

Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos  
Fundação Estadual do Meio Ambiente  
Engebio Engenharia S/S Ltda

**Estudo do estado da arte e análise de viabilidade  
técnica, econômica e ambiental da implantação de uma  
usina de tratamento térmico de resíduos sólidos  
urbanos com geração de energia elétrica no estado de  
Minas Gerais**

**RELATÓRIO 1 – Estado da arte do tratamento térmico de resíduos  
sólidos urbanos com geração de energia elétrica**

**2ª edição - 2010**

Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos  
Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável  
Fundação Estadual do Meio Ambiente  
Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento  
Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades de Infraestrutura

**Estudo do estado da arte e análise de viabilidade  
técnica, econômica e ambiental da implantação de  
uma usina de tratamento térmico de resíduos  
sólidos urbanos com geração de energia elétrica no  
estado de Minas Gerais**

**RELATÓRIO 1:**

**Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos  
com geração de energia elétrica**

**2ª edição**

FEAM – DPED – GEDIF – RT – 001/2010

Belo Horizonte

2010

© 2009 Fundação Estadual do Meio Ambiente – 1ª edição

© 2010 Fundação Estadual do Meio Ambiente – 2ª edição. rev. atual.

**Governo do Estado de Minas Gerais**

Aécio Neves Cunha  
Governador

**Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Sisema**

**Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - Semad**

José Carlos Carvalho  
Secretário

**Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM**

José Cláudio Junqueira Ribeiro  
Presidente

**Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento**

Paulo Eduardo Fernandes de Almeida  
Diretor

**Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades de Infraestrutura**

Ana Lúcia Bahia Lopes  
Gerente

**Equipe Técnica: FEAM**

Ana Lúcia Bahia Lopes, Eng. Civil, Esp.  
Abílio César Soares de Azevedo, Eng. Civil, Esp.  
Consuelo Ribeiro de Oliveira, Eng. Química, Esp.  
Laura Maria Jacques Leroy, Eng. Química, M.Sc. -Colaboradora

**Elaboração: Engebio Engenharia S/S Ltda**

Responsável Técnico  
Mario Saffer, Eng. Químico, D. Sc.

**Equipe Técnica: Engebio**

Mario Saffer, Eng. Químico, D. Sc.  
Adalberto Kilpinski, Economista  
José Carlos Carvalho da Cunha, Eng. Químico  
Guilherme Augusto Araújo Duarte, Eng. Químico  
Eduardo Bayon Britz, Téc. Meio Ambiente

Relatório 1: Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica / Engebio; Fundação Estadual do Meio Ambiente. --- Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente.  
294 -p. : II

Projeto “Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais”

1. Resíduo sólido urbano 2.Tratamento Térmico 3.Energia Elétrica I. Engebio II. Fundação Estadual do Meio Ambiente

CDU: 628.477.8 (815.1)

## RESUMO

A Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, do estado de Minas Gerais, com base na Lei Delegada nº. 156, de 25 de janeiro de 2007, regulamentada pelo Decreto 44819/2008 teve sua atribuição executiva no licenciamento ambiental transferida para unidades descentralizadas do Sistema Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SISEMA, passando a atuar com ênfase nas estratégias de busca de melhoria de qualidade ambiental e sustentabilidade do Estado, no âmbito da Agenda Marrom. Nesse contexto a FEAM busca contratar serviços técnicos especializados para apoiar o desenvolvimento de novos temas com foco na formulação de diretivas e normativas legais para fortalecimento da política ambiental do Estado.

Desenvolve-se no estado de Minas Gerais o Programa "Minas sem Lixões", implantado em 2003 pela Fundação Estadual de Meio Ambiente, como uma das ações do Projeto Estruturador "Resíduos Sólidos" do Estado e vem apresentando resultados expressivos desde sua criação, colocando Minas Gerais acima da média nacional na disposição adequada de resíduos sólidos urbanos.

O Projeto "Resíduo é Energia", em desenvolvimento pela FEAM, é realizado também no âmbito do Projeto Estruturador "Resíduos Sólidos" e pretende colaborar para a solução dos problemas gerados pelos resíduos sólidos em Minas Gerais. Assim, já foram iniciadas as pesquisas para subsidiar políticas de incentivo à construção de usinas térmicas a lixo, co-processamento de resíduos em fornos de cimento e aproveitamento do gás metano em aterros sanitários, além de soluções regionais e de inclusão social, priorizando as associações de catadores para o processo prévio de triagem e reciclagem. Dentro deste programa existem três estudos em andamento:

- captação de gás de aterro;
- biodigestão anaeróbia com obtenção de gás para geração de energia elétrica;

- implantação de Usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos por combustão para fins de geração de energia elétrica.

Para avaliar a alternativa de destinação final dos resíduos para destruição térmica em uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos por combustão para fins de geração de energia elétrica, a FEAM contratou serviços de consultoria especializada para desenvolver um “Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica em um município ou conjunto de municípios no estado de Minas Gerais”. Esse Estudo foi dividido em três etapas:

- Relatório 1 - Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica;
- Relatório 2 - Avaliação técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais;
- Relatório 3 - Estudo prospectivo das alternativas governamentais, nacionais e internacionais, voltadas ao financiamento de plantas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos.

Existem paradigmas a serem vencidos. A combustão de RSU é vista por muitos como nociva à saúde humana e prejudicial ao meio ambiente porém, devido ao nível de desenvolvimento tecnológico – eficientes sistemas de controle de emissão de gases, somados à vigência de legislações com parâmetros rígidos - hoje essa técnica é considerada uma alternativa ambientalmente segura e economicamente viável para o tratamento de resíduos urbanos.

O presente relatório – Relatório 1 - Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica – faz uma avaliação global de processos térmicos de tratamento de resíduos sólidos urbanos, definindo as melhores tecnologias a serem avaliadas e apresenta os critérios e os resultados da seleção da área e do conjunto de municípios que serão objeto do estudo de viabilidade técnica e econômica.

Nesse Relatório foram avaliados os métodos alternativos de disposição de resíduos com recuperação de energia. O tratamento térmico com queima direta dos resíduos, tal como são gerados (“*mass burn*”) foi a alternativa tecnológica selecionada.

Foram analisadas as emissões gasosas devido ao processo de combustão. Essas emissões são constituídas por substâncias em concentrações muito acima das permitidas pela legislação, por este motivo essas plantas requerem um tratamento físico-químico avançado para neutralizar os poluentes gerados.

O estudo dos sistemas de controle de emissões atmosféricas foi desenvolvido com base nos padrões de qualidade do ar dados pela Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990, e pela Deliberação Normativa COPAM nº 11, de 16 de dezembro de 1986, do estado de Minas Gerais. Tanto esta Normativa, como a CONAMA nº 382, definem padrões de emissão específicos para algumas fontes de poluição, porém não definem padrões específicos para o tratamento térmico de resíduos. A Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, incluindo os resíduos de origem urbana.

Em uma segunda etapa, foram selecionadas as tecnologia de combustão de resíduos sólidos urbanos consagradas no mercado internacional:

- CNIM;
- Von Roll Inova;
- Martin;
- Processo SYNCOM;
- Energy Products of Idaho;
- Foster Wheeler.

Mesmo não sendo uma tecnologia consolidada, e por se tratar de tecnologia nacional, foi também analisada a tecnologia USINAVERDE.

Esta etapa chegou à conclusão que entre os processos de queima com recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos tipo “*mass burn*”, a escolha da alternativa tecnológica vai depender do conjunto de informações do cenário final da Usina, incluindo as características finais do resíduo a ser tratado termicamente, seu condicionamento na origem, a forma de coleta, o sistema de triagem, a classificação e outras formas de tratamentos intermediários, o porte da Usina e o seu número de módulos, assim como do uso final da energia a ser gerada e da eficiência e custo global das instalações.

Como etapa final deste relatório foi efetuada a seleção da região de Minas Gerais que serviu como base para as próximas etapas do Estudo.

Para tal, em uma primeira etapa, baseando-se em critérios estabelecidos, considerados meios sociais, físicos e bióticos, foram pré-selecionadas 4 (quatro) regiões para instalação da planta da Usina, centradas nas cidades de Montes Claros, Ubá, Três Corações e Governador Valadares.

Como conclusão, utilizando-se critérios específicos, a melhor região de implantação da usina foi considerada a região do Sul de Minas Gerais, entorno da cidade de Três Corações.

Em sequência ao estudo, foi feita consulta formal aos fornecedores detentores de tecnologias de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica em andamento. O resultado dessa consulta é apresentado no Relatório 2.

## LISTA DE SIGLAS

APP	Área de Preservação Permanente
CCREM	<i>Canadian Council of Resource and Environment Ministers</i>
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
CEE	Comunidade Econômica Européia
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental (estado de Minas Gerais)
CPA	Controle de Poluição do Ar
DA	Digestão Anaeróbia
ECP	Equipamento de Controle de Poluição
EDR	Energia Derivada dos Resíduos
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EUA	Estados Unidos da América
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente (estado de Minas Gerais)
FMC	Fumaça
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDT	Ingestão Diária Tolerável



IVIG	Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais
LF	Leito Fluidizado
LO	Licença de Operação
MAA	Média Aritmética Anual
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MGA	Média Geométrica Anual
MP	Material Particulado
OMS	Organização Mundial da Saúde
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PTS	Partículas Totais em Suspensão
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SCPA	Sistemas de Controle de Poluição do Ar
SCR	Redução Catalítica Seletiva
SISEMA	Sistema Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (estado de Minas Gerais)
SMC	Sistemas de Monitoramento Contínuo
SNCR	Redução Catalítica Não Seletiva
US/EPA	Agência de Proteção Ambiental Americana
UTC	Unidade de Triagem e Compostagem
WTE	<i>Waste to Energy</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{g}$	Micrograma
$\text{Ca(OH)}_2$	Cal hidratada
$\text{CaO}$	Cal
$\text{Cd}$	Cádmio
$\text{CO}$	Monóxido de Carbono
$\text{CO}_2$	Dióxido de Carbono
$\text{Cr}$	Cromo
$\text{DENO}_x$	Denitrificação
$\text{h}$	Hora
hab.	Habitante
$\text{HC}$	Hidrocarbonetos
$\text{HCl}$	Ácido Clorídrico
$\text{HF}$	Ácido Fluorídrico
$\text{Hg}$	Mercúrio
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
V	Volt
L	Calor Latente de Vaporização
m	Metro
$\text{m}^3$	Metro cúbico

mg	Miligrama
MJ	Mega Joule
MP10	Partículas Inaláveis
MW	Mega Watt
MWh	Mega Watt hora
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NaHCO <sub>3</sub>	Bicarbonato de Sódio
ng	Nanograma
NH <sub>4</sub> OH	Amônia aquosa
Nm <sup>3</sup>	Normal metro cúbico
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
O <sub>2</sub>	Oxigênio
°C	Graus Celsius
PAH	Hidrocarbonetos poliaromáticos
Pb	Chumbo
pg	Picograma
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
t	Tonelada
tep	Tonelada equivalente petróleo
TEQ	Equivalência Tóxica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planta do tratamento térmico.....	9
Figura 2 - Fluxograma das operações para a combustão em grelha .....	11
Figura 3 - Resíduo transformado em CDR .....	15
Figura 4 - Processo de obtenção do CDR .....	15
Figura 5 - Fluxograma esquemático de gaseificação .....	19
Figura 6 - Processo Seco ( <i>Dry Process</i> ).....	29
Figura 7 - Processo Semiúmido.....	30
Figura 8 - Processo Úmido.....	31
Figura 9 - Processo SCR – Redução Catalítica Seletiva.....	33
Figura 10 - Processo SNCR – Redução Catalítica Não Seletiva.....	33
Figura 11 - Fluxograma de processo USINAVERDE.....	57
Figura 12 - Vista Geral da USINAVERDE.....	59
Figura 13 - Prédio de Pré-Tratamento .....	59
Figura 14 - Área de Recepção dos Resíduos .....	60
Figura 15 - Esteira de Recicláveis.....	60
Figura 16 - Forno de Combustão .....	61
Figura 17 - Caldeira de Recuperação .....	61
Figura 18 - Caldeira e Casa do Turbogenerador .....	62
Figura 19 - Sistema de Lavagem de Gases.....	62
Figura 20 - Decantador e Torre de Refrigeração.....	63
Figura 21 - Área Industrial.....	63
Figura 22 - Vista Geral da Usina LIPOR II .....	64
Figura 23 - Processo da Usina LIPOR II.....	65
Figura 24 - Processo da Usina LIPOR II.....	66
Figura 25 - Usina LIPOR II – Portugal .....	68
Figura 26 - Usina LIPOR II - Portugal .....	68
Figura 27 - Centro de Triagem.....	69
Figura 28 - Centro de Triagem.....	69
Figura 29 - Plantas de Incineração Von Roll Inova no mundo.....	70
Figura 30 - Processo Von Roll Inova .....	71
Figura 31 - Processo de queima em grelhas .....	72
Figura 32 - Processo de queima em forno rotativo .....	72
Figura 33 - Processo de redução de óxidos de nitrogénio .....	73
Figura 34 - Processo de tratamento de dioxinas e furanos .....	74
Figura 35 - Processo de tratamento para gases ácidos e metais pesados.....	74
Figura 36 - Processo de tratamento dos resíduos de combustão .....	75

Figura 37 - Usina WTE Riverside Resource Recovery Ltd (RRRL) – Londres (em construção) .....	76
Figura 38 - Usina East Liverpool - USA .....	76
Figura 39 - Sistema de Processo Semisseco .....	77
Figura 40 - Sistema SNCR e SCR .....	77
Figura 41 - Sistema de Processo Catalítico .....	78
Figura 42 - Tratamento final dos resíduos de processo .....	78
Figura 43 - Descarregamento dos resíduos no fosso .....	80
Figura 44 - Funil .....	80
Figura 45 - Sistema de alimentação .....	81
Figura 46 - Grelha de Ação Reversa.....	82
Figura 47 - Grelha Horizontal .....	82
Figura 48 - SITY2000 .....	83
Figura 49 - Movimento da Grelha Martin .....	83
Figura 50 - Injeção de ar numa grelha de seis zonas .....	84
Figura 51 - Módulo da Grelha de Ação Reversa.....	85
Figura 52 - Movimento da Grelha Horizontal .....	85
Figura 53 - Configuração de Grelha Horizontal .....	86
Figura 54 - Geometria de forno .....	87
Figura 55 - Sistema de queima com recirculação dos gases de combustão .....	88
Figura 56 - Sistema SYNCOM .....	88
Figura 57 - Processo SNCR.....	90
Figura 58 - Limpeza dos gases de combustão .....	90
Figura 59 - Usina em Amsterdã, Holanda.....	91
Figura 60 - Usina na Alemanha.....	91
Figura 61 - Usina na Itália .....	92
Figura 62 - Usina em Milão, Itália.....	92
Figura 63 - Grelha de Ação Reversa.....	93
Figura 64 - Grelha Horizontal .....	93
Figura 65 - Sistema de recirculação de gases .....	94
Figura 66 - Sistema completo de combustão em leito fluidizado.....	95
Figura 67 - Combustão em leito fluidizado, coluna inteira e detalhe inferior .....	96
Figura 68 - Caldeira com leito fluidizado .....	98
Figura 69 - Gaseificação em leito fluidizado .....	99
Figura 70 - Usina em Spokane, Washington, EUA .....	100
Figura 71 - Usina em Madera, Califórnia, EUA.....	100
Figura 72 - Usina em Brevard, Carolina do Norte, EUA .....	101
Figura 73 - Usina em Brevard, Carolina do Norte, EUA .....	101
Figura 74 - Usina em Lacrosse, Wisconsin, EUA .....	102
Figura 75 - Usina em Ravena, Itália.....	102
Figura 76 - Usina na Pensilvânia, EUA.....	103

Figura 77 - Resíduo final inerte .....	103
Figura 78 - Fosso para despejo dos detritos sólidos urbanos .....	104
Figura 79 - Triturador capaz de processar qualquer tipo de resíduo .....	104
Figura 80 - Representação do processo de combustão em leito fluidizado circulante .....	106
Figura 81 - Representação do processo de gaseificação em leito fluidizado circulante .....	108
Figura 82 - Planta Lomellina Energia em Parona, Itália .....	108
Figura 83 - Usina Norrsundet, Finlândia .....	109
Figura 84 - Usina Portucel, Portugal .....	109
Figura 85 - Usina Lahti, Finlândia .....	110
Figura 86 - Usina Electrabel, Bélgica .....	110
Figura 87 - Usina Corenso, Finlândia .....	111
Figura 88 - Mapa da região de Três Corações .....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissões da Usina RIFIUTI SILL 2, Milão/Itália .....	5
Tabela 2 - Padrões nacionais de qualidade do ar e critérios para episódios agudos .....	39
Tabela 3 - Destino dos resíduos em alguns países .....	53
Tabela 4 - Percentual de resíduos .....	55
Tabela 5 - Critérios para a seleção da região .....	117
Tabela 6 - Sedes municipais e População urbana.....	122
Tabela 7 - Disposição final de resíduos sólidos urbanos.....	123
Tabela 8 - Porcentagem da população com ICMS Ecológico .....	123
Tabela 9 - Condições socioeconômicas .....	124
Tabela 10 - Municípios x Coleta de Lixo .....	124
Tabela 11 - Custo e distancia média de coleta de RSU .....	125
Tabela 12 - Consórcios Intermunicipais nas regiões em estudo .....	125
Tabela 13 - Pontuação para a ponderação comparativa.....	126
Tabela 14 - Consolidação dos critérios .....	126
Tabela 15 - Comparativo das cidades para implantação da Usina .....	128
Tabela 16 - Porcentagem de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos.....	129
Tabela 17 - Porcentagem de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	130
Tabela 18 - Porcentagem (em peso úmido) de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais .....	131
Tabela 19 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Sul de Minas Gerais.....	132
Tabela 20 - Poder Calorífico Inferior e Capacidade das usinas na Europa e Elk-River (EUA) .....	133
Tabela 21 - Poder Calorífico, Teor de cinzas e Umidade dos RSU.....	135
Tabela 22 - Poder Calorífico Inferior e Superior dos RSU de Minas Gerais .....	136

