

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO AKIRA UIEDA

PROJETO BÁSICO DE CENTRAL TERMELÉTRICA COM
INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

São Paulo
2009

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO AKIRA UIEDA

PROJETO BÁSICO DE CENTRAL TERMELÉTRICA COM
INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduado em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Silvio de Oliveira Júnior

São Paulo

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Uieda, Fernando Akira

**Projeto básico de central termelétrica com incineração de
resíduos sólidos urbanos / F.A. Uieda. – São Paulo, 2009.
93 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1. Termoeletricidade 2. Incineração de resíduos urbanos
3. Resíduos sólidos domésticos I. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor Silvio de Oliveira Júnior, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

À Dynamis Mecânica Aplicada Ltda, pelo uso do software de combustão Vulcano. Aos amigos que lá trabalham, pelo incentivo e pela colaboração na obtenção de material específico. E, principalmente, ao engenheiro Guilherme Martins Ferreira pela sugestão do tema e pelo apoio técnico.

Ao amigo Douglas de Britto Costa da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pela ajuda na consulta de uma importante referência bibliográfica.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

RESUMO

No Brasil, o sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos não é feito de forma eficiente e a disposição final da maior parte do lixo coletado nem sempre é feita da forma mais adequada. Em meio a esta situação, soma-se o incentivo para a geração descentralizada de energia provocada pelo “apagão” em 2001 e a atual busca por fontes renováveis de energia. Visando suprir estas necessidades, este trabalho tem o objetivo de propor um projeto básico para a implantação de central termelétrica com incineração de resíduos sólidos urbanos na cidade de São Paulo. Tal tecnologia já é empregada de maneira intensa e com sucesso em diversos países do mundo.

Palavras-chave: Termoeletricidade. Incineração de resíduos urbanos. Resíduos sólidos domésticos.

ABSTRACT

In Brazil, the municipal solid waste management system is not done efficiently and the final disposal of most of the garbage collected is not always done more adequately. In the midst of this situation, sum up the incentive for the decentralized generation of energy caused by the black out in 2001 and the current search for renewable sources of energy. Aiming to meet these needs, this work has the objective to propose a basic project for the establishment of thermoelectric plant with incineration of municipal solid waste in São Paulo. This technology is already used so intensively and successfully in some countries around the world.

Keywords: Thermoelectricity. Incineration of municipal solid waste. Household waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.4.1 – Configuração típica de centrais termelétricas.....	26
Figura 3.4.2 – Configuração típica do filtro de mangas com limpeza por pulsação...	28
Figura 3.4.3 – Princípio de funcionamento do desaerador	29
Figura 4.1 – Estrutura molecular de alguns PAH's.....	33
Figura 4.2 – Estrutura molecular da dioxina	34
Figura 6.1.1 – Demonstrativo de coleta 2008.....	41
Figura 6.1.2 – Coleta domiciliar: Concessão das empresas.....	42
Figura 6.1.3 – Evolução da coleta seletiva	43
Figura 6.2.1 – Composição dos aterros sanitários	47
Figura 6.2.2 – Composição dos aterros de inertes.....	47
Figura 7.1.1 – Tela de simulação no programa Vulcano	54
Figura 7.8.1 – Fluxograma da planta.....	62
Figura 8.1 – Locais da saída dos subprodutos gerados em incineradores.....	64
Figura 8.2.1.1 – Gráfico de eficiência do processo SNCR com injeção de amônia...	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Geração de lixo per capita, 1995-2001.....	17
Tabela 2.2 – Unidades de destinação final de lixo coletado.....	17
Tabela 2.3 – Variação na composição dos RSU na região metropolitana de São Paulo	19
Tabela 3.2.1 - Características dos principais incineradores instalados no Brasil	22
Tabela 3.2.2 – Características dos principais incineradores instalados no Brasil (continuação).....	23
Tabela 3.3.1 – Dados de plantas termelétricas na Europa em 2003.....	25
Tabela 3.4.1 – Processamento e produção de algumas plantas termelétricas	30
Tabela 5.1 - Limites de emissões segundo CONAMA 316/2002.....	36
Tabela 5.2 – Normas internacionais – Níveis de emissões permitidos	39
Tabela 6.1.1 – Coleta de lixo segundo origem	40
Tabela 6.2.1 – Destinação primária do lixo por tipo de tratamento	46
Tabela 6.2.2 – Recursos públicos para o tratamento do lixo.....	48
Tabela 7.1 – Composição dos RSU	50
Tabela 7.2 – Composição Elementar dos RSU	51
Tabela 7.1.1 – Composição dos gases de escape fornecido pelo Vulcano.....	53
Tabela 7.3.1 – Aproveitamento energético dos RSU	57
Tabela 7.3.2 – Parâmetros das termelétricas de Xiamen e Usina Verde	57
Tabela 8.1 – Existência de metais pesados nas diversas frações dos RSD	63
Tabela 8.1.1 – Concentração média de contaminantes nas cinzas e escória de incineradores.....	65
Tabela 9.1 – Descrição do investimento.....	70
Tabela 9.2 – Movimentação de capital e critérios de decisão	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
ECP – Equipamento de Controle de Poluição
EIA – Estudo de Impacto Ambiental
EPA – Environmental Protection Agency
FTEQ – Fator de Equivalência de Toxicidade
LO – Licença de Operação
MP – Material Particulado
NBR – Norma Brasileira Registrada
PAH – Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
POP - Poluentes Orgânicos Persistentes
REEE - Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
RI – Resíduos Industriais
RIMA – Relatório de Impacto Ambiental
RSD – Resíduos Sólidos Domiciliares
RSS – Resíduos de Serviços de Saúde
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
SEMA – Secretaria Especial do Meio Ambiente
TCDD – Tetracloro-dibenzo-para-dioxina
TEQ – Total de Toxicidade Equivalente

LISTA DE SÍMBOLOS

HCl - ácido clorídrico

HF - ácido fluorídrico

NO_x - óxidos de nitrogênio

SO_x - óxidos de enxofre

PCDD - dioxinas – policlorodibenzeno-p-dioxinas

PCDF - policlorodibenzeno-furanos

CB - clorobenzeno

PCB - policlorobifenil

PAH - hidrocarbonos aromáticos policíclicos

CP - clorofenóis

O₂ - oxigênio

CO - monóxido de carbono

CO₂ - dióxido de carbono

Kcal - Quilocaloria

MW - Megawatt

T - Tonelada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	16
3. INCINERAÇÃO.....	20
3.1. Conceituação	20
3.2. Histórico.....	20
3.3. Incineração no Brasil e no Mundo	23
3.4. Planta Característica.....	25
4. ASPECTOS AMBIENTAIS	31
5. LEGISLAÇÃO.....	35
6. PANORAMA ATUAL.....	40
6.1. Coleta.....	40
6.2. Disposição.....	45
7. PROJETO BÁSICO DA CENTRAL TERMELÉTRICA	50
7.1. Incinerador	51
7.2. Caldeira de Recuperação	55
7.3. Turbo-Gerador	56
7.4. Sistema de Condensação.....	58
7.5. Desaerador.....	59
7.6. Filtro de Mangas	60
7.7. Lavador de Gases Úmidos	61
7.8. Fluxograma da Central Termelétrica	62
8. SUBPRODUTOS DO PROCESSO	63
8.1. Escória e Cinzas.....	64
8.2. Emissões Atmosféricas.....	66
8.2.1. NOx.....	66
8.2.2. SOx.....	67
8.2.3. PAH	68
8.2.4. Dioxinas e Furanos	68
9. VIABILIDADE ECONÔMICA.....	70
10. COMPARAÇÃO: INCINERAÇÃO x ATERRO SANITÁRIO	74

11. ANÁLISES E RESULTADOS	76
12. REFERÊNCIAS	79
ANEXO A - RESOLUÇÃO CONAMA.....	83

1. INTRODUÇÃO

A geração crescente de resíduos sólidos nos grandes centros urbanos e a interdependência entre o desenvolvimento humano e a utilização do meio ambiente resulta em padrões insustentáveis de produção e consumo, que provocam situações de desequilíbrio ambiental e impactos na saúde pública que precisam ser enfrentados.

Reduzir as milhões de toneladas dos vários tipos de resíduos sólidos – e seus impactos – que nossa civilização produz diariamente e garantir o uso sustentável dos recursos naturais constituem-se metas das atuais políticas de gestão ambiental em diversos países.

No âmbito das políticas ambientais, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Rio 92, e a consolidação dos compromissos assumidos na Agenda 21 incorporaram novas prioridades à gestão de resíduos sólidos no Brasil. Os três Rs, *reduzir* a produção de resíduos na fonte geradora, *reutilizar* visando ao aumento da vida útil dos produtos, *reciclar* e, principalmente, incorporar à cultura dos resíduos sólidos os aspectos voltados à modificação dos padrões de produção e de consumo sustentável passaram a integrar a agenda dos movimentos sociais e do setor público.

A produção crescente dos resíduos sólidos resulta de vários fatores: o crescimento demográfico acelerado e a longevidade, a busca pela limpeza e higiene, o processo intensivo de industrialização, a concentração da população em cidades, a proliferação dos sistemas de informação e os padrões insustentáveis de produção e consumo da sociedade moderna. Todos estes fatores acarretam na geração de resíduos com composição extremamente complexa com a presença de metais pesados, plásticos e outros compostos perigosos.

A situação é agravada nos grandes centros urbanos, pois as áreas de disposição tornam-se cada vez mais distantes e sua vida útil bastante diminuta em função do descontrolado crescimento populacional e ocupação urbana. Tal fato eleva os custos de transporte e a disposição dos resíduos, o que pode prejudicar a gestão dos serviços e causar impactos ambientais, como: degradação do solo,

comprometimento dos corpos d'água e mananciais, contribuição para a poluição do ar e proliferação de vetores de importância sanitária nos centros urbanos, catação de lixo em condições insalubres nos logradouros públicos e nas áreas de disposição final.

O quadro brasileiro da produção e da gestão de resíduos sólidos mostra que apesar de alguns avanços importantes, principalmente nos índices de atendimento pela coleta dos resíduos sólidos domiciliares, a situação de crescimento exponencial da produção do lixo verificada e sua destinação final ainda é inadequada na maioria dos municípios, assim como ainda é preocupante a situação dos baixíssimos índices de tratamento dos resíduos de serviços de saúde, industriais e da construção civil.

Em muitos países, especialmente nos desenvolvidos, é bastante empregada a tecnologia de incineração de RSU, que propicia, antes do aterramento dos resíduos, um tratamento térmico no qual ocorre a redução volumétrica. Além disso, o vapor gerado na combustão é utilizado para geração de energia elétrica. A tendência é aumentar cada vez mais a instalação dessas centrais movidas a resíduos sólidos integradas com a geração de energia elétrica.

A combustão de RSU apresenta outras vantagens como: destruição de organismos patogênicos, eliminação de odores nocivos comuns em aterros e destruição de diversos produtos tóxicos descartados pela população.

Apesar das vantagens, dúvidas sobre a viabilidade ambiental das usinas de incineração estão sendo levantadas em diversos países e instituições, em virtude da contaminação atmosférica associada à sua instalação e funcionamento. Além da emissão de gases ácidos, SO_x, NO_x e metais pesados, estudos têm constatado que a incineração de resíduos sólidos é uma das maiores fontes de dioxinas e furanos, um grupo de substâncias altamente tóxicas.

No Brasil, existem instalações de pequeno porte para a incineração específica de resíduos de serviços de saúde, visando primordialmente à destruição de patogênicos. Mas não existem exemplos de centrais termelétricas de grande porte especializadas na incineração de resíduos sólidos domiciliares.

A pesquisa científica na área dos resíduos sólidos no Brasil é bastante incipiente, principalmente na área da incineração de resíduos sólidos urbanos em centrais termelétricas. A própria ausência de legislação específica para incineração de lixo é reflexo do reduzido conhecimento técnico-científico sobre o assunto.

Neste relatório, através de intensiva investigação bibliográfica, são apresentados e discutidos os aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos, abrangendo-se os resíduos de serviços de saúde e mais especificamente os resíduos sólidos domiciliares. Tais análises farão parte de um projeto básico para a instalação de uma central termelétrica na cidade de São Paulo, objetivo específico deste trabalho.

2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo definição da NBR-10.004/87 – Resíduos Sólidos – Classificação, da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Resíduos Sólidos são definidos como sendo aqueles nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, de serviços, de varrição e agrícola. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Em nível geral, podem ser classificados em dois tipos: os resíduos industriais (RI), oriundos dos rejeitos de processos industriais, cuja responsabilidade de disposição é do gerador dos resíduos; e os resíduos sólidos urbanos (RSU), de responsabilidade da administração pública, que podem ser subdivididos em: resíduos sólidos domiciliares (RSD), que são os resíduos gerados por atividade doméstica, comercial e de serviços em geral; e resíduos de serviços de saúde (RSS), que são os resíduos gerados por atividade hospitalar, de farmácias, de clínicas médicas e odontológicas e laboratórios.

Segundo pesquisa do IBGE/PNSB realizada em 2000, cada cidadão brasileiro produz entre 0,5 e 1 quilo de lixo domiciliar (182,5 e 365 kg/ano). Isso representa um aumento preocupante na produção de RSD verificado entre os anos de 1992 e 2000. Enquanto o crescimento populacional passou de 146 para 170 milhões de habitantes (16,4%), a geração de RSD passou de 100 a 140 mil toneladas por dia (49%), ou seja, três vezes maior.

Para efeito de comparação, na Tabela 2.1 é apresentada este avanço nos países europeus, porém, para o período entre 1995 e 2001.

Tabela 2.1 – Geração de lixo per capita, 1995-2001

País / Região	1995 (kg/pessoa)	2001 (kg/pessoa)	Mudança percentual (%)
EU - 25	459	516	12,4
EU - 15	483	556	15,1
Reino Unido	499	590	18,2
França	501	545	8,9
Alemanha	533	610	14,4
Holanda	549	612	11,5
Luxemburgo	591	673	13,9
Estados Unidos	736	730	-1,0
Japão	407	412	1,0

Fonte: Waste Management World

No Brasil, o tratamento e/ou disposição dos resíduos não é feito de forma eficiente e adequada, apenas 28% dos RSS e 22% dos RI são tratados adequadamente (ABRELPE, 2005). Com base nos dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE (PNSB, 2000), nota-se que os destinos finais de grande parte do lixo coletado são os vazadouros ou aterros. Uma distribuição entre regiões geográficas indica mais detalhadamente esta realidade, conforme pode ser observado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Unidades de destinação final de lixo coletado

Região do Brasil	Vazadouro a céu aberto (lixão)	Vazadouro em áreas alagadas	Aterro controlado	Aterro sanitário	Aterro de resíduos especiais	Usina de compostagem	Usina de reciclagem	Incineração
Norte	488	8	44	32	10	1	0	4
Nordeste	2538	7	169	134	69	19	28	7
Sul	848	11	738	478	219	117	351	101
Sudeste	1713	36	785	683	483	117	198	210
Centro-Oeste	406	1	132	125	29	6	19	3

Fonte: JACOBI 2006

Existem diversas formas de tratamento de resíduos sólidos, principalmente para os Resíduos Industriais (RI). Para os RSD há três métodos mais usuais: Compostagem, Incineração e Aterro Sanitário (que além de ser um método de tratamento é também um método de disposição final). Para os RSS, utiliza-se a Incineração e Aterro Sanitário. É importante ressaltar que em todos estes processos, há a produção de rejeitos que devem ser finalmente dispostos através de aterros sanitários adequados ou outro método eficaz, como, por exemplo, a vitrificação, a estabilização em concreto, etc.

Os resíduos da construção civil (entulho) também representam um grande problema ambiental, principalmente pela disposição inadequada em córregos, terrenos baldios e beira de estradas. Nas cidades de médio e grande porte no Brasil, estes constituem mais de 50% da massa dos resíduos urbanos. Destaca-se ainda a presença expressiva de outros materiais na composição dos resíduos sólidos urbanos, dentre estes: trapos, couro, panos, borrachas, resíduos tecnológicos como as pilhas, baterias, disquetes, CDs, celulares, relógios, rádios, eletrodomésticos portáteis, equipamentos de microinformática, ferramentas elétricas, DVDs, lâmpadas fluorescentes, brinquedos eletrônicos e muitos outros produtos descartáveis. A produção dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) apresenta tendência de crescimento mundial. Estes contêm substâncias perigosas que provocam significativos impactos ambientais e econômicos quando não tratados apropriadamente após o seu uso; e o não aproveitamento de seus resíduos representa, também, um desperdício de recursos naturais não renováveis. No Brasil, não existem ainda sistemas adequados para a sua coleta ou tratamento e a maioria destes resíduos são descartados em lixões e aterros.

Em São Paulo, a predominância no lixo coletado ainda é de material orgânico (restos de comida, por exemplo), embora esta participação, a exemplo de outros países de alta concentração urbana e industrial, tem declinado. Na Tabela 2.3, os valores mostram uma redução de 76% em 1965 para 47,4% em 1990, ou seja, a matéria inorgânica ganha maior volume no lixo urbano na medida em que as famílias utilizam mais produtos industrializados ou processados que carregam embalagens.

