfaff-Simoneit, 1993). Logo em seguida, serão propostas algumas configurações de combustão/incineração de resíduos sólidos urbanos para que possam ser efetuadas as análises técnica e econômica e, desse modo, concluir qual ou quais dessas usinas elétricas são viáveis para a geração de eletricidade.

5.2 Apresentação geral dos dados

5.2.1 A Região de Guaratinguetá

A Região de Guaratinguetá localiza-se na parte leste do Estado de São Paulo, entre São Paulo e Rio de Janeiro e pertence à região administrativa de São José dos Campos (ver figura 5.1). A região ainda faz parte da Microrregião do Vale do Paraíba, que teve um papel importante na formação histórica de São Paulo e do Brasil. Ela sofreu nas décadas passadas uma grande transformação da sua estrutura sócio-econômica em consequência da industrialização e urbanização do país; esse processo alterou a paisagem e trouxe agravos ao meio ambiente. Na procura de soluções para problemas complexos, como saneamento básico, remoção do resíduo municipal e limpeza urbana, em 1985 as Prefeituras Municipais

de Aparecida, Cachoeira Paulista, Cunha, Guaratinguetá, Lorena, Piquete e Roseira criaram o Consórcio Intermunicipal da Região de Guaratinguetá (CIRG).



Fonte: Wehenpohl e Pfaff-Simoneit, 1993

Figura 5.1 Mapa da Região de Guaratinguetá

A partir de 1º de janeiro de 1993 o antigo bairro de Guaratinguetá, Potim, se transformou em um município independente e, ao mesmo tempo, integrou-se ao consórcio

como o oitavo membro. Pois, segundo Wehenpohl e Pfaff-Simoneit (1993), não é viável obter uma solução adequada para cada município, devido ao tamanho de muitos deles e ao número de seus habitantes. Vários problemas ligados ao sistema de lixo somente podem ser resolvidos de forma adequada quando feitos em maior escala.

A região é localizada entre os dois maiores centros produtores e consumidores do Brasil, São Paulo e Rio de Janeiro, servida pela rodovia de maior tráfego de América do Sul, a Rodovia Presidente Dutra. No norte da região de Guaratinguetá encontra-se a Serra da Mantiqueira, no sul a Serra Quebra Cangalha e a Serra do Mar. No vale, localizado entre as duas serras encontra-se o Rio Paraíba do Sul. Neste desembocam, na altura de Guaratinguetá, o Ribeirão São Gonçalo, o Ribeirão dos Motas e o Ribeirão Guaratinguetá.

O Município de Aparecida ocupa uma área de 112 km², sendo 34 km² de zona urbana e 78 km² de zona rural. Limita-se apenas com os municípios de Guaratinguetá, Lagoinha e Roseira. Todo o município situa-se na zona intertropical, chamada zona tórrida. O município apresenta uma população urbana de 30.000 habitantes e uma população rural de 5.000 habitantes, perfazendo um total de 35.000 habitantes. A densidade demográfica é igual a 260 habitantes por km². Tem como característica ser uma cidade turística-religiosa, sendo visitada anualmente por uma população flutuante que varia de 8 a 12 milhões de peregrinos. Segundo o censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 1991, Aparecida tem uma população de 33.289 habitantes, dos quais 32.615 são urbanos e 674 são rurais. Em função do turismo religioso o número de hotéis (107 em 1988), bares (160) e restaurantes (27 em 1988) é significativo.

O Município de Cachoeira Paulista ocupa uma área de 277 km² e está situado no Vale do Paraíba, entre as Serras da Mantiqueira e Bocaina, em plena bacia sedimentar terciária. É servido pela estrada de Ferro Central do Brasil da R.F.F.S.A. e a rodovia Presidente Dutra. Encontra-se ligado aos municípios vizinhos de Lorena, Cruzeiro, Piquete e Silveiras por estradas pavimentadas. O número de habitantes é estimado em 30.000; segundo o censo do IBGE de 1991 o número é de 23.108 habitantes (18.630 urbanos e 4.478 rurais). A taxa de crescimento anual referente ao Censo de 1980 é de 1,07%.

Cachoeira Paulista é uma cidade cuja maior parte de sua renda provém da atividade pecuária e da lavoura, tendo uma produção média de 35.000 litros de leite diários tratados pela Cooperativa de Laticínios de Cachoeira Paulista (COLACAP). Existem ainda no

município pequenas indústrias, como as de confecções, de cerâmicas artísticas, de telhas, de tijolos e de produtos derivados do leite.

Com uma extensão de 1.399 km² o Município da Estância Climática de Cunha é um dos maiores do Estado de São Paulo. A topografia é predominantemente montanhosa e a altitude normal varia de 900 a 1.600 metros. Cunha limita-se com os municípios de São Luiz do Paraitinga, Lagoinha, Guaratinguetá, Lorena, Silveiras, São José do Barreiro, Ubatuba, Areias e Parati. Sua economia de subsistência está baseada na agro-pecuária e o município possui 23.000 habitantes, dos quais 10.000 vivem na área urbana.

Entre os membros do CIRG o Município de Guaratinguetá é o mais populoso, tendo 90% dos 120.000 habitantes localizados na zona urbana (censo do IBGE: 101.117 habitantes em 1991), e ocupa uma área de 825 km². Guaratinguetá limita-se ao norte com Piquete e Delfim Moreira, ao sul com Lagoinha e Cunha, à leste com Lorena e à oeste com Aparecida, Roseira, Pindamonhangaba e Campos do Jordão.

Na prefeitura estão cadastradas 36 indústrias de pequeno porte, 15 indústrias de médio porte e 18 indústrias de grande porte, sendo que a maior delas é a Badische Anelin- und Sodafabrik (BASF) com cerca de 1.300 empregados.

A extensão do Município de Lorena é de 470 km², dos quais 25 km² correspondem a área urbana. Lorena limita-se ao norte com Piquete, à leste com Cachoeira Paulista e Silveiras, ao sul com Cunha e à oeste com Guaratinguetá. A população encontra-se estimada em torno de 105.000 habitantes, cujos 96.000 residem na zona urbana, e a taxa anual de crescimento é de 2,11%.

O número total de indústrias no município é de 59 e as atividades predominantes em Lorena são: as indústrias (química, metalúrgica e bélica), a agricultura (arroz, feijão, mandioca e hortaliças), a bovinocultura (gado de corte e de leite) e a agro-pecuária (indústria e comércio).

A área do Município de Piquete é de 170 km² e abriga uma população de aproximadamente 18.000 habitantes, dos quais 12.000 são urbanos; segundo o censo do IBGE, Piquete tem somente 15.000 habitantes. Fora a agricultura, a economia depende da Fábrica Presidente Vargas (filial nº 1 da Indústria de Material Bélico do Brasil - IMBEL).

O menor município do CIRG é o Município de Roseira com seus 10.000 habitantes, sendo 7.000 na zona urbana e 3.000 na zona rural. Estende-se sobre 129 km² e sua principal atividade econômica é a agricultura.

A tabela 5.1 mostra, na forma de uma sinopse, os dados estatísticos dos municípios que integram o CIRG.

Tabela 5.1 - Dados estatísticos dos municípios do CIRG.

Municípios	Área (km ²)	Habitantes IBGE (1991)	Habitantes estimativas	Habitantes urbana	Habitantes rural
Aparecida	112	23.289	35.000	30.000	5.000
Cach. Paulista	277	23.108	30.000	28.500	1.500
Cunha	1.339	----	23.000	10.000	13.000
Guaratinguetá	825	101.117	120.000	108.000	12.000
Lorena	470	73.147	105.000	96.000	9.000
Piquete	170	15.000	18.000	12.000	6.000
Roseira	129	----	10.000	7.000	3.000
CIRG	3.322	----	341.000	291.500	49.500

Fonte: Wehenpohl e Pfaff-Simoneit (1993)

A partir de 1º de janeiro de 1993 o novo Município de Potim, um antigo bairro de Guaratinguetá, ganhou sua autonomia e começou a fazer parte do CIRG como o seu oitavo membro. Por ter uma população compreendida em torno de 9.000 habitantes, este município foi classificado como o menor no grupo daqueles que integram o Consórcio Intermunicipal da Região de Guaratinguetá.

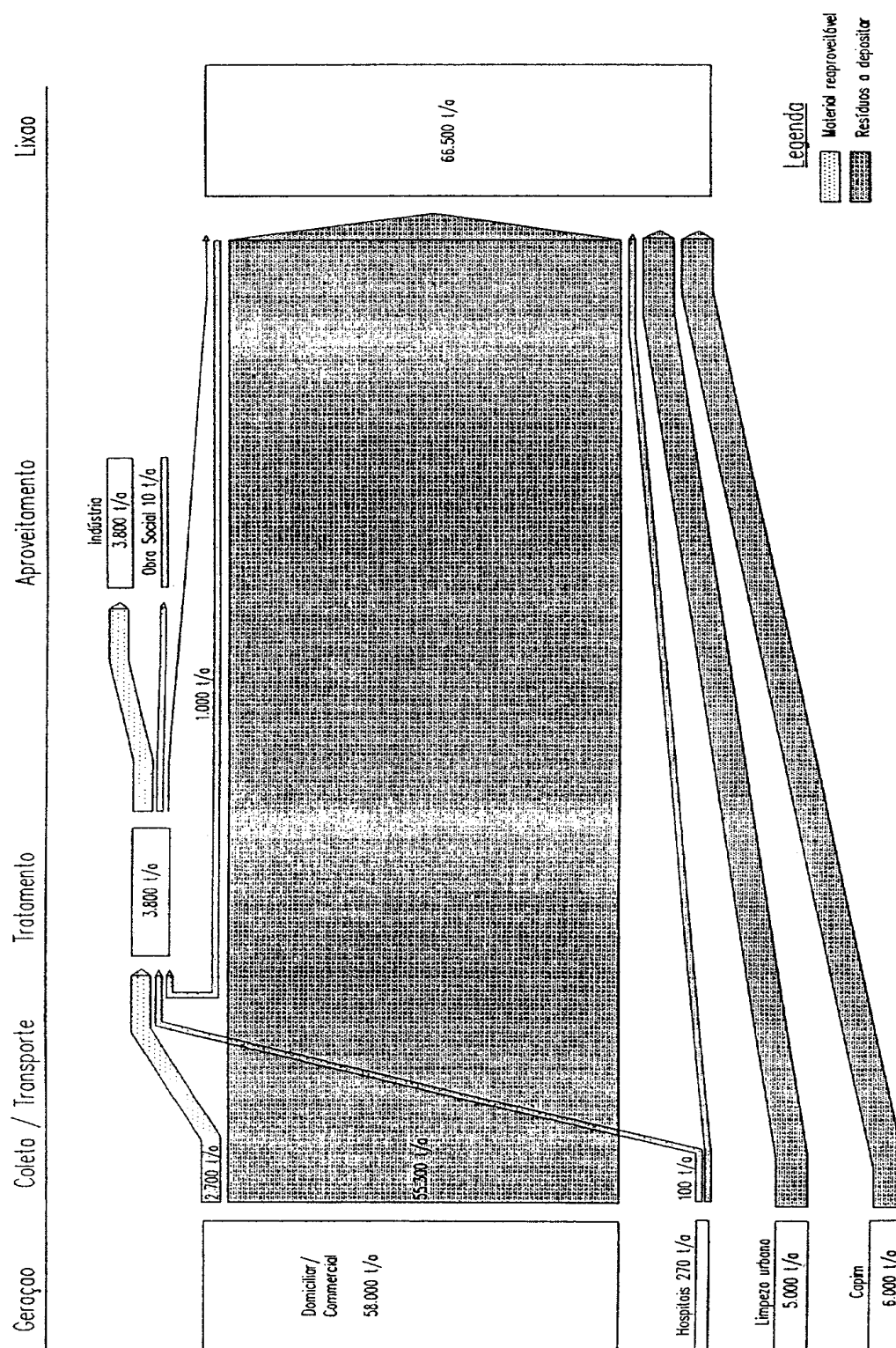
5.2.2 Os resíduos sólidos municipais na Região de Guaratinguetá

As informações seguintes baseam-se em levantamentos que foram feitos nos meses de agosto e setembro do ano de 1992 (Wehenpohl e Pfaff-Simoneit, 1993) e constituem elementos para a compreensão da questão, bem como para a análise pretendida. Em cada município do CIRG os resíduos sólidos municipais domiciliares e comerciais recolhidos pelo serviço público foram pesados durante uma semana. De cada setor de recolhimento nos

municípios foi feita uma análise de sua composição com base em amostras de cerca de 40 até 50 kg. Tal análise do lixo foi repetida com amostras extraídas de 5 setores do município de Guaratinguetá. Notou-se que os resíduos domiciliares (recolhidos pela coleta regular) juntamente com os resíduos comerciais (produzidos por pequenos estabelecimentos comerciais localizados no centro das cidades) foram classificados como resíduos sólidos municipais pelo fato de na Região de Guaratinguetá a coleta dos mesmos ser feita em conjunto, levando a concluir que as quantidades indicadas a seguir também incluem resíduos que não são domiciliares.

A figura 5.2 mostra a situação da evacuação dos resíduos domiciliares com a parte dos comerciais que se recolhe em conjunto tal como encontrado pelos pesquisadores em seu relatório. A geração dos resíduos sólidos municipais não pode ser definida exatamente, porque o material reciclável foi retirado de várias maneiras e entregue a um setor de reaproveitamento. Existem basicamente as seguintes vias de reaproveitamento na Região de Guaratinguetá:

- A venda direta pelo dono do lixo aos carrinheiros (pessoas que recolhem com um carrinho de mão elementos que podem ser reciclados) e aos postos de ferro velho (especialmente material valoroso como alumínio, latas, papel, papelão, ferro velho e outros).
- A coleta feita pelos carrinheiros: esta forma de recolhimento do material reciclável encontra-se centrada principalmente nos bairros comerciais. Os donos das lojas muitas vezes já colocam estes materiais separados do resto de lixo. Fora disso, os carrinheiros revolvem o lixo disposto a ser coletado pelos serviços das prefeituras na procura de algo aproveitável. Isso, em geral, leva a uma maior sujeira das ruas.
- As equipes que trabalham nos caminhões coletores das prefeituras também participam da eliminação do material reciclável. As pessoas selecionam durante o turno latas de alumínio, restos de papelão e de ferro e vendem, no final da coleta, a um posto de ferro velho. Para a separação, os caminhões dispõem de vários sacos plásticos localizados nos chassis.



Fonte: Wehenpohl e Pfaff-Simoneit, 1993

Figura 5.2 Fluxograma da evacuação dos resíduos sólidos municipais

- A seleção do material destinado ao reaproveitamento feita pelos catadores nos lixões: praticamente em todos os lixões dos municípios do CIRG há um grupo de catadores separando plásticos, papelão, garrafas e latas, sendo que a maior importância é dada às folhas de plástico das quais aproveitam-se somente as mais limpas, pois o trabalho de limpá-las não se justifica pelo preço a obter. A maioria destas folhas são de sacos plásticos utilizados para o próprio acondicionamento do lixo nas residências. Outra fração importante é representada pelo papelão, embora seja muitas vezes contaminado pela fração orgânica o que, de certa forma, provoca uma redução no seu potencial de reciclagem. As garrafas e latas, apesar de serem inferiores na quantidade, fornecem um bom lucro aos catadores.