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS</b> .....	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Gerenciamento de resíduos e geração de energia</b> .....	<b>7</b>
3.1.1	<i>Recuperação de gás de aterros</i> .....	7
3.1.2	<i>Digestão anaeróbia</i> .....	8
3.1.3	<i>Tratamento térmico</i> .....	8
3.1.3.1	<i>Combustão em grelha</i> .....	10
3.1.3.2	<i>Combustão em leito fluidizado</i> .....	12
3.1.3.3	<i>CDR - Combustível Derivado de Resíduo</i> .....	14
3.1.3.4	<i>Gaseificação e Pirólise</i> .....	16
3.1.3.5	<i>Tecnologia Arco de Plasma</i> .....	17
<b>3.2</b>	<b>Inserção do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos junto ao público</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3</b>	<b>Principais poluentes resultantes do tratamento térmico de RSU</b> .....	<b>22</b>
3.3.1	<i>Os perigos das dioxinas</i> .....	23
3.3.2	<i>Efeitos sobre a saúde</i> .....	24
3.3.3	<i>Exposição</i> .....	24
<b>3.4</b>	<b>Sistemas de controle de poluição do ar (SCPA)</b> .....	<b>25</b>
3.4.1	<i>Gases ácidos, metais pesados e material particulado</i> .....	27
3.4.1.1	<i>Processo Seco (Dry Process)</i> .....	28
3.4.1.2	<i>Processo Semiúmido</i> .....	29
3.4.1.3	<i>Processos úmidos com e sem descarga de água</i> .....	30
<b>3.5</b>	<b>Resíduos sólidos do processo de tratamento térmico</b> .....	<b>34</b>
3.5.1	<i>Destinação e valorização das cinzas</i> .....	35
<b>4</b>	<b>LEGISLAÇÃO</b> .....	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Padrão para emissões atmosféricas</b> .....	<b>38</b>
<b>4.2</b>	<b>Padrão para dioxinas</b> .....	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DE TECNOLOGIAS NO BRASIL E NO MUNDO – ESCALAS INDUSTRIAL OU PILOTO</b> .....	<b>50</b>
<b>5.1</b>	<b>Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos no Brasil</b> .....	<b>50</b>



5.2	Tecnologias de tratamento térmico no Brasil .....	52
5.3	Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos no mundo.....	53
5.4	Tecnologias de tratamento térmico no mundo .....	55
6	DESCRIÇÃO GERAL DOS PRINCIPAIS PROCESSOS .....	56
6.1	USINAVERDE .....	56
6.2	CNIM.....	64
6.3	Von Roll Inova .....	70
6.4	Martin .....	79
6.5	Energy Products of Idaho .....	94
6.6	Foster Wheeler.....	105
7	COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO TÉCNICA E AMBIENTAL DOS PROCESSOS IDENTIFICADOS .....	111
7.1	Pressão de fornalha.....	112
7.2	Temperatura de combustão .....	113
7.3	Velocidade superficial dos gases na caldeira .....	114
7.4	Preparação dos resíduos para o tratamento térmico .....	115
7.5	Conclusão.....	115
8	SELEÇÃO DA REGIÃO DE IMPLANTAÇÃO .....	116
8.1	Critérios .....	117
8.2	Pré-seleção de regiões .....	120
8.2.1	<i>Região no entorno da cidade de Montes Claros.....</i>	120
8.2.2	<i>Região no entorno da cidade de Ubá .....</i>	120
8.2.3	<i>Região no entorno da cidade de Três Corações .....</i>	121
8.2.4	<i>Região no entorno da cidade de Governador Valadares.....</i>	121
8.3	Seleção da Região .....	126
9	COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA E PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA REGIÃO ESCOLHIDA.....	129
9.1	Composição gravimétrica .....	129
9.2	Poder calorífico.....	133
10	CONSULTA FORMAL A FORNECEDORES DOS PROCESSOS PRÉ-SELECIONADOS.....	136
	ANEXOS .....	138

<b>Anexo A: FEAM – “Avaliação de região em Minas Gerais para instalação de usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos – UAER , segundo critérios da ENGEBIO” .....</b>	<b>139</b>
<b>Anexo B: Request for Proposals-RFP- Rev 3 .....</b>	<b>265</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>273</b>

## 1 OBJETIVO

A Fundação Estadual do Meio Ambiente– FEAM, do estado de Minas Gerais, com base na Lei Delegada nº. 156, de 25 de janeiro de 2007, regulamentada pelo Decreto 44819/2008 teve sua atribuição executiva no licenciamento ambiental transferida para unidades descentralizadas do Sistema Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SISEMA, passando a atuar com ênfase nas estratégias de busca de melhoria de qualidade ambiental e sustentabilidade do Estado, no âmbito da Agenda Marrom, incluindo o tema energia e mudanças climáticas. Nesse contexto a FEAM busca contratar serviços técnicos especializados para apoiar o desenvolvimento de novos temas com foco na formulação de diretivas e normativas legais para fortalecimento da política ambiental do Estado.

Conforme divulgado pela FEAM (2008) desenvolve-se no estado de Minas Gerais o Programa "Minas sem Lixões", implantado em 2003 pela Fundação Estadual de Meio Ambiente, como uma das ações do Projeto Estruturador "Resíduos Sólidos" do Estado e vem apresentando resultados expressivos desde sua criação, colocando Minas Gerais acima da média nacional na disposição adequada de resíduos sólidos urbanos, atualmente em torno de 30%.

O Projeto "Resíduo é Energia", em desenvolvimento pela FEAM, é realizado também no âmbito do Projeto Estruturador "Resíduos Sólidos" e pretende colaborar para a solução dos problemas gerados pelos resíduos sólidos em Minas Gerais. Assim, já foram iniciadas as pesquisas para subsidiar políticas de incentivo à construção de usinas térmicas a lixo, co-processamento de resíduos em fornos de cimento e aproveitamento do gás metano em aterros sanitários, além de soluções regionais e de inclusão social, priorizando as associações de catadores para o processo prévio de triagem e reciclagem.

O programa "Minas sem lixões" tem como meta a ser atingida até o ano de 2011 a diminuição de 80% do número de lixões presentes no estado e a disposição adequada de 60% dos resíduos sólidos urbanos gerados.

Dentro deste programa existem três estudos em andamento que visam atingir essa meta:

---

- captação de gás de aterro;
- biodigestão anaeróbia com obtenção de gás para geração de energia elétrica;
- implantação de usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (RSU) por combustão para fins de geração de energia elétrica.

Os serviços objeto deste Estudo visam à avaliação da viabilidade da implantação de uma usina de tratamento térmico de RSU por combustão para fins de geração de energia elétrica contemplando o agrupamento de municípios em uma região do estado de Minas Gerais.

Em paralelo será avaliada a possibilidade de obtenção de créditos de carbono, o que resultará, além dos benefícios em termos ambientais, os resultantes da geração complementar de energia, a não disposição desses resíduos no meio ambiente e a melhoria do resultado econômico e financeiro do empreendimento.

## **2 INTRODUÇÃO**

Estudos divulgados em vários países do chamado “Primeiro Mundo” revelam o alto grau de desinformação quando o assunto é a combustão de resíduos urbanos.

Muito frequentemente adjetivam essa técnica como nociva à saúde humana e prejudicial ao meio ambiente porque tomam por referência resultados obtidos em equipamentos já obsoletos. O atual nível de desenvolvimento tecnológico – leia-se eficientes sistemas de controle de emissão de gases, somados à vigência de legislações com rígidos parâmetros –, permite hoje considerar a combustão uma alternativa ambientalmente segura e economicamente viável para o tratamento de resíduos urbanos.

---

No momento presente, a combustão de resíduos sólidos municipais deve ser encarada como uma das formas viáveis existentes para a disposição de resíduos. Dentre os processos de tratamento térmico em alta temperatura, a combustão atualmente é o mais difundido, com um número elevado de unidades em operação comercial em todo o mundo, muitas de grande porte.

Os atuais custos de disposição em aterros tendem a se elevar com o tempo, principalmente nas grandes metrópoles brasileiras, o que provavelmente tornará a combustão com geração de energia elétrica ou vapor d'água, em unidades de grande porte, uma alternativa economicamente mais atraente que o aterro sanitário. Deve ser sempre lembrado que a disposição em aterros trata-se de um passivo ambiental para as gerações futuras.

Mundialmente já se observa uma forte tendência nesse sentido. Países com pequena disponibilidade de área adequada para a construção de novos aterros, a exemplo do Japão, Suíça e Cingapura, não somente exibem um grande número de incineradores em operação, mas têm apresentado uma tendência de crescimento desta forma de disposição dos RSU ao longo dos anos.

Isso tem ocorrido devido à incorporação, às novas unidades, de sistemas de recuperação de energia e de tratamento de gases de combustão eficientes, tornando-os mais interessantes do ponto de vista econômico e mais seguros do ponto de vista ambiental. É importante notar que, mantidas as condições operacionais do incinerador em determinados valores de temperatura e concentração de oxigênio nos gases, os teores de compostos orgânicos voláteis são minimizados e a formação das dioxinas e dos furanos é fortemente inibida, mesmo com a presença de materiais que favoreçam a sua formação.

Em diversos países a combustão com geração de energia prevalece sobre a disposição em aterros e reciclagem, alcançando índices bastante significativos: o Japão incinera 72% dos resíduos sólidos municipais gerados; Bélgica, 25%; Suíça, 59%; Dinamarca, 90%; França, 42% e Alemanha, 36% (CEMPRE, 2002, *apud* CAIXETA, 2005).

Atualmente, há mais de 1.700 incineradores instalados no mundo que, a partir da queima em altíssimas temperaturas dos RSU, geram energia elétrica ou vapor

---

d'água. Esses dois produtos são hoje obtidos, na sua maioria, em incineradores com combustão em grelha. Essas instalações são sempre construídas nas proximidades dos pólos consumidores de vapor para aquecimento ou de redes de distribuição de energia elétrica.

Uma usina com incineradores de grelha normalmente é composta de dois a três equipamentos de combustão operando em paralelo, cada um com capacidade variando de 50 a 1000 toneladas de resíduos por dia. Os gases ácidos de combustão, material particulado, dioxinas, furanos e metais pesados, eventualmente presentes, são removidos por sistemas de limpeza apresentando índices de eficiência bastante elevados.

Um relatório divulgado em junho de 2003, pela Agência de Proteção Ambiental da Inglaterra, concluiu que o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (RSU) encerra baixíssimos riscos à saúde da população, bem como ao meio ambiente, vizinhos às instalações desta natureza.

Suas emissões mais nocivas, as dioxinas e furanos, têm suas concentrações mantidas em níveis baixíssimos como resultado da operação de eficientes sistemas de limpeza de gases presentes nas plantas de tratamento térmico.

Nessa direção seguem estudos similares realizados por agências de proteção ambiental de outros países, a exemplo da Áustria, Alemanha e Dinamarca. Todas concluíram que a incineração de embalagens plásticas foi a solução mais econômica, ambientalmente segura e apta para o alcance das metas de implementação do desenvolvimento sustentável acordadas pelos países integrantes da União Européia, resultando na atualidade em reciclagem de 22,5% de todas as embalagens plásticas pós-consumo.

É importante ressaltar que o tratamento térmico de resíduos sólidos para geração de energia elétrica também contribui para a redução das emissões globais de gás carbônico. As tecnologias de limpeza de gases hoje presentes nos incineradores permitem atingir padrões de emissão abaixo dos exigidos pelas legislações mais restritivas e, contrariamente ao conceito geral existente, o tratamento térmico pode apresentar vantagens, em termos ambientais, em relação a outros meios de disposição, a exemplo de aterros.

---

Neste último, a matéria orgânica presente no resíduo, ao ser decomposta, libera gás metano que, se não queimado, tem um potencial 21 vezes maior que o gás carbônico em relação ao efeito estufa, além de emitir outros gases orgânicos que contribuem para a formação de compostos poluentes atmosféricos, bem como efluentes líquidos, especialmente o chorume, que pode contaminar os lençóis freáticos.

Com o atendimento aos padrões da legislação brasileira vigente, não há mais motivos para se associar sistemas de incineração/tratamento térmico com problemas de poluição atmosférica. A título de exemplificação, a Tabela 1 ilustra as emissões da usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos RIFIUTI SILL 2, operada pela AMSA na cidade de Milão, Itália.

**Tabela 1 - Emissões da Usina RIFIUTI SILL 2, Milão/Itália**

<b>Parâmetro*</b>	<b>Unidade de Medida</b>	<b>Limite Legal</b>	<b>Média Anual</b>
Ácido Clorídrico	mg/Nm <sup>3</sup>	10	5,8
Monóxido de Carbono	mg/Nm <sup>3</sup>	50	6,4
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	200	126,8
Amônia & Derivados	mg/Nm <sup>3</sup>	10	4,3
Óxidos de Enxofre	mg/Nm <sup>3</sup>	100	1,07
Hidrocarbonetos Totais (VOC)	mg/Nm <sup>3</sup>	10	0,28
Particulados	mg/Nm <sup>3</sup>	10	0,09
Mercúrio	mg/Nm <sup>3</sup>	0,05	0,0024

\*Parâmetros controlados pelo Sistema de Monitoramento de Emissões. Ano 2007 / Valores Médios de Emissões Atmosféricas

Fonte: Martin Gmbh (2009)

### 3 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

As usinas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica podem reduzir o volume de resíduo municipal em aproximadamente 80%. A qualidade da queima do resíduo depende naturalmente do poder calorífico do combustível, neste caso, do poder calorífico dos resíduos sólidos municipais, e dos parâmetros de combustão. A energia gerada pela combustão dos resíduos sólidos é utilizada para alimentar turbinas para a geração de eletricidade.

Dempsey e Oppelt (1987) dividem um sistema de incineração de resíduos perigosos em quatro subsistemas: 1) preparação e alimentação do resíduo; 2) câmara(s) de combustão; 3) controle dos poluentes atmosféricos e 4) manuseio das cinzas/resíduos. A seleção da combinação e os arranjos apropriados para cada usina irão depender das propriedades físicas e químicas dos resíduos a serem incinerados. Essa configuração de usinas composta pelos quatro subsistemas também se aplica às unidades que utilizam os resíduos sólidos urbanos no processo.

Usualmente os resíduos são queimados em uma grelha (queima em massa) em plantas com capacidade que varia de 8 a 30 toneladas de resíduos por hora. Essas plantas possuem potência instalada entre 20 e 80 MW.

Mais recentemente novas tecnologias utilizam combustão em leito fluidizado circulante. São plantas de maior capacidade e podem alcançar potência instalada superior a 50 MW.

As plantas de tratamento térmico exigem um rigoroso controle do processo de combustão, pois o combustível pode ter grandes variações em suas propriedades como poder calorífico, umidade, composição e peso específico. Devido ao fato de não ser conhecida a exata composição dos resíduos sólidos urbanos e de existir uma rigorosa legislação referente às emissões atmosféricas, as plantas de tratamento térmico de resíduos possuem sofisticados dispositivos de limpeza de gases e controle de emissões.

---



### 3.1 Gerenciamento de resíduos e geração de energia

Juntamente com a reciclagem e a compostagem, o reaproveitamento da energia derivada dos resíduos (EDR) tem um papel importante no gerenciamento de resíduos e na recuperação de recursos.

As principais vantagens da recuperação da energia são:

- redução do volume de resíduos;
- geração de resíduos inertes;
- benefícios financeiros obtidos a partir dos resíduos;
- desvio do fluxo de resíduos biodegradáveis;
- um modo prático de gerenciar os aumentos na geração de resíduos.

No mercado existem diferentes alternativas tecnológicas para a geração de energia por meio da utilização dos resíduos sólidos urbanos (RSU), estas estão descritas a seguir.

#### 3.1.1 Recuperação de gás de aterros

O gás de aterro é produzido pela decomposição de resíduos orgânicos em condições anaeróbias no local do aterro. Normalmente, o gás de aterro é composto por 55 por cento de metano, 40 por cento de dióxido de carbono e pequenas quantidades de nitrogênio, hidrogênio e água. Esses gases podem ser coletados através de uma rede de dutos horizontais e poços, que são instalados anteriormente e durante a disposição dos resíduos no local do aterro. Os benefícios do aproveitamento do gás de aterro como fonte energética foram à solução para o

---

problema dos vazamentos de gás nos aterros, que freqüentemente ofereciam risco de explosões. Como o metano é um dos gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa, o seu uso como fonte de energia traz o benefício adicional de ajudar a reduzir o seu potencial de aumentar o aquecimento global.