Tabela 2.3 – Variação na composição dos RSU na região metropolitana de São Paulo

Tipos de material	1965	1969	1972	1989	1990
Papel, papelão	16,8	29,2	25,9	17	29,6
Trapo, couro	3,1	3,8	4,3	-	3
Plástico	-	1,9	4,3	7,5	9
Vidro	1,5	2,6	2,1	1,5	4,2
Metais, latas	2,2	7,8	4,2	3,3	5,3
Matéria orgânica	76	52,2	47,6	55	47,4

Fonte: JACOBI, 2006

É importante destacar que a matéria orgânica representa aproximadamente 50% da massa do lixo coletado e disposto em aterros sanitários no Brasil, e apenas 1,5% é aproveitada em processos de compostagem para ser usada como condicionador de solo (adubo). Em alguns municípios brasileiros, existem sistemas de coleta especiais de alimento, ainda em bom estado, em feiras ou centrais de abastecimento, que são processados para a produção de ração para animais ou encaminhados para a compostagem.

Portanto, em função de questões ambientais, de infra-estrutura insuficiente e de pequena disponibilidade de áreas apropriadas, que elevam os custos para implantação de novos aterros sanitários na cidade de São Paulo e aumentam os custos de transporte, devido às elevadas distâncias do centro gerador ao aterro, o interesse no desenvolvimento de tecnologias e processo de tratamento de resíduos foi intensificado. Com isso, a incineração é uma alternativa real de tratamento a ser estudada no âmbito do gerenciamento de resíduos sólidos desta comunidade.

3. INCINERAÇÃO

3.1. Conceituação

É importante inicialmente definir o termo incineração, para então discutir o tema proposto. Segundo Lima, 1991, “Incineração é um processo de redução do peso, volume e das características de periculosidade dos resíduos, com a conseqüente eliminação da matéria orgânica e características de patogenicidade, através da combustão controlada”. Pode-se expandir ainda mais esta conceituação, afirmando que a incineração é também um processo de reciclagem da energia liberada na queima dos materiais, visando à produção de energia elétrica e de vapor. A redução de volume é geralmente superior a 90% e em peso superior a 75%. Para a garantia do meio ambiente, a combustão tem que ser continuamente controlada, levando-se em conta que o combustível (lixo urbano) é “desconhecido”, isto porque varia ao longo do tempo em composição, umidade, peso específico e poder calorífico. Por isso, os sistemas modernos de incineração de lixo são dotados de sistemas computadorizados de controle contínuo das variáveis de combustão, tanto na câmara primária quanto na de pós-combustão, bem como nas demais etapas de depuração de gases e geração de energia.

3.2. Histórico

O primeiro incinerador municipal no Brasil foi instalado em 1896 em Manaus para processar 60 toneladas por dia de lixo doméstico, tendo sido desativado somente em 1958 por problemas de manutenção, de acordo com Lima, 1991. Um equipamento similar foi instalado em Belém e desativado em 1978 pelos mesmos motivos. Em 1913 foi instalado em São Paulo, no Araçá, um incinerador com a capacidade de 40 t/dia, tendo sido desativado em 1948 e demolido em 1953. Em 49 foi instalado em Pinheiros, SP, um incinerador para 200 t/dia, que foi desativado em 1990. Dois outros foram também instalados em São Paulo, ambos com capacidade de 300 t/dia. Em 1959 foi instalado o incinerador de Ponte Pequena e, em 1968, o do Vergueiro (PMSP/Secretaria do Verde, 1993). Estes equipamentos

encontram-se paralisados, no momento. Todas estas instalações contaram com tecnologias de gerações hoje ultrapassadas, não tendo a capacidade de atender as exigências das leis ambientais atuais.

Em 1994 foi lançado um mega-projeto, também em São Paulo, para a construção de dois novos incineradores de grande capacidade, cada um com 2.500 t/dia. Até o momento, no entanto o projeto continua em compasso de espera, apesar de já ter sido licitado, aguardando definições dos esquemas de remuneração pelos serviços prestados, que ofereçam garantias ao empreendedor pelo longo prazo de concessão oferecido pelo poder público. Existem também mobilizações da opinião pública através de entidades ambientalistas, que, desconhecendo as tecnologias atuais e as garantias de não poluição do meio ambiente, fazem forte pressão contrária. Enquanto isso o volume de lixo sem destinação adequada cresce assustadoramente.

Faz parte também da história da incineração, a proliferação de incineradores residenciais prediais, ocorrida no Rio de Janeiro, a partir de 1950, com o surgimento da construção de prédios de vários andares. Estes incineradores foram banidos em 1969/70 porque eram, em realidade, verdadeiras “caixas de queimar sem controle”.

A partir de 1970 foi iniciada a fase de implantação de incineradores especificamente desenvolvidos para o tratamento de resíduos especiais, como: aeroportuários, hospitalares, industriais e outros perigosos. Nesta fase, entre outros, foram instalados os incineradores das indústrias químicas Ciba, Basf, Hoescht (atual Clariant), Bayer, Cetrel, Cinal e da Kompac, nos aeroportos internacionais de Guarulhos e do Rio de Janeiro, no Banco Central, e em várias prefeituras, como a de Brasília, além do mais recente Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos, instalado em Fortaleza, que acaba de ter os testes de emissão de gases aprovados segundo as normas ABNT e CETESB. Alguns destes incineradores estão listados na Tabela 3.2.1 e Tabela 3.2.2, com suas características principais. Esta não tem por objetivo ser exaustiva, nem incluir todos os incineradores existentes, mas apenas dar uma visão de algumas instalações importantes, que se mantêm em funcionamento no momento. Estes incineradores têm capacidades de processar entre 300 kg/hora a 1,8 t/hora. Dados levantados pela CETESB afirmam que o Brasil

gera cerca de 2,7 milhões de toneladas de resíduos perigosos, entretanto, muitos técnicos afirmam que o valor real deve ser várias vezes superior a este, considerando-se as dificuldades em se realizar os levantamentos precisos da geração destes resíduos, e mais complexo ainda é o conhecimento dos resíduos estocados, considerados passivos ambientais.

Tabela 3.2.1 - Características dos principais incineradores instalados no Brasil

Planta	Projeto / Tecnologia	Tipo	Capac. (t/ano)	Resíduos processados	Tratamento dos gases	Controle de emissões	Efluentes e cinzas
BASF Guaratinguetá - SP	Inter-Uhde	Rotativo	2.700	R.S.L.P., exceção de ascaréis	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO e SO _x	Cinzas: em aterro terceirizado
BAYER Belfort Roxo - RJ	Inter-Uhde	Rotativo	3.200	R.S.L.P., incluindo Difenilas policl.	Lavadores ácido e alcalino, separador de gotículas	Contínuo: O ₂ e CO	Cinzas: aterro ind. próprio Líquidos:ETE
CETREL Camaçari - BA	Sulzer	Rotativo	10.000	Resíduos líquidos organoclorados	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO ₂ e Nox	Cinzas: aterro próprio
CIBA Taboão da Serra - SP	Inter-Uhde	Rotativo	3.200	Res. Ind. Org. e inorg. Exc. Ascarel e radioativos	Lavadores ácido e alcalino, demister e ciclone	Contínuo: O ₂ , CO, Nox e SO _x	Aterro próprio para 10.000 m ³ de cinzas e escórias
CLARIANT Suzano - SP	Inter-Uhde	Rotativo	2.700	Resíduos sólidos e pastosos	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO, CO ₂ , Nox, SO _x e MP	Cinzas e escórias: aterro ind. Em Resende (RJ) e ETE 300 m ³ /h

Fonte: MENEZES, 2000

Tabela 3.2.2 – Características dos principais incineradores instalados no Brasil (continuação)

Planta	Projeto / Tecnologia	Tipo	Capac. (t/ano)	Resíduos processados	Tratamento dos gases	Controle de emissões	Efluentes e cinzas
ELI LILLY Cosmópolis - SP	Inter-Uhde	Rotativo	10.400	Resíduos sólidos, líquidos e pastosos	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO e CO ₂	Aterro próprio classe I
KOMPAC Fortaleza - CE	Kompac	Câmara horizontal com leito recíprocante	10.950	Resíduos de serviços de saúde e industriais	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO e CO ₂ Periódico: SO _x , NO _x , HCl, HF e Cl ₂	Efl. Líquidos não descartados. Cinzas e escórias: aterro industrial
RHODIA Cubatão - SP	Rhone - Poulanc	Rotativo	18.00	R.S.L.P., incluindo organoclorados	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO, CO ₂ e NO _x	Aterro próprio classe I
SILCON Paulínea - SP	Hoval	Leito fixo, pirolítico	3.600	Resíduos de serviços de saúde	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO e CO ₂	Aterro próprio classe I

Fonte: MENEZES, 2000

3.3. Incineração no Brasil e no Mundo

A incineração no Brasil ainda se caracteriza pela existência de grande quantidade de incineradores de porte muito pequeno, instalados em hospitais, casas de saúde, indústrias, aeroportos, prefeituras espalhados pelo Brasil [como relatado no item anterior]. São equipamentos muito simples, com capacidades inferiores a 100 kg/hora. A grande maioria destes, com honrosas exceções, está hoje desativada ou incinerando de forma precária, em geral com emissões bastante elevadas. A razão principal para tanto é que estes equipamentos são geralmente mal operados e mantidos de forma inadequada. Isto se deve ao conceito generalizado de que trabalhar com lixo é uma punição, e as instituições acabam por mandar os piores funcionários para estes postos e dão atenção mínima para treinamento e reposição

de peças. Naturalmente, o foco principal da administração de um hospital, por exemplo, será sempre no atendimento aos seus pacientes e nos problemas de ordem médica, e não nas técnicas de gerenciar e tratar o lixo.

Na Europa, bem como no Japão, a incineração de RSD é intensa. Legislações específicas para este tipo de gerenciamento de resíduos são atualizadas periodicamente em função de pesquisas, conhecimentos e aumento das pressões dos movimentos verdes. Há uma constante busca para criação de novos materiais e tecnologia para otimização e racionalização do processo. O tratamento de gases é sofisticado ainda mais, perseguindo a meta de emissão zero. Avançam os sistemas para a remoção de outros poluentes como NO_x, dioxinas e furanos. Há o aparecimento das tecnologias avançadas de tratamento para a produção de resíduos finais inertes, que podem ser reciclados ou dispostos sem nenhum problema para o meio ambiente, tal como o uso do plasma térmico. Vários processos estão se sofisticando atualmente no pré-tratamento do lixo, anterior à incineração, para aumentar a sua homogeneização, baixar a umidade e melhorar o poder calorífico, de tal forma a transformá-lo em um combustível de qualidade para a máxima geração de energia. Sofisticam-se também os processos de combustão com o aumento dos sistemas de turbilhonamento, secagem, ignição e controle da combustão.

Portanto, existe toda uma estrutura de pesquisa, produção e comércio voltada a oferecer alternativas ao tratamento de RSD gerados nestes países. O seu resultado pode ser avaliado na Tabela 3.3.1, na qual é indicada a quantidade aproximada de resíduos tratados e a de plantas termelétricas que utilizaram este tipo de lixo como fonte de energia no ano de 2003.

Tabela 3.3.1 – Dados de plantas termelétricas na Europa em 2003

País / Região	Número de plantas	Lixo tratado (milhões de toneladas)
França	123	11,25
Espanha	11	1,86
Portugal	3	1
Reino Unido	15	3,17
Bélgica	17	1,64
Holanda	12	5,18
Luxemburgo	1	0,12
Suiça	29	2,97
Itália	49	3,47
Áustria	5	0,88
Alemanha	58	13,18
República Tcheca	3	0,4
Polônia	1	0,04
Hungria	1	0,19
Dinamarca	31	3,28
Noruega	21	0,79
Suécia	28	3,13
Finlândia	1	0,15

Fonte: Waste Management World

3.4. Planta Característica

A maioria das centrais termelétricas com incineração de RSD possui a configuração típica ilustrada na Figura 3.4.1, onde se pode notar a presença do incinerador, da caldeira de recuperação, do turbo-gerador e do sistema de tratamento dos gases de exaustão. Além destes equipamentos/sistemas há o sistema complementar para condensação da água utilizada na caldeira.

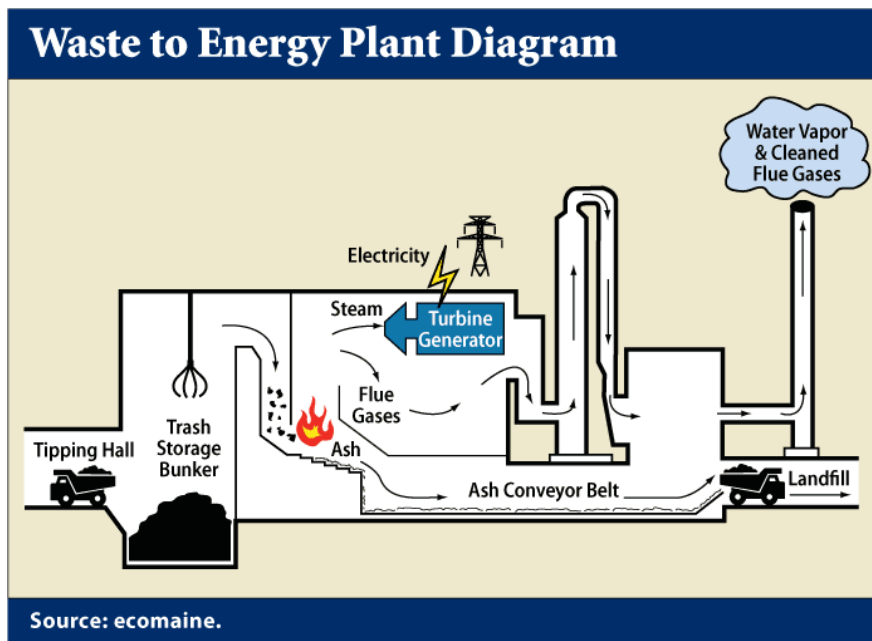


Figura 3.4.1 – Configuração típica de centrais termelétricas

Pode-se classificar os incineradores conforme o sistema utilizado para viabilizar o melhor mecanismo de queima dos resíduos. Alguns tipos são relacionados a seguir:

- Grelhas móveis: a queima dos resíduos se dá sobre grelhas móveis. Essa mobilidade permite um maior revolvimento dos resíduos, visando uma melhor qualidade e homogeneidade da combustão. Na sua grande maioria, a alimentação é do tipo contínua.
- Fornos rotativos: em alguns sistemas de fornos rotativos, os resíduos passam inicialmente por uma grelha sobre a qual ocorre aquecimento, secagem e pirólise dos resíduos para, logo em seguida, ocorrer a oxidação do material carbonizado no forno rotativo, onde o revolvimento é bastante eficiente, pois o forno (de formato cilíndrico) faz revoluções contínuas sobre sua geratriz. Em outros, não há estas grelhas e todo o processo se dá simultânea e seqüencialmente no interior do forno rotativo. Normalmente, a alimentação é do tipo contínua.

- Leito fluidizado: tecnologia empregada em diversas áreas industriais. Consiste num reator onde na parte inferior encontra-se o “leito”, normalmente de areia, e há uma parte superior livre. Sob o leito há um sistema de injeção de ar, cuja velocidade é tal que o leito fluidifica-se. O reator é previamente aquecido e então alimentado em suas laterais pelo combustível, processando-se a sua queima. O alto grau de mistura provocada pelo leito aumenta a eficiência da combustão.
- Queima em suspensão: esta é uma tecnologia usada freqüentemente em estações de geração de eletricidade, cujo combustível é carvão em pó. O combustível derivado do resíduo é usado como combustível suplementar e injetado por diversos difusores, de várias direções das paredes da fornalha, queimando-se antes de atingir a grelha do fundo.

O sistema de tratamento dos gases de exaustão é composto por filtro de mangas ou precipitador eletrostático para a remoção do particulado e o lavador de gases para a remoção dos gases ácidos.

O filtro de mangas é um equipamento constituído de um material densamente trançado (geralmente feltro de poliacrilonitrila) denominado manga, através do qual os gases quentes são forçados a passar devido a pressões diferenciais; o material particulado é retido na superfície cilíndrica da manga. O gás limpo sai da mesma e é mandado para o lavador de gases úmidos. A configuração deste equipamento é mostrada na Figura 3.4.2.

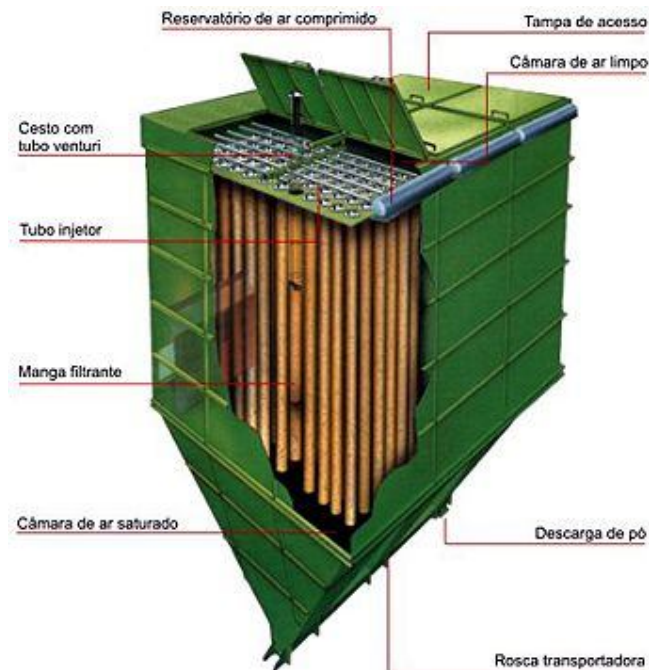


Figura 3.4.2 – Configuração típica do filtro de mangas com limpeza por pulsação

O precipitador eletrostático possui a mesma função do filtro de mangas e seu funcionamento é constituído por três passos fundamentais; carregamento da partícula, coleta da partícula e remoção do pó coletado. O carregamento das partículas se dá por meio do desenvolvimento de um campo elétrico não uniforme, próximo ao sistema de eletrodos cilíndricos, normalmente fios metálicos. O campo elétrico próximo destes fios acelera os elétrons presentes no gás a velocidades suficientes para causar a ionização desse gás. Os eletrodos de descarga normalmente são carregados negativamente e os eletrodos de coleta são aterrados, resultando uma força na direção dos eletrodos de coleta, cuja magnitude depende da carga e do campo. Esta força provoca uma deposição das partículas carregadas no eletrodo de coleta, onde são retidas nestas superfícies através da combinação de força mecânicas, elétricas e moleculares. O material retido nos eletrodos de coleta pode ser removido através de sistemas de vibração ou batidas.