A tabela 5.2 indica as quantidades de resíduos sólidos geradas nos municípios pertencentes ao Consórcio Intermunicipal da Região de Guaratinguetá. Os números são extrapolações do levantamento realizado entre agosto e setembro de 1992.

Tabela 5.2 - Quantidades de resíduos sólidos na Região do CIRG.

Municípios	(t/semana)	(t/ano)	Habitantes urbana	kg/hab*ano	kg/hab*dia (300 dia/ano)
Aparecida	356	18.500	30.000	617	2,06 ⁽¹⁾
Cach. Paulista	45	2.350	28.500	82	0,27
Cunha	13	700	10.000	70	0,23
Guaratinguetá ⁽³⁾	258	13.500	108.000	125	0,42
Lorena	230	12.000	96.000	125	0,42
Piquete	26	1.300	12.000	108	0,36
Roseira	18	950	7.000	136	0,45 ⁽²⁾

Anotações:

(1) O alto valor específico é resultado do turismo religioso;

(2) O valor específico é influenciado pela alta quantidade de resíduos dos restaurantes localizados na Via Dutra;

(3) Inclui os dados do município de Potim.

Fonte: Wehenpohl e Pfaff-Simoneit (1993)

O que se observa são as quantidades específicas muito elevadas no município de Aparecida. Tais valores são resultantes da atração de peregrinos católicos à basílica e que costumam visitar o local principalmente nos fins de semana. Assim, em geral, o número de

visitantes em Aparecida situa-se bem próximo de umas 90.000 pessoas e no mês de outubro este número aumenta para umas 300.000 pessoas. Os valores indicados nesta tabela somente incluem as quantidades transportadas aos lixões.

Para o levantamento da composição dos resíduos sólidos municipais foram feitas algumas análises em amostras que, por sua vez, foram recolhidas separadamente em cada setor de coleta nos municípios do CIRG. As primeiras análises foram realizadas paralelamente ao levantamento das quantidades de resíduos sólidos. Complementando tais informações, foram feitas também análises adicionais de cinco setores de coleta do município de Guaratinguetá no mês de dezembro de 1992 (ver tabela 5.3).

A fração orgânica é a mais significativa de todas, com uma porcentagem de 50% até 60%, cujos uns 80% são restos de cozinha (restos de frutas, de legumes e de comida) enquanto que os outros 20% são resíduos oriundos de jardins e hortas (restos de folhas e de plantas).

Do papel, cerca de um terço é papel higiênico que não é jogado no vaso. A maior parte já não pode mais ser reaproveitada, porque foi usado por exemplo para embrulhar restos de comida e, por isso, encontra-se contaminada. Somente uns 20% até 30% desta fração são revistas e jornais que poderiam ser reciclados. O papel limpo de alta qualidade, proveniente principalmente das lojas, de escritórios e de bancos em geral não entra na coleta. A porcentagem de fraldas, maços de cigarros, que nas análises foram parcialmente juntados com o papel, é de cerca de 2%. Em resumo, a quantidade de papel no lixo disposto à coleta é baixa por causa das atividades de reciclagem. O papelão praticamente não existe mais no lixo urbano, porque já é retirado bem antes da coleta. Somente pedaços ou pequenas embalagens, às vezes, são encontradas.

Dos vidros em geral só se encontram cacos. Frações consideráveis existem apenas nos lixos dos bares e restaurantes onde uma coleta separada poderia ser interessante.

A pequena quantidade de metais baseia-se principalmente em latas e tampas de garrafas. As latas de alumínio, antes da coleta, quase não existem mais nos lixos, ao passo que há uma ínfima porção de chumbo entre os resíduos urbanos desta região e que deveria ser classificada como resíduo perigoso.

Os plásticos devido a sua quantidade são relativamente importantes; tratam-se principalmente de folhas e sacos plásticos (30% até 40% são de sacos plásticos destinados ao acondicionamento do lixo). Esta fração é considerada como uma das mais importantes para os catadores.

Tabela 5.3 - Composição dos resíduos sólidos municipais na Região do CIRG.

Município	Aparecida		Cachoeira Paulista		Cunha		Guaratinguetá		Piquete		Roseira		CIRG (Total)	
Componentes	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)
Papel	36,5	23,9	15,4	21,3	2,4	10,4	44,1	13,5	7,3	20,3	5,0	11,0	110,7	16,9
Papelão	12,3	8,1	6,6	9,2	1,5	6,5	10,3	3,1	0,9	2,5	1,3	2,9	32,9	5,0
Madeira	----	0,0	----	0,0	----	0,0	0,9	0,3	----	0,0	----	0,0	0,9	0,1
Trapo	----	0,0	2,9	4,0	1,3	5,6	5,5	1,7	2,1	5,8	----	0,0	11,8	1,8
Couro/osso/borracha	----	0,0	----	0,0	----	0,0	1,1	0,3	----	0,0	----	0,0	1,1	0,2
Plástico	22,9	15,0	5,8	8,1	2,7	11,7	21,8	6,7	4,0	11,1	3,6	7,9	60,8	9,3
Matéria orgânica	58,4	38,3	37,7	52,4	14,0	60,6	194,1	59,3	17,0	47,2	30,0	65,8	351,2	53,5
Metal ferroso	6,4	4,2	0,8	1,1	0,7	3,0	9,1	2,8	1,6	4,4	1,3	2,9	19,9	3,0
Metal não-ferroso	1,5	1,0	----	0,0	----	0,0	1,1	0,3	----	0,0	----	0,0	2,6	0,4
Vidro	2,6	1,7	2,8	3,9	0,5	2,2	12,7	3,9	1,0	2,8	1,6	3,5	21,2	3,2
Louça/pedras/entulho	3,7	2,4	----	0,0	----	0,0	4,8	1,5	2,1	5,8	----	0,0	10,6	1,6
Terra e similares	8,2	5,4	----	0,0	----	0,0	13,4	4,1	----	0,0	2,8	6,1	24,4	3,7
Outros	----	0,0	----	0,0	----	0,0	8,4	2,6	----	0,0	----	0,0	8,4	1,3
Total	152,5	100,0	72,0	100,0	23,1	100,0	327,3	100,0	36,0	100,0	45,6	100,0	656,5	100,0

Fonte: Wehenpohl e Pfaff-Simoneit (1993)

Com isto, conclui-se que o lixo que é colocado pelos produtores à disposição da prefeitura para a coleta encerra uma pequena quantidade de material reaproveitável. As frações destinadas a reciclagem são principalmente papelão, plásticos e latas e a separação feita pelos catadores já leva a uma retirada da maior parte do material reciclável antes de ser jogada fora. Este procedimento deixa um resto de lixo para a coleta que não compensa ser novamente separado em instalações específicas desta prática, sendo que o material encontra-se demasiadamente misturado e contaminado e que só poucos pedaços podem ser de novo separados.

Embora não se tenha feito uma análise mais minuciosa com relação ao valor do poder calorífico e ao conteúdo de umidade do lixo da região do CIRG, as amostras permitiram uma estimativa da umidade em torno de 40% até 50% e um poder calorífico de aproximadamente 4.000 kJ/kg até 5.000 kJ/kg. Estes valores mostram que, por causa da composição, o lixo não é apropriado para a incineração. Apesar de tais conclusões, seria importante, a nosso ver, considerar o uso de tais resíduos em sistemas de aproveitamento energético com cogeração.

5.3 Análises técnica e econômica

São apresentadas, na seqüência, propostas de configurações voltadas ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos municipais com as respectivas análises técnica e econômica, visando alcançar informações que consubstanciem a comparação entre as mesmas.

ALTERNATIVA 1

Consta de um sistema de cogeração que opera segundo um ciclo à vapor com caldeira convencional para a queima de resíduo sólido municipal; emprega-se, também, uma turbina a vapor do tipo contra-pressão para produzir 3,6 t/h de vapor saturado à 0,7 MPa e gerar energia elétrica, com a finalidade de suprir as necessidades de uma unidade de processo industrial (ver figura 5.3). Deve-se salientar que as análises técnica e econômica verificarão para três caldeiras convencionais com diferentes condições de vapor vivo (6,3 MPa a 450

°C; 4,2 MPa a 400 °C e 2,1 MPa a 350 °C), as condições de resposta deste sistema quanto ao aproveitamento energético.

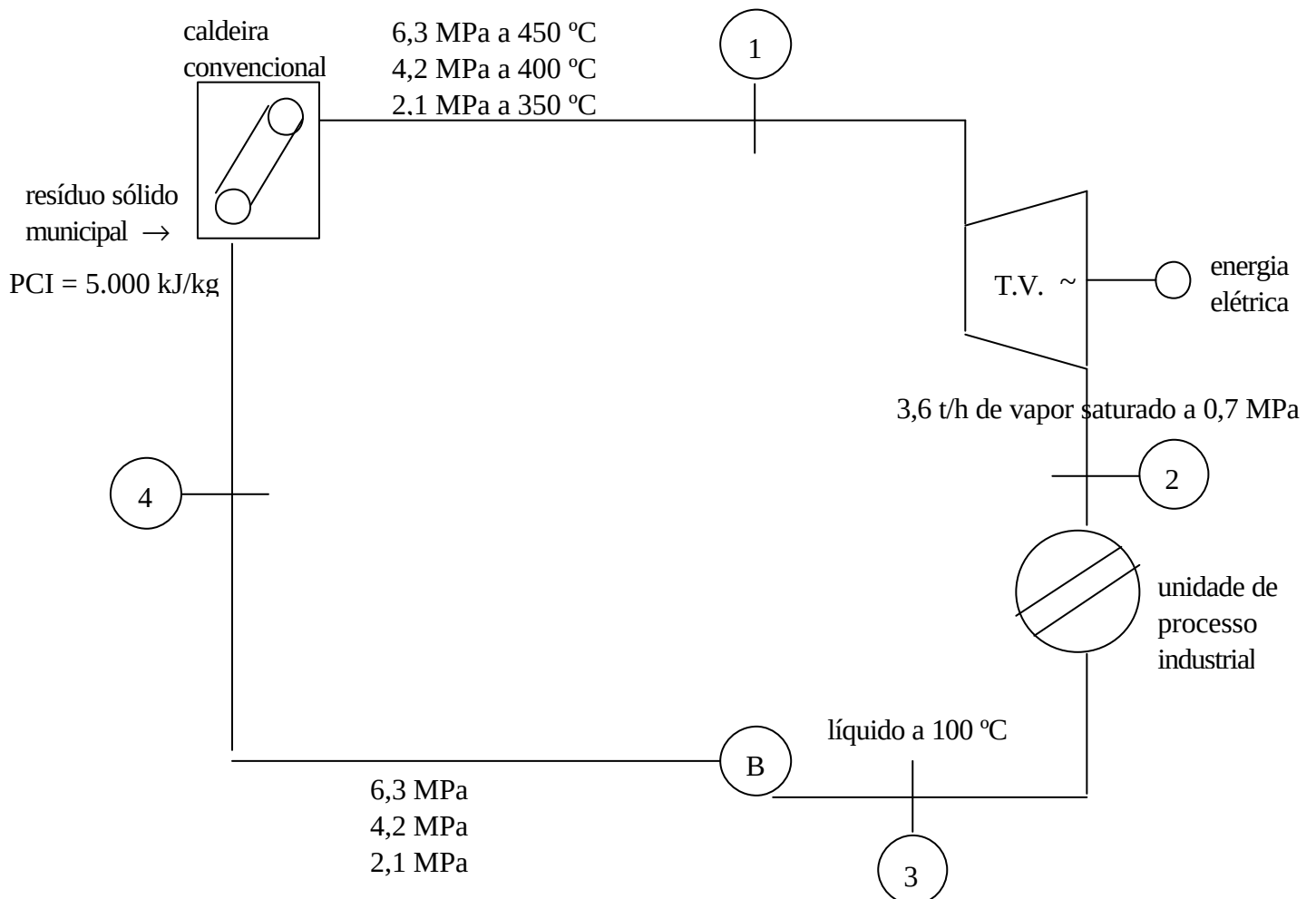


Figura 5.3 Ciclo a vapor com caldeira convencional e turbina de contra-pressão

A seqüência de cálculos da análise técnica é apresentada a seguir e os valores empregados na análise termodinâmica constam da tabela 5.4.

1) Potência suprida pelo combustível

$$E_{\text{comb}} = (\dot{m}_v \cdot (h_1 - h_4')) / 0,85$$

2) Vazão de combustível

$$\dot{m}_{\text{comb}} = (E_{\text{comb}} / \text{PCI})$$

3) Turbina

$$\dot{W}_{\text{eixo}} = (h_1 - h_2') \cdot \dot{m}_v$$

4) Gerador elétrico

$$E_p = 0,95 \cdot (\dot{W}_{\text{eixo}})$$

5) Processo

$$E_c = \dot{m}_v \cdot (h_2' - h_3)$$

6) Bomba

$$\dot{W}_{\text{bomba}} = (\dot{m}_v \cdot (h_4' - h_3) / 0,80)$$

7) Eficiência de geração de energia elétrica

$$\eta_{\text{ge}} = (E_p - \dot{W}_{\text{bomba}}) / E_{\text{comb}}$$

8) Eficiência de geração de calor

$$\eta_{\text{gc}} = (E_c / E_{\text{comb}})$$

9) Eficiência global

$$\eta_{\text{global}} = (E_p + E_c) / E_{\text{comb}}$$

Tabela 5.4 - Dados da análise termodinâmica.

ESTADO TERMODI- NÂMICO	PRESSÃO (MPa)		TEMPERA- TURA (° C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kg ° C)
(1)	6,3		450,00	3.297,40	6,6932
	4,2		400,00	3.210,00	6,7432
	2,1		350,00	3.134,80	6,9330
(2)	0,7	(6,3)	164,97	2.890,80	6,6890
		(4,2)	164,64	2.874,70	6,7070
		(2,1)	164,64	2.844,70	6,8860
(3)	0,7		100,00	419,50	1,3063
(4)	6,3		100,40	427,23	1,3368
	4,2		100,24	424,30	1,3305
	2,1		100,10	421,38	1,3253

Observação: as entalpias calculadas nos estados (2) e (4) são reais, enquanto que as entalpias calculadas nos estados (1) e (3) são ideais, com eficiência de expansão na turbina estimada em 75%.

Conforme Sales Filho e Figueiredo (1989), a razão existente entre a vazão de vapor e a vazão de resíduo processado (vazão de combustível) é de 0,3456 ($(\dot{m}_{\text{vapor}} / \dot{m}_{\text{comb}}) = (7,2 \text{ t/h} : 20,83 \text{ t/h}) = (0,3456 / 1,0)$). Com base nesta afirmação e segundo alguns dados fornecidos por Brown (1985), deve ser considerada para tal análise uma vazão de vapor saturado da ordem de 3,6 t/h.