### 3.1.2 Digestão anaeróbia

Os resíduos orgânicos podem ser fracionados por meio da digestão anaeróbia (DA) e o gás metano produzido pode ser recuperado. A decomposição anaeróbia vem sendo utilizada extensivamente para o tratamento dos resíduos agrícolas e provenientes de esgotos. O seu uso no tratamento de RSU, normalmente nos resíduos de esgoto, produz um combustível que pode ser utilizado - como é o caso do gás de aterro - para alimentar os incineradores, na geração de eletricidade ou, após ser purificado, para ser adicionado ao suprimento de gás. Uma grande vantagem da digestão anaeróbia é que todo o gás produzido pode ser coletado e utilizado, ao contrário do gás de aterro, cuja eficiência na coleta é relativamente baixa (50 por cento ou menos). A digestão anaeróbia também produz um resíduo sólido ou "digestato", que pode ser tratado e usado como fertilizante.

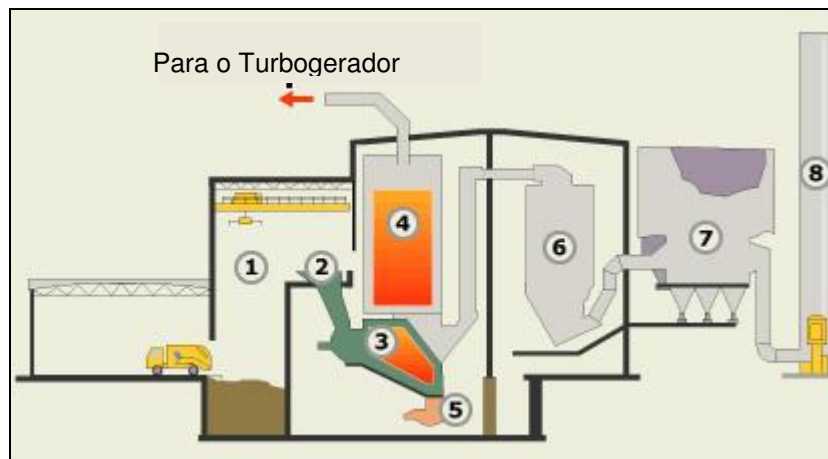
### 3.1.3 Tratamento térmico

O processo de tratamento térmico está esquematizado na Figura 1, a seguir.

Em plantas de tratamento térmico, o lixo é descarregado no silo da usina **(1)** de onde é tomado por agarradores mecânicos e jogado em moegas **(2)**. Das moegas o lixo é empurrado gradualmente para o interior do incinerador **(3)** que opera em temperaturas que costumam variar entre 750 e 1000 graus Celsius.

---

O calor produzido pela queima do lixo é utilizado em caldeiras (4) e o vapor gerado nestas é conduzido por tubulações para um sistema de turbina e gerador, para a produção de energia elétrica.



Fonte: National Energy Education Development Project, *Museum of Solid Waste*, Sept/2006

**Figura 1 - Planta do tratamento térmico**

Depois de o resíduo sólido urbano ser incinerado resta sobre as grelhas as cinzas mais pesadas, que são drenadas para sistemas coletores situados abaixo das grelhas (5), passando após por separadores eletromagnéticos que promovem a extração de metais para reciclagem. Os gases de combustão contendo contaminantes sólidos e gasosos passam através de sistema de lavagem (6) para o tratamento e remoção de poluentes ácidos como o  $\text{SO}_2$  e também dioxinas. Os gases passam então por filtros para retenção de partículas finas (poeiras) (7) e são lançados ao meio ambiente através da chaminé (8).

Existem quatro rotas tecnológicas principais para o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos e uma nova rota tecnológica: a tecnologia arco de plasma, que se encontra em estudo e ainda é pouco difundida no mercado devido ao seu alto custo. Um resumo de cada tecnologia é descrito a seguir.

### 3.1.3.1 Combustão em grelha

A técnica convencional de combustão de resíduos, chamada de tratamento térmico em massa, envolve a queima dos resíduos à medida que eles vão sendo enviados, após a retirada dos itens pesados. Normalmente é feita a mistura dos resíduos para ajudar a queima. No passado, as instalações para incineração eram projetadas com o único objetivo de processar os resíduos, mas as instalações atuais são de um modo geral, projetadas para recuperar a energia dos resíduos na forma de vapor, água quente ou eletricidade, sendo comum na Europa sua utilização em sistemas de aquecimento distrital.

A queima em grelhas é certamente a forma mais simples e comum de tratamento térmico. A rigor pode-se dividir este método de tratamento térmico em dois conceitos principais: (i) a queima massiva (*MASS BURN*) e (ii) queima de não recicláveis. Na primeira alternativa, o resíduo sólido urbano bruto é misturado sem operação de triagem para retirada de materiais recicláveis (ex: plásticos, madeira e papel). A energia presente nos RSU é recuperada dos gases de combustão em alta temperatura. Cerca de 100.000 toneladas/ano de resíduo sólido urbano são suficientes para garantir uma geração média de até 7 MWh, dependendo do poder calorífico do resíduo incinerado, suficiente para atender cerca de 10.000 domicílios de padrão Classe Média.

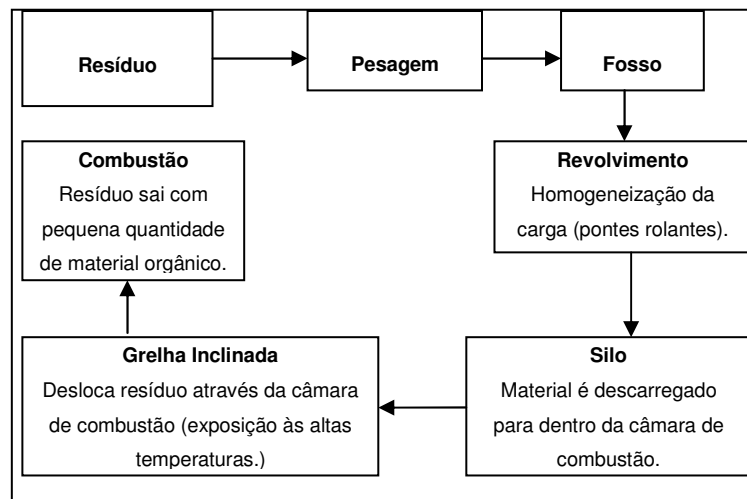
Na segunda alternativa, o resíduo sólido urbano passa por etapas de triagem e separação de recicláveis, restando apenas os resíduos orgânicos úmidos e materiais não aproveitáveis para serem incinerados. Neste caso, o resíduo sólido urbano incinerado apresenta poder calorífico mais baixo e seu rendimento para geração de energia reduz-se consideravelmente.

Um fluxograma simplificado do processo de combustão em grelha pode ser ilustrado na Figura 2.

Durante o deslocamento dos resíduos na grelha o material vai se aquecendo e passa por secagem, perda de compostos orgânicos voláteis, combustão do resíduo carbonoso e sai da câmara de combustão com uma pequena quantidade de material orgânico. Cerca de 60% do ar de combustão é introduzido por baixo da

---

grelha e o restante entra sobre o material depositado na grelha. O ar injetado por baixo da grelha (pré-aquecido) tem a função de resfriar e auxiliar na secagem e combustão dos resíduos. O ar introduzido sobre a grelha tem alta velocidade para criar uma região de elevada turbulência e promover sua mistura com os gases e vapores gerados durante a combustão.



**Figura 2 - Fluxograma das operações para a combustão em grelha**

A temperatura recomendada é cerca de 1200 °C, temperatura na qual são decompostos a maior parte dos compostos orgânicos a gás carbônico e água.

Na combustão também é possível formar gases corrosivos (ácido clorídrico, outros compostos de cloro, etc.) por isso as tubulações metálicas próximas às grelhas devem ser revestidas com material refratário e a temperatura não deve ser maior que 420 °C.

Os gases da combustão, que saem numa temperatura de aproximadamente 250 °C são enviados para os sistemas de tratamento de gases para remoção dos gases ácidos, material particulado, dioxinas, furanos e eventuais metais pesados.

Ao fim da grelha a fração orgânica deve estar quase totalmente consumida restando apenas uma fração inorgânica, a cinza de fundo. As cinzas são apagadas em um tanque com água e desaguadas.

O vapor gerado é normalmente utilizado para a geração de energia e, em países de clima frio, para sistemas de aquecimento distrital.

### 3.1.3.2 Combustão em leito fluidizado

A tecnologia de combustão em leito fluidizado é baseada em um sistema no qual os resíduos, adequadamente triturados, são incinerados em suspensão, dispersos em leito composto por partículas inertes como areia ou cinzas. Este leito é mantido em intensa movimentação promovida pelo insuflamento do ar primário de combustão através de um distribuidor especialmente dimensionado para este processo de queima, situado na base (fundo) da caldeira. O material em suspensão comporta-se similarmente a um fluido em ebulição, decorrendo daí a denominação “Leito Fluidizado” (LF).

Há diferentes conceitos de combustores de leito fluidizado, por exemplo, os de leito circulante e os borbulhantes. Em qualquer dos casos há a necessidade de que os resíduos a serem incinerados tenham tamanho relativamente uniforme e a granulometria do leito de inertes deve ser controlada.

Em comparação com a queima em grelha, os sistemas de combustão em leito fluidizado possibilitam a redução das emissões de gases, parcialmente devido ao próprio processo e, também, porque se pode acrescentar cal ou calcário ao leito simultaneamente à combustão.

Como aproximadamente um terço das despesas nas unidades de queima em grelha é derivado ao sistema de controle de poluição do ar (CPA), torna-se possível economizar já que os sistemas de leito fluidizado têm menores necessidades desses controladores.

Por outro lado, as usinas de queima em grelha não necessitam do pré-processamento dos resíduos. Com o desenvolvimento da queima em leito fluidizado circulante, as unidades incineradoras aumentaram em porte, resultando em ganhos

---

de escala. Logo, os custos por tonelada de resíduos processados, em comparação à queima em grelhas não chegam a ser acentuadamente diferentes. Porém, para uma eficaz aplicação desta tecnologia, antes da operação de tratamento térmico dos resíduos sólidos, materiais componentes não-combustíveis são removidos e o resíduo sólido urbano passa por uma operação de trituração tendo em vista prepará-lo para a queima. O resíduo sólido urbano preparado desta forma recebe o nome de Combustível Derivado de Resíduo (CDR), que tem poder calorífico superior ao resíduo sólido urbano não tratado.

Devido ao fato de os sistemas de LF borbulhantes serem tipicamente menores, o seu uso torna-se mais apropriado para comunidades de menor porte. A necessidade de se processar previamente os resíduos para reduzir o seu tamanho e torná-los uniformes antes da combustão em uma usina de LF cria a oportunidade de maximizar a reciclagem dos materiais. Os metais podem ser separados dos outros resíduos à medida que são triturados, sofrendo redução de tamanho. Mas, esses resíduos metálicos devem ser mantidos limpos para que a reciclagem da maioria dos outros materiais seja bem sucedida e isto requer uma pré-seleção na fonte para que não haja a mistura.

O início da operação de um sistema de combustão em leito fluidizado é promovido por queimadores de óleo, situados acima do leito, que o aquecem até atingir uma temperatura de 400 °C. Neste instante inicia-se a alimentação dos resíduos sólidos que pode ser feita acima ou dentro do leito, a agitação intensa distribui os resíduos por todo o leito de maneira uniforme.

As partículas dos resíduos sólidos entram em contato com a areia, trocando calor, o que faz com que o sistema aqueça e entre em combustão rapidamente. Ao atingir a temperatura de operação (600 °C) os queimadores auxiliares são desligados e a queima passa a ser sustentada com a alimentação contínua do resíduo. As cinzas mais pesadas são retiradas por extratores mecânicos situados no fundo da caldeira e as cinzas leves são arrastadas e coletadas nos sistemas de limpeza de gases.

Os compostos orgânicos arrastados pelos gases em forma sólida ou gasosa são queimados na região superior do leito, conhecida como *free-board*. Após o *free-*

---

*board* os gases são enviados para o sistema de recuperação de energia e tratamento de gases.

O leito fluidizado permite um pré-tratamento dos gases pela adição de calcário ao leito que reage com boa parte dos gases ácidos formados durante a combustão formando sais como sulfato de cálcio e cloreto de cálcio. O pré-tratamento alivia o sistema de limpeza de gases, mas não o elimina.

Apesar destas vantagens técnicas, o processo de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos por meio de combustão em leito fluidizado ainda não alcançou seu pleno desenvolvimento comercial, devido à sua maior complexidade operativa (requer controles mais sofisticados e operadores mais qualificados). A experiência comercial com esta tecnologia para o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos é, portanto, limitada e sua performance ainda requer etapas de desenvolvimento, para sua plena aceitação e ganho de competitividade. São poucos os detentores de tecnologias de tratamento térmico que oferecem a combustão em leito fluidizado e há experiências negativas, a exemplo de uma unidade instalada na cidade de Berlim que, há poucos anos, acabou sendo fechada por apresentar problemas de pouca confiabilidade.

### 3.1.3.3 CDR - Combustível Derivado de Resíduo

A produção de Combustíveis Derivados de Resíduo (CDR) não é um processo recente. Esse método foi inicialmente desenvolvido como um meio de evitar-se a queima imediata dos RSU e, em vez disso, transformá-los em um combustível que pudesse ser transportado e armazenado. A produção de CDR possibilita a subsequente conversão térmica de resíduos combustíveis.

No caso da queima em grelha não há uma grande necessidade de classificação ou de processamento dos resíduos, entretanto, para a produção de CDR é aconselhável que os resíduos passem por uma série de estágios de processamento prévio.

---

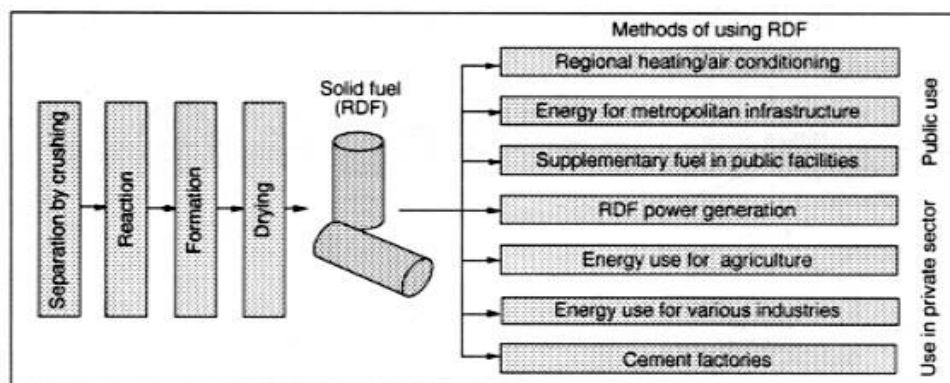


Em sua forma mais simples, o CDR se apresenta como um material bruto na forma de flocos, produzido a partir de RSU de origens diversas que passaram por uma série de estágios de classificação e remoção magnética de materiais ferrosos e não ferrosos. Alternativamente, pode haver processos adicionais que transformarão o CDR em um combustível adensado e pelletizado (ou em forma de cubos), como pode ser visto na Figura 3, o que facilitará o transporte e a estocagem. A transformação dos resíduos em CDR bruto ou pelletizado difere da queima em grelha convencional por ser feita em dois estágios, onde o primeiro estágio de processamento pode ser conduzido de forma independente em relação ao estágio de queima. Este último poderá acontecer em um local diferente e a qualquer hora. Um exemplo de processo de tratamento de RSU para obtenção de CDR está apresentado na Figura 4.



Fonte: RMA Publications, 2009.

**Figura 3 - Resíduo transformado em CDR**



Fonte: Ministry of the Environment – Government of Japan (1998)

**Figura 4 - Processo de obtenção do CDR**

### 3.1.3.4 Gaseificação e Pirólise

A gaseificação é o processo de reação do carbono com o vapor para produzir hidrogênio e monóxido de carbono. A gaseificação converte uma matéria-prima sólida ou líquida em gás por meio da oxidação parcial, sob a aplicação de calor.

A pirólise é um processo formado por uma série de reações complexas, iniciadas quando um material é aquecido (de 400 a 800 °C), na ausência de oxigênio, para produzir correntes de vapores condensáveis e não condensáveis e resíduos sólidos. O calor fraciona a estrutura molecular dos resíduos, liberando compostos de carbono na forma líquida, sólida e gasosa, que poderão ser utilizados como combustíveis.

Ambas as tecnologias foram primariamente usadas para fontes específicas - e geralmente únicas – de resíduos não misturados, como pneus e plásticos, ou então para se processar os CDR. Entretanto, na Alemanha, uma usina de pirólise vem processando resíduos municipais desde 1985. Em 1983, na cidade de Günzburg, na Bavária, a empresa municipal de limpeza urbana, utilizando projetos e equipamentos da Deutsche Babcock (empresa já extinta) recebeu autorização para que sua usina entrasse em operação. Esta planta está em atividade permanente desde 1985.

Os resíduos triturados são colocados em um tambor rotativo aquecido por chamas de gás, onde as temperaturas variam de 400 °C a 500 °C. O gás passa por um separador ciclônico para a remoção das partículas brutas e então é direcionado para uma câmara de pós-combustão onde a temperatura é de 1200 °C. Atualmente, a despeito do exemplo citado acima, os sistemas de pirólise e de gaseificação não são considerados próprios para processar grandes volumes de RSU não tratados e misturados.