No lavador de gases, o ar poluído tem a sua velocidade reduzida e é uniformemente distribuído contra uma bateria de bicos pulverizadores especiais que injetam água sob pressão em gotículas de apenas 60 microns e formam uma compacta cortina líquida. Esta impede a passagem de gases de combustão e de

quaisquer partículas sólidas que são coletadas no interior do tanque, permitindo que o ar limpo e isento de elementos poluidores, após passar por eliminador de gotas, possa ser descarregado diretamente na atmosfera uma vez que todos os elementos poluidores estarão flutuando na superfície da água. O sistema de drenagem é responsável pela auto-limpeza interna dos materiais filtrados e coletados ao longo da operação, evitando sua acumulação no interior do gabinete do equipamento.

No sistema de alimentação de água da caldeira, é importante ressaltar a presença do desaerador. Sua função é remover gases não condensáveis (oxigênio e dióxido de carbono livre) da água de make-up utilizada para alimentar caldeiras e de retorno de condensado. A Figura 3.4.3 ilustra o seu funcionamento.

A remoção desses gases protege tubulações e bombas, assim como as caldeiras e as linhas de retorno de condensado desses gases corrosivos.

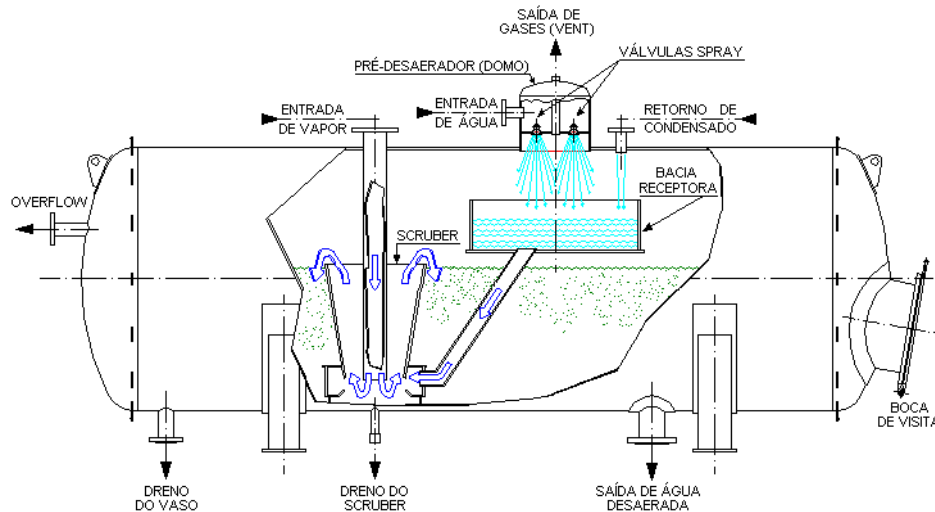


Figura 3.4.3 – Princípio de funcionamento do desaerador

A água proveniente do condensador, numa vazão de 142 m³/h, entra no pré-des aerador ou domo, onde válvulas spray de aço inoxidável direcionam o fluxo de água formando um "chuveiro" através da ventilação condensadora de contato direto em seu interior, na atmosfera de vapor da seção de pré-aquecimento. Aqui a maior parte dos gases corrosivos é removida antes que a água atinja a superfície de aço da bacia receptora. Esta água quente e parcialmente desaerada então passa da

seção de aquecimento para a seção de vapor ou "scrubber" onde uma completa desaeração é concluída assim que a água é vigorosamente esfregada por um excesso de vapor já livre de oxigênio.

O vapor extraído da turbina, correspondente a 10% de todo vapor utilizado, é introduzido uniformemente através de um distribuidor dentro do desaerador. Lá o vapor colide em alta velocidade com a água aquecida e parcialmente desaerada que entra na seção vinda do compartimento de pré-aquecimento. Uma violenta ação de lavagem e mistura aí acontece. Esta ação remove mecanicamente os traços remanescentes de gases não-condensáveis para fora da água pré-aquecida. Portanto, a água desaerada descarregada do topo da seção de lavagem a vapor está livre de todos os gases não-condensáveis mensuráveis. O vapor separa a água desaerada da seção de limpeza e passa para dentro da seção de pré-aquecimento para continuar o ciclo. O vapor é condensado no condensador de contato direto interno sendo "soprado" para fora do desaerador, onde carrega para a atmosfera os gases não-condensáveis assim liberados.

Na Tabela 3.4.1 estão representadas algumas plantas internacionais e suas respectivas capacidades instaladas de processamento e geração de energia elétrica.

Tabela 3.4.1 – Processamento e produção de algumas plantas termelétricas

Localização	Capacidade de tratamento (t/dia)	Produção de energia bruta (MW)
Tsurumi, Japão	600	12
Tomida, Nagoya, Japão	450	6
Dickerson, Maryland, EUA	1.800	63
Alexandria, Virginia, EUA	975	22
Isvag, Antuérpia, Bélgica	440	14
Savannah, EUA	690	12
Izmit, Turquia	96	4
UIOM Emmenspitz, Suíça	720	10
Wells, Áustria	190	7

Fonte: Waste Management World

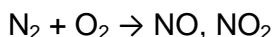
4. ASPECTOS AMBIENTAIS

Em função do grande esforço feito para diminuir a quantidade de poluentes emitidos para a atmosfera e do alto nível de toxicidade de alguns deles, é importante esclarecer alguns aspectos como seus mecanismos de formação e seus riscos para o meio ambiente e, conseqüentemente, para os seres humanos.

A sigla NO_x é utilizada para indicar todos os óxidos de nitrogênio que podem ser produzidos numa reação de combustão. Alta temperatura, excesso de ar e longo tempo de residência na zona de queima favorecem a sua formação, cujos mecanismos são:

- NO_x Térmico

Este é o NO_x produzido pela reação entre o oxigênio e o nitrogênio do ar atmosférico em elevadas temperaturas. A equação que rege este mecanismo é:



A produção de NO_x Térmico aumenta exponencialmente com a temperatura e esta é a razão por ser predominante em mecanismos com altas temperaturas.

- NO_x Ativo

Este é o NO_x produzido por um processo extremamente complexo que ocorre devido a milhares de reações químicas rápidas envolvendo radicais livres de hidrocarbonetos contidos no combustível e o nitrogênio e oxigênio do ar. A equação que representa este mecanismo é:



- NO_x Combustível

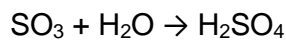
Este é o NO_x produzido pela oxidação direta dos compostos orgânicos nitrogenados encontrados no combustível e aqueles originados de reações intermediárias que podem ser resumidas de acordo com a equação:



Este mecanismo é importante apenas nas situações em que o combustível contém compostos nitrogenados.

A emissão de NO_x na atmosfera pode causar chuva ácida, smog e formação de ozônio nas camadas mais baixas da atmosfera terrestre.

Os óxidos de enxofre resultantes dos processos de combustão incluem muitas espécies químicas – SO, S₂O, SnO, SO₂, SO₃ e SO₄. Todavia, as espécies predominantes são SO₂ – formada preferencialmente em temperaturas altas – e SO₃ – formada preferencialmente em temperaturas baixas. É um gás incolor com um odor afiado, que é extremamente corrosivo na presença de água, cuja equação de formação é mostrada abaixo. Como exemplo desta característica tem-se a chuva ácida.



O SO_x é um poluente muito agressivo em relação aos danos que pode causar ao sistema respiratório dos seres humanos.

O enxofre é carregado para dentro do forno pelo combustível. Portanto, a produção e o potencial de emissão de SO_x depende basicamente do Ciclo do Enxofre associado com o processo de produção, o qual é influenciado pela quantidade de enxofre presente no combustível e pelas propriedades das fases gasosa e sólida dentro do forno.

Os PAH's observados nas emissões de incineradores são originados, em sua grande maioria, pelos plásticos existentes nos RSD, que não completam todo o processo de combustão. Suas moléculas são formadas por 3 ou mais anéis benzênicos. A Figura 4.1 mostra a estrutura de alguns PAH's que podem ser encontrados nos gases quentes provenientes do incinerador.



Figura 4.1 – Estrutura molecular de alguns PAH's

Embora a “família” dos PAH's ser muito grande e incluir as mais variadas espécies, apenas as moléculas que possuem entre 4 e 7 anéis benzênicos em suas estruturas são particularmente importantes, pois representam um grande potencial de risco para os seres humanos. Estes poluentes são cancerígenos e mutagênicos. O mais conhecido e estudado é o Benzo(a)pireno devido a estes efeitos serem mais intensos nesta molécula.

Os mecanismos de formação dos PAH's na reação de combustão não são esclarecedores o bastante ou entendidos suficientemente. Por isso, são objetos de muitos estudos atualmente.

Os PCDD's (policlorodibenzeno-p-dioxinas) e os PCDF's (policlorodibenzeno-furanos), comumente chamados de dioxinas e furanos, são os compostos de maior toxicidade já analisados pela EPA. . O congênere (membro do grupo) mais tóxico destes produtos químicos é o 2,3,7,8 tetraclorodibenzeno-p-dioxina (TCDD), cuja estrutura molecular está mostrada na Figura 4.2. Diversas são as possibilidades e teorias de suas formações em incineradores. O que se pode afirmar até o momento é que as dioxinas são formadas principalmente em temperaturas abaixo de 400 °C.

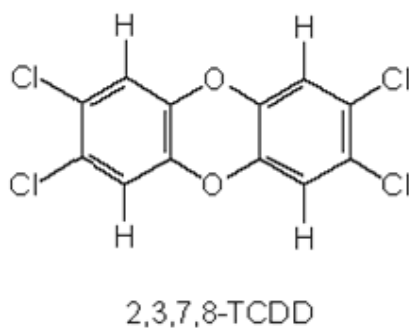


Figura 4.2 – Estrutura molecular da dioxina

A emissão destes componentes é proveniente, principalmente, da incineração dos RSS. Segundo Willians, 1992, o nível de emissão de dioxinas e furanos na incineração de RSS, sem a consideração dos sistemas de tratamento de gases e particulados, é cerca de 35 vezes maior do que na incineração de RSD, por kg de resíduo incinerado. Porém, a sua baixa emissão não justifica o não tratamento dos gases.

Com a evolução do conhecimento dos graves problemas à saúde causados pelas dioxinas (propriedades cancerígenas, mutagênicas e teratogênicas) e os elevados níveis de emissão detectados nos últimos anos, o melhor conhecimento do seu mecanismo de formação, associado ao maior rigor no padrão de emissão exigido das fontes geradoras, vem impulsionando o desenvolvimento de pesquisas para a redução de suas emissões.

5. LEGISLAÇÃO

As normas brasileiras que regularizam a incineração de resíduos sólidos urbanos são escassas e inespecíficas. Segundo a Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986, artigo 2º, inciso X, “Aterros sanitários, processamento e destino final de resíduos tóxicos ou perigosos” dependem da elaboração de um estudo de impacto ambiental e respectivo relatório de impacto ambiental - RIMA, a serem submetidos à aprovação do órgão estadual competente, e da Secretaria Especial do Meio Ambiente - SEMA em caráter supletivo para o seu licenciamento.

A Resolução CONAMA 08/90 de 06 de dezembro de 1990 limita no seu artigo 2º a máxima emissão de SO₂ a 2.000 g/10⁶ Kcal e de material particulado a 120 g/10⁶ Kcal (a óleo combustível) e 800 g/10⁶ Kcal (a carvão mineral) para caldeiras, fornos e incineradores maiores que 70 MW. A Densidade Colorimétrica não deve ser superior a 20%, equivalente ao padrão nº 1 da Escala Ringelmann. E ainda estabelece no seu artigo 3º que “Para outros combustíveis, exceto óleo combustível e carvão mineral, caberá aos órgãos estaduais de meio ambiente o estabelecimento de limites máximos de emissão para partículas totais, dióxido de enxofre e, se for o caso, outros poluentes, quando do licenciamento ambiental do empreendimento”.

Apenas em 2002 foi criada uma resolução que se adequasse às características dos RSU. A Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002 descreve, desde o artigo 22º até o 47º, procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos sólidos, destacando-se o artigo 26º, no qual “O processo de licenciamento das unidades de tratamento térmico de resíduos será tecnicamente fundamentado com base nos estudos” do projeto básico e de detalhamento, RIMA, análise de risco, plano do teste de queima, plano de contingência e plano de emergência; e o artigo 27º segundo o qual “Todo e qualquer sistema de tratamento térmico deve possuir unidades de recepção, armazenamento, alimentação, tratamento das emissões de gases e partículas, tratamento de efluentes líquidos, tratamento das cinzas e escórias”. Os artigos completos estão no Anexo A.

Os limites de emissões definidos pela resolução CONAMA 316/2002 estão demonstrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Limites de emissões segundo CONAMA 316/2002

Resolução CONAMA 316/2002	
Substância	Limite (mg/Nm ³)
Gases	
Ácido Clorídrico (HCl)	80
Ácido Fluorídrico (HF)	5
Óxido de Nitrogênio (NOx)	560
Óxido de Enxofre (SOx)	280
Material Particulado	70
Poluentes Orgânicos Persistentes	
Dioxinas e Furanos	0,5 ng/Nm ³
Metais Pesados	
<i>Classe I</i>	
Cádmio (Cd)	0,28
Mercúrio (Hg)	
<i>Classe II</i>	
Níquel (Ni)	1,4
<i>Classe III</i>	
Chumbo (Pb)	7
Cromo (Cr)	
Cobre (Cu)	
Antimônio (SB)	

Fonte: CONAMA

A CETESB, órgão fiscalizador da SEMA, adota alguns critérios específicos na fiscalização de incineradores de RSS, regulados pela Norma CETESB E-15011, revisada em fevereiro de 1997, que englobam medições de temperatura e análise dos gases de saída da chaminé, além da água residuária do lavador de gases. Os seus parâmetros acompanham as diretrizes estabelecidas por outros países, onde as legislações pertinentes à incineração de resíduos sólidos foram evoluindo de acordo com o maior grau de conhecimento da própria tecnologia, bem como em função de pressões da sociedade junto às autoridades de seus países no sentido de restringir ao máximo as fontes poluidoras.

Porém, no âmbito dos RSD, pela própria inexistência de unidades de incineração, não há nenhuma legislação que regule a atividade e que estabeleça parâmetros de projeto e de emissão como o faz a CETESB para os RSS.

As legislações e normas vigentes nos países que se utilizam da tecnologia de incineração de RSD não se limitam apenas a estabelecer padrões de emissão de efluentes, mas sim a contemplar critérios de projeto e diretrizes de manejo, de modo a permitir perfeito controle em todo o processo da incineração. Os efeitos no ambiente, vindos de qualquer equipamento usado para combustão, dependem de diversos fatores, entre eles a natureza, a forma e a concentração das substâncias liberadas. No caso da incineração de resíduos sólidos domiciliares, as maiores liberações estão nos gases, nos resíduos das cinzas e, ocasionalmente, em águas residuárias.

A maioria das atuais normas sobre incineração de resíduos sólidos domiciliares leva em consideração os seguintes grupos de substâncias, sobre as quais se costuma estabelecer limites de emissões:

Gases ácidos:

- ácido clorídrico (HCl)
- ácido fluorídrico (HF)
- óxidos de nitrogênio (NOx)
- óxidos de enxofre (SOx)

Material particulado:

Metais: que são subdivididos em três classes pela legislação da maioria dos países europeus:

- Classe I: mercúrio, cádmio
- Classe II: arsênio, cobalto, níquel, selênio, berílio, tellurium
- Classe III: chumbo, cromo, cobre, zinco, manganês, potássio, vanádio, sódio, alumínio, magnésio, ferro, prata, fósforo, silício, titânio, boro, bário, antimônio, bismuto, tin, molibdênio e cálcio

Orgânicos:

- dioxinas – policlorodibenzeno-p-dioxinas (PCDD's)
- policlorodibenzeno-furanos (PCDF's)
- clorobenzeno (CB)
- policlorobifenil (PCB's)
- hidrocarbonos aromáticos policíclicos (PAH's)
- clorofenóis (CP)

Na Tabela 5.2 é apresentada uma compilação de referências na qual são mostrados os limites de emissões para diversos poluentes oriundos da incineração de RSD, conforme legislação de vários países. Uma comparação entre os limites indicados deve ser feita com cautela em função das diferentes “condições de referência das emissões” e das unidades adotadas pelas diversas normas apresentadas.