Na busca deste parâmetro admitiu-se uma necessidade da ordem de 3,6 t/h de vapor para um possível pólo industrial, anexo à central térmica, que o utilizaria para a reciclagem de produtos como plástico, papel e papelão.

O poder calorífico do lixo (PCI) da Região de Guaratinguetá a ser considerado nesta análise é de 5.000 kJ/kg (Wehenpohl e Pfaff-Simoneit, 1993); um exemplo da memória de cálculo é apresentado para o sistema de cogeração com caldeira de 6,3 MPa a 450 °C.

1) Potência suprida pelo combustível

$$E_{\text{comb}} = (\dot{m}_v \cdot (h_1 - h_4')) / 0,85 = (1,0 \cdot (3.297,40 - 427,23)) / 0,85$$

$$E_{\text{comb}} = 3.376,67 \text{ kW}$$

2) Vazão de combustível

$$\dot{m}_{\text{comb}} = (E_{\text{comb}} / \text{PCI}) = (3.376,67 / 5.000)$$

$$\dot{m}_{\text{comb}} = \mathbf{0,6753 \text{ kg/s} = 2.431,08 \text{ kg/h}}$$

3) Turbina

$$\dot{W}_{\text{eixo}} = (h_1 - h_2') \cdot \dot{m}_v$$

$$\dot{W}_{\text{eixo}} = (3.297,40 - 2.890,80) \cdot 1,0$$

$$\dot{W}_{\text{eixo}} = \mathbf{406,58 \text{ kW}}$$

4) Gerador elétrico

$$E_p = 0,95 \cdot (\dot{W}_{\text{eixo}})$$

$$E_p = 0,95 \cdot (406,58)$$

$$E_p = \mathbf{386,25 \text{ kW}}$$

5) Processo

$$E_c = \dot{m}_v \cdot (h_2' - h_3) = 1,0 \cdot (2.890,80 - 419,50)$$

$$E_c = \mathbf{2.471,18 \text{ kW}}$$

6) Bomba

$$\dot{W}_{\text{bomba}} = (\dot{m}_v \cdot (h_4' - h_3) / 0,80) = (1,0 \cdot (427,23 - 419,50) / 0,80)$$

$$\dot{W}_{\text{bomba}} = \mathbf{9,66 \text{ kW}}$$

7) Eficiência de geração de energia elétrica

$$\eta_{ge} = (E_p - \dot{W}_{bomba}) / E_{comb}$$

$$\eta_{ge} = (386,25 - 9,66) / 3.376,67$$

$$h_{ge} = \mathbf{0,112}$$

8) Eficiência de geração de calor

$$\eta_{gc} = (E_c / E_{comb})$$

$$\eta_{gc} = (2.471,18 / 3.376,67)$$

$$h_{gc} = \mathbf{0,732}$$

9) Eficiência global

$$\eta_{global} = (E_p + E_c) / E_{comb}$$

$$\eta_{global} = (386,25 + 2.471,18) / 3.376,67$$

$$h_{global} = \mathbf{0,846}$$

A tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos para a análise técnica do ciclo a vapor proposto na alternativa 1, considerando os três casos decorrentes de diferentes pressão e temperatura do vapor vivo.

Tabela 5.5 - Dados da análise técnica para a alternativa 1.

Condições do vapor vivo	P = 6,3 MPa T = 450 °C	P = 4,2 MPa T = 400 °C	P = 2,1 MPa T = 350 °C
E_{comb} [kW]	3.376,67	3.277,29	3.192,26
$\dot{m}_{\text{comb}}$ [kg/h]	2.431,08	2.359,80	2.298,60
$\dot{W}_{\text{eixo}}$ [kW]	406,58	335,32	290,12
E_p [kW]	386,25	318,56	275,62
E_c [kW]	2.471,18	2.455,35	2.425,38
$\dot{W}_{\text{bomba}}$ [kW]	9,66	6,0	2,35
η_{ge} [%]	11,2	9,5	8,6
η_{gc} [%]	73,2	74,9	76,0
η_{global} [%]	84,6	84,6	84,6

Antes de iniciar o estudo de viabilidade econômica, vamos fazer a especificação de alguns parâmetros:

- A faixa de variação do custo do combustível ($\$_{\text{comb}}$) ficará em torno de 0,010 US\$/kg - 0,020 US\$/kg (Wehenpohl e Pfaff-Simoneit, 1993).
- O investimento total para a unidade de incineração completa, já considerando 50% a mais sobre os equipamentos principais para cômputo de outros encargos do projeto, será de aproximadamente 4.500 US\$/kW (Balestieri, 1997); esse valor pode ser considerado pertinente para o atual estado de conhecimento, pois de acordo com os dados coletados em Sales Filho e Figueiredo (1989), esta afirmação se confirma perante o seguinte cálculo:

$$(C_{\text{inv}}) / (\dot{W}_e) = (13 \times 10^6 \text{ US\$}) / (2.872,31 \text{ kW}) = 4.526 \text{ US\$/kW}$$

Sendo: C_{inv} → custo total de investimento na unidade de incineração

$\dot{W}_e$ → potência elétrica líquida

- Será adotada a seguinte simbologia:

S1 → Sistema de cogeração que utiliza uma caldeira de 6,3 MPa a 450° C.

S2 → Sistema de cogeração que utiliza uma caldeira de 4,2 MPa a 400° C.

S3 → Sistema de cogeração que utiliza uma caldeira de 2,1 MPa a 350° C.

a) Energia elétrica anualmente consumida pelo recinto sem a instalação pretendida (comprada da concessionária).

$$\dot{W}_{\text{eixo (máx)}} [\text{kW}] \times 24 [\text{h/dia}] \times 365 [\text{dias/ano}]$$

$$407 [\text{kW}] \times 24 [\text{h/dia}] \times 365 [\text{dias/ano}] = \mathbf{3.565.320 [\text{kW. h/ano}]}$$

b) Custo anual da energia elétrica consumida pelo recinto sem a instalação pretendida (pago à concessionária).

$$\text{Para } P_{\text{el}} = 0,070 [\text{US\$/kW. h}]$$

$$0,070 [\text{US\$/kW. h}] \times 3.565.320 [\text{kW. h/ano}] = \mathbf{249.572 [\text{US\$/ano}]}$$

c) Energia elétrica anualmente produzida na cogeração (se eventualmente instalada).

$$E_p [\text{kW}] \times 24 [\text{h/dia}] \times 300 [\text{dias/ano}]$$

$$S1 \rightarrow 386,25 [\text{kW}] \times 24 [\text{h/dia}] \times 300 [\text{dias/ano}] = \mathbf{2.781.000 [\text{kW. h/ano}]}$$

$$S2 \rightarrow 318,56 [\text{kW}] \times 24 [\text{h/dia}] \times 300 [\text{dias/ano}] = \mathbf{2.293.632 [\text{kW. h/ano}]}$$

$$S3 \rightarrow 275,62 [\text{kW}] \times 24 [\text{h/dia}] \times 300 [\text{dias/ano}] = \mathbf{1.984.464 [\text{kW. h/ano}]}$$

d) Energia elétrica anualmente consumida da rede após a instalação pretendida (item (a) - item (c)).

$$S1 \rightarrow 3.565.320 [\text{kW. h/ano}] - 2.781.000 [\text{kW. h/ano}] = \mathbf{784.320 [\text{kW. h/ano}]}$$

$$S2 \rightarrow 3.565.320 [\text{kW. h/ano}] - 2.293.632 [\text{kW. h/ano}] = \mathbf{1.271.688 [\text{kW. h/ano}]}$$

$$S3 \rightarrow 3.565.320 [\text{kW. h/ano}] - 1.984.464 [\text{kW. h/ano}] = \mathbf{1.580.856 [\text{kW. h/ano}]}$$

e) Custo anual da energia elétrica consumida da rede após a instalação (pago à concessionária).

$$\text{Para } P_{\text{el}} = 0,070 [\text{US\$/kW. h}]$$

$$S1 \rightarrow 0,070 [\text{US\$/kW. h}] \times 784.320 [\text{kW. h/ano}] = \mathbf{54.902 [\text{US\$/ano}]}$$

$$S2 \rightarrow 0,070 [\text{US\$/kW. h}] \times 1.271.688 [\text{kW. h/ano}] = \mathbf{89.018 [\text{US\$/ano}]}$$

$$S3 \rightarrow 0,070 [\text{US\$/kW. h}] \times 1.580.856 [\text{kW. h/ano}] = \mathbf{110.660 [\text{US\$/ano}]}$$

f) Benefício elétrico anual devido a instalação (item (b) - item (e)).

$$S1 \rightarrow 249.572 \text{ [US\$/ano]} - 54.902 \text{ [US\$/ano]} = \mathbf{194.670 \text{ [US\$/ano]}}$$

$$S2 \rightarrow 249.572 \text{ [US\$/ano]} - 89.018 \text{ [US\$/ano]} = \mathbf{160.554 \text{ [US\$/ano]}}$$

$$S3 \rightarrow 249.572 \text{ [US\$/ano]} - 110.660 \text{ [US\$/ano]} = \mathbf{138.912 \text{ [US\$/ano]}}$$

g) Energia térmica (forma de vapor) anualmente consumida pelo recinto sem a instalação pretendida (caldeira convencional).

$$E_v = \dot{m}_v \cdot (h_1 - h_4')$$

$$S1 \rightarrow E_v = 1,0 \cdot (3.297,40 - 427,23) = \mathbf{2.870,17 \text{ kW}}$$

$$S2 \rightarrow E_v = 1,0 \cdot (3.210,00 - 424,30) = \mathbf{2.785,70 \text{ kW}}$$

$$S3 \rightarrow E_v = 1,0 \cdot (3.134,80 - 421,38) = \mathbf{2.713,42 \text{ kW}}$$

$$E_v \text{ [kW]} \times 24 \text{ [h/dia]} \times 365 \text{ [dias/ano]}$$

$$S1 \rightarrow 2.870,17 \text{ [kW]} \times 24 \text{ [h/dia]} \times 365 \text{ [dias/ano]} = \mathbf{25.142.689 \text{ [kW. h/ano]}}$$

$$S2 \rightarrow 2.785,70 \text{ [kW]} \times 24 \text{ [h/dia]} \times 365 \text{ [dias/ano]} = \mathbf{24.402.732 \text{ [kW. h/ano]}}$$

$$S3 \rightarrow 2.713,42 \text{ [kW]} \times 24 \text{ [h/dia]} \times 365 \text{ [dias/ano]} = \mathbf{23.769.559 \text{ [kW. h/ano]}}$$

h) Custo anual da energia térmica consumida pelo recinto sem a instalação pretendida (caldeira convencional).

$$\eta_{\text{caldeira}} = (\dot{m}_v \cdot (h_1 - h_4')) / E_{\text{comb}} = 0,85$$

$$\eta_{\text{caldeira}} = E_v / E_{\text{comb}} = 0,85$$

$$E_{\text{comb}} = (E_v / 0,85)$$

$$S1 \rightarrow E_{\text{comb}} = (2.870,17 / 0,85) = \mathbf{3.376,67 \text{ kW}}$$

$$S2 \rightarrow E_{\text{comb}} = (2.785,70 / 0,85) = \mathbf{3.277,29 \text{ kW}}$$

$$S3 \rightarrow E_{\text{comb}} = (2.713,42 / 0,85) = \mathbf{3.192,26 \text{ kW}}$$

- É necessário calcular um CV_{conv} para cada sistema de cogeração e em seguida multiplicá-los pelos respectivos valores encontrados no item (g), finalizando, desse modo, o cálculo do item (h):

$$(1) CV_{conv} = (((C_{comb} \times E_{comb}) / E_v) + CM_{cald})$$

$$(2) CV_{conv} [US\$/kW. h] \times \text{item (g)} [kW. h/ano]$$

- Mas, primeiramente, temos que achar o C_{comb} de cada um destes sistemas levando em consideração as duas faixas de variação do custo do combustível ($\$_{comb(1)} = 0,010 US\$/kg$ e $\$_{comb(2)} = 0,020 US\$/kg$):

$$C_{comb} = ((\$_{comb} \times \dot{m}_{comb} \times (1/FS)) / E_{comb})$$

Sendo que: $\dot{m}_{comb} \rightarrow$ valores na tabela 4.5 (transformar de [kg/h] para [kg/ano])

$$(1/FS) = (1 \text{ ano} / 7.200 \text{ horas}) = 0,00014 [\text{ano/h}]$$

$E_{comb} \rightarrow$ valores em [kW] calculados no início desse item

h.1) Cálculo do C_{comb} para os 3 sistemas, levando em consideração o valor de $\$_{comb(1)}$:

$$S1 \rightarrow C_{comb} = ((0,010 \times 17.503.776 \times 0,00014) / 3.376,67) = \mathbf{0,0073 [US\$/kW. h]}$$

$$S2 \rightarrow C_{comb} = ((0,010 \times 16.990.560 \times 0,00014) / 3.277,29) = \mathbf{0,0073 [US\$/kW. h]}$$

$$S3 \rightarrow C_{comb} = ((0,010 \times 16.549.920 \times 0,00014) / 3.192,26) = \mathbf{0,0073 [US\$/kW. h]}$$

h.2) Cálculo do C_{comb} para os 3 sistemas, levando em consideração o valor de $\$_{comb(2)}$:

$$S1 \rightarrow C_{comb} = ((0,020 \times 17.503.776 \times 0,00014) / 3.376,67) = \mathbf{0,0145 [US\$/kW. h]}$$

$$S2 \rightarrow C_{comb} = ((0,020 \times 16.990.560 \times 0,00014) / 3.277,29) = \mathbf{0,0145 [US\$/kW. h]}$$

$$S3 \rightarrow C_{comb} = ((0,020 \times 16.549.920 \times 0,00014) / 3.192,26) = \mathbf{0,0145 [US\$/kW. h]}$$

h.3) Cálculo do CV_{conv} para os 3 sistemas (utilizando a equação (1)), levando em consideração os valores de C_{comb} encontrados no item (h.1):

$$(1) CV_{conv} = (((C_{comb} \times E_{comb}) / E_v) + CM_{cald})$$

$$S1 \rightarrow CV_{conv} = (((0,0073 \times 3.376,67) / 2.870,17) + 0,008) = \mathbf{0,0166 \text{ [US\$/kW. h]}}$$

$$S2 \rightarrow CV_{conv} = (((0,0073 \times 3.277,29) / 2.785,70) + 0,008) = \mathbf{0,0166 \text{ [US\$/kW. h]}}$$

$$S3 \rightarrow CV_{conv} = (((0,0073 \times 3.192,26) / 2.713,42) + 0,008) = \mathbf{0,0166 \text{ [US\$/kW. h]}}$$

h.4) Cálculo do CV_{conv} para os 3 sistemas (utilizando a equação (1)), levando em consideração os valores de C_{comb} encontrados no item (h.2):

$$(1) CV_{conv} = (((C_{comb} \times E_{comb}) / E_v) + CM_{cald})$$

$$S1 \rightarrow CV_{conv} = (((0,0145 \times 3.376,67) / 2.870,17) + 0,008) = \mathbf{0,0250 \text{ [US\$/kW. h]}}$$