---

### 3.1.3.5 *Tecnologia Arco de Plasma*

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

As propriedades de um gás sofrem mudanças significativas quando este gás é submetido a temperaturas muito elevadas. Quando a temperatura de aquecimento atinge cerca de 2.000 °C as moléculas do gás começam a dissociarem-se em estado atômico. Quando atinge 3.000 °C os átomos são ionizados devido à perda de parte dos elétrons. Este gás ionizado é chamado de plasma.

O plasma é conhecido como o “quarto estado da matéria”: sólido, líquido, gasoso e plasma, é uma forma especial de material gasoso que conduz eletricidade. No estado de plasma o gás atinge temperaturas extremamente elevadas, variando de 5.000 °C a 50.000 °C de acordo com as condições de geração, tipicamente as temperaturas do plasma são da ordem de 15.000 °C. O gás sob o estado de plasma apresenta boa condutividade elétrica e alta viscosidade quando comparado a um gás no estado normal.

O plasma é gerado pela formação de um arco elétrico através da passagem de corrente entre o cátodo e o ânodo. Podem ser utilizadas tanto a corrente contínua como a corrente alternada, mas até o momento a predominância é da utilização de corrente contínua. O plasma é gerado e controlado em tochas de plasma que possuem o mesmo formato dos queimadores utilizados nos fornos.

A tocha de plasma é um dispositivo que transforma energia elétrica em calor transportado por um gás. As tochas podem ser de dois tipos: arco não transferido ou arco transferido. O arco é dito não transferido quando é produzido no interior do dispositivo de geração que contem os eletrodos e do qual sai o gás aquecido, pode ser de corrente contínua ou corrente alternada. As tochas de arco transferido utilizam um eletrodo emissor, estando o receptor do arco localizado fora da tocha, podendo ser outro eletrodo ou o material sob aquecimento interligado ao circuito através de um eletrodo, estas tochas utilizam corrente contínuas. A eficiência de

---

transformação da tocha de plasma é da ordem de 85% a 90% da energia elétrica utilizada.

Num processo de queima de resíduos sólidos urbanos o resíduo é termicamente decomposto em gás combustível numa fornalha vertical (“*shaft*”).

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

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

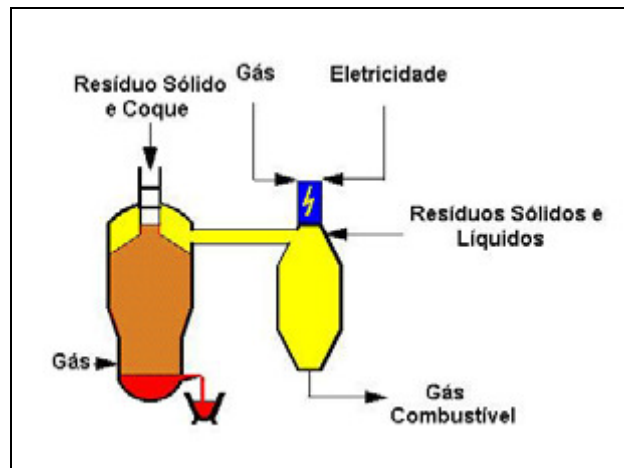
Os gases e os sólidos fluem contracorrente através da fornalha. A escória fundida escoar pela base a cerca de 1450 °C enquanto que o gás, inclusive hidrocarbonetos e outras substâncias orgânicas parcialmente decompostas, sai pelo topo da fornalha entre 600 °C e 800 °C. Este gás é misturado com ar aquecido a plasma no reator de decomposição, onde é completamente destruída a matéria orgânica remanescente, produzindo um gás combustível a cerca de 1200 °C a 1400 °C. A Figura 5 mostra esquematicamente este processo de gaseificação.

As principais vantagens do uso de plasma na decomposição térmica de substâncias são as elevadas temperaturas causam rápida e completa pirólise da substância orgânica, permitindo fundir e vitrificar certos resíduos inorgânicos; os resíduos/produtos vitrificados são similares a um mineral de alta dureza; o processo permite reduções de volume extremamente elevadas, podendo ser superiores a 99%.

O uso de plasma na decomposição térmica de substâncias é uma técnica dedicada, exigindo um grande investimento; o volume de gases inicialmente gerado é mais baixo do que na combustão convencional, mas depois da combustão dos

---

gases produzidos, é idêntico ao de outras formas de incineração; o sistema não dispensa um sofisticado sistema de lavagem de gases, tal como incineradores.



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 5 - Fluxograma esquemático de gaseificação**

No que diz respeito à produção de dioxinas e furanos, os sistemas estão dependentes das tecnologias de recuperação térmica utilizada a jusante, não sendo claro que se possa garantir inequivocamente uma vantagem nítida sobre as tecnologias de incineração mais avançadas nem com as técnicas mais simples de gaseificação.

As técnicas de incineração por plasma não parecem ter alcançado grande desenvolvimento industrial. Segundo Jonathan Strickland (2008), existem somente duas indústrias de plasma comerciais que processam RSU e elas estão instaladas no Japão.

A indústria situada no parque industrial Mihama-Mikata começou a operar em 2002. Ela pode processar mais de 24 toneladas por dia de RSU e quatro toneladas por dia de lodo de tratamento de esgoto. A indústria é relativamente pequena e não produz gás de síntese para combustível. Entretanto, ela produz vapor e água quente, que são usados como energia e geração de calor no parque industrial. A indústria usa um sistema de resfriamento a água para a escória fundida e separa os

nódulos de metal para vendê-los como sucata. A areia é misturada com o concreto para ser usada em blocos de pavimentação.

A outra indústria de gaseificação por plasma fica em Utashinai, Japão. Também começou a processar RSU em 2002. O desenho original da aparelhagem determinou sua capacidade em torno de 170 toneladas por dia de RSU e de resíduos automotivos. Hoje o aparelho processa aproximadamente 300 toneladas por dia. O aparelho gera mais de 7,9 MWh de eletricidade, enviando aproximadamente 4,3 MWh de volta à rede elétrica.

Os métodos por plasma na prática estão ganhando importância na fusão de sucata de metais e ligas, alumínio contido nos rejeitos, lamas de eletrodeposição, recuperação de metais de catalisadores gastos e cinzas de incineração, processos para tratamento de líquidos orgânicos, inclusive organoclorados.

No Japão o plasma é usado para fundir cinzas de incineração e conseqüentemente reduzir o volume descartado; na França, cinzas de incineração e asbesto são transformados pela tecnologia de plasma em escória inerte; nos Estados Unidos da América, está sendo empregado para recuperar metais de catalisadores e também vem crescendo em importância desenvolvimentos para destruição de resíduos militares e recuperação de zinco metálico de poeiras siderúrgicas.

### **3.2 Inserção do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos junto ao público**

A exemplo do que ocorre em outros países, o Governo Inglês está revendo as estratégias relativas ao tratamento a ser dado ao Lixo Urbano. Entre as propostas em curso está o plano de aumentar a participação do tratamento térmico de Resíduos Sólidos Urbanos, para a redução de seu lançamento em aterros.

---

Este trabalho revelou que cerca de 9% do Lixo Urbano gerado na Inglaterra está sendo hoje incinerado. A região sudeste é a que detém a menor participação do tratamento térmico: menor do que 1%. O meio oeste é a região onde mais se pratica a incineração, alcançando cerca de 31% do resíduo gerado. A grande maioria do Lixo Urbano ainda é disposto em aterros, cerca de 72% dos 29,1 milhões de toneladas produzidas anualmente.

Correntes ambientalistas afirmam que o tratamento térmico estimula à produção de resíduo porque as operadoras de incineradores necessitam de quantidades mínimas de resíduo para a manutenção das plantas em operação. Para atender estas demandas, dizem estes, as autoridades locais abandonam os programas de reciclagem e de diminuição da produção de RSU.

O Governo inglês contrapõe estas afirmativas demonstrando por meio de estatísticas que reciclagem e compostagem cresceram de 3,3% para 19% nos últimos anos.

Sem dúvida, a maior preocupação da população em geral, quando o assunto é o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos, fica por conta da poluição causada pelas emissões de gases, vapores e poeiras através das chaminés das Unidades de tratamento térmico. Logicamente, a maior preocupação está centrada nas emissões de Dioxinas, principalmente pela suspeição de que seriam causadoras de câncer.

Por outro lado, a adoção de legislação mais restritiva pela União Européia, desde 1996, forçou o fechamento de plantas de tratamento térmico mais antigas por não terem condições de atender aos novos padrões de emissão estabelecidos.

Mas afinal de contas, “quais seriam os benefícios do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos?” Perguntaria a população. Poder-se-ia argumentar que na grande maioria das plantas de tratamento térmico o calor gerado é utilizado para a produção de energia elétrica. Se o resíduo não for queimado então será, muito provavelmente, lançado em algum aterro, o que é considerada a menos amigável solução sob o ponto de vista ambiental.

Correntes ambientalistas argumentam que embora os incineradores possam produzir energia elétrica, no longo prazo estas plantas não economizam energia

---

porque o resíduo incinerado não é reciclado. Isto é, mais matérias primas terão que ser produzidas para repor os materiais queimados.

Atualmente, cerca de 17% do resíduo da União Européia é incinerado. Na Dinamarca, que é vista como uma das nações europeias com maior conscientização ambiental incinera-se aproximadamente 53% do Resíduo Urbano produzido. Por outro lado, alguns países, entre eles Irlanda e Grécia, não possuem plantas de tratamento térmico.

Exemplos de participação da população no processo de tomada de decisões relativas à implantação de Unidades Incineradoras de Lixo:

- *Dundee Energy Recycling Ltd* assinou o primeiro “Compromisso de Boa Vizinhança” firmado na Inglaterra, em que a empresa se obriga à adoção de padrões de emissão mais rígidos dos que requeridos por lei;
- a Planta de tratamento térmico SELCHP, localizada na região sudeste de Londres, envolve pessoas da comunidade local no trabalho junto aos seus desenvolvedores e responsáveis pelo planejamento, e o Conselho de Administração possui um membro eleito pela comunidade;
- após um frustrado plano de implantação, o Conselho do Condado de Hampshire desenvolveu uma série de Painéis do Cidadão, para analisar juntamente com a comunidade as questões relativas ao Lixo Urbano do Condado, trabalhando junto a esta o desenvolvimento do conjunto de opções que inclui compostagem, reciclagem e tratamento térmico em pequena escala. Este plano alcançou grande aceitação da comunidade.

### **3.3 Principais poluentes resultantes do tratamento térmico de RSU**

Os principais poluentes resultantes do tratamento térmico de resíduos domiciliares são descritos a seguir.

---



**Gases** – gases ácidos (tais como Ácido Clorídrico, Ácido Fluorídrico e Dióxido de Enxofre), e outros gases como Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>), Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) são gerados e devem ser removidos pelos sistemas de limpeza dos gases.

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

**Substâncias Orgânicas** – estas ocorrem freqüentemente quando a combustão não é completa, ou são formadas após a incineração. Os compostos orgânicos podem ser emitidos na forma de vapor ou aderidos ao material particulado (poeiras) arrastado pelos gases de combustão. As dioxinas são os poluentes orgânicos que motivam as maiores preocupações (conforme apresentado no item 3.3.1, a seguir).

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

### 3.3.1 Os perigos das dioxinas

Dioxina é o nome dado a um grupo de 210 compostos químicos organoclorados similares, altamente tóxico, carcinogênico e teratogênico. É um dos poluentes orgânicos persistentes sujeitos à Convenção de Estocolmo.

As dioxinas são subprodutos não intencionais de muitos processos industriais nos quais o cloro e produtos químicos dele derivados são produzidos, utilizados e eliminados. As emissões industriais de dioxina para o meio-ambiente podem ser

---

transportadas a longas distâncias por correntes atmosféricas e, de forma menos importante, pelas correntes dos rios e dos mares. Conseqüentemente, as dioxinas estão agora presentes no globo de forma difusa. Estima-se que, mesmo que a produção cesse hoje completamente, os níveis ambientais levarão anos para diminuir. Isto ocorre porque as dioxinas são persistentes, levam de anos a séculos para se degradarem e podem ser continuamente recicladas no meio ambiente.

### 3.3.2 Efeitos sobre a saúde

Dioxinas podem causar efeitos adversos à saúde, dependendo dos níveis de concentração, duração e freqüência de exposição, o tipo específico do composto, e a susceptibilidade da pessoa exposta. A maioria das preocupações refere-se à conexão entre o grau de exposição e a ocorrência de câncer. Alguns estudos relacionam a exposição a Dioxinas com a ocorrência de problemas de fertilidade e/ou má-formação de fetos, bem como anormalidades no desenvolvimento físico, como baixa imunidade e mudanças comportamentais.

### 3.3.3 Exposição

Aproximadamente 98% da exposição das pessoas a dioxinas se dá através da cadeia alimentar (a inalação direta responde pelos 2% restantes). Segundo as “*Environmental Agency in England and Wales*” e a “*Scottish Environment Protection Agency*”, os levantamentos mais recentes revelam que, no Reino Unido, cerca de 3% das emissões de dioxinas são originárias de Plantas de tratamento térmico de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU. Segundo estas mesmas agências, estes índices são similares aos observados em outros países da Europa desenvolvida.

As dioxinas são depositadas do ar sobre as plantações de frutas e hortaliças, pastos e solo, acabando por passar por toda a cadeia alimentar. As águas

---

superficiais acabam também por transportá-las para rios, lagos e oceano, onde são absorvidas por peixes e crustáceos. Desta forma, dioxinas acabam por estar presente em todo o meio ambiente e níveis mínimos serão provavelmente detectados em quase a totalidade dos alimentos. Comumente a exposição pode ser incrementada pela proximidade das populações em relação a determinadas fontes emissoras, ou devido a hábitos alimentares, por exemplo: grande consumo de conservas de peixes em óleo vegetal, carne vermelha, entre outros.

Como as dioxinas são pouquíssimo reativas, sendo quase sua totalidade quimicamente inerte, suas moléculas dificilmente serão quebradas e poderão acumular-se no corpo humano (particularmente em tecidos gordurosos). Os níveis de exposição atualmente observados na Europa desenvolvida podem ser suficientes para causar algum impacto adverso na população em geral, embora as pesquisas não tenham revelado evidências claras destes riscos.

Tanto a US/EPA como a OMS reconhecem que estes efeitos possam ocorrer, mas sejam imperceptíveis por serem mascarados pelo cenário de doenças “comuns”. Investigações e estudos relativos aos efeitos sobre a saúde “versus” exposição às dioxinas em localidades específicas (por ex: áreas vizinhas a Incineradores de Lixo Urbano) não chegaram a resultados conclusivos.

### **3.4 Sistemas de controle de poluição do ar (SCPA)**

As emissões gasosas devido ao processo de combustão são constituídas por substâncias em concentrações muito acima das permitidas pela legislação, por este motivo essas plantas requerem um tratamento físico-químico avançado para neutralizar os poluentes gerados. De forma geral um sistema para depuração dos gases é constituído por unidades para lavagem ácida de halogênios, lavagem alcalina, lavagem de aerossóis e filtros de manga.

Um sistema de controle da poluição do ar deve contemplar o conjunto de equipamentos, a tecnologia empregada, os procedimentos de operação, a

---

manutenção e o monitoramento para que as emissões atmosféricas de uma unidade de combustão de resíduos sólidos atendam aos níveis estabelecidos pelas normas pertinentes e aceitáveis do ponto de vista ambiental (GRIPP, 1998).

Os equipamentos de controle de poluição do ar utilizados para tratar as emissões atmosféricas da combustão são agrupados em função das frações das emissões (gases ácidos, orgânicos ou material particulado). As tecnologias empregadas no processo de incineração também fazem parte do controle da poluição do ar, uma vez que técnicas podem ser aplicadas visando melhor desempenho na combustão de resíduos e diminuição das emissões gasosas, sem que necessariamente sejam empregados equipamentos específicos para o tratamento dos gases.

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

Os Sistemas de Monitoramento Contínuo (SMC) são requeridos ou utilizados na medição contínua dos gases de combustão: CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HC; recentemente tem-se utilizado também monitores para HCl e opacidade (DEMPSEY e OPPELT, 1987).

De acordo com a legislação canadense CCREM (apud GRIPP, 1998), no sistema de controle de poluição do ar, quando a temperatura de operação é baixa (temperatura de entrada no dispositivo de controle do material particulado na faixa de 140 °C), a eficiência da remoção do material particulado é alta e é garantida a condensação de traços orgânicos e substâncias metálicas. Ao controlar as emissões de certos contaminantes como material particulado, HCl, CO e dioxinas e furanos, pode-se inferir que os níveis de emissão de outras substâncias como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, Pb, Cd, Hg, As e Cr estarão dentro dos níveis aceitáveis de emissão. Condições adequadas de operação da incineração e do sistema de controle de poluição do ar garantirão baixos níveis de emissão. Também, ao melhorar as taxas

---

de remoção de material particulado, haverá redução das emissões de traços orgânicos que aderem às superfícies das partículas.

### 3.4.1 Gases ácidos, metais pesados e material particulado

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

Os lavadores úmidos, embora tenham sido os primeiros equipamentos de controle de poluição utilizados para a remoção de particulados nos processos de tratamento térmico de RSU, passaram posteriormente a ser usados também na remoção de gases ácidos.