Tabela 5.2 – Normas internacionais – Níveis de emissões permitidos

PAÍS	SUÍÇA	ALEM.	GRÁ-BREI	HOLANDA	EUROPA	SUÉCIA	FRANÇA	CANADÁ	DINAM.	JAPÃO	ÁUSTRIA	EU A	BRASIL
FONTE	a	a, b, c	d, i	a, c, e	a, c, e, h	e, g	f	j	k	a	a	i, m, n, o	a
NORMA	CB GW	17Blm SchV	IPR 5/3	NL GW	EG Richtlinien	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	LRG - K	40CFR60	CONAMA 08/90
ANO	Mar/90	Dez/90	Abr/91	1989	Jun/89	1986	1986	1991	(m)	(m)	Jul/88	(m)	06/12/90
ENQUADRAMENTO	Valor Médio Diário	Valor Médio Diário	Valor Médio Diário	Valor Médio Horário	Valor Médio 7 dias	Valor Médio Mensal	(m)	Valor Médio 4 Horas	(m)	Para Grandes Cidades	Valor Médio Diário	Valor Médio 4 Horas	Caldeiras Fornos Incinerad. > 70 Mw
PORTE	(m)	>	(m)	(m)	>	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	> 250 ton/dia	
CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA	273° K 101,3 kPa 11% O ₂	273° K 101,3 kPa 11% O ₂	273° K 101,3 kPa 11% O ₂	273° K 101,3 kPa 11% O ₂	273° K 101,3 kPa 11% O ₂	273° K 101,3 kPa 10% CO ₂	273° K 101,3 kPa 7% CO ₂	298° K 101,3 kPa 11% O ₂	273° K 101,3 kPa 10% O ₂	273° K 101,3 kPa 12% O ₂	273° K 101,3 kPa 11% O ₂	273° K 101,3 kPa 7% O ₂	298° K 101,3 kPa
DAS EMISSÕES													
GRUPO													
MP													
COMPONENTE													
INORGÂNICO													
PCDD/F													
QUEIMA													
OBS													

(1) - valor médio para 1 hora
(2) - condição da referência
(3) - dioxinas totais
(4) - NATO
(5) - EADON
(m) - não informado
(6) - g/10⁶ Kcal - Óleo Comb. ou Carvão Mineral
(7) - Sb, Pb, Cr, CN, F, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, V, Sr
(8) - As, Co, Ni, Se, Te
(9) - P₆, SO₂, CO, CO₂, O₂, Temperaturas
(10) - P₆, HCl, CO, O₂, SO₂, HF, CO₂, Temp, Vapores
(11) - Opacidade, O₂, CO, HCl e Temperaturas
(12) - Todas concentrações de emissões, volume, O₂ três temperaturas, vol. gases de combustão, unidade
(13) - Opacidade, SO₂, Nox, CO, Carga e Temperaturas
a) A ARAUJO S/A, 1992
b) FOUJHY, 1992
c) SANTEN, 1993
d) PATEL et HIGHAM, 1995
e) JUNGSMANN, 1993
f) HEAP, 1995
g) LORAM, 1988
h) LOWE et GROEGER, 1990
i) EPA, 1997
j) COREM, 1991
k) HAY, 1989
l) COREM, 1991
m) GETZ et alii, 1991
n) PROEMA, 1994a
o) BAWKON, 1991
org GRIPP, W. G.

6. PANORAMA ATUAL

6.1. Coleta

Segundo dados da Secretaria Municipal de Serviços, a cidade de São Paulo gera 15 mil toneladas de lixo diariamente (lixo residencial, de saúde, restos de feiras, podas de árvores, entulho etc). Só de resíduos domiciliares são coletados mais de 9,5 mil toneladas por dia.

Os trabalhos de coleta de resíduos domiciliares, seletivo e hospitalares são executados pelas duas concessionárias: Ecourbis e Loga. Diariamente é percorrida uma área de 1.523 km² e estima-se que mais de 11 milhões de pessoas são beneficiadas pela coleta. Cerca de 3,2 mil pessoas trabalham no recolhimento dos resíduos e são utilizados 492 veículos (caminhões compactadores e outros específico para o recolhimento dos resíduos de serviços de saúde).

A coleta de lixo está separada segundo origem na Tabela 6.1.1 para os anos de 1980, 1991 e 2000 a 2006. E o balanço de 2008 está em um demonstrativo na Figura 6.1.1.

Tabela 6.1.1 – Coleta de lixo segundo origem

Origem do Lixo	Primário Domiciliar, Varrição e Feiras	Industrial (2)	Saúde	Entulho (3)	Diversos
1980	1.849.185	987.367	38.309	0	30.257
1991	2.493.528	398.745	48.650	0	1.043.828
2000	3.461.906	193.940	33.978	1.678.595	373.488
2001	3.663.366	167.220	33.335	1.416.350	394.182
2002	3.548.934	112.620	33.472	1.488.073	434.857
2003	3.161.814	90.174	32.489	2.194.983	416.136
2004	3.210.000	73.949	31.723	1.598.741	422.384
2005	3.232.000	0	31.393	1.754.269	371.408
2006	3.403.691	0	31.271	1.652.294	403.580

Fonte: Secretaria Municipal de Serviços/SES - Departamento de Limpeza Urbana/Limpurb-1

Elaboração: Sempla/ Dipro

(1) Em Toneladas

(2) Resíduos Sólidos Domiciliares, Comerciais e Institucionais de particulares considerados grandes geradores

(3) Entulho recebido nos aterros da Prefeitura e contratados, Entulho da Prefeitura + Entulho Pago (Caçambas)

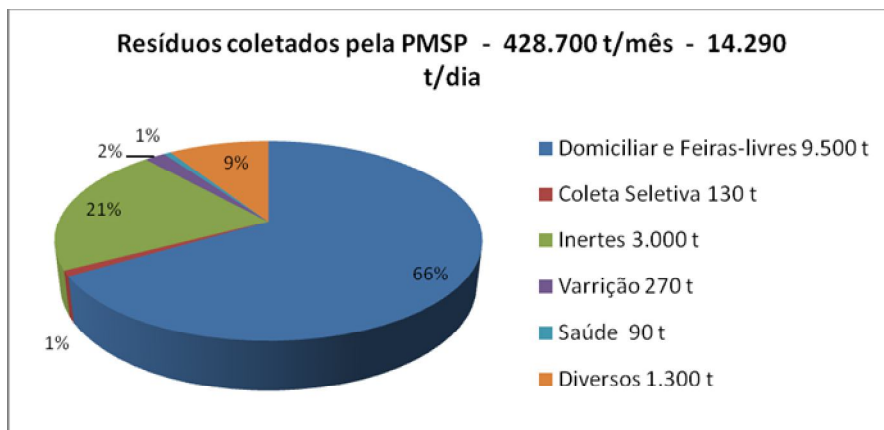


Figura 6.1.1 – Demonstrativo de coleta 2008
(Fonte: Secretaria Municipal de Serviços)

A Loga realiza a coleta da região noroeste da cidade de São Paulo. Além da coleta, a Loga administra o aterro Sanitário Bandeirantes, em Perus, e o transbordo Ponte Pequena. A Ecourbis realiza a coleta da região sudeste e administra o aterro São João, na Avenida Sapopemba, e os transbordos Vergueiro e Santo Amaro. O mapa desta distribuição está representado na Figura 6.1.2.

O aterro sanitário Bandeirantes está desativado desde o mês de março de 2007, mas tem captação de gás. O material coletado pela concessionária é levado para o aterro de Caieiras. O aterro São João está recebendo, parcialmente, os resíduos coletados pela Ecourbis. A outra parte está sendo levada para o CDR Pedreira (aterro particular).

Coleta Domiciliar Distribuição das Empresas

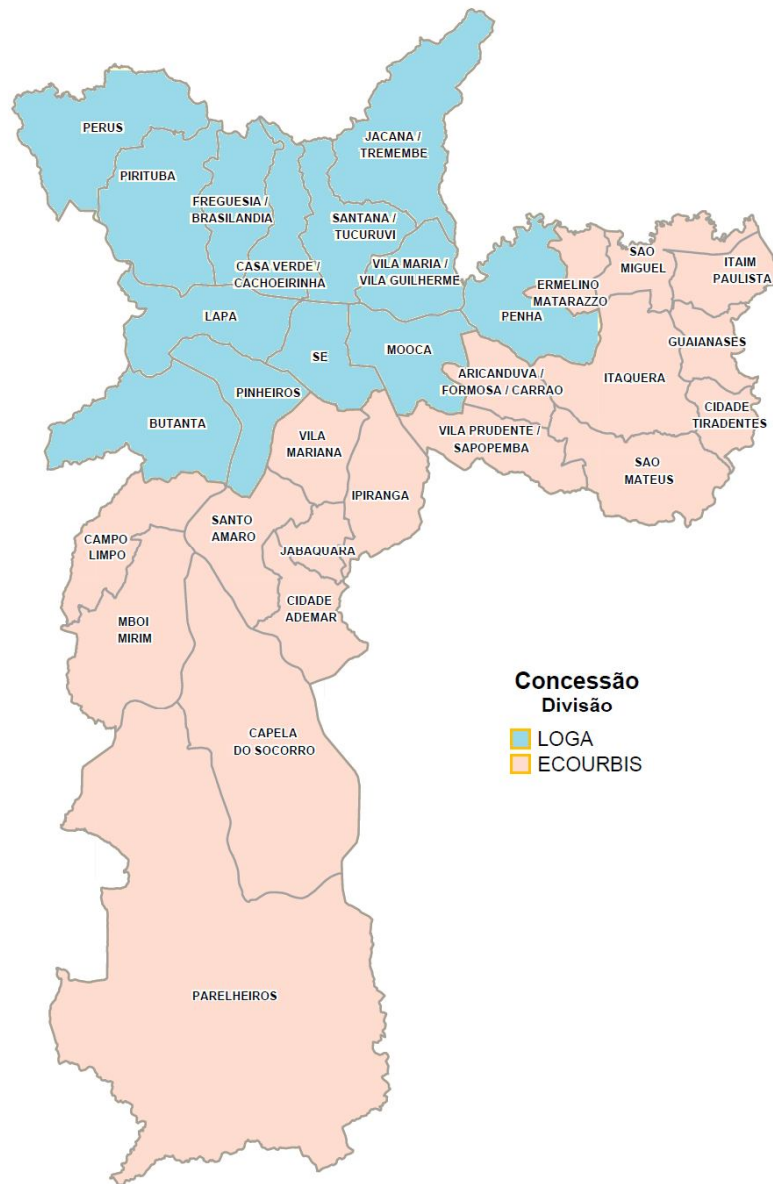


Figura 6.1.2 – Coleta domiciliar: Concessão das empresas

A coleta de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde (RSS) é feita em veículos especialmente preparados e à prova de vazamentos. O Departamento de Limpeza Urbana (Limpurb) tem cadastrados todos os pequenos geradores (farmácias, clínicas, escolas, consultórios, etc) e os grandes geradores (hospitais, pronto socorros e ambulatórios). Cerca de 89 toneladas de resíduos de saúde são

gerados diariamente. Além dos resíduos, os animais mortos recolhidos em clínicas veterinárias, nos centros de zoonoses e os encontrados em vias públicas são levados para tratamento específico.

O Programa de Coleta Seletiva regulamentado pelo Decreto nº 48799 de 9 de outubro de 2007 conta atualmente com 15 Centrais de Triagem que possibilitam a geração de renda, emprego e inclusão social para 964 pessoas que estavam à margem da sociedade.

A importância do programa não se restringe ao seu caráter social, afinal de contas, a preocupação ambiental acompanha as diretrizes que norteiam a coleta seletiva.

Os dados de material coletado pelas cooperativas de Janeiro a Dezembro de 2008 foi de 40.919 toneladas, sendo que, 15.695 toneladas foram coletadas pelas Centrais de Triagem e 25.224 pelas Concessionárias Loga e Ecourbis, possibilitando sobrevida aos aterros sanitários e uma melhor destinação ao material que é gerado diariamente. A quantidade de 40.919 toneladas perfaz 7% do total do resíduo passível de ser coletado no Município de São Paulo. Na Figura 6.1.3 é demonstrada a sua evolução durante os anos.

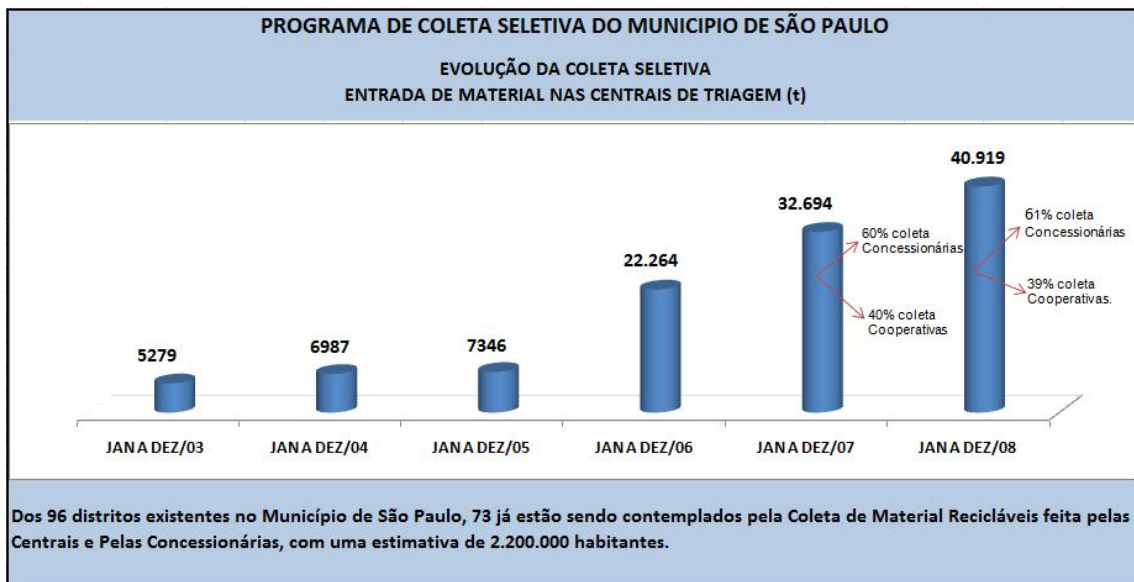


Figura 6.1.3 – Evolução da coleta seletiva

Atualmente dos 96 *distritos* existentes no Município de São Paulo, 74 são contemplados pela Coleta de Materiais Recicláveis realizada pelas Centrais e pelas concessionárias, ficando a sua coordenação sob a responsabilidade da Secretaria Municipal de Serviços, por intermédio do Departamento de Limpeza Urbana – LIMPURB, estabelecendo normas e procedimentos para sua implementação, gerenciamento, fiscalização e controle.

6.2. Disposição

Como em todo Brasil, o tratamento e/ou disposição dos resíduos não é feito de forma eficiente e adequada na cidade de São Paulo e, com base nos dados apresentados na Tabela 6.2.1, nota-se que a maioria dos resíduos sólidos coletados é destinada a aterros sanitários e de inertes.

Apesar destes aterros sanitários serem áreas preparadas tecnicamente para receber os resíduos orgânicos coletados nas residências e contarem com garantias de proteção ao meio ambiente, evitando a contaminação do lençol freático, pode-se listar as seguintes problemas resultantes dessa prática de dispor resíduos a céu aberto:

- Possível contaminação ambiental pela ação do chorume, gerado pela degradação biológica da matéria orgânica, atingindo o solo e as águas superficiais e subsuperficiais. Nos corpos d'água, o lixo pode provocar poluição física (aumento de turbidez, alteração de temperatura), poluição química (mudança de coloração e acidificação), poluição bioquímica (mau cheiro, alteração de ph e oxigênio dissolvido) e poluição biológica (presença de coliformes fecais);
- Gases resultantes da decomposição anaeróbia da matéria orgânica (CH₄, NH₃, CO₂ e H₂S), que são expelidos para atmosfera contribuindo para o efeito estufa;
- Desperdício de matéria economicamente valorizável, representado pelos materiais recicláveis (papel, plástico, metal e vidro);
- Desvalorização de espaços urbanos para a localização dos "lixões", que quase sempre são instalados nas periferias das cidades onde reside a população mais carente e vulnerável às conseqüências da degradação ambiental;
- Proliferação de insetos e agentes patogênicos ao homem e animais.

Os transbordos são pontos de destinação intermediários dos resíduos coletados na cidade, criados em função da considerável distância entre a área de

coleta e o aterro sanitário. Estas estações de transbordo são, portanto, locais onde o lixo é descarregado dos caminhões compactadores e, depois, colocado em uma carreta que leva os resíduos até o aterro sanitário, seu destino final.