$$S2 \rightarrow CV_{conv} = (((0,0145 \times 3.277,29) / 2.785,70) + 0,008) = \mathbf{0,0250 \text{ [US\$/kW. h]}}$$

$$S3 \rightarrow CV_{conv} = (((0,0145 \times 3.192,26) / 2.713,42) + 0,008) = \mathbf{0,0250 \text{ [US\$/kW. h]}}$$

h.5) Cálculo do custo anual da energia térmica consumida pelo recinto sem a instalação pretendida para os 3 sistemas (utilizando a equação (2)), levando em consideração os valores de CV_{conv} encontrados no item (h.3):

$$(2) CV_{conv} \text{ [US\$/kW. h]} \times \text{item (g) [kW. h/ano]}$$

$$S1 \rightarrow 0,0166 \text{ [US\$/kW. h]} \times 25.142.689 \text{ [kW. h/ano]} = \mathbf{417.369 \text{ [US\$/ano]}}$$

$$S2 \rightarrow 0,0166 \text{ [US\$/kW. h]} \times 24.402.732 \text{ [kW. h/ano]} = \mathbf{405.085 \text{ [US\$/ano]}}$$

$$S3 \rightarrow 0,0166 \text{ [US\$/kW. h]} \times 23.769.559 \text{ [kW. h/ano]} = \mathbf{394.575 \text{ [US\$/ano]}}$$

h.6) Cálculo do custo anual da energia térmica consumida pelo recinto sem a instalação pretendida para os 3 sistemas (utilizando a equação (2)), levando em consideração os valores de CV_{conv} encontrados no item (h.4):

$$(2) CV_{conv} [US\$/kW \cdot h] \times \text{item (g)} [kW \cdot h/\text{ano}]$$

$$S1 \rightarrow 0,0250 [US\$/kW \cdot h] \times 25.142.689 [kW \cdot h/\text{ano}] = \mathbf{628.567 [US\$/ano]}$$

$$S2 \rightarrow 0,0250 [US\$/kW \cdot h] \times 24.402.732 [kW \cdot h/\text{ano}] = \mathbf{610.068 [US\$/ano]}$$

$$S3 \rightarrow 0,0250 [US\$/kW \cdot h] \times 23.769.559 [kW \cdot h/\text{ano}] = \mathbf{594.239 [US\$/ano]}$$

i) Benefício térmico anual devido a instalação de cogeração (valores iguais aos dos itens (h.5) e (h.6)).

j) Benefício anual total devido a instalação de cogeração pretendida (item (f) + item (i)).

j.1) Cálculos considerando os valores do item (h.5):

$$S1 \rightarrow 194.670 [US\$/ano] + 417.369 [US\$/ano] = \mathbf{612.039 [US\$/ano]}$$

$$S2 \rightarrow 160.554 [US\$/ano] + 405.085 [US\$/ano] = \mathbf{565.639 [US\$/ano]}$$

$$S3 \rightarrow 138.912 [US\$/ano] + 394.575 [US\$/ano] = \mathbf{533.487 [US\$/ano]}$$

j.2) Cálculos considerando os valores do item (h.6):

$$S1 \rightarrow 194.670 [US\$/ano] + 628.567 [US\$/ano] = \mathbf{823.237 [US\$/ano]}$$

$$S2 \rightarrow 160.554 [US\$/ano] + 610.068 [US\$/ano] = \mathbf{770.622 [US\$/ano]}$$

$$S3 \rightarrow 138.912 [US\$/ano] + 594.239 [US\$/ano] = \mathbf{733.151 [US\$/ano]}$$

k) Gasto anual do combustível na cogeração.

$$\dot{m}_{comb} [kg/h] \times \$_{comb} [US\$/kg] \times 7.200 [h/\text{ano}]$$

k.1) Cálculos considerando o valor de $\$_{comb(1)}$:

$$S1 \rightarrow 2.431,08 [kg/h] \times 0,010 [US\$/kg] \times 7.200 [h/\text{ano}] = \mathbf{175.038 [US\$/ano]}$$

$$S2 \rightarrow 2.359,80 [kg/h] \times 0,010 [US\$/kg] \times 7.200 [h/\text{ano}] = \mathbf{169.906 [US\$/ano]}$$

$$S3 \rightarrow 2.298,60 [kg/h] \times 0,010 [US\$/kg] \times 7.200 [h/\text{ano}] = \mathbf{165.499 [US\$/ano]}$$

k.2) Cálculos considerando o valor de $\$_{\text{comb}(2)}$:

$$S1 \rightarrow 2.431,08 \text{ [kg/h]} \times 0,020 \text{ [US$/kg]} \times 7.200 \text{ [h/ano]} = \mathbf{350.076 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S2 \rightarrow 2.359,80 \text{ [kg/h]} \times 0,020 \text{ [US$/kg]} \times 7.200 \text{ [h/ano]} = \mathbf{339.811 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S3 \rightarrow 2.298,60 \text{ [kg/h]} \times 0,020 \text{ [US$/kg]} \times 7.200 \text{ [h/ano]} = \mathbf{330.998 \text{ [US$/ano]}}$$

l) Gasto anual com manutenção na cogeração.

$$\text{Para } CM_{\text{STS}} = 0,017 \text{ [US$/kW. h]}$$

$$CM_{\text{STS}} \text{ [US$/kW. h]} \times E_p \text{ [kW]} \times 7.200 \text{ [h/ano]}$$

$$S1 \rightarrow 0,017 \text{ [US$/kW. h]} \times 386,25 \text{ [kW]} \times 7.200 \text{ [h/ano]} = \mathbf{47.277 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S2 \rightarrow 0,017 \text{ [US$/kW. h]} \times 318,56 \text{ [kW]} \times 7.200 \text{ [h/ano]} = \mathbf{38.992 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S3 \rightarrow 0,017 \text{ [US$/kW. h]} \times 275,62 \text{ [kW]} \times 7.200 \text{ [h/ano]} = \mathbf{33.736 \text{ [US$/ano]}}$$

m) Gasto anual total na cogeração e na manutenção do sistema de cogeração (item (k) + item (l)).

m.1) Cálculos considerando os valores do item (k.1):

$$S1 \rightarrow 175.038 \text{ [US$/ano]} + 47.277 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{222.315 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S2 \rightarrow 169.906 \text{ [US$/ano]} + 38.992 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{208.898 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S3 \rightarrow 165.499 \text{ [US$/ano]} + 33.736 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{199.235 \text{ [US$/ano]}}$$

m.2) Cálculos considerando os valores do item (k.2):

$$S1 \rightarrow 350.076 \text{ [US$/ano]} + 47.277 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{397.353 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S2 \rightarrow 339.811 \text{ [US$/ano]} + 38.992 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{378.803 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S3 \rightarrow 330.998 \text{ [US$/ano]} + 33.736 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{364.734 \text{ [US$/ano]}}$$

n) Receita anual esperada (item (j) - item (m)).

n.1) Cálculos considerando os valores dos itens (j.1) e (m.1):

$$S1 \rightarrow 612.039 \text{ [US$/ano]} - 222.315 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{389.724 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S2 \rightarrow 565.639 \text{ [US$/ano]} - 208.898 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{356.741 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S3 \rightarrow 533.487 \text{ [US$/ano]} - 199.235 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{334.252 \text{ [US$/ano]}}$$

n.2) Cálculos considerando os valores dos itens (j.2) e (m.2):

$$S1 \rightarrow 823.237 \text{ [US$/ano]} - 397.353 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{425.884 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S2 \rightarrow 770.622 \text{ [US$/ano]} - 378.803 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{391.819 \text{ [US$/ano]}}$$

$$S3 \rightarrow 733.151 \text{ [US$/ano]} - 364.734 \text{ [US$/ano]} = \mathbf{368.417 \text{ [US$/ano]}}$$

o) Cálculo do “**payback**” (período de retorno).

$$k = (\text{custo de investimento no sistema instalado} / \text{receita anual esperada})$$

o.1) Cálculo do custo de investimento para os 3 sistemas de cogeração:

$$E_p \text{ [kW]} \times \text{Investimento total [US$/kW]}$$

$$S1 \rightarrow 386,25 \text{ [kW]} \times 4.500 \text{ [US$/kW]} = \mathbf{1.738.125 \text{ [US$]}}$$

$$S2 \rightarrow 318,56 \text{ [kW]} \times 4.500 \text{ [US$/kW]} = \mathbf{1.433.520 \text{ [US$]}}$$

$$S3 \rightarrow 275,62 \text{ [kW]} \times 4.500 \text{ [US$/kW]} = \mathbf{1.240.290 \text{ [US$]}}$$

o.2) Cálculo do “payback” para os 3 sistemas de cogeração, considerando os valores da receita anual esperada encontrados no item (n.1):

$$S1 \rightarrow k = (1.738.125 / 389.724) = \mathbf{4,5 \text{ [anos]}}$$

$$S2 \rightarrow k = (1.433.520 / 356.741) = \mathbf{4,0 \text{ [anos]}}$$

$$S3 \rightarrow k = (1.240.290 / 334.252) = \mathbf{3,7 \text{ [anos]}}$$

o.3) Cálculo do “payback” para os 3 sistemas de cogeração, considerando os valores da receita anual esperada encontrados no item (n.2):

$$S1 \rightarrow k = (1.738.125 / 425.884) = \mathbf{4,1 \text{ [anos]}}$$

$$S2 \rightarrow k = (1.433.520 / 391.819) = \mathbf{3,7 \text{ [anos]}}$$

$$S3 \rightarrow k = (1.240.290 / 368.417) = \mathbf{3,4 \text{ [anos]}}$$

Tabela 5.6 - Resultados finais da análise econômica para a alternativa 1.

Sistemas	E _p (kW)	Investimento Total (US\$/kW)	Custo de investimento (US\$)	k (anos) para \$ _{comb(1)}	k (anos) para \$ _{comb(2)}
S1	386,25	4.500	1.738.125	4,5	4,1
S2	318,56	4.500	1.433.520	4,0	3,7
S3	275,62	4.500	1.240.290	3,7	3,4

Uma simulação com a faixa de variação do custo do combustível, conforme citado por Wehenpohl e Pfaff-Simoneit (1993) como sendo valores entre 0,010 [US\$/kg] e 0,020 [US\$/kg], revela um período de retorno (k) como indicado na tabela 5.6. Com base nesses valores se observa que, apesar de um pouco elevados para uma proposta de cogeração em empresas privadas, há que se considerar o fato de o empreendimento proposto se valer de financiamento captado junto a organismos de desenvolvimento econômico e social, bem como a relevância social e ambiental dele decorrentes, o que nos permite afirmar ser o mesmo exequível em quaisquer dos casos.

Uma revisão das possibilidades do sistema proposto na alternativa 1 permite concluir que a produção de energia elétrica é baixa em face da decisão de paridade térmica; o resultado de uma análise para a qual se busca queimar todo o lixo gerado (200 t/d = 8,33 t/h

= 8.330 kg/h) produz os dados técnicos e econômicos apresentados, respectivamente, nas tabelas 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7 - Dados da análise técnica para a alternativa 1, considerando a incineração da capacidade total de resíduo urbano gerado.

Condições do vapor vivo	P = 6,3 MPa T = 450 °C	P = 4,2 MPa T = 400 °C	P = 2,1 MPa T = 350 °C
E_{comb} [kW]	11.569,50	11.569,50	11.569,50
$\dot{m}_v$ [kg/s]	3,4263	3,5302	3,6242
$\dot{W}_{\text{eixo}}$ [kW]	1.393,13	1.183,68	1.051,38
E_p [kW]	1.323,47	1.124,49	998,81
E_c [kW]	8.467,42	8.667,35	8.789,41
$\dot{W}_{\text{bomba}}$ [kW]	33,11	21,18	8,52
η_{ge} [%]	11,2	9,5	8,6
η_{gc} [%]	73,2	74,9	76,0
η_{global} [%]	84,6	84,6	84,6

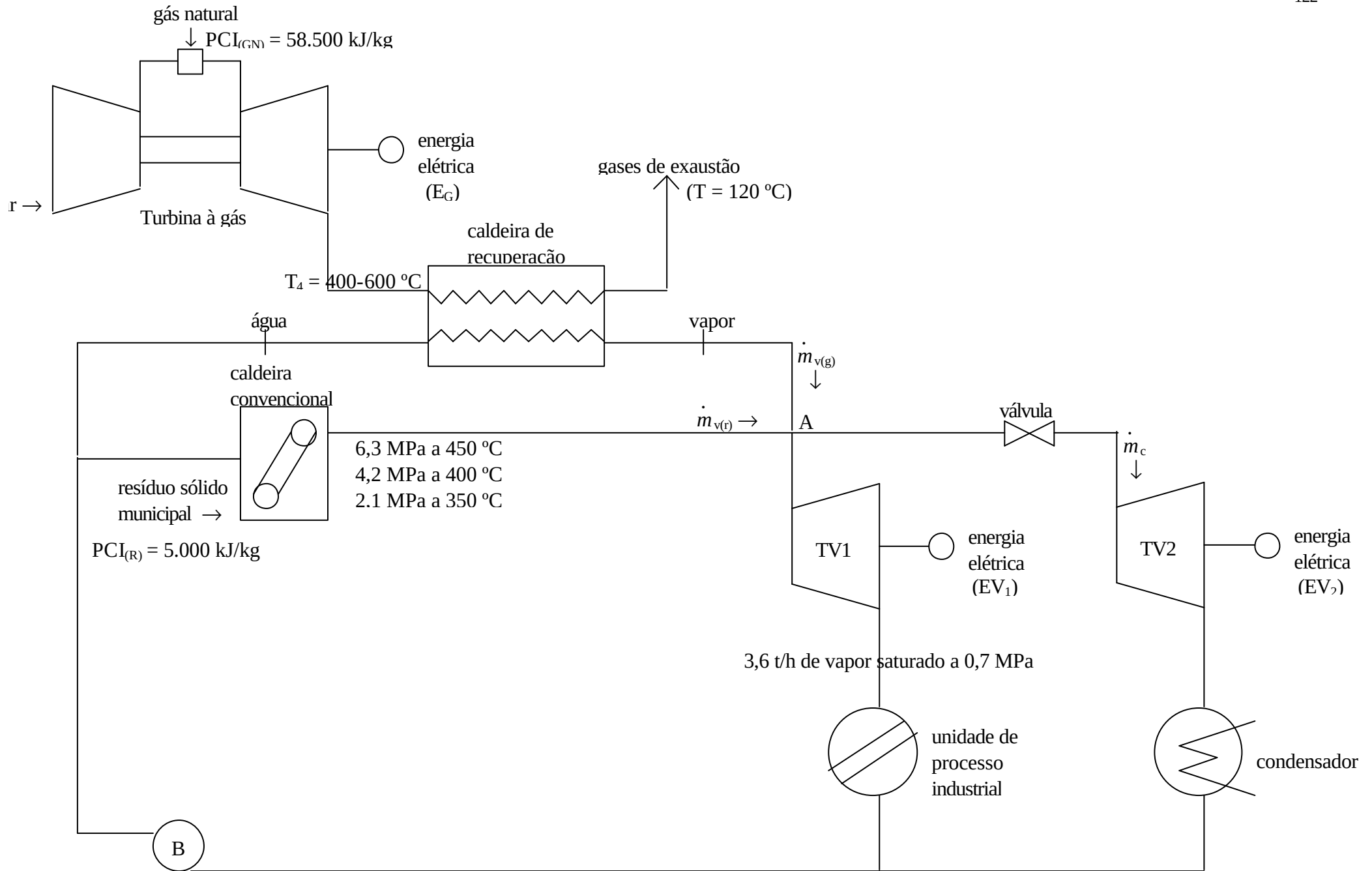
Tabela 5.8 - Resultados finais da análise econômica para a alternativa 1, considerando a incineração da capacidade total de resíduo urbano gerado.