Segundo Gripp (1998) os lavadores úmidos são raramente adotados nos EUA, sendo que na Europa e no Japão são empregados principalmente para a remoção de gases ácidos, especialmente o HCl (ácido clorídrico) e HF (ácido fluorídrico). Relata, ainda, que esta tecnologia tem limitações devido ao seu alto custo de manutenção que é função da deposição de sólidos no reator, da formação de pluma de vapor no fluxo gasoso e da produção de resíduo líquido.

Também são utilizados para o controle dos gases ácidos o pulverizador de absorvente seco (*Spray Dry Absorber* - DAS) com o emprego de cal (CaO), e a injeção de adsorvente seco (*Dry Sorbent Injection* - DSI) onde normalmente usa-se a cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>) ou o bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>) que são injetados diretamente na câmara de combustão com o resíduo a ser incinerado.

Por outro lado, alguns poluentes como metais pesados, hidrocarbonetos e organoclorados são gerados por não serem eliminados completamente ou porque se formaram durante o tratamento térmico, conforme se verifica na descrição de Gripp: “durante o tratamento térmico de RSU ocorre a formação de diversas espécies metálicas ao longo do processo, haja vista sua inserção num complexo mecanismo

---

termoquímico, com ocorrência de fenômenos como a coagulação, condensação e nucleação de espécies metálicas voláteis” (GRIPP, 1998, p.99).

Os equipamentos de controle de poluição do ar nem sempre conseguem remover metais pesados, principalmente mercúrio, cádmio e chumbo oriundos do tratamento térmico dos RSU devido às características físico-químicas, como por exemplo, temperaturas de volatilização relativamente baixas. Em estudos realizados por Vogg et al. (apud GRIPP, 1998) referentes ao balanço de massa de cádmio e mercúrio no tratamento térmico de resíduos sólidos municipais verifica-se que 5% do cádmio que entra no processo sai no gás limpo após tratamento, 30% sai na escória e 65% fica junto às cinzas retidas nos filtros. Para o mercúrio, tem-se que 70% do que entra no incinerador sai com o gás limpo, 20% na escória e 10% nas cinzas dos filtros. Entretanto, Gripp (1998) argumenta que atualmente, com o desenvolvimento de tecnologias específicas de remoção de mercúrio em incineradores mais modernos, o índice de Hg nas emissões gasosas tem atingido valores de 10% a 15%.

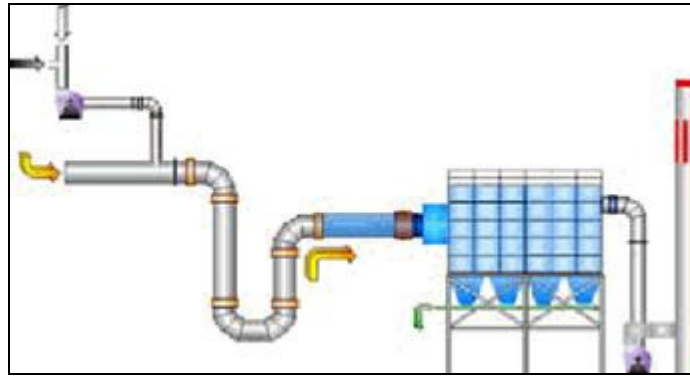
Para a recuperação de material particulado, gases ácidos e metais pesados podemos citar o desenvolvimento de três tecnologias descritas a seguir.

#### 3.4.1.1 *Processo Seco (Dry Process)*

Este processo não envolve apenas a filtração, mas também a injeção de um reagente adequado em forma de pó para a lavagem dos gases, conforme ilustrado na Figura 6.

Poluentes ácidos são capturados por adsorção nas partículas do reagente alcalino. Adicionalmente coque ou carvão ativado é injetado para adsorver dioxinas e furanos, bem como numerosos outros poluentes residuais, em particular certos gases e metais pesados como o mercúrio. O resfriamento dos gases de combustão a baixas temperaturas melhora o processo de secagem permitindo o uso de diferentes tipos de reagentes ou a redução de consumo dos mesmos.

---



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 6 - Processo Seco (*Dry Process*)**

O processo não utiliza água e a pluma é praticamente não existente.

O reator é fundamental para otimizar a difusão e o tempo de residência do reagente nos gases de combustão antes de entrar para o filtro.

Os filtros utilizados são: Filtros eletrostáticos, Filtros de Manga Horizontal ou Vertical. Esses filtros separam partículas (cinzas, excesso de reagentes e produtos de reação) dos gases de combustão. Os filtros de manga otimizam a captura dos poluentes gasosos por adsorção na massa do filtro que se forma sobre o tecido. O meio filtrante é selecionado dependendo das condições de operação para assegurar um bom desempenho e vida útil do filtro.

#### 3.4.1.2 *Processo Semiúmido*

O processo semiúmido consiste na atomização do reagente (usualmente leite de cal) no fluxo de gás. O material particulado e os sais resultantes da reação de neutralização e o excesso de reagentes são capturados nos filtros de manga ou nos precipitadores eletrostáticos, conforme ilustrado na Figura 7.

Este processo é adequado quando são requeridos médios desempenhos de limpeza de gás e quando as quantidades de gases a serem tratadas são limitadas.

---

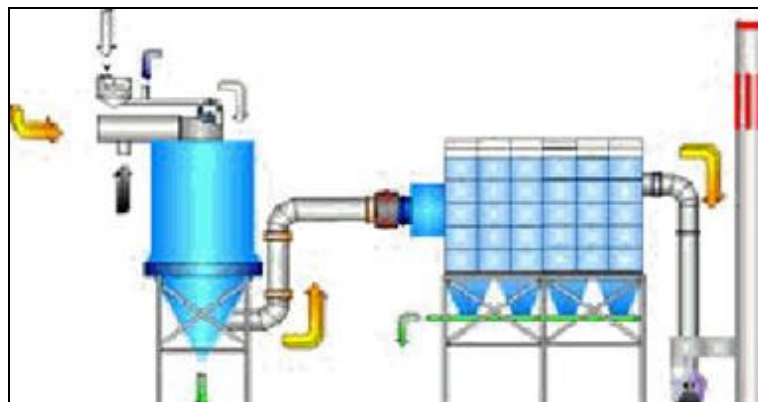
Esse processo possui um consumo médio de água, sem descarga com pequena formação de pluma.

Assim como o processo seco, os resíduos gerados devem sofrer tratamento adicional antes de serem descartados.

A qualidade da atomização no reator permite que a etapa principal do processo melhore significativamente.

Para este processo existem duas rotas tecnológicas:

- Pulverização especial de fluido duplo e atomização rotativa de alto desempenho;
- Coque ou carvão ativado é injetado na torre de atomização a montante do filtro de manga, formando uma camada reativa que adsorve dioxinas e furanos bem como numerosos outros poluentes residuais, em particular certos gases e metais pesados como o mercúrio.



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 7 - Processo Semiúmido**

### 3.4.1.3 Processos úmidos com e sem descarga de água

Os processos úmidos envolvem o arraste de gases o que leva à temperatura de saturação e à absorção dos gases ácidos. Materiais particulados e poluentes são

---

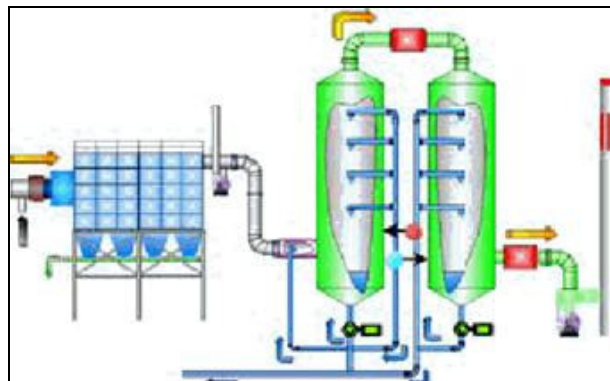


coletados na lavagem de gases com água e após são tratados e neutralizados antes de serem descartados. Metais pesados são precipitados e os sólidos suspensos filtrados produzindo uma massa que contém os metais pesados estabilizados e água limpa que pode ser descartada no meio ambiente, conforme ilustrado na Figura 8.

Este processo retorna excelentes resultados, independentemente da quantidade de poluentes no sistema. A quantidade de reagente utilizado é próxima ao ideal estequiométrico.

A quantidade de resíduos a serem dispostos é menor que a de outros processos e adicionalmente o tratamento é relativamente simples.

Foi desenvolvido um sistema único de limpeza úmida dos gases de concepção modular, facilmente adaptável para se ajustar a diferentes parâmetros de projeto. O sistema consiste na combinação de torres de spray com filtros e/ou módulos de Eletrofiltros Venturi. Eles incluem um variado número de inovações tecnológicas permitindo que os sistemas satisfaçam os mais exigentes requisitos de controle da qualidade do ar e mantenham-se excepcionalmente confiáveis.



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 8 - Processo Úmido**

### **NO<sub>x</sub>, dioxinas e furanos**

Outro poluente a ser considerado é o NO<sub>x</sub> que, dentre outras origens, pode ser formado a partir do N<sub>2</sub> presente no ar que é injetado durante a combustão (NO<sub>x</sub> térmico). Porém, isso só ocorre mais intensa e significativamente em temperaturas

---

elevadas (cerca 1.400 °C), o que não é comum em processos de tratamento térmico de RSU. Para o controle das emissões de NO<sub>x</sub>, é importante manter o processo de combustão (temperatura de chama, concentração de oxigênio, umidade da fornalha, tempo de retenção etc.) em níveis adequados, o que irá reduzir a geração desse poluente.

Em processos onde a combustão não completa a oxidação de todo o combustível, ocorrerá a emissão de produtos da combustão incompleta, gerando compostos orgânicos, dentre os quais destacamos o monóxido de carbono (CO) e os chamados hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH), estes geralmente oriundos dos plásticos existentes nos RSU, que não completaram todo o processo de combustão (GRIPP, 1998).

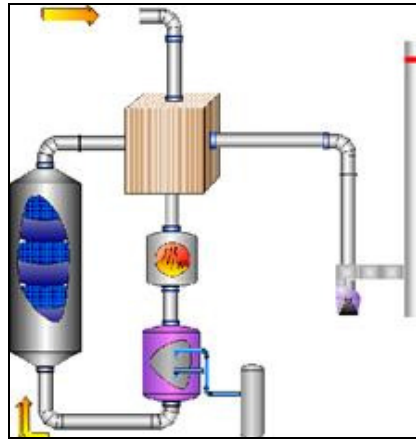
Para a redução da emissão de poluentes como NO<sub>x</sub>, dioxinas e furanos existem dois processos denominados SCR (Redução Catalítica Seletiva) e SNCR (Redução Catalítica Não Seletiva) descritos a seguir.

### **SCR – Redução Catalítica Seletiva**

Os óxidos de nitrogênio são reduzidos por intermédio da injeção de amônia a montante do reator. A reação é mais eficiente a temperaturas entre 200 °C e 300 °C. Este sistema é montado a jusante do principal sistema de tratamento de gases, garantindo melhores condições de funcionamento e estendendo consideravelmente a vida útil do catalisador, conforme ilustrado na Figura 9.

Este processo é igualmente eficiente para destruir dioxinas e furanos. Catalisadores específicos também são eficientes para oxidar o monóxido de carbono (CO) residual em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

---



Fonte: CNIM (2009)

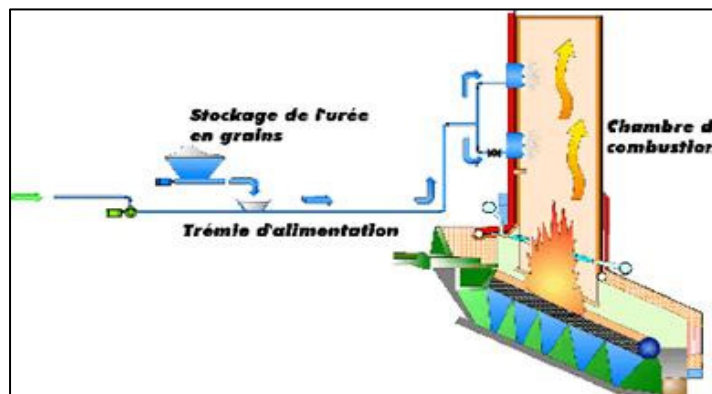
**Figura 9 - Processo SCR – Redução Catalítica Seletiva**

### **SNCR – Redução Catalítica Não Seletiva**

O processo SNCR para redução de óxidos de nitrogênio consiste em injetar um reagente na saída do forno a uma temperatura entre 900 °C e 1000 °C. Os seguintes reagentes são usados neste processo:

- pastilhas de uréia;
- uréia líquida;
- amônia.

Melhores desempenhos requerem a injeção de excesso de amônia o que impede a captura em processos secos ou semi-secos e polui o líquido em processos aquosos. O processo de lavagem dos gases com água faz com que seja possível a reciclagem dentro da caldeira do excesso de amônia presente nos gases. A ilustração do processo pode ser vista na Figura 10.



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 10 - Processo SNCR – Redução Catalítica Não Seletiva**

### 3.5 Resíduos sólidos do processo de tratamento térmico

As cinzas são subprodutos do tratamento térmico e constituem-se da porção inorgânica e da matéria não-combustível presente nos RSU. Durante o processo de tratamento térmico são gerados dois tipos de cinzas: as de fundo denominadas por alguns autores como cinza pesada, cinza de fundo ou escória e as cinzas suspensas retidas pelo sistema de controle das emissões gasosas, também denominadas de cinza leve ou cinzas volantes. As primeiras correspondem de 75% a 90% de toda cinza gerada dependendo do tipo de instalação e do tipo de combustível (resíduo sólido domiciliar, resíduo sólido dos serviços de saúde, resíduo sólido industrial ou outros). Este percentual somente se altera significativamente em incineradores que empregam o princípio da combustão em leito fluidizado, para a qual o resíduo sofre uma prévia trituração e na qual a velocidade dos gases de combustão é mais alta. Com isso, incineradores de leito fluidizado requerem sistemas de coleta de poeiras mais robustos e eficientes, pois mais de 50% dos sólidos poderá estar sendo transportado nos gases de combustão, na forma de materiais particulados.

Outro aspecto a ser considerado em relação aos resíduos sólidos da queima refere-se à temperatura em que se processa a incineração. Na queima em grelha as temperaturas são mais elevadas, com grande parte do material residual sólido resultando fundido e/ou sinterizado, diferentemente dos incineradores que empregam o princípio do leito fluidizado, nos quais a temperatura de combustão normalmente não ultrapassa os 900 °C, o que resulta em resíduos sólidos pulverulentos e calcinados, sem praticamente ocorrer fusão ou sinterização de cinzas.

As diferenças entre as condições de queima influenciam decisivamente nas propriedades físicas e químicas das cinzas, fazendo com que sua reatividade e, conseqüentemente, potencialidade para impactação ambiental sejam distintas.

A maior preocupação quanto à disposição final das cinzas está relacionada aos metais pesados e outros materiais orgânicos não destruídos.

---

### 3.5.1 Destinação e valorização das cinzas

As cinzas geradas durante o processo de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos e de seu sistema de tratamento de gases (cinza, de fundo e cinza volante respectivamente) podem torna-se uma fonte de poluição, sendo, portanto necessários cuidados quanto a sua destinação, tanto para disposição em aterros como para a valorização.

Quando destinados à disposição final em aterros estes devem atender a exigências normativas conforme a classe em que os resíduos são enquadrados.

Existem estudos e aplicações de destinação com valorização e descrevem-se a seguir alguns, a título de exemplo.

Nos Estados Unidos há um crescente interesse em aplicações marítimas, como na prevenção de erosão de áreas costeiras e construção de recifes artificiais. Na Alemanha, metade das cinzas que vão para o fundo do incinerador (resíduos da queima) é usada como material utilizado na construção de estradas e fabricação de barreiras à prova de som.

Na Holanda, pretende-se usar 80 por cento de todos os subprodutos do incinerador de RSM. Atualmente, 40 por cento das cinzas captadas pelo equipamento de controle de poluição são usados como agregado para asfalto. Cerca de 60 por cento das cinzas do fundo dos incineradores (mais de dois milhões de toneladas por ano) já são utilizadas como base para estradas, aterros e como agregado para concreto. Na Dinamarca, as cinzas de fundo vêm sendo utilizadas desde 1974. Quase três quartos (72 por cento) são usados como sub-base em estacionamentos, ciclovias e estradas. (KOMPAC & KOGENERGY, 2005, p. 4).

Como exemplos de utilização de resíduos sólidos de usinas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos, na França 50% da produção anual de cinzas de fundo é submetida ao processo de valorização e utilizada na pavimentação de rodovias e na cobertura de fossas e aterros, sendo utilizadas na cidade de Toulouse, desde 1926 (BUREAU DE RECHERCHE GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES, 2004)

Ainda a título de exemplo, 21 mil toneladas de cinzas de fundo foram utilizadas na construção da estação de metrô ao lado do *Stade de France*, em Saint-

---

Dénis, e 117 mil toneladas foram utilizadas na construção da *Eurodisney* (MIQUEL e POIGNANT, 1999).