Tabela 6.2.1 – Destinação primária do lixo por tipo de tratamento

Tipo de Tratamento	Aterro Sanitário e de Inertes	Compostagem	Incinerador Grupo B1 (2)	Incinerador Animais	Transbordo (3)	Triagem (4)
1980	233.880	189.162	0	0	204.937	10.727
1991	1.844.789	23.168	0	0	739.036	5.946
2000	2.235.388	492.730	0	0	2.361.496	18.376
2001	2.529.719	503.420	0	0	2.645.425	18.588
2002	2.529.533	490.750	522	590	2.613.029	15.331
2003	2.218.516	334.420	233	780	2.812.346	19.402
2004	1.957.216	193.101	394	890	2.918.884	22.727
2005	2.264.517	0	453	1.023	3.135.309	16.462
2006	2.291.511	0	383	1.090	3.095.356	22.901

Fonte: Secretaria Municipal de Serviços/SES - Departamento de Limpeza Urbana/Limpurb-1

Elaboração: Sempla/ Dipro

(1) Em Toneladas

(2) Incinerador Grupo B - São referentes aos medicamentos vencidos e quimioterápicos

(3) Transbordo Ponte Pequena, Santo Amaro, Vergueiro, Itatinga e Leopoldina

(4) Os Valores dos anos de 1980 e 1991 estão compreendidos no processo de compostagem e, correspondem aos quantitativos da Coleta Seletiva e dos Produtos Comercializados

(5) A partir de Novembro de 2004 parte dos resíduos descarregados no Transbordo Ponte Pequena foram destinados para o Aterro do município de Caieiras

Conforme a Secretaria Municipal de Serviços, em 2008, a quantidade de resíduos dispostos em aterros foi de 16.800 t/dia, distribuídos nos aterros sanitários e de inertes. As suas respectivas composições estão representadas na Figura 6.2.1 e Figura 6.2.2.

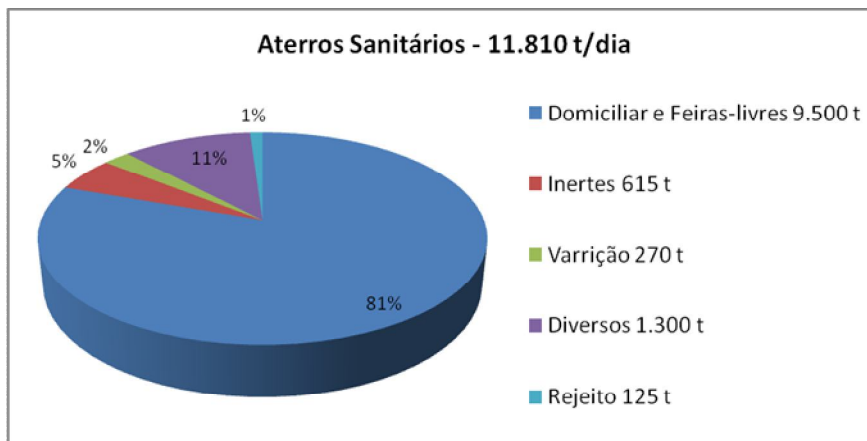


Figura 6.2.1 – Composição dos aterros sanitários
(Fonte: Secretaria Municipal de Serviços)

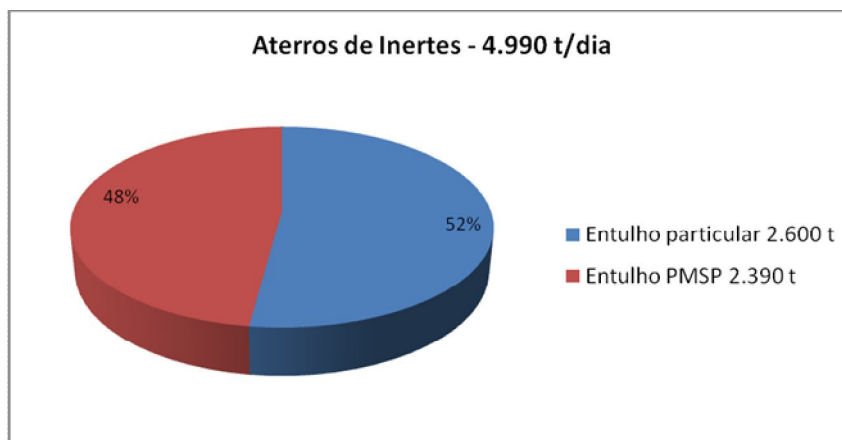


Figura 6.2.2 – Composição dos aterros de inertes
(Fonte: Secretaria Municipal de Serviços)

Atualmente, os recursos disponíveis para o tratamento dos resíduos do município de São Paulo estão listados na Tabela 6.2.2. Exceto os 3 aterros de inertes particulares contratados pela prefeitura.

Tabela 6.2.2 – Recursos públicos para o tratamento do lixo

Equipamentos públicos

Unidade	Finalidade	Endereço
Bandeirantes	Aterro Sanitário	Rua Mogeiro, 1580 Km 26 Rodov. Dos Bandeirantes
São João	Aterro Sanitário	Av. Sapopemba, km 33 – Divisa com Mauá
Vila Leopoldina	Transbordo de Inerte	Av. Emb. Macedo Soares, 6000
Itatinga	Transbordo de Inerte	Rua Aniquis s/nº
Vergueiro	Transbordo	Rua Breno Ferraz do Amaral, 415 B
Ponte Pequena	Transbordo	Av. do Estado, 300
Santo Amaro	Transbordo	Rua Miguel Yunes, 480

Equipamentos em manutenção ou desativados

Unidade	Finalidade	Endereço
Sapopemba	Aterro Sanitário	Av. Sapopemba, 26.351
Santo Amaro	Aterro Sanitário	
Vila Albertina	Aterro Sanitário	R. Cap. José Agules de Camargo, s/nº
Jacuí	Aterro Sanitário	Rua Arareua, s/nº
São Mateus (desativado)		
Itatinga	Aterro de Inerte	Rua Aniquis, s/nº

Fonte: Secretaria Municipal de Serviços - SP

O Aterro São João, localizado na Estrada de Sapopemba km 33, em São Mateus, recebe os resíduos coletados pela EcoUrbis. O volume depositado nesse aterro diariamente é de 1 mil toneladas, o restante destes



resíduos vão para o Aterro Pedreira . A operação deste aterro foi iniciada em 1992.

O aterro Bandeirantes, localizado na Rodovia dos Bandeirantes km 26, em Perus, recebe resíduos coletados pela Loga e está desativado desde março de 2007. A partir desta data, os resíduos vão para o Aterro Caieiras.



O transbordo de Ponte Pequena: tem capacidade para receber, diariamente, 400 operações de descarga dos caminhões coletores; o que corresponde a 150 operações diárias de carga das carretas internas da unidade, que transportam os resíduos (lixo) para locais apropriados.



7. PROJETO BÁSICO DA CENTRAL TERMELÉTRICA

A quantidade de resíduos urbanos gerados na cidade de São Paulo é muito grande, por isso não será possível atender toda esta demanda apenas com uma unidade. Portanto, este trabalho visa a instalação de uma unidade termelétrica em cada aterro sanitário (6 no total, sendo 2 em operação e 4 em manutenção atualmente), ou seja, os resíduos que serão tratados são àqueles destinados somente aos aterros sanitários (11.810 t/dia em 2008). Esta premissa tem o objetivo também de aproveitar toda infra-estrutura instalada e logística já utilizada pelo atual sistema de tratamento de resíduos. Cada unidade em estudo terá capacidade para 1.300 t/dia.

O projeto básico foi elaborado considerando os parâmetros de localização e condições climáticas:

- Altitude local: 750 m acima do nível do mar;
- Pressão barométrica local: 92,63 kPa;
- Temperatura de bulbo seco ambiente: 31,8°C;
- Temperatura de bulbo úmido ambiente: 24,2°C;
- Umidade absoluta: 19,7 g de H₂O / kg de ar seco;

As características admitidas para o resíduo constam nas Tabelas 7.1 e 7.2.

Tabela 7.1 – Composição dos RSU

Composição física dos RSU	
Matéria orgânica	37,8%
Papel e papelão	29,6%
Plástico	9,0%
Vidro	4,8%
Metal	5,4%
Outros	13,3%

Fonte: POLETTO 2007

Tabela 7.2 – Composição Elementar dos RSU

Composição elementar do RSU	
Cinzas	3,04%
C	24,81%
H	3,53%
S	0,05%
Cl	1,34%
O	11,23%
H ₂ O	56,00%

Fonte: POLETTO 2007

A aplicação da tecnologia de processamento térmico e geração de energia a partir dos resíduos urbanos são precedidas pela seleção manual e mecânica dos materiais recicláveis, que são destinados à indústria de reciclagem. Somente são submetidos ao tratamento térmico a matéria orgânica e os resíduos combustíveis não recicláveis, ou seja, o material que seria destinado ao aterro.

De acordo com as premissas adotadas e o levantamento dos dados iniciais é possível especificar os principais equipamentos/tecnologia utilizados na planta.

7.1. Incinerador

Dentre todos os tipos de incineradores disponíveis atualmente, a opção que melhor se adéqua ao perfil do resíduo produzido em São Paulo é o incinerador do tipo Grelhas Móveis. Sua principal característica é a maximização da qualidade e homogeneidade da combustão, pois a mobilidade dessas grelhas permite um maior revolvimento dos resíduos.

A capacidade de operação será de 1.300 t/dia de resíduos, como citado anteriormente, com alimentação contínua e injeção de ar primário e secundário, necessários para a combustão das fases sólida e gasosa, respectivamente.

A temperatura de chama adiabática será de 1.030°C e o tempo de residência mínimo dos sólidos em torno de 1,5 hora e dos gases, 2 segundos, de acordo com as recomendações da Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs).

A simulação da combustão dos resíduos no incinerador foi feita no software de combustão industrial Vulcano fornecido pela empresa Dynamis Mecânica Aplicada Ltda. Com ele, é possível acompanhar todos os parâmetros não só da combustão como também de um processo seguinte (secagem, por exemplo).

O programa aceita uma grande quantidade de entradas de dados:

- Umidade do ar atmosférico
- Temperatura ambiente
- Pressão ambiente
- Pré-aquecimento do ar
- Tipo de combustível (é possível criar um combustível que não esteja na biblioteca do software)
- Temperatura do combustível
- Excesso de oxidante
- Combustão com ou sem dissociação
- Trocas térmicas na combustão e no processo
- Quantidade de vapor d'água no processo
- Quantidade de CO₂ no processo

E fornece como resultado:

- Fluxo de gases de escape
- Temperatura dos gases de escape
- Composição dos gases de escape

- Propriedades dos gases de escape (massa molecular equivalente, temperatura de orvalho, densidade e calor específico médio)
- Quantidade de ar falso

Para o estudo em questão, temos os seguintes parâmetros de entrada:

- Umidade do ar: 19,7 g de H₂O / kg de ar seco
- Pressão ambiente: 92,63 kPa
- Temperatura ambiente: 25 °C
- Composição elemental do combustível (mostrada anteriormente na Tabela 7.2)
- Temperatura dos gases de escape: 1.030 °C
- Poder calorífico inferior: 9.340 kJ/kg (POLLETO, 2007)

Resultados da simulação:

- Gases de escape: 7,2 kg de gases de escape / kg de combustível
- Ar atmosférico (oxidante): 6,2 kg de ar / kg de combustível
- Composição dos gases de escape (Tabela 7.1.1)

Tabela 7.1.1 – Composição dos gases de escape fornecido pelo Vulcano

Composição dos gases de escape % em massa (b. u.)	
CO ₂	11,32%
H ₂ O	28,34%
N ₂	58,70%
HCl	0,21%
O ₂	1,42%
SO ₂	0,01%

Com estes resultados e sabendo que a alimentação de combustível é de 1.300 t/dia (54.166 kg/h), temos que o fluxo de gases quentes é de 390.190 kg/h e o de ar atmosférico (oxidante) é de 335.830 kg/h.

A tela da simulação da combustão está representada na Figura 7.1.1.

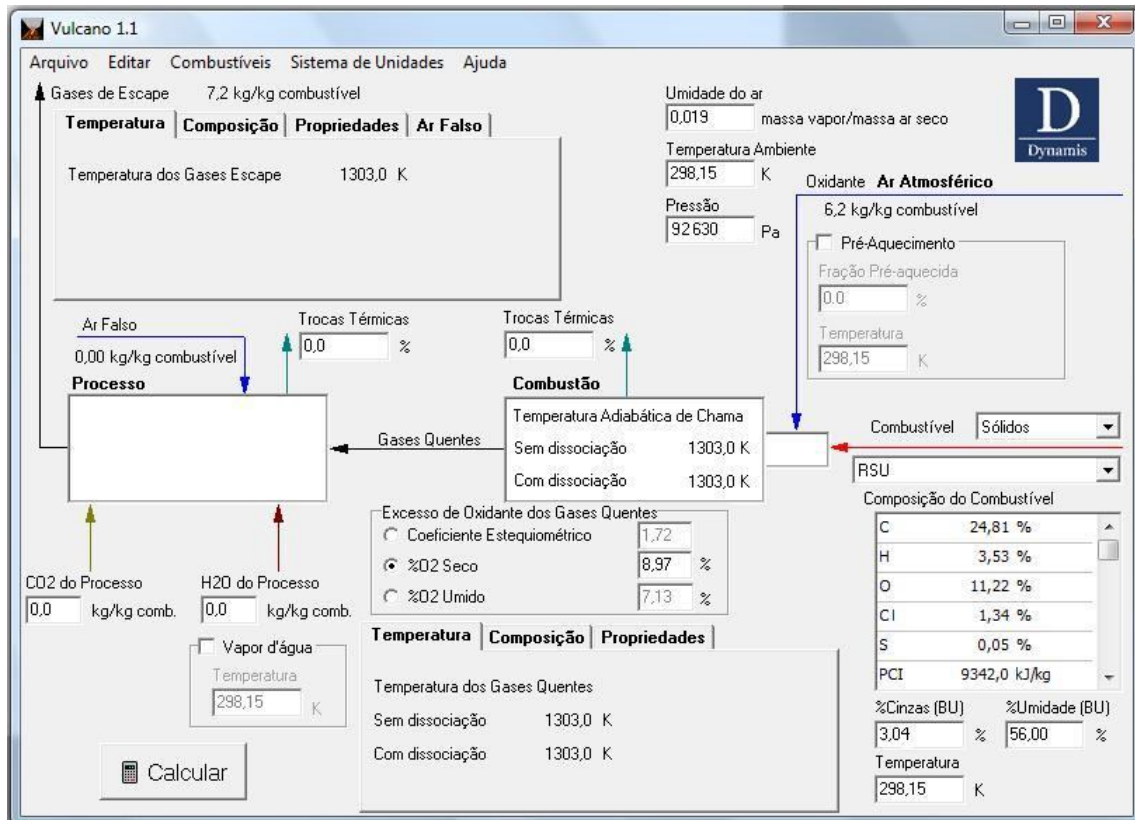


Figura 7.1.1 – Tela de simulação no programa Vulcano

7.2. Caldeira de Recuperação

Os gases quentes provenientes da queima dos resíduos são direcionados para uma caldeira de recuperação do tipo aquatubular, onde é produzido vapor a 60 bar de pressão e 400°C, de acordo com um ciclo Rankine. O fluxo de vapor gerado foi calculado fazendo-se um balanço térmico envolvendo os gases quentes, a água e perdas gerais. O calor fornecido pelos gases quentes será utilizado para aquecer a água líquida até a temperatura de evaporação, vaporizá-la e aquecer o vapor até a temperatura adequada para o funcionamento do turbo-gerador, além das perdas para a carcaça e da purga, cujos valores são de 1% e 2 %, respectivamente, da quantidade de água vaporizada. Esta troca de calor está representada nas Equações (1), (2), (3) e (4).

$$\dot{Q}_{gases} = \dot{Q}_{aquecer,agua} + \dot{Q}_{vapor} + \dot{Q}_{aquecer,vapor} + \dot{Q}_{carcaça} + \dot{Q}_{purga} \quad Eq.(1)$$

Substituindo as variáveis, temos:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gases} \cdot \bar{C}p_{gases} \cdot \Delta T_{gases} &= \dot{m}_{agua} \cdot Cp_{agua} \cdot \Delta T_{agua} + \dot{m}_{agua} \cdot h_{lv} + \\ + \dot{m}_{vapor} \cdot Cp_{vapor} \cdot \Delta T_{vapor} &+ 0,01 \cdot \dot{m}_{agua} \cdot h_{lv} + 0,02 \cdot \dot{m}_{agua} \cdot h_{lv} \quad Eq.(2) \end{aligned}$$

$$e \begin{cases} \dot{m}_{agua} = \dot{m}_{vapor} + \dot{m}_{purga} & Eq.(3) \\ \dot{m}_{purga} = 0,02 \cdot \dot{m}_{vapor} & Eq.(4) \end{cases}$$

Onde,

\dot{m}_{gases} - Vazão mássica de gases quentes = 390.190 kg/h

$\bar{C}p_{gases}$ - Calor específico médios dos gases quentes = 1,21 kJ/kg°C

ΔT_{gases} - Variação de temperatura dos gases quentes = 1.030°C - 200°C
= 830°C

\dot{m}_{agua} - Vazão mássica de água líquida

Cp_{agua} - Calor específico da água a 25°C = 4,19 kJ/kg°C

ΔT_{agua} - Variação de temperatura da água = 275°C - 180°C = 95°C

h_{lv} - Entalpia de vaporização da água = 1.574,91 kJ/kg

\dot{m}_{vapor} - Vazão mássica de vapor produzido

Cp_{vapor} - Calor específico de vapor a 400°C = 3,64 kJ/kg°C

ΔT_{vapor} - Variação de temperatura do vapor = 400°C - 275°C = 125°C

Portanto, a vazão mássica de vapor produzido na caldeira foi de 158.730 kg/h.