Sistemas	E_p (kW)	Investimento Total (US\$/kW)	Custo de investimento (US\$)	k (anos) para $\\$_{\text{comb}(1)}$	k (anos) para $\\$_{\text{comb}(2)}$
S1	1.323,47	4.500	5.955.615	4,5	4,1
S2	1.124,49	4.500	5.060.205	4,0	3,7
S3	998,81	4.500	4.494.645	3,7	3,4

Observe que quando a quantidade de resíduo sólido municipal a ser incinerado é aumentada o período de retorno (k) não sofre nenhuma alteração, porém a tabela 5.7 ilustra um aumento significativo na geração de energia elétrica e de vapor.

ALTERNATIVA 2

Esta alternativa consta de um ciclo combinado constituído por um ciclo à gás, queimando gás natural, com caldeira de recuperação sem queima suplementar e um ciclo à vapor, queimando resíduo sólido municipal, na qual será adicionada à turbina a vapor de contrapressão pura outra de condensação pura (ver figura 5.4).



A seqüência de cálculos da análise técnica é apresentada a seguir:

1) Potência suprida pelo combustível

- Para o resíduo sólido municipal:

$$E_{\text{comb(r)}} = (\dot{m}_{\text{v(r)}} \cdot (h_1 - h_4')) / 0,85$$

- Para o gás natural:

$$E_{\text{comb(g)}} = \dot{m}_{\text{comb(g)}} \cdot \text{PCI}_{(\text{GN})}$$

sendo que: $\text{PCI}_{(\text{GN})} = 38.000 \text{ [kJ/m}^3] \times (1 / 0,65) \text{ [m}^3/\text{kg}] = 58.500 \text{ [kJ/kg]}$.

2) Vazão de combustível

$$\dot{m}_{\text{comb(r)}} = (E_{\text{comb(r)}} / \text{PCI}_{(\text{R})})$$

sendo que: $\text{PCI}_{(\text{R})} = 5.000 \text{ kJ/kg}$ (ver análise técnica da alternativa 1).

3) Turbina

- Para a turbina à vapor de contrapressão pura:

$$\dot{W}_{\text{eixo(TV1)}} = (h_1 - h_2') \cdot \dot{m}_p$$

- Para a turbina à vapor de condensação pura:

$$\dot{W}_{\text{eixo(TV2)}} = (h_1 - h_c) \cdot \dot{m}_c$$

sendo que: $h_c = 167,57 \text{ kJ/kg}$ (entalpia obtida na tabela de vapor de água saturado, $T = 40^\circ\text{C}$, do livro do Van Wylen e Sonntag - 1976).

- Para a turbina à gás:

$$\dot{W}_{\text{eixo(TG)}} = \dot{W}_{\text{TG}} \cdot 0,92$$

sendo que: $\dot{W}_{\text{TG}}$ é tirado de catálogos e nas condições nominais de projeto, tomadas para altitude de 600 metros, o fator de correção é de 0,92.

4) **Gerador elétrico**

- Para a turbina à vapor de contrapressão pura:

$$E_{p(1)} = 0,95 \cdot (\dot{W}_{\text{eixo(TV1)}})$$

- Para a turbina à vapor de condensação pura:

$$E_{p(2)} = 0,95 \cdot (\dot{W}_{\text{eixo(TV2)}})$$

- Para a turbina à gás:

$$E_{p(\text{TG})} = 0,95 \cdot (\dot{W}_{\text{eixo(TG)}})$$

5) **Processo**

$$E_c = \dot{m}_p \cdot (h_2' - h_3)$$

6) **Bomba**

$$\dot{W}_{\text{bomba}} = ((\dot{m}_{v(g)} + \dot{m}_{v(r)}) \cdot (h_4' - h_3)) / 0,80$$

7) **Eficiência de geração de energia elétrica**

$$\eta_{ge} = (E_{p(1)} + E_{p(2)} + E_{p(\text{TG})} - \dot{W}_{\text{bomba}}) / (E_{\text{comb(r)}} + E_{\text{comb(g)}})$$

8) **Eficiência de geração de calor**

$$\eta_{gc} = E_c / (E_{\text{comb(r)}} + E_{\text{comb(g)}})$$

9) **Eficiência global**

$$\eta_{\text{global}} = (E_{p(1)} + E_{p(2)} + E_{p(\text{TG})} + E_c) / (E_{\text{comb(r)}} + E_{\text{comb(g)}})$$

Como parte da análise técnica foi realizada a escolha de três conjuntos à gás (turbina à gás e caldeira de recuperação), retirados dos catálogos de fabricantes, com o intuito de se extrair alguns parâmetros importantes à serem utilizados na mesma.

- **Conjunto à gás nº 1 (CG1):**

Nome: Dresser Rand KG2-3E

$$\dot{m}_{v(g)} = 7,2 \text{ t/h} = 2,00 \text{ kg/s (para o sistema que opera com } P = 6,3 \text{ MPa e } T = 450 \text{ °C)}$$

$$\dot{m}_{v(g)} = 7,6 \text{ t/h} = 2,11 \text{ kg/s (para o sistema que opera com } P = 4,2 \text{ MPa e } T = 400 \text{ °C)}$$

$$\dot{m}_{v(g)} = 8,3 \text{ t/h} = 2,31 \text{ kg/s (para o sistema que opera com } P = 2,1 \text{ MPa e } T = 350 \text{ °C)}$$

$$\dot{m}_{ar} = 14,832 \text{ kg/s}$$

$$\rightarrow \dot{m}_{gás} = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb(g)} = 14,832 + 0,254 = 15,086 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{comb(g)} = 0,254 \text{ kg/s}$$

Temperatura de exaustão (T_4) = 552,78 °C

$$\dot{W}_{TG} = 1.753 \text{ kW}$$

Heat rate = 23,071 kJ/kW. h

- **Conjunto à gás nº 2 (CG2):**

Nome: Nuovo Pignone PGT2

$$\dot{m}_{v(g)} = 4,8 \text{ t/h} = 1,33 \text{ kg/s (para o sistema que opera com } P = 6,3 \text{ MPa e } T = 450 \text{ °C)}$$

$$\dot{m}_{v(g)} = 5,1 \text{ t/h} = 1,42 \text{ kg/s (para o sistema que opera com } P = 4,2 \text{ MPa e } T = 400 \text{ °C)}$$

$$\dot{m}_{v(g)} = 5,5 \text{ t/h} = 1,53 \text{ kg/s (para o sistema que opera com } P = 2,1 \text{ MPa e } T = 350 \text{ °C)}$$

$$\dot{m}_{ar} = 10,024 \text{ kg/s}$$

$$\rightarrow \dot{m}_{gás} = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb(g)} = 10,024 + 0,163 = 10,187 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{comb(g)} = 0,163 \text{ kg/s}$$

Temperatura de exaustão (T_4) = 550,00 °C

$$\dot{W}_{TG} = 1.800 \text{ kW}$$

Heat rate = 14,401 kJ/kW. h

• **Conjunto à gás nº 3 (CG3):**

Nome: Allison 501 KBJ

$$\dot{m}_{v(g)} = 8,2 \text{ t/h} = 2,27 \text{ kg/s (para o sistema que opera com } P = 6,3 \text{ MPa e } T = 450 \text{ °C)}$$

$$\dot{m}_{v(g)} = 8,8 \text{ t/h} = 2,44 \text{ kg/s (para o sistema que opera com } P = 4,2 \text{ MPa e } T = 400 \text{ °C)}$$

$$\dot{m}_{v(g)} = 9,4 \text{ t/h} = 2,61 \text{ kg/s (para o sistema que opera com } P = 2,1 \text{ MPa e } T = 350 \text{ °C)}$$

$$\dot{m}_{ar} = 15,377 \text{ kg/s}$$

$$\rightarrow \dot{m}_{gás} = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb(g)} = 15,377 + 0,290 = 15,667 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{comb(g)} = 0,290 \text{ kg/s}$$

Temperatura de exaustão (T_4) = 580,00 °C

$$\dot{W}_{TG} = 3.804 \text{ kW}$$

Heat rate = 13,182 kJ/kW. h

Foi feita também uma aplicação da equação da continuidade no ponto A da figura 5.4, obtendo-se a seguinte relação:

$$\dot{m}_{v(g)} + \dot{m}_{v(r)} = \dot{m}_p + \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_c = \dot{m}_{v(g)} + \dot{m}_{v(r)} - \dot{m}_p$$

sendo que: $\dot{m}_{v(g)}$ → valores especificados para cada conjunto à gás de acordo com o sistema de cogeração considerado

$$\dot{m}_{v(r)} \rightarrow \text{varia de 0 à 3,6 t/h}$$

$$\dot{m}_p \rightarrow \text{valor fixado em 3,6 t/h (produção de vapor da alternativa 1)}$$

Com isso, através dos cálculos realizados para cada sistema de cogeração, fez-se o levantamento de três gráficos destinados à mostrarem uma comparação entre a $\dot{m}_c$ e a $\dot{m}_{v(r)}$.

- Para o sistema de cogeração que opera com $P = 6,3 \text{ MPa}$ e $T = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\dot{m}_c = \dot{m}_{v(g)} + \dot{m}_{v(r)} - \dot{m}_p$$

a) Considerando a $\dot{m}_{v(g)}$ do CG1:

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 0 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{mín})} = 7,2 + 0 - 3,6 = 3,6 \text{ t/h} = 1,0 \text{ kg/s}$

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 3,6 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{máx})} = 7,2 + 3,6 - 3,6 = 7,2 \text{ t/h} = 2,0 \text{ kg/s}$

b) Considerando a $\dot{m}_{v(g)}$ do CG2:

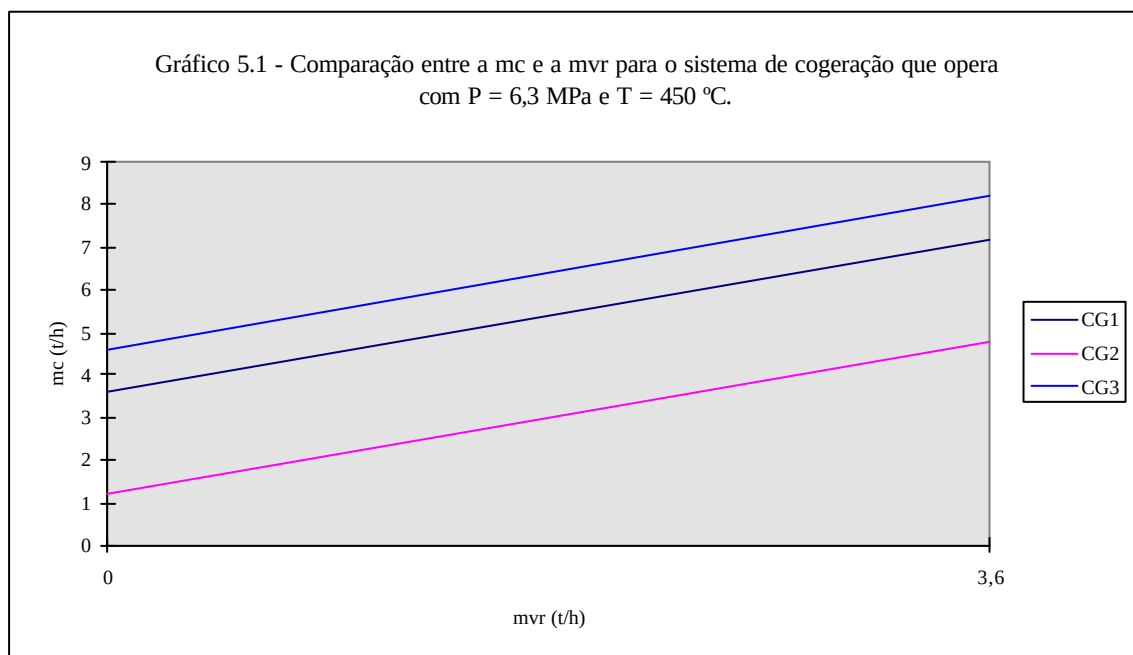
- Para $\dot{m}_{v(r)} = 0 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{mín})} = 4,8 + 0 - 3,6 = 1,2 \text{ t/h} = 0,33 \text{ kg/s}$

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 3,6 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{máx})} = 4,8 + 3,6 - 3,6 = 4,8 \text{ t/h} = 1,33 \text{ kg/s}$

c) Considerando a $\dot{m}_{v(g)}$ do CG3:

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 0 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{mín})} = 8,2 + 0 - 3,6 = 4,6 \text{ t/h} = 1,27 \text{ kg/s}$

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 3,6 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{máx})} = 8,2 + 3,6 - 3,6 = 8,2 \text{ t/h} = 2,27 \text{ kg/s}$



- Para o sistema de cogeração que opera com $P = 4,2 \text{ MPa}$ e $T = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

a) Considerando a $\dot{m}_{v(g)}$ do CG1:

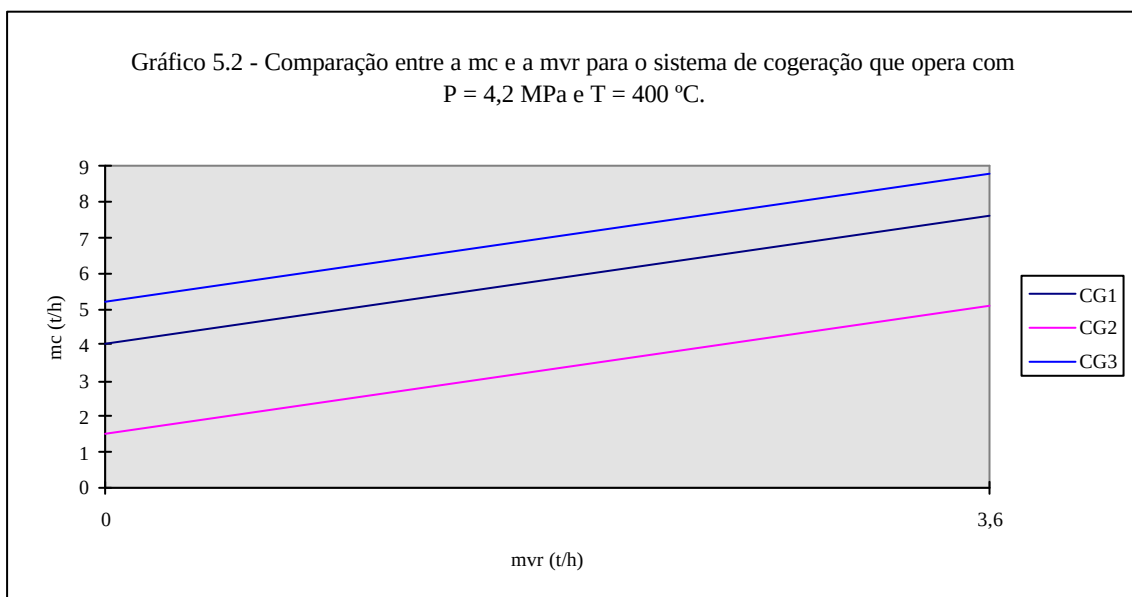
- Para $\dot{m}_{v(r)} = 0 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{mín})} = 7,6 + 0 - 3,6 = \mathbf{4,0 \text{ t/h} = 1,11 \text{ kg/s}}$
- Para $\dot{m}_{v(r)} = 3,6 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{máx})} = 7,6 + 3,6 - 3,6 = \mathbf{7,6 \text{ t/h} = 2,11 \text{ kg/s}}$

b) Considerando a $\dot{m}_{v(g)}$ do CG2:

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 0 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{mín})} = 5,1 + 0 - 3,6 = \mathbf{1,5 \text{ t/h} = 0,42 \text{ kg/s}}$
- Para $\dot{m}_{v(r)} = 3,6 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{máx})} = 5,1 + 3,6 - 3,6 = \mathbf{5,1 \text{ t/h} = 1,42 \text{ kg/s}}$

c) Considerando a $\dot{m}_{v(g)}$ do CG3:

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 0 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{mín})} = 8,8 + 0 - 3,6 = \mathbf{5,2 \text{ t/h} = 1,44 \text{ kg/s}}$
- Para $\dot{m}_{v(r)} = 3,6 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{máx})} = 8,8 + 3,6 - 3,6 = \mathbf{8,8 \text{ t/h} = 2,44 \text{ kg/s}}$



- Para o sistema de cogeração que opera com $P = 2,1 \text{ MPa}$ e $T = 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

a) Considerando a $\dot{m}_{v(g)}$ do CG1:

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 0 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{mín})} = 8,3 + 0 - 3,6 = \mathbf{4,7 \text{ t/h} = 1,31 \text{ kg/s}}$

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 3,6 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{máx})} = 8,3 + 3,6 - 3,6 = \mathbf{8,3 \text{ t/h} = 2,31 \text{ kg/s}}$

b) Considerando a $\dot{m}_{v(g)}$ do CG2:

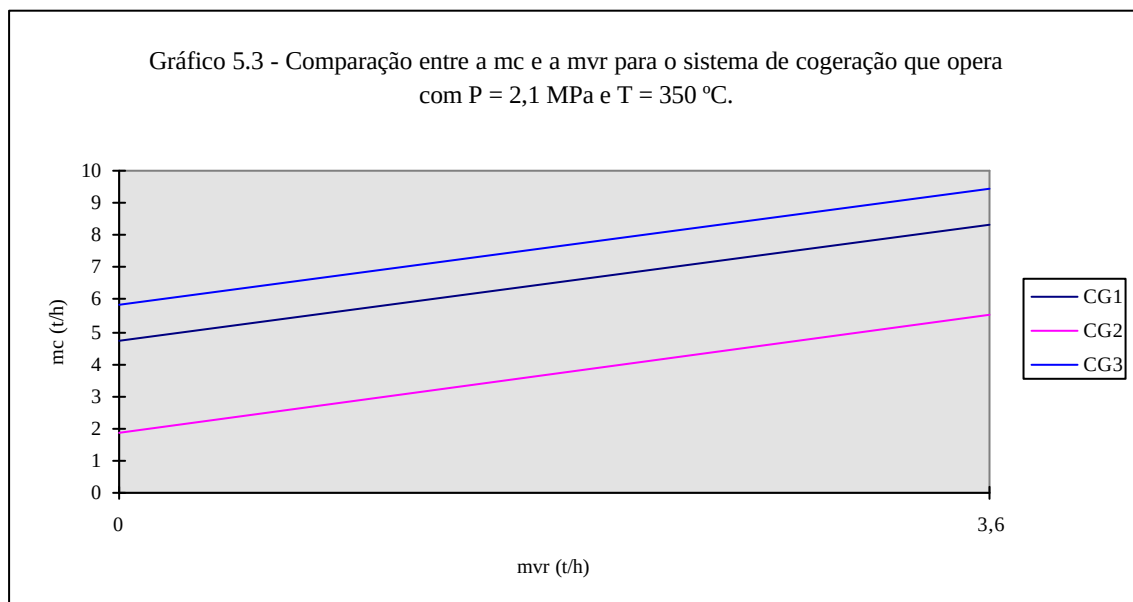
- Para $\dot{m}_{v(r)} = 0 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{mín})} = 5,5 + 0 - 3,6 = \mathbf{1,9 \text{ t/h} = 0,53 \text{ kg/s}}$

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 3,6 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{máx})} = 5,5 + 3,6 - 3,6 = \mathbf{5,5 \text{ t/h} = 1,53 \text{ kg/s}}$

c) Considerando a $\dot{m}_{v(g)}$ do CG3:

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 0 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{mín})} = 9,4 + 0 - 3,6 = \mathbf{5,8 \text{ t/h} = 1,61 \text{ kg/s}}$

- Para $\dot{m}_{v(r)} = 3,6 \text{ t/h} \rightarrow \dot{m}_{c(\text{máx})} = 9,4 + 3,6 - 3,6 = \mathbf{9,4 \text{ t/h} = 2,61 \text{ kg/s}}$



Na sequência, após esta pré-análise, serão apresentados na tabela 5.9 os resultados da análise técnica dos sistemas de cogeração com base no equacionamento.

No estudo de viabilidade econômica da alternativa 2 é importante salientar que os parâmetros especificados na análise econômica da alternativa 1 serão mantidos, com adequação dos parâmetros às duas condições extremas de vazão de vapor decorrente da incineração de resíduos (conforme ilustradas nos gráficos 5.1 à 5.3). Apenas faz-se necessário acrescentar os valores do custo do gás natural: $\$_{\text{comb(GN)}} = 0,18 \text{ US\$/kg}$ (Costa, 1997) e do investimento total para cada conjunto à gás:

Dresser Rand KG2-3E (CG1) ® 500 US\$/kW

Nuovo Pignone PGT2 (CG2) ® 450 US\$/kW

Allison 501 KBJ (CG3) ® 380 US\$/kW

Os resultados finais da análise econômica para a alternativa 2 encontram-se ilustrados na tabela 5.10.

Uma nova simulação com a faixa de variação do custo do combustível, conforme fonte e valores já mencionados na alternativa anterior, revela um período de retorno (k) como indicado na tabela 5.10. Com base nesses valores é necessário compreender que, quando comparados aos da alternativa 1, o empreendimento proposto torna-se vultoso com relação ao capital à ser investido, o que nos permite dizer que o sistema de cogeração que opera segundo um ciclo à vapor com caldeira convencional para a queima de resíduo sólido municipal é mais viável economicamente.

Tabela 5.9 - Dados da análise técnica para a alternativa 2.

CASOS	(1)			(2)			(3)		
$E_{\text{comb}(r)}$ [kW]	3.376,67			3.277,29			3.192,26		
$E_{\text{comb}(g)}$ [kW]	(CG1) 14.859,00	(CG2) 9.535,50	(CG3) 16.965,00	(CG1) 14.859,00	(CG2) 9.535,50	(CG3) 16.965,00	(CG1) 14.859,00	(CG2) 9.535,50	(CG3) 16.965,00
$\dot{m}_{\text{comb}(r)}$ [kg/h]	2.431,08			2.359,80			2.298,60		
$\dot{W}_{\text{eixo}(TV1)}$ [kW]	406,58			335,32			290,10		
$\dot{W}_{\text{eixo}(TV2)\text{mín}}$ [kW]	(CG1) 3.129,83	(CG2) 1.032,84	(CG3) 3.974,88	(CG1) 3.377,10	(CG2) 1.277,82	(CG3) 4.381,10	(CG1) 3.887,07	(CG2) 1.572,63	(CG3) 4.777,24
$\dot{W}_{\text{eixo}(TV2)\text{máx}}$ [kW]	(CG1) 6.259,66	(CG2) 4.162,67	(CG3) 7.104,71	(CG1) 6.419,53	(CG2) 4.320,25	(CG3) 7.423,53	(CG1) 6.854,30	(CG2) 4.539,86	(CG3) 7.744,47
$\dot{W}_{\text{eixo}(TG)}$ [kW]	(CG1) 1.612,76	(CG2) 1.656,00	(CG3) 3.499,68	(CG1) 1.612,76	(CG2) 1.656,00	(CG3) 3.499,68	(CG1) 1.612,76	(CG2) 1.656,00	(CG3) 3.499,68
$E_{p(1)}$ [kW]	386,25			318,56			275,60		
$E_{p(2)\text{mín}}$ [kW]	(CG1) 2.973,34	(CG2) 981,19	(CG3) 3.776,14	(CG1) 3.208,24	(CG2) 1.213,93	(CG3) 4.162,04	(CG1) 3.692,71	(CG2) 1.493,99	(CG3) 4.538,38
$E_{p(2)\text{máx}}$ [kW]	(CG1) 5.946,67	(CG2) 3.954,54	(CG3) 6.749,47	(CG1) 6.098,55	(CG2) 4.104,24	(CG3) 7.052,35	(CG1) 6.511,58	(CG2) 4.312,87	(CG3) 7.357,25
$E_{p(TG)}$ [kW]	(CG1) 1.532,12	(CG2) 1.573,20	(CG3) 3.324,69	(CG1) 1.532,12	(CG2) 1.573,20	(CG3) 3.324,69	(CG1) 1.532,12	(CG2) 1.573,20	(CG3) 3.324,69
E_c [kW]	2.471,30			2.455,35			2.425,20		
$\dot{W}_{\text{bomba}}$ [kW]	(CG1) 28,98	(CG2) 22,51	(CG3) 31,59	(CG1) 18,66	(CG2) 14,52	(CG3) 20,64	(CG1) 7,78	(CG2) 5,95	(CG3) 8,48
$\eta_{\text{ge}(\text{mín})}$ [%]	(CG1) 26,7	(CG2) 22,6	(CG3) 36,7	(CG1) 27,8	(CG2) 24,1	(CG3) 38,5	(CG1) 30,4	(CG2) 26,2	(CG3) 40,3
$\eta_{\text{ge}(\text{máx})}$ [%]	(CG1) 43,0	(CG2) 45,6	(CG3) 51,3	(CG1) 43,7	(CG2) 46,7	(CG3) 52,7	(CG1) 46,0	(CG2) 48,4	(CG3) 54,3
η_{gc} [%]	(CG1) 13,5	(CG2) 19,1	(CG3) 12,1	(CG1) 13,5	(CG2) 19,1	(CG3) 12,1	(CG1) 13,4	(CG2) 19,0	(CG3) 12,0
$\eta_{\text{global}(\text{mín})}$ [%]	(CG1) 40,3	(CG2) 41,9	(CG3) 48,9	(CG1) 41,4	(CG2) 43,4	(CG3) 50,7	(CG1) 43,9	(CG2) 45,3	(CG3) 52,4
$\eta_{\text{global}(\text{máx})}$ [%]	(CG1) 56,6	(CG2) 64,9	(CG3) 63,5	(CG1) 57,3	(CG2) 66,0	(CG3) 64,9	(CG1) 59,5	(CG2) 67,5	(CG3) 66,4

Tabela 5.10 - Resultados finais da análise econômica para a alternativa 2.

Condição (a): com vazão de vapor ($m_{v(r)}$) nula

CONDIÇÕES DE VAPOR VIVO	P = 6,3 MPa T = 450 °C			P = 4,2 MPa T = 400 °C			P = 2,1 MPa T = 350 °C		
Custo de investimento_(mín) [US\$]	(CG1) 15.884.215	(CG2) 6.861.420	(CG3) 19.994.137	(CG1) 16.636.660	(CG2) 7.604.145	(CG3) 21.426.082	(CG1) 18.623.455	(CG2) 8.671.095	(CG3) 22.926.292
Tempo de retorno k (anos) para \$_{comb(R)1}	(CG1) 14,4	(CG2) 8,8	(CG3) 10,4	(CG1) 14,5	(CG2) 9,2	(CG3) 10,5	(CG1) 14,2	(CG2) 9,5	(CG3) 10,7
Tempo de retorno k (anos) para \$_{comb(R)2}	(CG1) 12,1	(CG2) 6,9	(CG3) 9,4	(CG1) 12,3	(CG2) 7,3	(CG3) 9,6	(CG1) 12,3	(CG2) 7,8	(CG3) 9,8

Condição (b): com vazão de vapor ($m_{v(r)}$) igual a 3,6 t/h

CONDIÇÕES DE VAPOR VIVO	P = 6,3 MPa T = 450 °C			P = 4,2 MPa T = 400 °C			P = 2,1 MPa T = 350 °C		
Custo de investimento_(máx) [US\$]	(CG1) 29.264.200	(CG2) 20.241.495	(CG3) 33.374.122	(CG1) 29.643.055	(CG2) 20.610.540	(CG3) 34.432.477	(CG1) 31.308.370	(CG2) 21.356.055	(CG3) 35.611.207
Tempo de retorno k (anos) para \$_{comb(R)1}	(CG1) 14,2	(CG2) 11,6	(CG3) 11,6	(CG1) 14,2	(CG2) 11,7	(CG3) 11,6	(CG1) 14,1	(CG2) 11,7	(CG3) 11,6
Tempo de retorno k (anos) para \$_{comb(R)2}	(CG1) 14,0	(CG2) 11,4	(CG3) 11,4	(CG1) 14,0	(CG2) 11,5	(CG3) 11,5	(CG1) 13,9	(CG2) 11,5	(CG3) 11,5

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Ainda que a discussão acerca da disponibilidade do petróleo a baixo preço seja recorrente em algumas fases da história recente da Humanidade, permanece como uma questão importante a análise de alternativas que lhe sejam competitivas em termos dos aspectos econômico e ambiental.

A revisão bibliográfica apresentada acerca do aproveitamento energético dos resíduos sólidos municipais revela alguns aspectos relevantes:

- com o crescimento populacional verificado no último século, a necessidade de áreas agricultáveis e para o seu assentamento tem requerido um grande esforço dos governos visando seu atendimento, o que é particularmente agravado pela necessidade do emprego de grandes áreas para a deposição do lixo gerado;
- no caso específico de países como Japão, que apresenta severas restrições de área, a situação do lixo urbano se mostra ainda mais grave, exigindo medidas adequadas para garantir um acondicionamento eficaz;
- existem estudos, em diferentes níveis de aprofundamento, que mostram a oportunidade do aproveitamento energético do lixo urbano, ainda que com custos de investimento relativamente elevados, bem como com agravos ambientais pela emissão de poluentes orgânicos e inorgânicos.