Um estudo detalhado (QUINA, 2005) foi realizado com cinzas volantes produzidas em usinas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos implantadas em Portugal, concluindo que os métodos de solidificação/estabilização (S/S) imobilizam eficazmente os metais pesados, porém os sais solúveis são susceptíveis de serem libertados em quantidades significativas. Esse estudo destaca que é tecnicamente possível o uso de cinzas volantes na produção de materiais cerâmicos, desde que os agregados leves produzidos apresentem características comercialmente aceitáveis, o que limita o uso de quantidades elevadas de resíduo. Conclui também que o impacto ambiental dos agregados leves produzidos laboratorialmente, com incorporação de resíduo, não é relevante ao nível dos processos de lixiviação.

Na Comunidade Européia não existe uma posição comum sobre o nível de periculosidade destes materiais residuais. Por isso, os diferentes atos legislativos de cada Estado-Membro da Comunidade Européia têm gerado diferentes classificações destes materiais, conduzindo a níveis diferenciados de valorização (NUNES, 2004).

No cenário da Comunidade Européia, assim como no Brasil, existem normas e legislações que contemplam a caracterização e sistemas de destinação destes resíduos.

A Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos e engloba o tratamento térmico de resíduos sólidos de origem urbana, considerando que as cinzas volantes e escórias provenientes do processo de tratamento térmico, devem ser consideradas, para fins de disposição final, como resíduos Classe I – Perigoso, e que o órgão ambiental poderá autorizar a disposição destes como resíduos Classe II A (não perigoso, não inerte) e Classe II B (não perigoso, inerte), se comprovada sua inertização pelo operador.

A NBR 10004/2004 – Resíduos Sólidos – Classificação, não define uma classificação específica para as cinzas volantes e escórias da combustão de RSU e, também permite que o gerador dos resíduos perigosos possa demonstrar que um

---

resíduo em particular apresenta ou não características de periculosidade especificadas nesta norma.

No Estado de Minas Gerais a Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009, dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos, porém não menciona os resíduos sólidos gerados por processos de valorização térmica de resíduos sólidos urbanos.

Na União Européia, a Decisão da Comissão nº 2000/532/CE , de 3 de maio de 2000, estabelece uma lista de resíduos em conformidade com a alínea a) do artigo 1º da Diretiva 75/442/CEE e identifica os resíduos que são considerados perigosos. Conforme esta Decisão, as cinzas volantes e escórias (cinza de fundo) são consideradas como resíduos perigosos somente quando estas contiverem substâncias perigosas. Permite ainda, aos Estados – Membros decidir, com base em informações fornecidas pelo gerador dos resíduos, que um determinado resíduo indicado como perigoso não apresenta características de periculosidade.

A Circular 94-IV-1, de 9 de maio de 1994, do Ministério do Meio Ambiente da França, relativa à eliminação de cinzas de fundo de usinas de tratamento térmico de resíduos urbanos regulamenta os procedimentos para valorização e eliminação de cinzas de fundo.

Para os resíduos gerados pelas usinas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (cinzas volantes e cinzas de fundo), quando a destinação for definida como a disposição final em aterros, a classe dos resíduos é determinante para a definição do tipo de aterro, devendo ser garantida a sua disposição em locais em conformidade com a legislação e normas específicas para tal.

Quando estes resíduos forem destinados para valorização (requalificação do resíduo sólido como subproduto ou material de segunda geração por meio da reutilização, reciclagem ou do tratamento para outras aplicações) a classificação dos resíduos não é mandatória, pois neste caso, deverá ser analisada individualmente cada solução de valorização e, aplicadas normas, padrões e legislações específicas ao tipo de valorização prevista.

---

## 4 LEGISLAÇÃO

### 4.1 Padrão para emissões atmosféricas

No Brasil, os padrões de qualidade do ar são dados pela Resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990.

Segundo esta resolução, são padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

São considerados Padrões Primários de Qualidade do Ar, as concentrações de poluentes que se forem ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Os Padrões Secundários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre a população e ao meio ambiente em geral.

Também foram estabelecidos os Níveis de Qualidade do Ar para elaboração do Plano de Emergência para Episódios Críticos de Poluição do Ar, visando providências dos governos de estado e dos municípios, assim como de entidades privadas e comunidade geral, com o objetivo de prevenir grave e iminente risco à saúde da população.

Considera-se Episódio Crítico de Poluição do Ar a presença de altas concentrações de poluentes na atmosfera em curto período de tempo, resultante da ocorrência de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos mesmos. Foram estabelecidos os Níveis de Atenção, Alerta e Emergência, para a execução do Plano.

A Tabela 2 apresenta os padrões dados pelo CONAMA nº 3/1990.

---



**Tabela 2 - Padrões nacionais de qualidade do ar e critérios para episódios agudos**

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário	Padrão Secundário	Atenção	Alerta	Emergência
		(µg/m <sup>3</sup> )*				
PTS	24 horas MGA	240	150	375	625	875
		80	60			
MP <sub>10</sub>	24 horas MMA	150	150	250	420	500
		50	50			
FMC	24 horas MMA	150	100	250	420	500
		60	40			
SO <sub>2</sub>	24 horas MMA	365	100	800	1.600	2.100
		80	40			
NO <sub>2</sub>	1 hora MMA	320	190	1.130	2.260	3.000
		100	100			
CO	1 hora 8 horas	40.000 (35 ppm)	40.000 (35 ppm)	15	30	40
		10.000 (9 ppm)	10.000 (9 ppm)			
O <sub>3</sub>	1 hora	160	160	400	800	1.000
				200		

(\*) Condições de referência a temperatura 25°C e pressão de 760 mm Hg

PTS – Partículas totais em suspensão

FMC - Fumaça

MGA – Média geométrica anual

MAA – Média aritmética anual

MP10 – Partículas inaláveis

Fonte: Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990

A Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas específicas, não citando tratamento térmico de resíduos.

No estado de Minas Gerais, o Conselho Estadual de Política Ambiental estabelece normas e padrões para emissões de poluentes na atmosfera por meio da Deliberação Normativa COPAM nº 11, de 16 de dezembro de 1986. Este documento, assim como o CONAMA nº 382, define padrões de emissão específicos para algumas fontes de poluição, exceto o caso de tratamento térmico de resíduos.

A Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002 dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Esta resolução engloba o tratamento térmico de resíduos sólidos de origem urbana, citado nos seguintes artigos:

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 800 °C (Oitocentos graus Celsius), e o tempo de residência do resíduo em seu interior não poderá ser inferior a 1 (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. 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 (anexo II);

V - Plano de Contingência (anexo III);

VI - Plano de Emergência (anexo IV).

§ 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 (anexo V), 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.

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 (O<sub>2</sub>), 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 ( $O_2$ ), 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 deve 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 ( $O_2$ ) 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 – 70 mg/Nm<sup>3</sup>;

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

a) Classe 1: vinte e oito centésimos de miligrama por normal metro cúbico - 0,28 mg/Nm<sup>3</sup> - incluindo:

1. Cádmio e seus compostos, medidos como cádmio (Cd);
2. Mercúrio e seus compostos, medidos como mercúrio (Hg);
3. Tálcio e seus compostos, medidos como tálcio (Tl);

b) Classe 2: um miligrama e quatro décimos por normal metro cúbico – 1,4 mg/Nm<sup>3</sup> - 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 – 7 mg/Nm<sup>3</sup> - 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 – 280 mg/Nm<sup>3</sup> -, medidos como dióxido de enxofre;
2. Óxidos de nitrogênio: quinhentos e sessenta miligramas por normal metro cúbico – 560 mg/Nm<sup>3</sup> -, medidos como dióxido de nitrogênio;
3. Monóxido de carbono: cem partes por milhão por normal metro cúbico<sup>1</sup>;
4. Compostos clorados inorgânicos: oitenta miligramas por normal metro cúbico – 80 mg/Nm<sup>3</sup> -, até 1,8 kg/h, medidos como cloreto de hidrogênio;
5. Compostos fluorados inorgânicos: cinco miligramas por normal metro cúbico – 5 mg/Nm<sup>3</sup> -, medidos como fluoreto de hidrogênio;

---

(1) A equipe técnica Feam entende que a CONAMA traduziu literalmente o termo inglês “parts per million by volume – ppmv”, que melhor significaria em português “ppm, expresso em volume”; portanto, pode-se entender o referido padrão CONAMA como 100 ppm<sub>v</sub>, expresso em normal metro cúbico, que equivale a 123 mg/Nm<sup>3</sup>.

---

§ 2º Os parâmetros medidos devem ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para 7% (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. 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<sup>1</sup>.

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 A (não perigoso, não inerte) e Classe II B (não perigoso, inerte), se comprovada sua inertização pelo operador.

---

(1) Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005.

---

## 4.2 Padrão para dioxinas

Não está claro se há um limite abaixo do qual a exposição a dioxinas não terá efeitos sobre a saúde. A Agência de Proteção Ambiental Americana (US/EPA), por precaução, assume que este limite não existe e estabelece padrões conservativos, visando à segurança da população. A Organização Mundial de Saúde (OMS) e o Comitê de Assessoramento do Departamento de Saúde da Inglaterra assumem que existe um limite abaixo do qual a saúde não será afetada e, assim sendo, estabelece padrões um pouco menos exigentes.

Padrões para os níveis de concentração de dioxinas em alimentos são baseados no conceito de “ingestão diária tolerável” (IDT). Tendo em vista que diferentes Dioxinas variam em sua toxicidade, os padrões são também expressos em termos de equivalência tóxica (TEQ). Uma TEQ igual a 1 se relaciona às dioxinas mais tóxicas – outras têm TEQ mais baixas. A US/EPA utiliza uma IDT de 0,1 picograma/quilograma de peso corporal/dia (pgTEQ/kg.corp/d), quando a OMS recomenda uma IDT de 1 a 4 pgTEQ /kg.corp/d. Atualmente, o padrão Inglês está fixado em 10 pgTEQ/kg.corp/d, mas está sendo objeto de revisão pelo Departamento de Saúde.

No Brasil a Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, que dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos estipula limites de emissão para dioxinas e furanos em tratamento térmico de resíduos de origem urbana como:

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/Nm<sup>3</sup>.

---

## 5 IDENTIFICAÇÃO DE TECNOLOGIAS NO BRASIL E NO MUNDO – ESCALAS INDUSTRIAL OU PILOTO

### 5.1 Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos no Brasil

No Brasil, o primeiro incinerador foi construído na cidade de Manaus, em 1896, pelos ingleses e tinha capacidade para processar 60 t/dia de resíduo doméstico. Foi desativado em 1958 por não mais atender às necessidades locais e por problemas de manutenção. Em São Paulo, em 1913, foi instalado um incinerador especial, com capacidade para 40 t/dia de resíduo, provido de um sistema de recuperação de energia (uma caldeira e um alternador), que devido a problemas de adaptação à rede elétrica foi desativado e substituído por motores elétricos convencionais. Este último foi desativado em 1949 e demolido em 1953 (CETESB, 1997).

As tecnologias tanto desses primeiros incineradores municipais no Brasil, quanto daqueles que foram instalados em São Paulo em 1959 e 1967, na região de Vergueiro e no Bom Retiro, respectivamente, eram antigas e não atendiam aos padrões de controle de poluição exigidos pela legislação vigente (LIMA, 1985).

Na década de 1950, com o surgimento da construção de prédios de vários pavimentos nas cidades de maior porte foram implantados vários incineradores prediais para queimar o resíduo gerado nos apartamentos, porém foram banidos entre 1969 e 1970 por não possuírem nenhum controle do processo de incineração.

De acordo com Gripp (1998) o tratamento térmico de resíduos sólidos domiciliares no Brasil é praticamente inexistente e apenas os incineradores de Vergueiro e Ponte Pequena funcionavam, cada um, com capacidade de 300 t/dia. Ambos incineraram em 1993 um total de 73.000,00 t de resíduos, sendo 28.000,00 t de RSU, que correspondiam a 1,16% dos resíduos sólidos domésticos tratados e/ou dispostos no município de São Paulo.

---

Os primeiros incineradores no Brasil se enquadravam dentro da primeira geração, com tecnologia ultrapassada, cuja função principal das plantas era reduzir o volume do resíduo, sendo que os gases gerados eram lançados diretamente na atmosfera, sem tratamento. Nos dias atuais, diante das exigências da legislação ambiental e da mobilização da opinião pública por meio de entidades ambientalistas, são inconcebíveis tais sistemas.

A implantação de incineradores atualmente no Brasil teve maior projeção para o tratamento de resíduos classificados como especiais (aeroportuários, hospitalares e industriais). Com isso, verifica-se que o tratamento térmico no país ainda se caracteriza pela grande quantidade de incineradores de pequeno porte, instalados principalmente em hospitais, os quais operam de forma precária, sem manutenção adequada e sem controle das emissões atmosféricas.

No Brasil o processo de tratamento térmico ganhou o conceito de poluidor, nocivo à saúde e prejudicial ao meio ambiente devido ao uso de equipamentos obsoletos ou à operação e manutenção inadequadas. Esta visão negativa ainda é marcante para grande parte da população brasileira. Como no Brasil a imagem dos incineradores ainda é associada a potenciais fontes de poluição, o processo de tratamento térmico para o tratamento de RSU não tem sido incluído nos programas de gerenciamento dos resíduos sólidos.

Para Menezes et al. (2000), enquanto a tendência mundial é aproveitar os resíduos urbanos para a geração de energia, no Brasil não existem projetos representativos que promovam a reciclagem, considerando o uso do biogás e do resíduo em termelétricas, o que contribuiria para equacionar dois problemas: o ambiental, com o tratamento dos resíduos, e o de geração de energia.

---

## 5.2 Tecnologias de tratamento térmico no Brasil

Nos últimos anos, alguns projetos de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético têm sido cogitados para serem implantados, muito embora, tais projetos ainda não tenham sido efetivados.

Dois projetos foram desenvolvidos pelo Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais - IVIG da COOPE/UFRJ, tendo como objetivo a redução da quantidade de resíduos a serem encaminhados aos aterros e conseqüentemente a redução dos gases do efeito estufa, são eles:

- Projeto da digestão acelerada: consorcia a recuperação do metano à compostagem para a produção do adubo orgânico;
- Biomassa-Energia-Materiais (B.E.M): Projeto que produz a celulignina, um combustível sólido proveniente do aproveitamento de restos de alimentos com elevado poder calorífico (4.500 kcal/kg). O processo de produção da celulignina é realizado a partir da pré-hidrólise ácida dos RSU em um reator a vácuo.

Na tecnologia B.E.M. e na tecnologia de digestão acelerada verifica-se o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos "novos", ou seja, a recuperação da energia acontece concomitantemente à geração dos resíduos, diferentemente da recuperação do biogás de aterros, onde os resíduos foram depositados há mais tempo.

O projeto de uma Usina Protótipo de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com o objetivo de evitar a formação do metano em aterro e gerar eletricidade para autoconsumo, denominado de USINAVERDE, está implantado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro. É a primeira usina de tratamento térmico de RSU com geração de eletricidade em funcionamento no Brasil.

### 5.3 Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos no mundo

Em vários países o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia prevalece sobre a disposição em aterros e sobre a reciclagem, alcançando índices elevados como mostra a Tabela 3. No Japão, onde são escassas as áreas adequadas para construir aterros sanitários, a tendência é que cresça o número de unidades de tratamento térmico de resíduos. Isto ocorre também em função do desenvolvimento de novas tecnologias para a recuperação de energia e para o tratamento dos gases de combustão, tornando as unidades econômica e ambientalmente mais viáveis (MENEZES et al., 2000).

Tabela 3 - Destino dos resíduos em alguns países

País	Aterros sanitários (%)	Usinas triagem e compostagem (%)	Incineradores (%)
Alemanha	72	3	25
Bélgica	62	9	29
Dinamarca	37	7	56
Espanha	76	16	8
França	50	20	30
Holanda	50	20	30
Inglaterra	90	1	9
Itália	56	10	34
Japão	24	4	72
Suécia	35	10	55
Suíça	6	6	88

Fonte: [www.conecteeducao.com/2008](http://www.conecteeducao.com/2008)

O tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos vem sendo praticado por diversos países visando principalmente a redução de volume, face aos problemas de disponibilidade de área, e de periculosidade dos resíduos. No Japão o percentual de RSU incinerado chega a 80% e, apenas em Tóquio, funcionavam 13 usinas até 1994 (IPT/CEMPRE, 1995).

Para Lima (1985), persistindo a crise energética no mundo e desenvolvendo-se tecnologias para melhorar o aproveitamento do poder calorífico do resíduo sólido urbano, os processos de tratamento térmico com recuperação de energia tenderão a dominar o mercado do tratamento do resíduo urbano.

Uns dos primeiros incineradores destinados a queima dos RSU, ou o primeiro utilizando-se de técnicas ainda rudimentares e de operações simples, foi instalado na cidade de Nottingham, na Inglaterra em 1874. Nos USA o primeiro incinerador com geração de vapor foi construído em Nova York, em 1905, ocorrendo um rápido crescimento com mais 200 unidades instaladas até 1920.

Segundo Gripp (1998) cerca de 94% dos incineradores dos EUA, com capacidade maior que 500 t/dia, têm sistemas de recuperação de energia e a maioria em operação é do tipo *Mass Burn* – MB (queima direta sem triagem). Menezes et al. (2000) também afirmam que em países desenvolvidos como a Alemanha, Japão, Suíça e outros, onde o percentual de incineração é elevado, muitas plantas foram construídas recentemente, outras estão em construção, principalmente para a geração de energia. Para Suíça e Japão a projeção é que tenham, brevemente, 90% de seus resíduos processados em plantas de tratamento térmico.