7.3. Turbo-Gerador

A capacidade de geração foi calculada de acordo com a Equação (5).

$$W_t = \dot{m}_{vapor} \cdot (h_1 - h_{2s}) \cdot \eta \quad Eq. (5)$$

Onde,

W_t - Potência da turbina

\dot{m}_{vapor} - Vazão mássica de vapor = 158.730 kg/h

h_1 - Entalpia na entrada da turbina (400 °C e 60 bar) = 3.177 kJ/kg

h_{2s} - Entalpia na saída da turbina (isentrópico, 12,3 kPa, 50 °C) = 2.095

kJ/kg

η - Rendimento do conjunto = 0,7

Com isso, o turbo-gerador terá uma potência líquida de aproximadamente 33 MW (0,47 MWh / t RSU), sendo que 3 MW será consumido na própria planta (bombas hidráulicas e ventiladores). A Tabela 7.3.1 apresenta faixas ideais de aproveitamento energético.

Tabela 7.3.1 – Aproveitamento energético dos RSU

Aproveitamento energético dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	
Biogás de aterro (base metano)	0,1 - 0,2 MWh / t RSU
Digestão anaeróbia acelerada	0,1 - 0,3 MWh / t RSU
Incineração RSU com geração de energia	0,4 - 0,6 MWh / t RSU
Ciclo combinado RSU + Gás natural	0,8 - 0,9 MWh / t RSU

Fonte: Usina Verde

Para efeito de comparação, a Tabela 7.3.2 apresenta parâmetros de operação de 2 centrais termelétricas: a primeira na cidade chinesa de Xiamen que gera aproximadamente 1.200 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia; e a segunda é um módulo comercial fornecido pela empresa Usina Verde.

Tabela 7.3.2 – Parâmetros das termelétricas de Xiamen e Usina Verde

Planta	Xiamen (China)	Usina Verde (Brasil)
Capacidade de Processo [t RSU/dia]	430	150
Fluxo de Vapor [t/h]	15,9	-
Pressão de vapor [bar]	40	45
Temperatura de vapor [°C]	400	420
Aproveitamento energético [MWh/t RSU]	0,67	0,65

Fonte: Waste Management World / Usina Verde

7.4. Sistema de Condensação

O sistema de condensação é composto por um condensador, um conjunto de torres de resfriamento e uma bomba centrífuga para circulação de água.

A vazão de vapor que passa pelo condensador é 90% de todo vapor que alimenta o turbo-gerador, ou seja, 142.857 kg/h. Os outros 10% (15.873 kg/h) é destinado ao desaerador.

Na entrada do condensador, tem-se líquido e vapor a 50 °C e, na saída, líquido saturado a mesma pressão. O fluido refrigerante utilizado é água, cuja temperatura de entrada é 35 °C e de saída, 45 °C. A carga térmica deste equipamento pode ser calculada com a Equação (6).

$$Q_{cond} = \dot{m}_{vapor} \cdot (h_2 - h_{sat}) \quad Eq. (6)$$

Onde,

Q_{cond} - Carga térmica do condensador

\dot{m}_{vapor} - Vazão mássica de vapor = 142.857 kg/h

h_2 - Entalpia na saída da turbina = 2.311 kJ/kg

h_{sat} - Entalpia de líquido saturado (12,3 kPa) = 207 kJ/kg

Portanto, o condensador deve ter uma carga térmica de aproximadamente 84 MW.

Com isso, pode-se determinar a vazão de água no circuito condensador-torre de resfriamento-bomba utilizando a Equação (7).

$$Q_{cond} = \dot{m}_{agua} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad Eq. (7)$$

Onde,

Q_{cond} - Carga térmica do condensador

\dot{m}_{agua} - Vazão mássica de água

C_p - Calor específico da água = 4,184 kJ/kg.°C

ΔT - Variação de temperatura da água = 10 °C

A vazão de água calculada é de 1.995 kg/s ou 7.207 m³/h.

7.5. Desaerador

O vapor extraído da turbina correspondente a 15.873 kg/h (10% de todo vapor utilizado) é introduzido uniformemente através de um distribuidor dentro do desaerador.

A água proveniente do condensador possui as seguintes características:

- Vazão: 142,857 kg/h
- Temperatura: 50 °C
- Pressão de trabalho: 1,5 MPa
- Líquido saturado

Nestas condições, segundo Van Wylen, o volume específico é de 0,001 m³/kg.

Assim, o desaerador deverá ter capacidade para uma vazão de água líquida de 143 m³/h.

7.6. Filtro de Mangas

Devido à composição dos resíduos sólidos urbanos, o ambiente formado pelos gases de sua combustão é muito agressivo, devido a componentes como Cl₂, HCl, S, metais alcalinos e metais pesados como Zn e Sn. Antes de serem emitidos para a atmosfera, eles passam por um sistema de limpeza de gases composto por um filtro de mangas e um lavador de gases úmidos. O primeiro é responsável pela remoção de material particulado e o segundo, pela remoção dos gases ácidos, orgânicos e óxidos de nitrogênio.

Devido a dificuldades de fabricação, o sistema de limpeza dos gases contará com 2 linhas idênticas de tratamento. Cada filtro de mangas terá as seguintes características:

- Vazão nominal: 195.000 kg/h
- Velocidade superficial de referência: 1,2 m/min (de acordo com o fabricante)
- Área filtrante: 9.800 m²
- Dimensões das mangas: 160 mm de diâmetro e 5.200 mm de comprimento (padrão dos fabricantes)
- Quantidade de mangas: 3.750 mangas
- Concentração de particulado máxima admissível na saída: 70 mg/Nm³ (de acordo com a resolução CONAMA 316/2002)

A remoção de particulado retido pela superfície das mangas será feito por pulsação. Este mecanismo é importante para manter a eficiência de operação do filtro de mangas.

A área filtrante necessária foi obtida com a Equação (8).

$$\text{Área filtrante} = \frac{\text{vazão}}{\text{velocidade superficial de referência}} \quad \text{Eq. (8)}$$

A massa específica dos gases considerada foi de 0,276 kg/m³ (obtida no software VULCANO).

De acordo com as dimensões estabelecidas pelo fabricante, cada manga terá uma área filtrante de 2,61 m². Com estes valores, calculou-se a quantidade de mangas necessárias para o filtro.

7.7. Lavador de Gases Úmidos

O lavador de gases úmidos é especificamente utilizado para absorção de gases tóxicos como SO₂, HF, HCL, H₂S, mas também exerce a função de remover materiais particulados, funcionando como um “refinamento” no gás previamente limpo pelo filtro de mangas.

Assim como o filtro de mangas, esta planta contará com 2 lavadores de gases com as seguintes especificações unitárias:

- Vazão nominal: 195.000 kg/h
- Temperatura de operação: 85 °C
- Eficiência: 99,3 % (de acordo com o fabricante)
- Concentração de particulado máxima admissível na saída: 70 mg/Nm³ (de acordo com a resolução CONAMA 316/2002)

8. SUBPRODUTOS DO PROCESSO

A incineração de resíduos sólidos urbanos produz, ao longo do seu processo, diversos compostos nocivos ao ambiente. Além dos poluentes presentes em qualquer processo de combustão (CO_2 , CO , SO_x , NO_x ...), outros resíduos como metais pesados, hidrocarbonetos, organoclorados são gerados durante o processo, ou por não serem eliminados durante a incineração (como no caso dos metais pesados) ou por se formarem durante a própria incineração através de elementos existentes no combustível (como no caso de certos organoclorados).

Os metais pesados estão distribuídos por todas as frações dos resíduos e não apenas nos materiais metálicos, ou seja, a incineração de papéis, plásticos, jornais também libera os metais pesados existentes nestas frações.

A Tabela 8.1 mostra, em %, a distribuição dos metais contidos nas frações de resíduos sólidos domiciliares. Diversos metais tóxicos, como cádmio, chumbo e mercúrio são encontrados em todos os componentes dos resíduos.

Tabela 8.1 – Existência de metais pesados nas diversas frações dos RSD

Distribuição dos metais contidos nas frações de RSD (%)									
Fração	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Plástico	26	1	5	2	10	1	1	5	1
Papel	4	5	7	11	13	18	3	3	11
Matéria animal	1	1	1	1	2	1	1	1	1
Matéria vegetal	2	1	2	3	6	4	3	2	4
Tecido	1	1	1	2	4	1	1	1	1
Borracha e couro	4	1	42	1	3	1	1	2	9
Metais	60	88	44	22	60	74	87	85	68
Miscelânea	3	4	3	63	3	4	6	4	6

Fonte: GRIPP 1998

Na Figura 8.1 estão representados esquematicamente os locais de saída dos diversos tipos de subprodutos gerados durante a incineração dos resíduos sólidos.

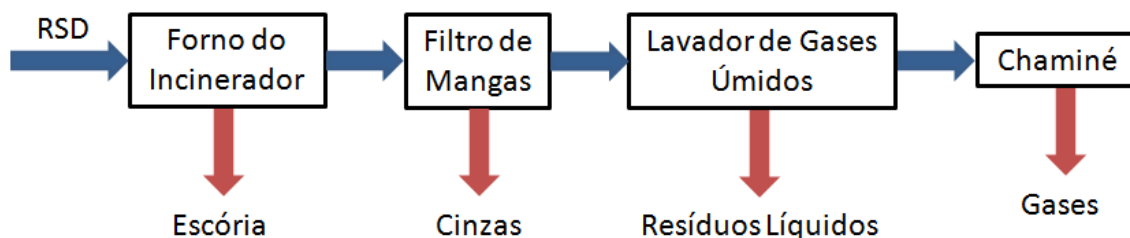


Figura 8.1 – Locais da saída dos subprodutos gerados em incineradores

No forno do incinerador tem-se a formação da escória; no filtro de mangas ocorre a retenção das cinzas; os lavadores de gases úmidos produzem resíduos líquidos; os gases emitidos pela chaminé também são subprodutos do processo.

8.1. Escória e Cinzas

A escória e as cinzas resultantes deste tratamento térmico são considerados resíduos perigosos, principalmente as cinzas, devido à maior concentração de metais pesados. Segundo Gripp, 1998, a produção de cinzas de um incinerador é, dependendo do tipo das instalações e da composição do combustível, cerca de 10% da quantidade produzida de escória.

Segundo dados fornecidos pela empresa Usina Verde, elas representam cerca de 8% do total de lixo tratado em peso, ou seja, para a planta em questão estima-se a produção de 104 toneladas deste tipo de material.

A concentração média de alguns dos contaminantes existentes nas cinzas e na escória de incineradores de RSD é demonstrada na Tabela 8.1.1.

Tabela 8.1.1 – Concentração média de contaminantes nas cinzas e escória de incineradores

Substância	Escória (mg/kg)	Cinzas (mg/kg)
Arsênico	9,2	55,7
Cádmio	10,7	235
Cromo	61,2	76,2
Níquel	41,4	19.104
Chumbo	2.800	5.642
PCDD/PCDF*	0,021	5,28

Fonte: KELLERMEYER e ZIEMER, 1989

*em µg/kg

Além destes contaminantes, na escória e nas cinzas também há materiais inertes e inorgânicos.

Os cuidados com a escória e as cinzas são necessários desde o seu manejo na usina de incineração até a sua correta disposição e/ou estabilização. O método mais corrente de disposição é o que se dá através do seu apropriado aterramento: ou de maneira individual (um aterro específico para escória e outro aterro específico para cinzas), ou de maneira conjunta (um aterro para a mistura de escória e de cinzas), ou ainda através da codisposição com RSD. Ao se aterrar escória e/ou cinzas, as precauções são tomadas em função da sua potencial periculosidade no que se refere à contaminação de solos e aquíferos devido à solubilização e lixiviação dos seus contaminantes.

Uma alternativa ao aterramento é a utilização da escória e das cinzas na construção civil. Há estudos que comprovam a viabilidade do uso desses resíduos no concreto como substituto parcial do cimento, inclusive com aumento da resistência à compressão, utilizando-se uma mistura de 10% de cinzas.

Outra opção é utilizar esses resíduos em obras de pavimentação. Estudos concluíram que a sua utilização em base e sub-base de pavimentos é plenamente possível em pavimentos que não necessitem da alta qualidade dos agregados, como na pavimentação de áreas urbanas, suburbanas, rurais e estacionamentos.

Por falta de áreas para a disposição final e uma elevada geração de cinzas e escórias, no Japão, grande parte desses resíduos é usada para fazer ilhas

artificiais e avanços de superfície sobre o mar, caracterizando outra forma de aplicação.

8.2. Emissões Atmosféricas

Com relação à emissão de gases, deve-se dar atenção para os SO_x , NO_x e gases ácidos (HCl, HF), principalmente porque são componentes causadores da chuva ácida. A presença de CO (monóxido de carbono) nas emissões atmosféricas é indicativa de uma oxidação incompleta ao longo do processo, fato que é associado à emissão de outros compostos poluentes denominados de produtos da combustão incompleta (PIC), bastante nocivos à saúde e ao meio ambiente, como por exemplo, as dioxinas e furanos. Há outros traços orgânicos resultantes da combustão incompleta, como os chamados PAH's (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos), os aldeídos, os clorobenzenos, etc.

Neste capítulo, serão apontadas técnicas para redução e controle da produção e emissão destes poluentes.

8.2.1. NO_x

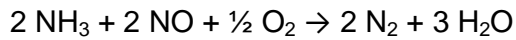
As técnicas sugeridas por este trabalho para controlar e reduzir a produção e emissão de NO_x são:

- Uso de aditivos, ou seja, modificação química no processo de combustão pela incorporação de produtos químicos no combustível ou no oxidante para reduzir a geração de NO_x . A viabilidade desta técnica é fortemente influenciada por dois fatores: custo e efeitos do aditivo no processo de produção.

- Substituição do oxidante, ou seja, o uso de outro oxidante ao invés do ar atmosférico que é um grande provedor de nitrogênio para a formação de NO_x nas reações de combustão comuns. O complemento do ar atmosférico com injeção de oxigênio puro pode, por exemplo, causar uma redução drástica na emissão de NO_x . Este oxigênio puro deve representar aproximadamente 80% do total de oxidante.

- Injeção de líquidos ou gases inertes para reduzir os picos de temperatura. Usualmente é utilizado água.

- Processo SNCR: neste processo, a redução de NO_x é alcançada com a utilização do processo SNCR (Selective Non Catalytic Redutcion) com amônia. A equação que rege este processo é:



A temperatura dos gases de exaustão é de 1.030 °C e de acordo com a Figura 8.2.1.1, pode-se alcançar uma redução de NO_x de aproximadamente 50%.

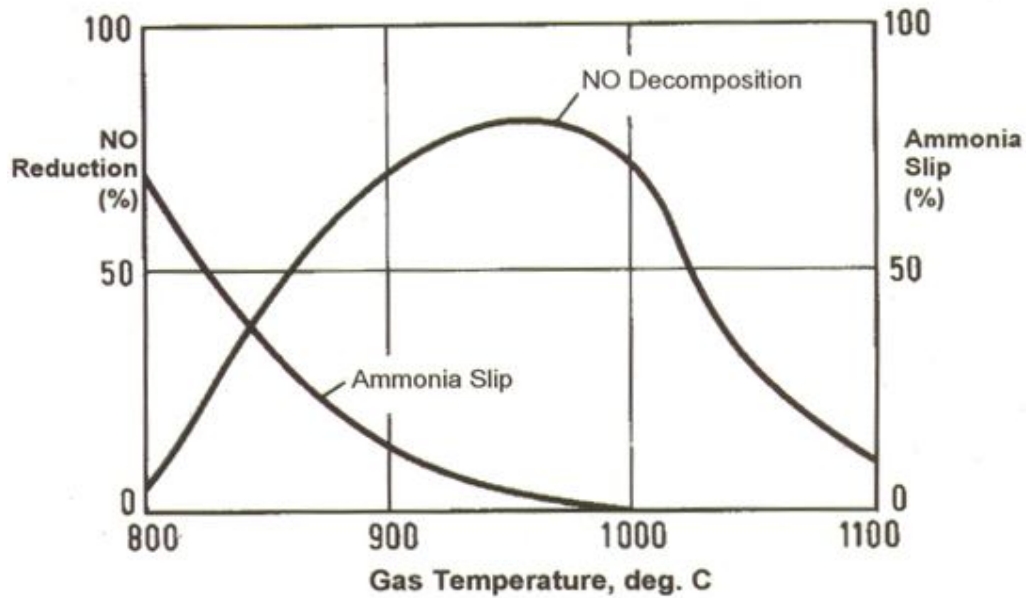


Figura 8.2.1.1 – Gráfico de eficiência do processo SNCR com injeção de amônia

8.2.2. SO_x

Para reduzir as emissões de SO_x também é possível, como no caso do NO_x, utilizar aditivos para promover uma modificação química no processo de combustão pela incorporação de produtos químicos no combustível ou no oxidante para reduzir a geração de SO_x. A viabilidade desta técnica é fortemente influenciada por dois fatores: custo e efeitos do aditivo no processo de produção.

Além disso, é possível fazer o pós-tratamento dos gases com a instalação de um lavador alcalino.

8.2.3. PAH

Os PAH's, principalmente aqueles com 4 ou mais anéis benzênicos e potencialmente mais perigosos a saúde humana, são altamente resistentes a oxidação. Deste modo, os avanços mais modernos na combustão são uma tentativa de compreender os mecanismos de formação em detalhes, para então, ser possível ter o controle sobre eles e minimizar suas emissões.