Na Região de Guaratinguetá identificam-se algumas iniciativas no que se refere ao aproveitamento dos resíduos sólidos municipais:

- em 1993, por iniciativa conjunta da Prefeitura Municipal de Guaratinguetá e da Obra Social Nossa Senhora da Glória, entidade filantrópica voltada para a recuperação e reinserção de alcoólatras e drogados na sociedade, um grupo de pesquisadores alemães realizou um levantamento da situação do lixo na região, propondo alternativas para o seu aproveitamento;
- a Obra Social Nossa Senhora da Glória realiza atualmente um trabalho de reciclagem, especialmente de plásticos, para produção de artefatos que possam ser comercializados visando a redução desses materiais no lixo urbano da região;

- o CODEVAP - Consórcio para o Desenvolvimento do Vale do Paraíba - é uma entidade intermunicipal que busca, através da associação entre os diversos municípios do Vale do Paraíba, alcançar um melhor estágio de desenvolvimento e progresso de suas populações;
- na mesma linha de atuação, o CIRG - Consórcio Intermunicipal da Região de Guaratinguetá
- seria uma possibilidade de atuação conjunta para o uso múltiplo do resíduo sólido municipal, bem como uma forma de garantir um volume adequado para iniciativas como a geração de energia;
- finalmente, cabe mencionar recente iniciativa da Câmara Municipal de Guaratinguetá na realização de palestra sobre o tema da reciclagem, em comemoração ao dia do Meio Ambiente.

A partir dessas considerações, foram realizados estudos aqui apresentados para a validação da proposta de aproveitamento conjunto da energia gerada a partir da incineração do lixo urbano de um possível consórcio entre oito cidades do fundo do Vale do Paraíba.

Da análise da alternativa 1, que se baseou no ciclo a vapor, conclui-se que através de financiamento captado junto a organismos de desenvolvimento econômico e social é possível empregar tal sistema de co-geração em quaisquer dos casos estudados, ainda que trabalhando em paridade térmica (considerando-se o consumo de vapor em um pólo industrial próximo à central térmica proposta); em complemento a esta análise, realizou-se uma verificação das possibilidades de geração com a incineração total dos resíduos gerados na região, obtendo-se por resultados uma inalteração no período de retorno (k) e um aumento na geração combinada de eletricidade e de calor útil.

Na alternativa 2 um ciclo combinado, com diferentes conjuntos a gás queimando gás natural em associação à um ciclo térmico a vapor incinerando resíduo sólido municipal, permite concluir que com base nos valores elevados do custo de investimento é inviável a utilização de um sistema de cogeração deste porte e que opere segundo as condições impostas, visando prioritariamente o atendimento de empresas de reciclagem de produtos localizadas em um pólo industrial próximo às instalações da unidade termelétrica.

Recomendações e Trabalhos Futuros

A presença do gás natural no Vale do Paraíba tem se mostrado crescente pela atuação mais vigorosa da COMGAS no processo de distribuição dessa fonte energética e prevê-se que poderá ser ainda maior a partir da entrada do gás boliviano, em futuro próximo. Vale lembrar que a tubulação de gás natural já é existente entre Rio de Janeiro e São Paulo e que a construção dos *city gates* na Região de Guaratinguetá está em fase adiantada.

Face a essa questão, seria importante uma melhor avaliação de configurações alternativas para a geração conjunta de energia, conforme se apresenta na alternativa 2 do Capítulo 5, de modo a que se possa encontrar possibilidades com melhores índices de uso combinado das fontes combustíveis. Não é demais reforçar a melhoria do aspecto social que se imagina alcançar a partir do aproveitamento energético do lixo urbano, o que pode ser potencializado do ponto de vista ambiental com o emprego do gás natural.

A questão ambiental é, da mesma forma, um importante ponto a ser considerado em análises futuras, face aos agravos que tanto a simples deposição do lixo em aterros quanto a sua incineração podem causar. Dessa forma, são recomendáveis esforços que visem um aprofundamento desse quesito na pesquisa de alternativas tecnológicas recomendadas para a eliminação (ainda que parcial) de poluentes orgânicos e inorgânicos. A esse respeito, apresentam-se em anexo informações pertinentes ao tema.

Finalmente, é importante considerar que os custos ambientais decorrentes da necessidade de retenção das emissões gasosas pode ampliar de maneira expressiva os resultados econômicos aqui apresentados, o que reforça a necessidade de um aprofundamento da análise, baseado nessa vertente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALESTIERI, J.A.P. Estudo de sistemas de cogeração com aplicação de Métodos de Monte Carlo. Itajubá, 1990. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- BALESTIERI, J.A.P. Planejamento de centrais de cogeração: uma abordagem multiobjetiva. Campinas, 1994. 151p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Campinas.
- BALESTIERI, J.A.P. Planejamento de centrais de cogeração: projeto, operação e expansão. Guaratinguetá, 1997. 184p. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista.
- BARNISKE, L. Emission of trace organics from municipal solid waste incinerators - rationale of national guidelines in the Federal Republic of Germany. Waste Manag. Res., v.5, p. 347-54, 1987.
- BERENYI, E. B. The status of municipal waste combustion in the United States. Journal of Hazardous Materials, v.47, p. 1-17, 1996.
- BROWN, H.L. et al. Energy analysis of 108 industrial processes. Fairmont Press, 1985.
- BURNETT, J.M. Waste materials as fuels. In: O'CALLAGHAN, P. Energy for Industry. Oxford: Pergamon, 1979. p. 91-108.
- Combined refuse incineration, gas turbine power system in Japan. Diesel & Turbine Worldwide, p. 12-3, June, 1997.
- COSTA, M.H.A. Análise da viabilidade de sistemas de cogeração com gás natural. Guaratinguetá, 1997. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista.

- FIGUEIREDO, P.J.M. A sociedade do lixo: os resíduos, a questão energética e a crise ambiental. 2.ed. Piracicaba: Unimep, 1995. 240p.
- GOUNON, J., MILHAU, A. Analysis of inorganic pollutants emitted by the city of Paris garbage incineration plants. Waste Manag. Res., v.4, p. 95-104, 1986.
- GYFTOPOULOS, E. P., WIDMER, T. F. Cost-effective waste: energy utilization. Annual Review of Energy, v.7, p. 293-327, 1982.
- HANEDA, H. Efficiency improvement options for municipal waste-fired power generation - recent development activities in Japan: a review. Proc. Instn. Mech. Engrs., v.209, p. 81-100, 1995.
- HARTENSTEIN, H. U., HORVAY, M. Overview of municipal waste incineration industry in west Europe (based on the German experience). Journal of Hazardous Materials, v.47, p. 19-30, 1996.
- HUNSICKER, M.D., CROCKETT, T.R., LABODE, B.M.A. An overview of the municipal waste incineration industry in Asia and the former Soviet Union. Journal of Hazardous Materials, v.47, p. 31-42, 1996.
- ITO, K., YOKOYAMA, R., SHIMODA, M. Optimal planning of a super waste incineration cogeneration plant. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, v.119, p. 903-9, 1997.
- KROBITSYN, M.A., HIRS, G.G., JELLEMA, R. Integration of a gas turbine and a municipal solid waste incinerator. Power Technology International, p. 46-9, Autumn, 1997.
- KROL, A.A., DENT, C.G. A comparison of the application of “energy from municipal solid waste” technology in three countries - the United Kingdom, Sweden and Canada. Proc. Instn. Mech. Engrs., v.203, p. 207-15, 1989.

LEITE, R.C.C. O fim do petróleo. Folha de São Paulo, caderno 1, 10/05/98. p. 3.

LEME, F.P. Sistema de manejo de resíduos sólidos. In: _____. Engenharia do Saneamento Ambiental. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984. p. 247-77.

MALLOY, M.G., McADAMS, C.L. The U.S. & international municipal waste combustion industry. Waste Age, v.25, p. 89-98, 1994.

MARIOTONI, C.A., FERRUCCIO, S.J.A. Planejamento energético na engenharia civil: o caso da incineração de resíduos sólidos urbanos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 6, 1993, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: UFRJ, 1993. p. 1143-6.

OLIVEIRA, W.E. Resíduos sólidos e limpeza pública. In: PHILIPPI JÚNIOR, A. Saneamento do Meio. São Paulo: FUNDACENTRO - USP, 1998. p. 81-113.

PENNER, S.S., WIESENHAHN, D.F., LI, C. P. Mass burning of municipal wastes. Annual Review of Energy, v.12, p. 415-44, 1987.

PROBERT, S.D., KERR, K., BROWN, J. Harnessing energy from domestic, municipal and industrial refuse. Applied Energy, v.27, p. 89-168, 1987.

SALES FILHO, F.A., FIGUEIREDO, P.J.M. Geração termelétrica a partir de resíduos urbanos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COGERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA, 1, 1989, Campinas. Anais... Campinas: Aipse/Unicamp, 1989. p. 195-213.

- SCHALCH, V., LEITE, W.C.A., GOMES, L.P. Curso sobre gerenciamento de resíduos sólidos. São Carlos: Departamento de Hidráulica e Saneamento - USP, 1990. 225p.
- SMITH, D. J. Integrated waste management systems are the only solution. Power Engineering, v.94, p. 18-25, 1990.
- TAKIISHI, M. Falta incentivo para o lixo gerar energia. Química e Derivados, p. 42-6, Março, 1989.
- VAN WYLEN, G.J., SONNTAG, R.E. Fundamentos da termodinâmica clássica. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1976. 565p.
- VOGG, H. et al. The specific role of cadmium and mercury in municipal solid waste incineration. Waste Manag. Res., v.4, p. 65-74, 1986.
- WEHENPOHL, G., PFAFF-SIMONEIT, W. Conceito integrado de resíduos sólidos para a Região de Guaratinguetá / Brasil: análise e conceito. 1.ed. Guaratinguetá: Brochura, 1993. 136p.
- WILSON, D.G. et al. A waste-to-energy recycling plant for Beirut. Proc. Instn. Mech. Engrs., v.209, p. 63-70, 1995.

Holanda, M.R., Avaliação do potencial de co-geração a partir de resíduos sólidos municipais na Região de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 1998, 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

RESUMO

Após a turbulência ocorrida na década de 1970 com respeito ao preço internacional do petróleo, algumas vertentes da Conservação de Energia assumiram, nas décadas seguintes, papel de destaque na pesquisa e na prática industrial; desse modo, os impactos ambientais e a reciclagem respondem atualmente por dois dos temas de maior destaque. A cogeração é, por sua vez, uma forma de Conservação de Energia que tem por fundamento a redução do consumo das fontes energéticas para uma mesma produção final de energia, o que pode ser também visto como uma forma de aproveitamento múltiplo da produção final para um mesmo aporte energético. Associados, cogeração e aproveitamento dos resíduos sólidos municipais podem ser, em futuro próximo, uma das alternativas viáveis para a superação dos efeitos decorrentes do uso indiscriminado do petróleo. Neste trabalho foram feitas simulações a partir de duas configurações distintas de sistemas térmicos de geração (ciclo a vapor e ciclo combinado) para a Região de Guaratinguetá, a partir de informações coletadas em relatório elaborado por especialistas alemães e tendo por base um levantamento de iniciativas de igual teor em outros países. O emprego de valores reais para equipamentos e custos permitiram realizar uma análise de viabilidade econômica, a qual revelou tempos de retorno considerados baixos face às melhorias sociais e ambientais que adviriam de sua implantação.

Palavras-Chaves: Cogeração, Resíduos, Incineração.

Holanda, M.R., Evaluation of cogeneration feasibility with the burning of municipal solid waste in the Guaratinguetá Region. Guaratinguetá, 1998, 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

ABSTRACT

Some decades later since the international oil crisis of 1970's, Energy Conservation is nowadays being detached in the research and industrial fields: in this way, environmental impacts and recycling are discussed in several levels of influence. Cogeneration is also an energy conservation alternative since it is based on the energy input reduction for the same energy production output, in other words, it can be seen as a way to recover thermal and electric/mechanical energy for the same energy input. In this way, cogeneration and solid wastes can be seen as an important association to the near future for outcoming the undesirable effects of indiscriminated use of oil. Some simulations were presented, in this research report, based on two different schemes of thermal systems (a steam and a combined cycle) to the Guaratinguetá Region; data were collected from a report prepared by a group of German experts and schemes were proposed taking into account the state-of-the-art practised in the world. Real values were considered for generation systems set and costs and thus the economic results can be considered adequated, revealing paybacks considered adequated face to the social and environmental improvements obtained.

KEY-WORD: Cogeneration, Wastes, Incineration.

ANEXO

Aspectos sobre a emissão de poluentes na geração de energia

O aproveitamento energético dos resíduos sólidos tem como contrapartida a eliminação de partículas e substâncias tóxicas para a atmosfera; ainda que não seja o escopo deste trabalho analisá-las, são apresentadas algumas informações sobre o tema.

Como nos processos que utilizam a combustão/incineração de resíduos sólidos municipais para gerar energia ocorrem sempre as emissões de poluentes inorgânicos e orgânicos diretamente na atmosfera, baseados na experiência internacional, enfocam-se as emissões que podem existir nas mesmas, o problema da poluição atmosférica ocasionada pelos metais pesados (como o cádmio e o mercúrio), algumas instruções técnicas para manter a qualidade do ar e, por fim, os equipamentos utilizados no controle da poluição do ar atmosférico.

- **Emissões existentes em unidades de combustão/incineração**

a) Cinzas: parte incombusta das fontes combustíveis sólidas, as cinzas devem ser recolhidas tanto na fornalha quanto na corrente de gases de exaustão das caldeiras; as análises física e química das cinzas da unidade parisiense de Ivry são mostradas a título de exemplo na tabela A1. Os autores assinalam que o conteúdo de cinzas na fumaça das plantas de incineração, após a coleta das partículas de poeira, está entre 50 e 75 mg/m³. Os testes realizados sobre as emissões de poluentes na unidade de Issy-les-Moulineaux permitiram aferir uma eficiência do filtro de 98,75% e que mais ou menos 85,90% da quantidade total de cinzas são coletadas.

b) Ácido clorídrico

Segundo Gounon e Milhau (1986), na unidade de Saint-Ouen as medições de HCl (gasoso) feitas na emissão compreendem duas séries de análises no curso de duas semanas: uma no inverno e a outra no verão. Em cada semana, quatro amostragens de duas horas foram tomadas por dia (tanto em sentido ascendente, quanto no sentido descendente dos lavadores de gases). A concentração de HCl (gasoso) emitida na atmosfera foi de média para alta (198 à 746 mg/m³) e variou com o tempo.

Tabela A1 - Análises física e química das cinzas da planta de incineração Ivry.