Desde 1989 a Comunidade Econômica Européia (CEE) conta com legislação específica para fins de redução da poluição atmosférica proveniente das instalações de tratamento térmico de resíduos urbanos: a Diretiva n.º 89/369/CEE, trata das novas instalações e a Diretiva n.º 89/429/CEE, refere-se às instalações existentes. Atualmente em vigência, a Diretiva n.º 2000/76/CE visa melhorar o controle de emissões dos processos de incineração e co-incineração, fixando valores limite para emissões atmosféricas, bem como para as descargas de água.

Conforme já relatado, na União Européia, a Decisão da Comissão n.º 2000/532/CE, de 3 de maio de 2000 estabelece uma lista de resíduos em conformidade com a alínea a) do artigo 1.º da Diretiva 75/442/CEE e identifica os resíduos que são considerados perigosos. Conforme essa Decisão, as cinzas volantes e as cinzas de fundo são consideradas como resíduos perigosos somente quando estas contiverem substâncias perigosas. Permite, ainda, aos Estados – Membros possam decidir, com base em informações fornecidas pelo gerador dos

---



resíduos, que um determinado resíduo indicado como perigoso não apresenta características de periculosidade.

A Tabela 4 apresenta a situação atual das unidades e percentual de resíduos que tem como destinação atual o tratamento térmico com geração de energia.

**Tabela 4 - Percentual de resíduos**

<b>País</b>	<b>População (milhões)</b>	<b>Lixo (milhões.t/ano)</b>	<b>Número de Unidades</b>	<b>Combustão com geração de energia (%)</b>
Suíça	7	2,9	29	79
Japão	123	44,5	1893	72
Dinamarca	5	2,6	32	65
Suécia	9	2,7	21	59
França	56	18,5	100	41
Holanda	15	7,1	9	39
Alemanha	61	40,5	51	22

Fonte: ASME/2008

#### **5.4 Tecnologias de tratamento térmico no mundo**

Em caráter mundial, novas tecnologias vêm sendo estudadas visando à melhor eficiência energética, com o melhor aproveitamento da capacidade calorífica dos resíduos sólidos municipais e a menor geração de poluentes. Algumas tecnologias estão focadas em processos que minimizem a geração de poluentes atmosféricos, outras tecnologias estão buscando aprimorar os sistemas de tratamento de gases.

Dentre as tecnologias existentes podemos citar algumas que já são largamente empregadas e se destacam no mercado de equipamentos para tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos: tecnologia da CNIM, presente na cidade do Porto (Portugal), França, Holanda, Sul de Londres; da ABB presente em

seis usinas na Suíça, uma na Suécia e uma na Dinamarca; da Inova presente em Nuremberg (Alemanha), Holanda e Londres e da Martin, presente em países como Holanda, Alemanha, Itália, China e Japão.

## **6 DESCRIÇÃO GERAL DOS PRINCIPAIS PROCESSOS**

### **6.1 USINAVERDE**

A USINAVERDE é uma planta piloto para tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica localizada no Campus da Ilha do Fundão, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

O objetivo da planta piloto é o desenvolvimento de tecnologia para tratamento térmico de RSU e produção de energia elétrica. O período de concepção do projeto foi entre os anos de 2001 e 2003. O início de operação deu-se no ano de 2004 com a incineração sem geração de energia. Em maio de 2005 iniciou-se a operação com geração de energia elétrica.

A planta tem capacidade para incinerar 30 t/dia de resíduos sólidos urbanos e potência de 750 kW. A tecnologia é desenvolvida no Brasil, com exceção da caldeira de recuperação cujo direito de projeto foi adquirido de uma empresa alemã e construída no país. O projeto possui três patentes: lavagem de gases, acessórios do forno (alimentação, grelhas, esgotamento) e o processo como um todo. O projeto possui certificação para venda de créditos de carbono no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

---

## A Tecnologia USINAVERDE

A USINAVERDE é licenciadora da sua tecnologia patenteada que objetiva apresentar-se como uma alternativa ecologicamente correta aos atuais lixões e aterros irregulares, e economicamente viável com a geração de energia elétrica.

O processo conforme demonstrado no fluxograma da Figura 11, a seguir, pode ser dividido em duas etapas.



Fonte: USINAVERDE (2009)

Figura 11 - Fluxograma de processo USINAVERDE

A primeira etapa é o pré-tratamento dos resíduos que objetiva selecionar os materiais a serem tratados termicamente, elevando o poder calorífico dos mesmos de forma a obter maior eficiência na geração de energia. Os trabalhos ocorrem em galpão fechado, dotado de sistema de exatidão de odores, ar que é utilizado como ar de combustão no forno.

Os resíduos são recebidos diretamente dos caminhões de coleta. Mecanicamente são retirados os objetos de maiores dimensões como móveis, colchões, etc. Posteriormente é realizada a segregação dos materiais recicláveis (vidros, metais, etc.), de forma manual, em esteiras de catação e também através de detectores de metais.

Os resíduos restantes serão fragmentados e triturados em moinhos, formando o denominado Combustível Derivado de Resíduo (CDR), que será alimentado no forno.

A segunda etapa consiste no tratamento térmico, geração de energia e lavagem dos gases. O tratamento térmico dos resíduos no forno ocorre, em média, na temperatura de 950 °C. A oxidação dos gases, na câmara de pós-queima, ocorre a aproximadamente 1050 °C, com tempo de residência de dois minutos.

Os gases quentes são conduzidos para uma caldeira de recuperação, onde são produzidas 20 t/h de vapor a uma pressão de 45 bar e temperatura de 420 °C. O vapor gerado pela caldeira acionará um turbo gerador com potência efetiva de 3,5 MW.

Os gases exauridos da caldeira de recuperação são neutralizados por processo de lavagem em circuito fechado (solução de água com pH corrigido pelas cinzas do próprio processo e produtos químicos) em dois estágios: lavagem/redução de temperatura e polimentos dos gases. Após passagem por eliminador de gotículas (Demister) e precipitador eletrostático, os gases, já limpos, são liberados para a atmosfera. Exaustores instalados imediatamente antes da chaminé garantem que todo processo ocorra em pressão negativa.

A solução de lavagem é recolhida em tanques de decantação onde ocorre a neutralização e mineralização (decantação dos sais), retornando posteriormente ao processo de lavagem. Restarão no decantador um precipitado salino (concentração de cálcio e potássio) e um material inerte, correspondendo a algo em torno de 8% do volume inicial de RSU recebido para tratamento. Este material está sendo testado em substituição à areia, na fabricação de tijolos e pisos e estão sendo realizados os testes necessários visando sua aprovação para uso na construção civil. Um módulo de 150 t/dia gera material suficiente para a fabricação de 1500 tijolos/dia.

A USINAVERDE decidiu adotar uma solução modular para suas plantas de escala comercial, tendo cada módulo a capacidade de tratar 150 toneladas/dia de RSU bruto, o que, de acordo com a média de geração de resíduo por habitante apurada recentemente pelo IBGE, permitirá o atendimento das necessidades de disposição final de resíduos urbanos de comunidades de cerca de 180 mil pessoas.

---

A seguir são apresentadas algumas fotos da USINAVERDE.



Fonte: USINAVERDE (2009)

**Figura 12 - Vista Geral da USINAVERDE**



Fonte: USINAVERDE (2009)

**Figura 13 - Prédio de Pré-Tratamento**



Fonte:USINAVERDE (2009)

**Figura 14 - Área de Recepção dos Resíduos**



Fonte: USINAVERDE (2009)

**Figura 15 - Esteira de Recicláveis**



Fonte: USINAVERDE (2009)

**Figura 16 - Forno de Combustão**



Fonte: USINAVERDE (2009)

**Figura 17 - Caldeira de Recuperação**



Fonte: USINAVERDE (2009)

**Figura 18 - Caldeira e Casa do Turbogenerador**



Fonte: USINAVERDE (2009)

**Figura 19 - Sistema de Lavagem de Gases**





Fonte: USINAVERDE (2009)

**Figura 20 - Decantador e Torre de Refrigeração**



Fonte: USINAVERDE (2009)

**Figura 21 - Área Industrial**

## 6.2 CNIM

Para melhor descrever a tecnologia da CNIM iremos tomar como exemplo a Usina LIPOR II, localizada na cidade do Porto, em Portugal. A usina tem capacidade de tratar 400.000 toneladas anuais de RSU gerando 26 MW de energia elétrica. A Figura 22 mostra uma visão geral da usina.



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 22 - Vista Geral da Usina LIPOR II**

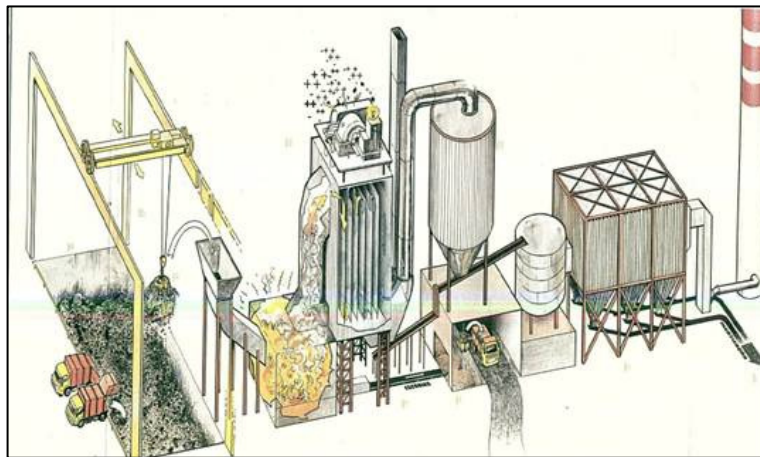
### A Tecnologia CNIM

A Figura 23 e a Figura 24 ilustram o processo de tratamento térmico da usina e o sistema de tratamento de gases até o processo final que é a geração de energia elétrica.

Na primeira etapa, a recepção dos resíduos, os veículos de coleta (1) são pesados na entrada da central do tratamento térmico e identificados por um cartão magnético que permite que as quantidades de resíduos sejam faturadas automaticamente, são recebidos resíduos de oito municípios. Os resíduos são depositados em um fosso (2) com paredes impermeáveis. Do fosso são transportados através de garras (3) comandadas à distância da sala de controle para serem homogeneizados e depois enviados para as esteiras de alimentação dos fornos.

---

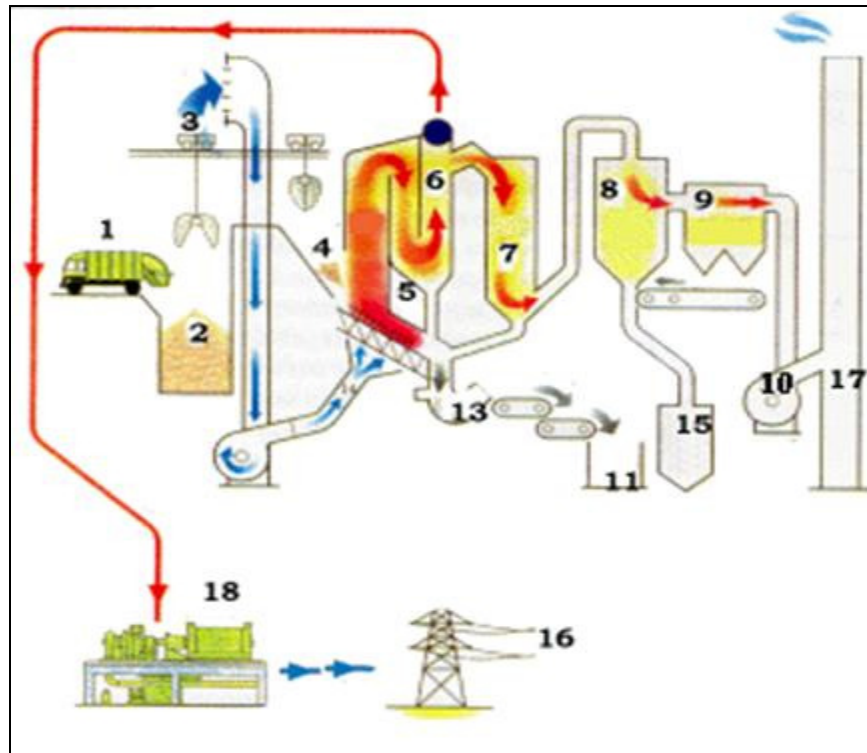
A segunda etapa é a recuperação de energia. Um alimentador abastece automática e periodicamente os resíduos provindos das esteiras (4) na fornalha onde a temperatura é superior a 1000 °C. Pelo movimento da grelha (5) os resíduos são imediatamente misturados às brasas e entrarão em combustão em contato com o ar soprado através da grelha. No final da combustão o material inerte, escória, cairá numa tina com água (13) na qual serão resfriadas. O ar de combustão será aspirado na região acima do fosso dos resíduos para manter esta zona em depressão com o exterior.



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 23 - Processo da Usina LIPOR II**

A combustão dos gases será finalizada na parte de cima da fornalha por injeção de ar secundário. Depois passarão pelos equipamentos da caldeira (6 e 7) na qual irão resfriar lentamente até cerca de 200 °C. O calor liberado pelos gases será utilizado para produzir vapor superaquecido. A caldeira é especialmente construída para garantir um bom desempenho e uma longa vida útil. As unidades de combustão, segundo as Diretivas da CEE são equipadas com um queimador automático para manter a temperatura do gás superior a 850 °C durante dois segundos.



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 24 - Processo da Usina LIPOR II**

A terceira etapa é a valorização da energia obtida. Nesta etapa o vapor resultante da combustão dos resíduos alimenta continuamente uma turbina que aciona um alternador. Uma pequena parte da eletricidade produzida é utilizada para consumo da própria usina e a maior parte é exportada para a rede (média tensão – 20 kV) da Torre de Distribuição (16).

A potência da turbina de 25 MW coloca a Usina LIPOR II na primeira posição dos produtores de eletricidade na região do Porto. No escape da turbina o vapor é condensado em aerocondensadores. Os condensados são recondicionados antes de retornarem ao processo na caldeira. A energia fornecida pelos resíduos tratados termicamente pelas duas unidades da LIPOR corresponderá a energia de cerca de 68.000 tep/ano (toneladas equivalente petróleo por ano).

Na quarta etapa ocorre o tratamento dos efluentes gasosos. Nesta etapa os gases de combustão são tratados na saída da caldeira. Os gases entram num reator (8) no qual os ácidos da combustão são neutralizados por injeção de leite de cal viva. A temperatura é reduzida a menos de 150 °C. Este sistema permite atingir

teores em emissões bastante inferiores aos máximos regulamentados na Comunidade Européia. Após os gases atravessam um captador de material particulado (9) ou filtro de mangas onde serão separados dos materiais particulados e outros produção de reação que ainda contenham. No final os gases limpos são evacuados pelo ventilador de ar de combustão (10) até a chaminé (17).

A última etapa é o tratamento dos resíduos de combustão. As escórias saídas do extrator têm os metais retirados magneticamente e após são levadas pelas esteiras até o tanque (11) previsto para esse fim. As escórias estéreis serão utilizadas para o recapeamento de estradas ou levadas para um aterro sanitário. As sucatas são vendidas ao setor industrial. Os produtos da reação e as fuligens são coletados nos reatores, nos captadores de material particulado (9) e nas caldeiras, depois são armazenados em silos (15) antes de serem colocados em sacos bastante impermeáveis e enterrados num aterro sanitário Classe I. A usina não apresenta despejo de efluentes líquidos, sendo totalmente neutra para o meio ambiente.

A central LIPOR II é integralmente controlada e vigiada da sala de comando central. A sala de comando permite dar comandos, calcular balanços térmicos e mássicos, visualizar em painéis os valores instantâneos e gráficos, os parâmetros de supervisão do processo, realizar e editar relatórios a curto e médio prazo.

A LIPOR II confiou a exploração das instalações por um período de 15 anos após a recepção da fábrica à Sociedade ESYS-MONTENAY filial da sociedade GENERALE DES EAUX. Essa sociedade será responsável pela valorização da energia elétrica produzida pela central.

O centro de valorização LIPOR II foi criado para funcionar 24 horas por dia e 7 dias por semana. A duração das paradas anuais para manutenção será no máximo de 3 a 4 semanas. As unidades serão suspensas durante horas mortas e em seqüência, de tal forma que a tonelagem que deve ser desviada a outros centros de tratamento seja mínima.

Para o funcionamento das duas unidades são necessárias, em princípio, 43 funcionários, com 5 turnos de 4 pessoas mais 5 funcionários durante o dia. Para manutenção e fornecimentos diários são necessários 14 funcionários e na administração mais 4 pessoas.

---

A seguir são apresentadas algumas fotos da central LIPOR II.