Uma solução altamente viável para eliminar PAH's gerados durante a queima do combustível é a pós-combustão com catalisadores de oxidação.

8.2.4. Dioxinas e Furanos

A tecnologia de injeção de adsorvente é um efetivo agente de supressão da formação de PCDD/PCDF quando utilizada de maneira apropriada. Takacs e Moilanen, 1991 supõem que a injeção de amônia atua na prevenção da formação de PCDD/PCDF tanto na câmara de combustão, onde a amônia compete pelo cloro disponível com os hidrocarbonos (precursores das dioxinas), quanto na formação de dioxinas através das cinzas volantes que atuam como catalisador, já que a amônia, em temperaturas apropriadas, produz o radical NH_4^+ , que provavelmente envenena o catalisador, reduzindo assim a formação de PCDD/PCDF nos gases de combustão e nos equipamentos de remoção de particulados.

Estratégias de pós-tratamento que transformam as dioxinas geradas durante a combustão em espécies não-tóxicas podem ser adotadas com grande efetividade. Dentre elas, há a adsorção em carvão ativado e a oxidação catalítica com a utilização de um catalisador apropriado – por exemplo, V_2O_5 e WO_3 com Substrato de Al_2O_3 ou TiO_2 .

De um modo geral, é possível minimizar a formação e emissão de PCDD/PCDF dos incineradores obedecendo às seguintes recomendações: controle da quantidade e distribuição do ar de combustão primário e secundário; procedimentos corretos de ignição e parada da instalação; controle da temperatura em todas as fases do processo; controle da taxa de alimentação de resíduos e baixa geração de material particulado.

9. VIABILIDADE ECONÔMICA

O investimento necessário está descrito na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Descrição do investimento

Equipamento / Serviço	Valor
Incinerador	R\$ 14.500.000,00
Ventilador 1	R\$ 750.000,00
Caldeira	R\$ 16.500.000,00
Gerador	R\$ 32.000.000,00
Turbina	R\$ 16.000.000,00
Condensador	R\$ 10.500.000,00
Torre de Resfriamento	R\$6.200.000,00
Desaerador	R\$ 60.000,00
Filtro de Mangas 1	R\$ 6.400.000,00
Filtro de Mangas 2	R\$ 6.400.000,00
Lavador de Gases 1	R\$ 10.000.000,00
Lavador de Gases 2	R\$ 10.000.000,00
Exaustor 1	R\$ 2.000.000,00
Exaustor 2	R\$ 2.000.000,00
Chaminé	R\$ 250.000,00
Obras Civis	R\$ 30.000.000,00
Instalações Elétricas	R\$ 5.500.000,00
Total	R\$ 169.060.000,00

A capacidade de geração da planta é de 33 MW, sendo que aproximadamente 3 MW serão para consumo próprio. O restante (30 MW) será vendido para a concessionária responsável pelo fornecimento local de energia elétrica. Considerando que a central operará 7.500 horas por mês e o valor de R\$ 150,00 por MWh, a energia disponível para venda será de 225.000 MWh, o que representa uma receita anual de R\$ 33.750.000,00.

De posse destes valores, foram utilizadas as técnicas descritas abaixo para fazer a análise de viabilidade econômica.

- Período de Payback: trata-se do tempo necessário para que a empresa recupere seu investimento inicial em um projeto, calculado com suas entradas de caixa. Se o período de payback for menor que o período máximo aceitável de recuperação, o projeto será aceito. Caso contrário, será rejeitado.

- Valor Presente Líquido (VPL): leva explicitamente em conta o valor do dinheiro no tempo, é considerado uma técnica sofisticada de orçamento de capital. Tanto as entradas como as saídas de caixa são medidas em termos de dinheiro presente. Como o investimento possui uma série convencional de fluxo de caixa, o investimento inicial é automaticamente expresso em termos de dinheiro presente. Se o VPL for maior que R\$ 0, o projeto deverá ser aceito. Caso contrário, rejeitado.

- Taxa Interna de Retorno (TIR): trata-se de uma taxa de desconto que iguala o VPL de uma oportunidade de investimento a R\$ 0 (porque o valor presente das entradas de caixa se iguala ao investimento inicial). É a taxa composta de retorno anual que a empresa obteria se concretizasse o projeto e recebesse as entradas de caixa previstas. Se a TIR for maior que o custo de capital, deve-se aceitar o projeto. Caso contrário, rejeitá-lo.

A movimentação de capital e os resultados estão expressos na Tabela 9.2.

Tabela 9.2 – Movimentação de capital e critérios de decisão

Viabilidade Econômica			
Critérios de Decisão			
Invest. Total (R\$) =			169.060.000,00
PBs (anos) =			5,0
TIR (10 anos) =			15,1%
Custo de Investimento =			9,0%
VPL (R\$) =			47.535.947,00

Ano	Investimento	Ganho	Fluxo CX
0	169.060.000	0	-169.060.000
1	0	33.750.000	33.750.000
2	0	33.750.000	33.750.000
3	0	33.750.000	33.750.000
4	0	33.750.000	33.750.000
5	0	33.750.000	33.750.000
6	0	33.750.000	33.750.000
7	0	33.750.000	33.750.000
8	0	33.750.000	33.750.000
9	0	33.750.000	33.750.000
10	0	33.750.000	33.750.000

O investimento para a implantação desta tecnologia ainda é elevado. Para efeito de comparação, a implantação de um aterro sanitário gira em torno de R\$9,00 por habitante, já a incineração ficam em torno de R\$200,00 (USINAVERDE,2009). Por isso, devem-se considerar outros meios para diminuir essa diferença.

Além de haver um retorno do investimento por volta de 5 anos (que pode ser conseguido com a venda do excedente de energia elétrica gerada), e não haver um limite para a vida útil da usina desde que sejam feitas as manutenções preventivas (o que não acontece com os aterros), ainda há a possibilidade da geração e comercialização dos chamados créditos de carbono. Isso porque este método de tratamento dos RSU previne a emissão do metano que seria exalado na decomposição dos materiais orgânicos em um aterro. De acordo com os resultados obtidos pelo estudo realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2004),

visando quantificar o potencial de geração de energia elétrica e de redução de emissões de metano, o preço de energia de R\$ 150 / MWh já considera os créditos de carbono.

Outra forma de ganho é a possibilidade de recepção de benefícios fiscais vindos do Estado. Em São Paulo, por exemplo, e em mais 12 Estados Brasileiros, existe o chamado ICMS ecológico que se constitui de um incentivo financeiro para municípios que desenvolvem ações de preservação ambiental. Em alguns deles, a exemplo de São Paulo, é repassada uma parcela do ICMS arrecadado no Estado para cidades que tenham investido em destinação/tratamento dos resíduos sólidos urbanos (uma das medidas de saneamento básico).

10. COMPARAÇÃO: INCINERAÇÃO x ATERRO SANITÁRIO

A comparação entre o método de destinação final dos RSU proposto neste trabalho e o atual, e mais comum, foi feito levando-se em conta 4 abordagens: custo de implantação e operação, geração de energia, impacto ambiental e créditos de carbono.

- Custo de implantação e operação: embora o custo inicial para implantação de um aterro sanitário seja expressivamente menor que o de uma de incineração, o aterro, por se localizar obrigatoriamente distante dos locais de geração de lixo, apresenta custo operacional bem mais elevado o que ainda é influenciado pela necessidade de tratamento do chorume; além disso, a vida útil de um aterro é limitada devendo, após o esgotamento da área, ser iniciado o processo de construção de um novo aterro em um novo local. Nesse caso, haverá ainda, quando da desativação do aterro, os custos com a recuperação do local (arborização, transformação em parque ou outro fim) e monitoramento por no mínimo 20 anos do aterro desativado para controle das emissões atmosféricas e de chorume que ainda ocorrerão. Já no caso da incineração, não há limite para sua vida útil se realizadas as manutenções preventivas e eventuais reparos.

- Geração de energia: a geração de energia na incineração é muito mais eficiente do que em um aterro. Enquanto uma usina de conversão térmica de resíduos consegue converter 1 tonelada de RSU em 400KWh, a mesma quantidade de resíduos em um aterro rende apenas 20KWh. Sem contar que devido a possibilidade de instalação da incineração próxima as cidades (centros de consumo) também se reduz as perdas de energia durante o transporte uma vez que o trajeto será menor.

- Impacto Ambiental: no aterro sanitário os resíduos ficam enterrados durante muitos anos até que enfim se decomponham e durante esse processo são gerados diversos tipos de gases e um líquido tóxico, o chorume. O chorume deverá ser tratado em um sistema à parte (Estação de Tratamento de Efluente) e os gases se não forem queimados, como é feito usualmente, para conversão do metano em dióxido de carbono, podem ser usados para gerar energia. O problema é que nem

todo gás produzido pelo aterro pode ser capturado e convertido em energia, uma parte dele sempre escapa para a atmosfera causando danos a camada de ozônio.

- Créditos de Carbono: o potencial de geração de créditos de carbono da incineração é bem maior que o de um aterro sanitário. Isso porque a quantidade de créditos de carbono criada por um projeto de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) é calculada levando-se em conta a redução na emissão de GEE (Gases de Efeito Estufa) conseguida por um projeto menos a quantidade de GEE que serão emitidos pelo próprio projeto. Sendo assim, um aterro sanitário que trata a mesma quantidade de RSU que uma de incineração, conseguirá menos crédito de carbono que a usina pelo simples fato de que o aterro irá emitir durante sua vida útil alguma quantidade de GEE enquanto que a usina não emite.

11. ANÁLISES E RESULTADOS

Evidencia-se um esgotamento do modelo de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos que tem sido empregado nas nossas grandes cidades, inclusive na cidade de São Paulo, escopo deste trabalho. Todo material contaminante presente nesses resíduos fica exposto, na maioria dos casos, em vazadouros e aterros não controlados, que estão cada vez mais distantes dos centros geradores.

Há a necessidade de se ampliar as alternativas para garantir um tratamento mais adequado e eficiente destes resíduos. A incineração com recuperação energética é uma delas.

A implantação de uma central termelétrica que opere nestas condições pode ser uma opção viável, técnica e economicamente, pois reduz o volume do produto final em aproximadamente 90%, que ainda pode ser utilizado em outras formas de disposição final, além de gerar energia elétrica que pode ser utilizada na própria planta ou vendida à concessionária local.

No Brasil, a tecnologia de incineração de resíduos sólidos domiciliares é praticamente inexistente. Em alguns países europeus, no Japão e nos Estados Unidos, ela é utilizada com sucesso, processando até 1.800 toneladas por dia de lixo e gerando 63 MW na central termelétrica de Dickerson (Maryland, EUA), por exemplo.

As normas brasileiras ainda estão se adequando a este novo cenário mundial para oferecer ao Brasil condições necessárias para a implantação dessa tecnologia alternativa. Para isso, constantes alterações estão sendo feitas para se adequar aos novos conhecimentos que vão sendo adquiridos nos mais diversos campos de pesquisa. A tendência dessas novas legislações é abranger não só a questão da limitação dos níveis de emissão de uma unidade, mas também determinar os parâmetros de projeto que devem ser obedecidos, os procedimentos básicos a serem seguidos e exigir a sistemática de monitoramento necessária ao controle de toda a central termelétrica.

Com o levantamento dos dados específicos para a cidade de São Paulo, foi possível caracterizar o material a ser tratado e definir os padrões de operação e projeto da central termelétrica em questão.

Foi realizada uma análise de todos os subprodutos gerados nesse processo de tratamento térmico dos RSD para fornecer uma disposição final adequada e dentro das normas ambientais.

A escória e as cinzas, geradas/captadas no forno do incinerador e no filtro de mangas, respectivamente, possuem diversos fins: aterros, construção civil, pavimentação, criação de ilhas artificiais e avanço de superfície sobre o mar, como ocorre no Japão, por exemplo.

Uma quantidade dos elementos tóxicos é eliminada na escória e nas cinzas, mas eles ainda continuam presentes nos gases de combustão. Os principais e mais preocupantes são os PAH's, dioxinas, furanos e elementos formadores da chuva ácida. Então alguns métodos foram discutidos para que, em conjunto com o lavador de gases úmidos, possam limpar totalmente os gases de combustão e adequá-los às normas ambientais de emissão.

O investimento necessário para a instalação de uma unidade foi estimado em R\$ 169.060.000,00, incluindo os equipamentos, obras civis e instalações elétricas.

De acordo com as técnicas de orçamento de capital, o projeto é viável economicamente. A simulação do fluxo de caixa apresentou um VPL de R\$ 47.535.947,00, uma TIR de 15,1% perante um custo de investimento de 9% e um retorno de investimento de 5 anos.

O investimento para a implantação desta tecnologia ainda é elevado em comparação com as outras formas de tratamento dos RSU. Por isso, devem-se considerar outros meios para diminuir essa diferença como, por exemplo, a possibilidade da geração e comercialização dos créditos de carbono e o incentivo financeiro conseguido com o ICMS ecológico.

Em uma análise comparativa do custo de implantação e operação, a geração de energia, o impacto ambiental e os créditos de carbono, o método da incineração apresentou-se mais vantajoso em relação aos aterros sanitários.

Por fim, este trabalho ressalta a importância da implementação do desenvolvimento de pesquisas nessa área para impulsionar a adoção de medidas que realmente venham contribuir na melhoria da qualidade ambiental e de vida da sociedade brasileira.

12. REFERÊNCIAS

- A. ARAUJO S/A. **Industrialização do Lixo Urbano: Aterro, Compostagem, Incineração**. São Paulo, 1992.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2005. Disponível em: <http://www.abrelpe.com.br/panorama_2005.php>. Acesso em: 10 abr. 2009.
- AQUAFIL – Tratamento de Água Ltda. <<http://www.aquafil.com.br>>. Acesso em: 11 nov. 2009
- BAWKON, B. **Incineration Technologies for Managing Solid Waste**. Pollution Engineering, pag. 96-102, set, 1991.
- BORGNAKKE, C; SONNTAG, R. E.; WYLEN, G. J. V. **Fundamentos da termodinâmica**. Tradução da sexta edição inglesa: Euryale de Jesus Zerbini. Edgard Blücher. São Paulo, 2003.
- CCREM – CANADIAN COUNCIL OF RESOURCE AND ENVIRONMENT MINISTERS. **Municipal Solid Waste Incineration Guidelines**. Canadá, 1991.
- CETESB. **Sistema de Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde**. Norma E-15011, São Paulo, 1997.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. 1986. **Resolução Conama nº 001**. Disponível em: <www.mma.gov.br/conama>. Acesso em: 01 abr. 2009.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. 1990. **Resolução Conama nº 008**. Disponível em: <www.mma.gov.br/conama>. Acesso em: 01 abr. 2009.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. 2002. **Resolução Conama nº 316**. Disponível em: <www.mma.gov.br/conama>. Acesso em: 01 abr. 2009.

- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Municipal Solid Waste Factbook**, ver. 4.0, Office of Solid Waste, 1997.
- FOUHY, K. **Legislation Scrubs Flue Gás Emissions**. Chemical Engineering, jun, 1992.
- GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. 10 ed, Pearson Addison Wesley. São Paulo, 2007.
- GRIPP, W. G. **Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo**. 1998. 209 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- HAUKOHL, J.; Marxen U.; Rand T. **Municipal Solid Waste Incineration – A Decision Maker’s Guide**. The World Bank. Washington, D.C, 2000.
- HAY, D. **Incineration of Municipal Solid Waste Regulatory Initiatives in Canada**. Proceedings Internacional Conference on Municipal Waste Combustion, Florida, USA, apr, 1989.
- HEAP, B. **Retrofitting an existing MSW waste-to-energy facility to meet emission requirements**. Filtration and Separation, vol. 32, num. 1, pag. 21-24, jan, 1995.
- JACOBI, P.; BESEN, G.R. **Gestão de resíduos sólidos na Região Metropolitana de São Paulo: avanços e desafios**. *São Paulo em Perspectiva*, São Paulo, Fundação Seade, v. 20, n. 2, p. 90-104, abr./jun. 2006. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br>>; <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 10 abr. 2009.
- JUNGMANN, G. **Pollutant Emissions Reduced by Retroffiting Waste Incineration Plants**. ABB Reviews, pag 15-20, feb, 1993.
- KELLERMEYER, D. A.; ZIEMER, S. E. – **Public Health Risks Associated With Disposal of MWS Incineration Ash**. Proceedings International Conference on Municipal Waste Combustion, Florida, USA, apr, 1989.
- LIMA, L. M. Q. **Tratamento de Lixo**. 2º edição, Editora Hemus, São Paulo, 1991.