	Porcentagem
Composição granular:	
< 0,08 mm	3,2
0,08 até < 0,5 mm	83,8
0,5 até < 4 mm	12,0
> 4 mm	1,0
Composição química:	
Perda na combustão à 1.000 °C	15,17
SiO ₂	30,72
Al ₂ O ₃	17,03
CaO	17,00
Fe ₂ O ₃	1,49
TiO ₂	1,60
MnO	0,12
MgO	2,10
SO ₃	5,20
Na ₂ O	4,05
K ₂ O	3,33
BaO	0,27
ZnO	1,92

Fonte: Gounon e Milhau (1986)

Com relação a acidez do ar atmosférico, muitas medições ambientais foram realizadas nas redondezas desta mesma unidade de incineração tentando detectar uma possível ligação com as emissões de HCl (gasoso). Os resultados com base nas quantidades de ácidos fortes, de cloretos particulados e de ácido clorídrico gasoso foram coletados e comparados durante dois períodos de controle, fornecendo um intervalo de medida entre 11,1 e 14,4 µg/m³ em

relação a quantidade total de cloretos e uma razão de cloreto particulado/cloreto gasoso geralmente maior do que 1,0.

c) Emissões de metais pesados

De acordo com Vogg, Braun, Metzger e Schneider (1986), a crescente conscientização com relação a poluição ambiental no decorrer dos anos no tocante à incineração de resíduos sólidos municipais não apenas reduziu drasticamente as emissões de HCl, SO₂ e CO e a geração de poeiras mas também diminuiu os constituintes destas, especialmente os metais pesados e os poluentes orgânicos, bem como as emissões de metais pesados gasosos e substâncias orgânicas gasosas, tornando-se assunto de grande interesse.

Um número crescente de sinais de contaminações no solo, que em muitos casos não podem ser causados por outros mecanismos senão pelas emissões e suas deposições, provam que a obrigatoriedade de se reduzir as emissões de poluentes é inteiramente justificada. Porém, em debates públicos sobre as emissões das unidades de incineração de lixo urbano, o problema dos metais pesados é geralmente discutido de forma muito global, omitindo o fato de que em vários sistemas de emissões pode ocorrer a presença individual de metais desse tipo em concentrações diferentes e conseqüentemente com uma variação importante.

Problemas ligados com emissões de metais pesados num processo de fundição são basicamente diferentes dos problemas da combustão do carvão e este, por sua vez, não pode ser comparado àqueles encontrados na incineração de resíduos sólidos municipais. A liberação de vários metais pesados na incineração de refugos não depende muito das concentrações do próprio lixo, mas muito mais do mecanismo químico agindo em temperaturas elevadas em combinação com a presença de componentes não metálicos. A tabela A2 mostra as concentrações de alguns metais pesados importantes presentes nos resíduos sólidos municipais.

Tabela A2 - Concentração de metais pesados constituintes do lixo urbano.

	Quantidade presente nos resíduos (g/tonelada)
Zn	3.000
Pb	1.500
Cu	100
Ni	100
Sb	50
Cd	20
Hg	5

Fonte: Vogg, Braun, Metzger e Schneider (1986)

Conforme pesquisas realizadas por Gounon e Milhau (1986), as concentrações de metais pesados presentes nos efluentes gasosos para a unidade de incineração Issy parecem baixas, quando comparadas com os resultados usualmente publicados. Não levando em consideração a natureza dos produtos incinerados, que muito afetam a produção destes metais, a validade das medições podem ser talvez reconsideradas. Todas estas afirmações podem ser ilustradas através da tabela A3 que mostra as análises das cinzas na entrada, no interior e na saída do precipitador eletrostático desta mesma unidade.

Tabela A3 - Concentração de metais pesados presentes nas cinzas encontradas na entrada, no interior e na saída do precipitador eletrostático da unidade de incineração Issy.

Ponto de medição	Ag	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Ba	Hg	Pb	Zn
17/outubro/1984										
Entrada (mg/g)	0,09	0,12	0,06	0,55	2,20	0,33	0,16	0,001	4,00	11,80
Interior (mg/g)	0,13	1,19	0,03	0,26	2,30	0,07	0,074	0,007	20,25	42,20
Saída (mg/m ³)	0,015	0,10	0,007	0,28	0,13	0,02	0,086	0,006	1,68	2,07
18/outubro/1984										
Entrada (mg/g)	0,18	0,18	0,07	0,76	4,30	0,54	0,10	0,001	6,50	27,80
Interior (mg/g)	0,16	1,47	0,02	0,30	3,10	0,06	0,08	0,008	31,30	57,65
Saída (mg/m ³)	0,018	0,06	0,007	0,09	0,13	0,01	0,055	0,008	1,94	2,27

Fonte: Gounon e Milhau (1986)

Para a unidade de incineração Saint-Ouen foram encontradas, entre 12 e 14 de março de 1985, as concentrações totais para os seguintes metais pesados como chumbo, mercúrio e cádmio:

CHUMBO = 43,2 (mg Nm³), geralmente como sólido;

MERCÚRIO = 0,58 (mg Nm³), metade como sólido e metade com gás;

CÁDMIO = 1,11 (mg Nm³), geralmente como sólido.

Estes números são extremamente elevados, pois muitos alegam a obsolescência da unidade e outros já apontam o projeto rudimentar do lavador de gases. Existem indícios de que a presença de uma quantidade considerável de poeiras nos gases foi certamente a causadora do aparecimento de erros instrumentais nestas medições, tornando-se impossível uma validade comparativa destes resultados com quaisquer outros.

De acordo com Vogg, Braun, Metzger e Schneider (1986), pode-se concluir que nos processos de incineração faz-se necessário tomar algumas medidas específicas contra as emissões de dois metais pesados tóxicos, o cádmio e o mercúrio que sempre estão presentes nos resíduos sólidos municipais. No caso do cádmio, medidas extensivas para a remoção de poeiras seriam suficientes, com o objetivo de alcançar, nos gases das chaminés, valores das mesmas em torno de 20-30 mg Nm³, não esquecendo de que melhores estratégias para a classificação dos materiais sólidos devam ser aplicadas. No caso do mercúrio, as reduções nas temperaturas dos gases da chaminé bem abaixo de 200 °C, em conexão com o emprego de métodos de absorção, implicando num decréscimo das emissões deste metal. A adsorção, a condensação e alguns outros processos destinados à redução de emissões de poluentes possuem também um papel importante. Os métodos que utilizam os lavadores de gases são muito eficientes na remoção do mercúrio, assim como as reduções na temperatura abaixo de 65 °C e também a adição de um agente oxidante podem ser vantajosos.

- **Recomendações técnicas para se manter a qualidade do ar atmosférico**

a) Requisitos gerais para a combustão auxiliar e secundária

Os incineradores de resíduos sólidos devem ser adaptados com uma câmara de combustão secundária, localizada ou no próprio forno ou atrás dele. Nessa câmara o gás deve ter uma temperatura de pelo menos 800 °C após a entrada final do fornecimento de ar. Em adição, faz-se necessário um tempo adequado de retenção dos gases da chaminé na câmara de combustão, assim como os mesmos devem possuir um conteúdo de oxigênio da ordem de 6% por volume.

É importante observar que para incinerar os resíduos contendo hidrocarbonetos aromáticos policlorados, tais como bifenis e polifenis policlorados, em níveis mais elevados do que é usual em resíduos urbanos ou semelhantes, é necessário uma temperatura de pelo menos 1.200 °C. Tal resíduo não deve ser introduzido no incinerador até que a temperatura mínima tenha sido alcançada pelo combustível adicional de queima ou pelos fornos auxiliares. Quando a unidade está parada, os fornos auxiliares devem ser colocados em operação para manter esta temperatura mínima até que não exista mais resíduo na própria câmara de combustão.

b) Restrição de monóxido de carbono (CO)

De acordo com Barniske (1987), os níveis de monóxido de carbono emitidos no gás da chaminé das unidades de combustão/incineração na Alemanha não devem exceder à 100 mg/m³, o que corresponde à 99,992% da eficiência de combustão. Esta redução assegura uma melhora na própria combustão de resíduos sólidos e, conseqüentemente, as emissões de poluentes orgânicos não-combustíveis são diminuídas. Devido ao uso de um indicador do nível de CO existe um requisito adicional, no qual os fornos auxiliares devem ser colocados em operação dentro de cinco minutos quando 80% do valor limite de emissão for alcançado ou excedido.

c) Restrição de poluentes orgânicos

Para que sejam mantidos os esforços de monitoramento dentro de limites razoáveis, as regulamentações têm sido simplificadas de modo que apenas um limite total de emissão de 200 mg/m³, em relação a quantidade total de carbono, é aplicado para cada unidade. Isto

significa que a restrição usual de emissões para poluentes individuais não será mais necessária por um longo tempo.

Existe um requisito utilizado para minimizar as emissões de poluentes que tem um nível particularmente baixo de degradação ou que são altamente tóxicos (tal como as dioxinas, os bifenis policlorados e outros) e, devido à sua composição, podem ter efeitos extremamente nocivos sobre o meio ambiente. Esse requisito especifica que tais emissões devem ser restritas dentro de limites que sejam aceitáveis. Os requisitos para o limite das emissões de substâncias químicas carcinogênicas também devem ser observados e as principais substâncias químicas dessa categoria, que são significativas em incineradores de resíduos, são dentre outros os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, benzopireno e o dibenzoantraceno. O valor limite de emissão para poluentes orgânicos tem uma função similar àquela apresentada para o CO, de modo que a redução da quantidade total de carbono nos gases da chaminé significa uma redução no conteúdo de orgânicos.

d) Limitação das emissões de material particulado

A redução do valor limite para as emissões de substâncias particuladas de 100 mg/m³ para 30 mg/m³ também tem o mesmo efeito da redução nas emissões de poluentes orgânicos, em particular o caso das dioxinas, de modo que a maioria dessas substâncias são estabelecidas na forma de partículas de poeiras.

• Equipamentos utilizados no controle da poluição atmosférica

O controle da poluição atmosférica é um aspecto que envolve a utilização de uma tecnologia simples. Os equipamentos tornam-se mais sofisticados desde 1982 de modo que as aplicações tecnológicas têm avançado para atender a legislações cada vez mais restritivas. Os dados da tabela A4 ilustram as mudanças ocorridas nas tecnologias de controle da poluição do meio ambiente.

Tabela A4 - Porcentagem de unidades de incineração que utilizam os equipamentos de controle da poluição do ar por ano nos EUA.

Equipamentos	Anos					
	1982	1984	1986	1988	1990	1992
Precipitador eletrostático	59,0 % (49)	52,7 % (59)	46,2 % (79)	41,3 % (83)	36,5 % (72)	40,4 % (69)
Sistemas de filtros	16,9 % (14)	16,1 % (18)	34,5 % (59)	44,3 % (89)	53,3 % (105)	50,3 % (86)
Lavadores do tipo via seco	6,0 % (5)	8,0 % (9)	35,1 % (60)	43,3 % (87)	51,8 % (102)	50,9 % (87)
Lavadores do tipo via úmida	7,2 % (6)	4,5 % (5)	5,3 % (9)	3,0 % (6)	4,6 % (6)	6,4 % (11)
Sistema de câmara de combustão dupla ou pós-queima	19,3 % (16)	14,3 % (16)	15,2 % (26)	12,4 % (25)	10,7 % (21)	9,4 % (16)
Sistema de controle de NO _x	0,0 % (0)	0,9 % (1)	1,8 % (3)	2,5 % (5)	14,7 % (29)	17,5 % (30)
Sistema de controle de mercúrio	0,0 % (0)	0,0 % (0)	0,0 % (0)	0,0 % (0)	0,0 % (0)	6,4 % (11)
Outras tecnologias	1,2 % (1)	0,9 % (1)	4,1 % (7)	2,5 % (5)	2,5 % (5)	1,8 % (3)
Não empregam nenhum sistema	4,8 % (4)	6,3 % (7)	4,7 % (8)	3,0 % (6)	4,1 % (8)	2,9 % (5)
Total (%) (Total de unidades)	114,5 % (88)	103,6 % (113)	146,8 % (166)	152,2 % (201)	178,2 % (202)	186,0 % (171)

Fonte: Berenyi (1996)

Em 1982 o tipo de equipamento predominante era o precipitador eletrostático, utilizado em 59% das unidades relatadas. Já em 1992, apenas 40% das unidades foram projetadas para utilizarem este tipo de tecnologia de controle da poluição do ar. Similarmente, o sistema com câmara de combustão dupla ou pós-queima, incorporado no esquema dos projetos das unidades de incineração, estava caindo de uso. Em 1982, 19% das unidades tinham esse tipo de sistema instalado no local e em 1992 a porcentagem caiu para 9%. Com isto, muitos projetos para a combustão de resíduos sólidos municipais foram sendo fechados, de modo que esse tipo de equipamento de controle da poluição vem sendo removido dessas unidades.

Uma tecnologia que teve seu crescimento máximo em termos de utilização é a combinação entre lavadores e sistemas de filtros. Em 1982, os sistemas de filtros foram empregados em apenas 17% das unidades de incineração mas agora estão na primeira metade dos projetos que encontram-se na fase de planejamento avançado e os que já estão na fase operacional. Um crescimento semelhante tem ocorrido com os lavadores que operam à seco, os quais foram utilizados em apenas 6% dos projetos em 1982, sendo que em 1992 eles foram encontrados em 51% de todos os projetos de unidades de combustão/incineração de resíduos urbanos. De acordo com os relatos fornecidos por Berenyi (1996), a combinação entre os lavadores e os sistemas de filtros é considerada, nos Estados Unidos, como sendo o método mais eficiente utilizado para a remoção das emissões de particulados.

A tabela A4 também ilustra o crescimento do controle de NO_x e de mercúrio, sendo que em 1992 os sistemas utilizados para o controle dessas emissões foram encontrados, respectivamente, em 18% e 6,4% das unidades; é por isso que certas localizações dos Estados Unidos estão requerendo estes tipos de equipamentos de controle com todas as suas vantagens.

Segundo Hartenstein e Horvay (1996), as novas unidades de incineração de resíduos urbanos do Oeste Europeu que já estejam em construção ou em fase de planejamento devem ser equipadas com sistemas de purificação dos gases da chaminé que operem na condição úmida e recomenda-se que esse processo seja realizado em quatro etapas, sendo que uma delas é aquela em que se empregam os lavadores de gases por via úmida. Na primeira etapa faz-se a remoção das cinzas, utilizando os mesmos precipitadores eletrostáticos ou os sistemas de filtros empregados nas unidades de combustão/incineração de resíduos municipais dos Estados Unidos. A segunda etapa do sistema de tratamento do gás da chaminé consiste de lavadores de ácidos que operam por via úmida a um valor de pH abaixo de 1,0 para absorver apenas HCl e HF, mas não SO_2 . O líquido utilizado por esses lavadores é água pura e nenhum agente neutralizante deve ser aplicado. Na terceira etapa o SO_2 remanescente é removido dos gases da chaminé por meio de lavadores que contém uma solução de hidróxido de cálcio. Normalmente, essa base porta-se como um agente neutralizante convertendo o SO_2 em gesso. Este, por sua vez, é lavado, secado e comercializado na indústria de gesso. A quarta e última etapa é designada para purificar totalmente o gás da chaminé e remover todos os poluentes residuais presentes e conforme citações feitas pelos mesmos autores, o

dispositivo mais eficaz para a realização dessa tarefa é um filtro de carbono ativado. Portanto, por meio do processo de adsorção todos os poluentes residuais são removidos pelo carbono ativado para níveis que se encontram em torno do limite de detecção.