- LORAM, R. G. **Energy From Waste: Current Progress in Sweden**. Energy World, num. 164, pag 3-5, 12, nov, 1988.
- MENEZES, R. A. A.; CEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 2000, Curitiba. Disponível em: <<http://www.luftech.com.br/arquivos/art07.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2009.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Estudo o potencial da geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil**. Brasília, 2004. Convênio: Ministério do Meio Ambiente e FEALQ.
- NILSSON, K. **Emission Standards for Waste Incineration**. Sweden, Paper presented in ISWA Annual Conference. Waste Management in Europe 1992. Netherlands, sep, 1990.
- PATEL, N.; HIGHAM, I. **MSW Combustion: Economics and Projections for Energy Recovery to the Year 2000**. IWM Proceedings, pag 8-12, apr, 1995.
- POLETTO, J. A.; SILVA, C. L. **Influência da Separação de Resíduos Sólidos Urbanos para Fins de Reciclagem no Processo de Incineração com Geração de Energia**. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco, 2007.
- PROEMA – ENGENHARIA E SERVIÇOS LTDA. **Estudo de Impacto Ambiental – EIA: Usina de Processamento de Resíduos Sólidos Domiciliares com Incineração, Recuperação de Energia Elétrica e dos Materiais Reaproveitáveis – Sapopemba**. São Paulo, out, 1994.
- SECRETARIA MUNICIPAL DE SERVIÇOS DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. <<http://portal.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/servicoseobras/coletadomiciliar/0001>>. Acesso em: 01 jun 2009.
- TAKACS, L.; MOILANEN, G. L. **Simultaneous control of PCDD/PCDF, HCL and NOx emissions from municipal solid waste incinerators with ammonia injection**. Journal of the Air & Waste Management Association, vol 41, num 5, pag 716, may, 1991.

USINA VERDE. <www.usinaverde.com.br>. Acesso em: 01 jun 2009.

VULCANO. **Programa de Combustão Industrial**. Fornecido pela empresa Dynamis Mecânica Aplicada Ltda.

WASTE MANAGEMENT WORLD. Tulsa: PennWell Corporation, 2006 – Bimensal.

WILLIAMS, P. T. **The Sampling and Analysis of Dioxins and Furans From Combustion Sources**. Journal of Institute of energy, vol 65, num 462, pag 46-54, mar, 1992.

ANEXO A - RESOLUÇÃO CONAMA

RESOLUÇÃO CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002

Publicada no DOU nº 224, de 20 de novembro de 2002, Seção 1, páginas 92-95

Correlações:

. Artigo 18 alterado pela Resolução CONAMA nº 386/06

Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, no uso de suas competências atribuídas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990, e tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, anexo à Portaria nº 326, de 15 de dezembro de 1994; e

Considerando que o princípio da precaução é o fundamento do desenvolvimento sustentável;

Considerando que os sistemas de tratamento térmico de resíduos são fontes potenciais de risco ambiental e de emissão de poluentes perigosos, podendo constituir agressão à saúde e ao meio ambiente se não forem corretamente instalados, operados e mantidos;

Considerando que, entre estes poluentes destacam-se, pela sua periculosidade, os poluentes orgânicos persistentes, e que deve ser buscada a redução das emissões totais dos poluentes mencionados, com a finalidade de sua contínua minimização e, onde viável, sua eliminação definitiva;

Considerando que os poluentes orgânicos persistentes têm propriedades tóxicas, são resistentes à degradação, se bioacumulam, são transportados pelo ar, pela água e pelas espécies migratórias através das fronteiras internacionais e depositados distantes do local de sua emissão, onde se acumulam em ecossistemas terrestres e aquáticos;

Considerando que o estabelecimento de limites máximos de emissão, para poluentes a serem lançados na atmosfera, nas águas e no solo, por sistemas de tratamento térmico, contribui na implementação do Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras, conforme previsto na Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997, resolve:

Art. 22. O sistema de tratamento térmico de resíduos de origem urbana, ao ser implantado, deve atender os seguintes condicionantes, sem prejuízo de outras exigências estabelecidas no procedimento de licenciamento e legislações complementares:

I - área coberta para o recebimento de resíduos;

II - sistema de coleta e tratamento adequado do chorume.

Art. 23. Os resíduos de origem urbana, recebidos pelo sistema de tratamento térmico, deverão ter registro das informações relativas à área de origem e quantidade.

Parágrafo único. As câmaras deverão operar à temperatura mínima de oitocentos graus Celsius, e o tempo de residência do resíduo em seu interior não poderá ser inferior a um segundo.

Art. 24. A implantação do sistema de tratamento térmico de resíduos de origem urbana deve ser precedida da implementação de um programa de segregação de resíduos, em ação integrada com os responsáveis pelo sistema de coleta e de tratamento térmico, para fins de reciclagem ou reaproveitamento, de acordo com os planos municipais de gerenciamento de resíduos.

Parágrafo único. A partir da licença de operação do sistema de tratamento térmico, deverá ser observado o seguinte cronograma mínimo de metas:

I - no primeiro biênio, deverá ser segregado o percentual correspondente a seis por cento do resíduo gerado na área de abrangência do sistema;

II - no segundo biênio, deverá ser segregado o percentual correspondente a doze por cento do resíduo gerado na área de abrangência do sistema;

III - no terceiro biênio, deverá ser segregado o percentual correspondente a dezoito por cento do resíduo gerado na área de abrangência do sistema;

IV - no quarto biênio, deverá ser segregado o percentual correspondente a vinte e quatro por cento do resíduo gerado na área de abrangência do sistema; e

V - a partir do quinto biênio, deverá ser segregado o percentual correspondente a trinta por cento do resíduo gerado na área de abrangência do sistema.

Art. 25. O tratamento térmico de agrotóxicos e afins, bem como os materiais, produtos ou resíduos por eles contaminados, quando exigível pela legislação específica, deverão atender às disposições da presente Resolução, obedecendo aos mesmos parâmetros e critérios adotados para os resíduos industriais.

Art. 26. O processo de licenciamento das unidades de tratamento térmico de resíduos será tecnicamente fundamentado com base nos estudos, a seguir relacionados, que serão apresentados pelo interessado:

I - Projeto Básico e de Detalhamento;

II - Estudo e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) ou outro estudo, definido pelo órgão ambiental competente;

III - Análise de Risco;

IV - Plano do Teste de Queima;

V - Plano de Contingência;

VI - Plano de Emergência.

§ 1o O prazo máximo de vigência da licença de operação será de cinco anos.

§ 2o A periodicidade dos testes para verificação de conformidade dos limites máximos de emissão e os demais condicionantes da Licença de Operação, bem como outros procedimentos não elencados, deverão ser fixados a critério do órgão ambiental competente.

§ 3o Na hipótese de encerramento das atividades, o empreendedor deverá submeter ao órgão ambiental competente o Plano de Desativação do sistema, obtendo o devido licenciamento.

Art. 27. Todo e qualquer sistema de tratamento térmico deve possuir unidades de recepção, armazenamento, alimentação, tratamento das emissões de gases e partículas, tratamento de efluentes líquidos, tratamento das cinzas e escórias.

Parágrafo único. Na hipótese de os efluentes líquidos e sólidos não serem tratados dentro das instalações do sistema de tratamento, o destinatário que os receber deverá estar devidamente licenciado para este fim.

Art. 28. Todo sistema de tratamento térmico de resíduos deverá possuir um responsável técnico para o seu funcionamento, devidamente habilitado para este fim, com registro de responsabilidade técnica no órgão profissional competente.

Parágrafo único. O responsável técnico terá como atribuições:

I - gerenciamento da operação, manutenção e controle do sistema de tratamento térmico;

II - a implementação de planos de emergência; e

III - elaboração e guarda por vinte e cinco anos, na forma de relatórios, de todos os registros de operação, manutenção, disfunção e interrupção do sistema, incluindo-se a quantidade de resíduo tratado, sua caracterização, o cardápio de entrada, quando for o caso, a escória produzida, assim como as verificações do atendimento aos limites de emissão de poluentes do ar e da água.

IV - Caberá ao responsável técnico legalmente habilitado emitir certificado de tratamento térmico atestando ter cumprido as condicionantes da licença ambiental cujos dados constarão do referido certificado, cabendo a guarda deste documento também ao gerador do resíduo, contratante da operação.

Art. 29. A primeira verificação do cumprimento aos Limites Máximos de Emissão será realizada em plena capacidade de operação e deve necessariamente

preceder à expedição da Licença de Operação (LO), que por sua vez não poderá ultrapassar os seis meses do início da partida da unidade.

Parágrafo único. A realização de teste de queima é obrigatória por ocasião do licenciamento, renovação de licença, além de toda e qualquer modificação das condições operacionais.

Art. 30. O operador do sistema de tratamento térmico deve ser capacitado nos seguintes tópicos:

I - conceitos ambientais e legislações pertinentes;

II - princípios básicos de combustão, tratamento térmico de resíduos e a geração de poluentes (gasosos, líquidos e sólidos);

III - manual de operação, com ênfase no tipo de sistema, procedimentos de partida, operação e parada;

IV - funcionamento e manutenção dos componentes e subsistemas, incluindo os de monitoramento e controle de poluição;

V - manuseio dos resíduos gerados no processo de tratamento térmico;

VI - procedimentos para o recebimento de resíduos, com atenção para o não recebimento de resíduos radioativos;

VII - Programa de Prevenção de Riscos de Acidentes do Trabalho, do Ministério do Trabalho;

VIII - acidentes e disfunções do sistema;

IX - registros operacionais; e

X - simulação de atendimento ao Plano de Emergência.

Art. 31. Todo sistema de tratamento térmico de resíduos deve dispor de:

I - Plano de Inspeção e Manutenção do Sistema, com registros completos das intervenções de inspeção, manutenção, calibração;

II - Sistema de Automonitoramento, capaz de manter o registro dos efluentes discriminados nas condicionantes do processo de licenciamento.

Parágrafo único. Estes registros deverão ser disponibilizados integralmente ao órgão ambiental, sempre que solicitado.

Art. 32. O licenciamento para o tratamento térmico de resíduos, não discriminados nas condicionantes do licenciamento do sistema, deverá ser objeto de procedimento específico, junto ao órgão ambiental competente.

Art. 33. O teste de queima deve compreender o conjunto de medições realizadas na unidade operando com a alimentação de resíduos, para avaliar a compatibilidade das condições operacionais do sistema de tratamento térmico, com vistas ao atendimento aos limites de emissões definidos na presente Resolução e com as exigências técnicas fixadas pelo órgão ambiental competente.

Art. 34. No início do Teste de Queima, deverá ser avaliado o sistema de intertravamento para interromper automaticamente a alimentação de resíduos.

Art. 35. As coletas de amostras deverão ser realizadas em triplicatas.

Art. 36. São condições prévias à realização do Teste de Queima:

I - ter um Plano de Teste de Queima aprovado pelo órgão ambiental competente;

II - não apresentar risco de qualquer natureza à saúde pública e ao meio ambiente;

III - ter instalados, calibrados e em condição de funcionamento, pelo menos, os seguintes monitores contínuos e seus registradores: monóxido de carbono (CO), oxigênio (O₂), temperatura e pressão do sistema forno, taxa de alimentação do resíduo e parâmetros operacionais dos ECPs;

IV - ter instalado e em condição de funcionamento um sistema de intertravamento, para interromper automaticamente a alimentação de resíduos, no mínimo, em casos de:

a) baixa temperatura de combustão;

- b) falta de indicação de chama;
- c) falta de energia elétrica ou queda brusca de tensão;
- d) queda do teor de oxigênio (O₂), quer na câmara pós-combustão ou na chaminé;
- e) excesso de monóxido de carbono (CO) na chaminé em relação ao limite de emissão estabelecido;
- f) mau funcionamento dos monitores e registradores de oxigênio ou de monóxido de carbono;
- g) interrupção do funcionamento do Equipamento de Controle de Poluição (ECP); e
- h) queda de suprimento do ar de instrumentação.

Art. 37. O monitoramento e o controle dos efluentes gasosos devem incluir, no mínimo:

I - equipamentos que reduzam a emissão de poluentes, de modo a garantir o atendimento aos Limites de Emissão fixados nesta Resolução;

II - disponibilidade de acesso ao ponto de descarga, que permita a verificação periódica dos limites de emissão fixados nesta Resolução;

III - sistema de monitoramento contínuo com registro para teores de oxigênio (O₂) e de monóxido de carbono (CO), no mínimo, além de outros parâmetros definidos pelo órgão ambiental competente;

IV - análise bianual das emissões dos poluentes orgânicos persistentes e de funcionamento dos sistemas de intertravamento.

Art. 38. Todo e qualquer sistema de tratamento térmico não deve ultrapassar os seguintes limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos:

I - material particulado (MP) total: setenta miligramas por normal metro cúbico;

II - substâncias inorgânicas na forma particulada, agrupadas em conjunto como:

a) Classe 1: vinte e oito centésimos de miligrama por normal metro cúbico incluindo:

1. cádmio e seus compostos, medidos como cádmio (Cd);
2. mercúrio e seus compostos, medidos como mercúrio (Hg);
3. tálio e seus compostos, medidos como tálio (Tl);

b) Classe 2: um miligrama e quatro décimos por normal metro cúbico incluindo:

1. arsênio e seus compostos, medidos como arsênio (As);
2. cobalto e seus compostos, medidos como cobalto (Co);
3. níquel e seus compostos, medidos como níquel (Ni);
4. telúrio e seus compostos, medidos como telúrio (Te);
5. selênio e seus compostos, medidos como selênio (Se);

c) Classe 3: sete miligramas por normal metro cúbico incluindo:

1. antimônio e seus compostos, medidos como antimônio (Sb);
2. chumbo e seus compostos, medidos como chumbo (Pb);
3. cromo e seus compostos, medidos como cromo (Cr);
4. cianetos facilmente solúveis, medidos como Cianetos (CN);
5. cobre e seus compostos, medidos como cobre (Cu);
6. estanho e seus compostos, medidos como estanho (Sn);
7. fluoretos facilmente solúveis, medidos como flúor (F);
8. manganês e seus compostos, medidos como manganês (Mn);
9. platina e seus compostos, medidos como platina (Pt);

10. paládio e seus compostos, medidos como paládio (Pd);

11. ródio e seus compostos, medidos como ródio (Rh);

12. vanádio e seus compostos, medidos como vanádio (V).

III. Gases:

1. óxidos de enxofre: duzentos e oitenta miligramas por normal metro cúbico, medidos como dióxido de enxofre;

2. óxidos de nitrogênio: quinhentos e sessenta miligramas por normal metro cúbico, medidos como dióxido de nitrogênio;

3. monóxido de carbono: cem partes por milhão por normal metro cúbico;

4. compostos clorados inorgânicos: oitenta miligramas por normal metro cúbico, até 1,8 kg/h, medidos como cloreto de hidrogênio;

5. compostos fluorados inorgânicos: cinco miligramas por normal metro cúbico, medidos como fluoreto de hidrogênio;

6. Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina): 0,50 ng/Nm³;

§ 1o Os fatores de equivalência de toxicidade (FTEQ) são aqueles constantes do anexo I.

§ 2o Os parâmetros medidos devem ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca.

§ 3o O órgão ambiental competente pode restringir os limites estabelecidos, dependendo das condições de localização e dos padrões de qualidade do ar da região.

Art. 39. A verificação dos Limites Máximos de Emissão deve atender aos procedimentos previstos nas normas técnicas em vigor, para os seguintes tópicos:

I - determinação de pontos de amostragem, em dutos e chaminés de fontes estacionárias;

II - efluentes gasosos, em dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação da massa molecular - base seca;

III - efluentes gasosos, em dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação da velocidade e vazão;

IV - efluentes gasosos, em dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação de umidade;

V - efluentes gasosos, em dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação do material particulado;

VI - efluentes gasosos, em dutos e chaminés de fontes estacionárias - calibração dos equipamentos utilizados em amostragem;

VII - efluentes gasosos, em dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação de dióxido de enxofre, trióxido de enxofre e névoas de ácido sulfúrico.

Art. 40. O lançamento de efluentes líquidos em corpos d'água deve atender os limites de emissão e aos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação, obedecendo, também, os critérios constantes da Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986, e demais exigências estabelecidas no licenciamento ambiental. Resolução revogada pela Resolução no 357/05

Art. 41. Os métodos de coleta e análise das águas residuárias devem ser os especificados nas normas previstas no art. 24 da Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986.

Art. 42. Todo e qualquer equipamento ou sistema de tratamento térmico de resíduos que produza resíduos sólidos, semi-sólidos ou pastosos pós-tratamento, devem manter procedimentos de registro e controle sistemático dos mesmos e atender as exigências do órgão licenciador no que se refere a sua destinação final.

Art. 43. Todo material não completamente processado deverá ser considerado resíduo e ser submetido a tratamento térmico.

§ 1o As cinzas e escórias provenientes do processo de tratamento térmico, devem ser consideradas, para fins de disposição final, como resíduos Classe I - Perigoso.

§ 2o O órgão ambiental poderá autorizar a disposição das cinzas e escórias como resíduos Classe II (não perigoso, não inerte) e Classe III (não perigoso, inerte), se comprovada sua inertização pelo operador.

Art. 44. Para as instalações já licenciadas e em funcionamento, o empreendedor deverá firmar, perante o órgão ambiental competente, Termo de Compromisso Ambiental para a adequação dos sistemas às exigências da presente Resolução.

Parágrafo único. Ficará a critério do órgão responsável pelo licenciamento, estabelecer o prazo máximo, limitado a três anos, para a adequação dos equipamentos ou sistemas de tratamento térmico, já em funcionamento, à presente Resolução.

Art. 45. O sistema de tratamento que, na data de publicação desta Resolução, estiver operando sem a devida licença ambiental deverá requerer a regularização de seu empreendimento, perante o órgão ambiental competente, no prazo máximo de noventa dias.

Art. 46. O não cumprimento ao que dispõe esta Resolução sujeita os infratores as sanções e penalidades estabelecidas na Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e no Decreto nº 3.179, de 21 de setembro de 1999, sem prejuízo de outras sanções cabíveis.