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 25 - Usina LIPOR II – Portugal**



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 26 - Usina LIPOR II - Portugal**



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 27 - Centro de Triagem**



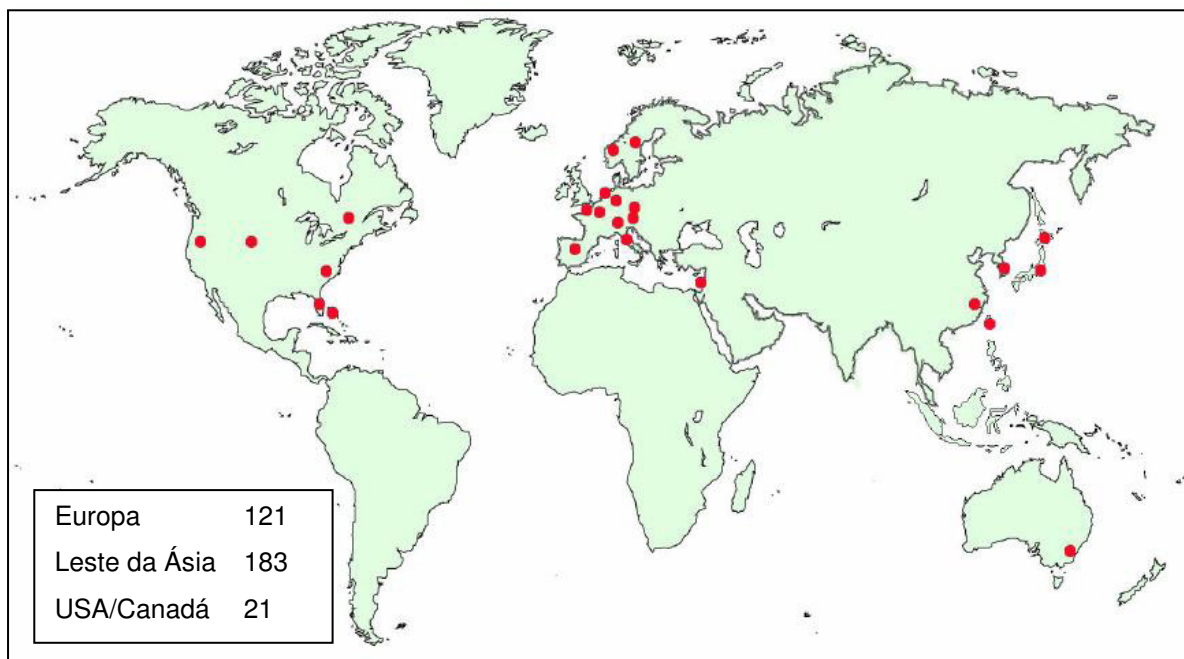
Fonte: CNIM (2009)

**Figura 28 - Centro de Triagem**

### 6.3 Von Roll Inova

A empresa Von Roll Inova atua no mercado desde o ano de 1933. Nos anos de 1937 a 1939 foi construída a primeira usina de tratamento de resíduos em Dordrecht, Países Baixos. Atualmente existem 330 plantas de tratamento térmico Von Roll Inova que tratam mais de 100.000 toneladas de resíduos urbanos por dia. A Figura 29 mostra a distribuição dessas plantas de incineração.

A tecnologia Inova visa a máxima inertização e redução de volume no tratamento térmico de resíduos urbanos, máxima eficiência em geração de energia, baixas emissões gasosas, mínima geração de resíduos de processo e o uso de produtos reutilizáveis.



Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 29 - Plantas de Incineração Von Roll Inova no mundo**

Dependendo do material a ser tratado existem rotas diferentes de processo. Se a matéria-prima for resíduos sólidos urbanos, biomassa, biogás ou outros resíduos combustíveis o tratamento é feito sob processo de queima em grelhas. Resíduos perigosos são tratados em forno rotativo.

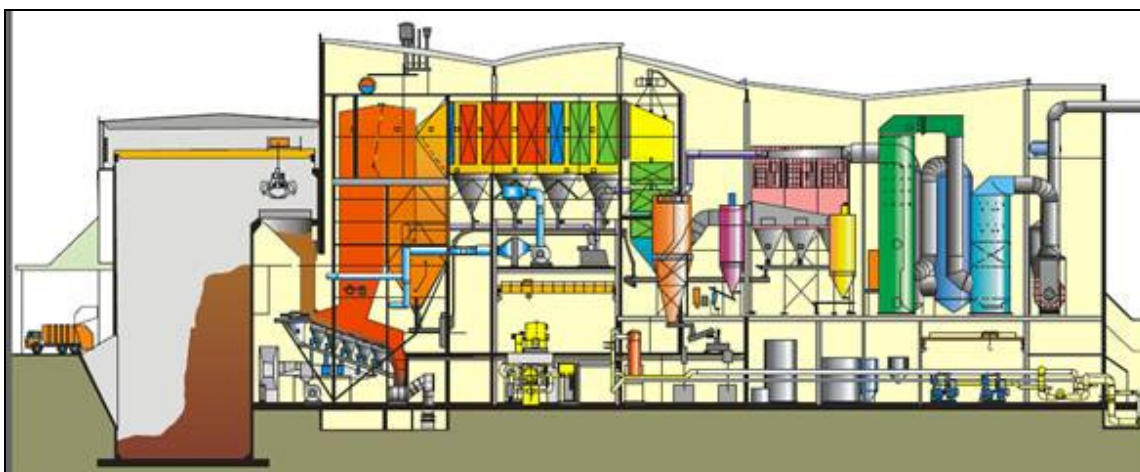


Lodos e biomassa podem ser tratados em leito fluidizado estacionário. Resíduos derivados de combustível, biomassa e carvão são tratados em leito fluidizado circulante.

Os gases resultantes dos processos de incineração são tratados conforme a sua composição: gases ácidos e metais pesados em processo semi-seco (Wet Scrubber); óxidos de nitrogênio pelos processos de Redução Catalítica Não Seletiva (SNCR) e Redução Catalítica Seletiva (SCR); dioxinas e furanos em processos catalíticos com adsorção. As cinzas e escórias são enviadas para recuperação para serem reutilizadas em outros processos como parte da matéria-prima.

### A tecnologia Von Roll Inova

A Figura 30 ilustra o processo de tratamento térmico de resíduos da Inova.



Fonte: Von Roll Inova (2009)

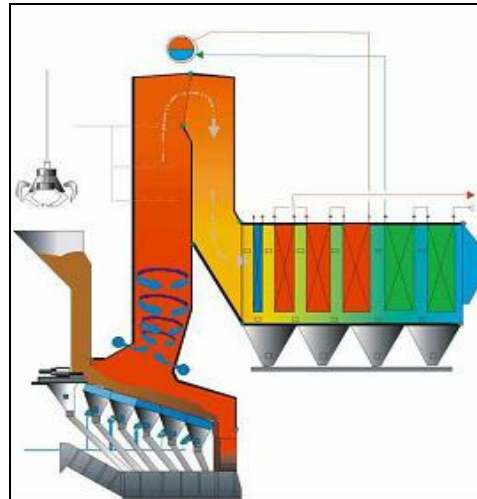
**Figura 30 - Processo Von Roll Inova**

### Processo de queima de grelhas

Este processo não necessita de um pré-tratamento dos resíduos sólidos urbanos, mas pode-se triturá-los e transformá-los em combustível derivado de resíduo (CDR). Neste processo é possível também tratar resíduos hospitalares.

Para este processo a capacidade calorífica deve variar entorno de 6 MJ/kg a 16 MJ/kg e a capacidade térmica varia de 16 MW a 100 MW por linha.

A Figura 31 ilustra o processo de queima em grelhas.



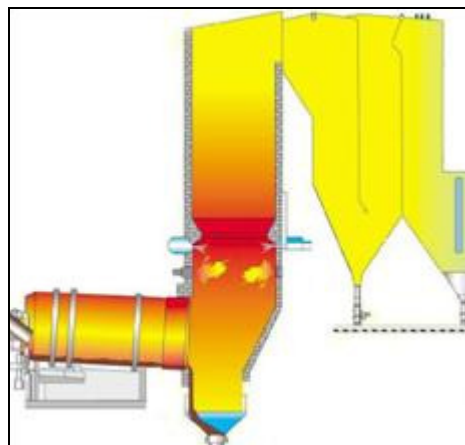
Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 31 - Processo de queima em grelhas**

### Forno Rotativo

Utilizado para tratar resíduos industriais e perigosos, no estado líquido, sólidos e chorume. A capacidade térmica varia de 5 MW a 35 MW por linha.

A Figura 32 ilustra o processo de queima em forno rotativo.



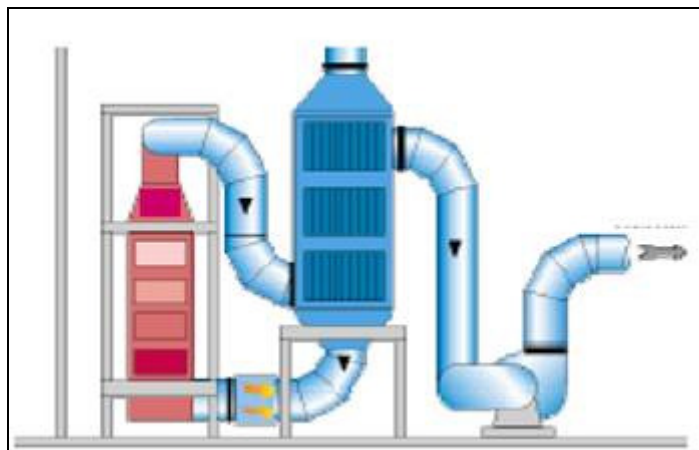
Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 32 - Processo de queima em forno rotativo**

### Processo de redução de óxidos de nitrogênio

Este processo converte óxido de nitrogênio em nitrogênio e água. Os processos utilizados são a Redução Catalítica Não Seletiva (SNCR) e a Redução Catalítica Seletiva (SCR). É um processo adaptável às necessidades do cliente para soluções específicas.

A Figura 33 ilustra o processo de redução de óxidos de nitrogênio.

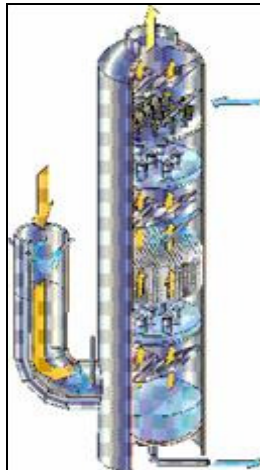


Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 33 - Processo de redução de óxidos de nitrogênio**

### Processo de tratamento para dioxinas e furanos

Este processo é composto por multiestágios, como absorção de gases, separação de poeira e remoção de dioxinas e furanos. O processo alcança baixíssimas emissões de gases. O processo também é extensivo para recuperar materiais úteis como cloreto de sódio, ácido clorídrico e metais pesados. A Figura 34 ilustra o processo de tratamento de dioxinas e furanos.

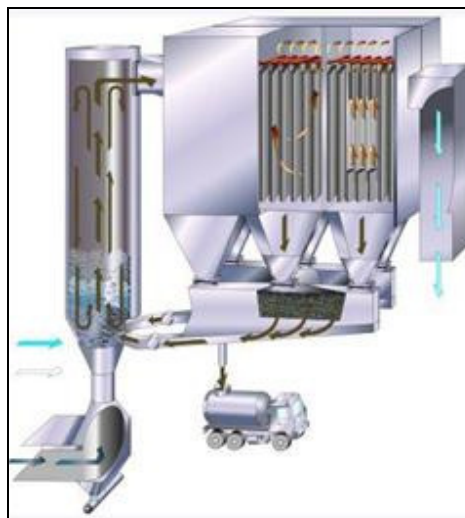


Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 34 - Processo de tratamento de dioxinas e furanos**

### **Processo de tratamento para gases ácidos e metais pesados**

Denominado sistema Turbosorp®. Este processo utiliza um reator de leito fluidizado com longo tempo de contato com o agente. A operação é bastante confiável devido à utilização de um filtro praticamente sem partes móveis. O processo também possui alta recirculação de material, pois tem proteção nos sacos dos filtros e baixo consumo de agente. A Figura 35 ilustra o processo de tratamento para gases ácidos e metais pesados.



Fonte: Von Roll Inova (2009)

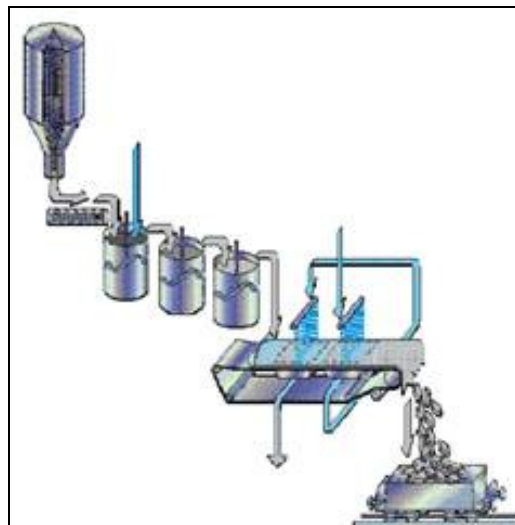
**Figura 35 - Processo de tratamento para gases ácidos e metais pesados**

## Tratamento dos resíduos sólidos do processo

Dependendo da forma de disposição ou reciclagem dos resíduos do processo diferentes tecnologias são aplicadas.

O processo geralmente compreende as seguintes etapas: lavagem neutra e lavagem ácida das cinzas volantes, solidificação dos resíduos, vitrificação dos resíduos com separação dos metais, tratamento das águas residuárias e preparação da escória para disposição em aterros ou reutilização.

A Figura 36 ilustra o processo de tratamento dos resíduos do processo de combustão.



Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 36 - Processo de tratamento dos resíduos de combustão**

A seguir, algumas fotos de Usinas da Von Roll Inova.



Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 37 - Usina WTE Riverside Resource Recovery Ltd (RRRL) – Londres (em construção)**



Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 38 - Usina East Liverpool - USA**



Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 39 - Sistema de Processo Semisseco**



Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 40 - Sistema SNCR e SCR**



Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 41 - Sistema de Processo Catalítico**



Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 42 - Tratamento final dos resíduos de processo**



## 6.4 Martin

A empresa Martin foi criada em 1925 em Munique, Alemanha, devido a estudos e pesquisas de seu fundador, Josef Martin, que inventou a queima em grelha de ação reversa. A primeira tecnologia de queima em grelha instalada para queima de resíduos sólidos municipais ocorreu seis anos após a sua fundação. Esta usina foi uma unidade piloto instalada nas proximidades de Paris.

Por volta dos anos 50 mais de 200 equipamentos de queima em grelha foram vendidos e entraram em operação em vários países da Europa. Uma usina de queima de resíduos sólidos municipais também foi instalada em São Paulo, Brasil.

Na década de 80 iniciou-se a preocupação com os gases emitidos pela queima dos resíduos e foram instalados os primeiros sistemas de limpeza de gases. A partir dos anos 90 foram criadas e instaladas diversas tecnologias de aprimoramento de processo, redução e tratamento dos resíduos de processo como o processo Martin SYNCOM, câmara com tecnologia de infravermelho para monitoramento do processo de combustão em tempo real. As plantas são adequadas para a queima de 2,5 a 8 t/h por linha de combustão.

Num processo de reestruturação a Martin passou a utilizar a queima em grelha horizontal e a tecnologia de queima em grelha SITY2000. A empresa assumiu parceria com a empresa CNIM para implantação de usinas na região da França.

### A Tecnologia Martin

Entrega dos resíduos: Os resíduos que chegam são pesados, registrados e dispostos num fosso de resíduos onde são misturados. O fosso é projetado para comportar a quantidade de resíduos entregue por vários dias, em dias úteis e horário comercial, porém a planta opera 24 horas por dia. O fosso é fechado para prevenir que poeiras e odores escapem. Adicionalmente ar é extraído continuamente para manter a pressão negativa dentro da vala. O ar extraído serve como ar de combustão para o sistema de queima.

A Figura 43 mostra o descarregamento dos resíduos no fosso.

---



Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 43 - Descarregamento dos resíduos no fosso**

Alimentação da Grelha: Os resíduos são transportados para a alimentação através de um tipo de funil com calha inclinada, como mostra a Figura 44.



Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 44 - Funil**

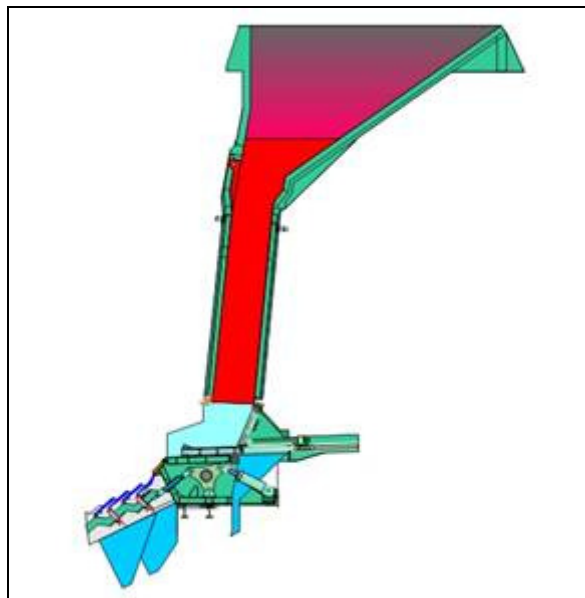
Os resíduos são empurrados pelo funil até as grelhas de combustão. Devido a altura da coluna de resíduos, ar indesejado é incapaz de entrar no sistema de combustão. O tipo de alimentação modifica a direção dos resíduos de vertical para horizontal e os resíduos, compactados dentro da calha são empurrados até a grelha em quantidades determinadas pelo sistema de combustão. A transição entre a

---

alimentação e a grelha de combustão é realizada por um sistema de inclinação ou pela borda de uma caixa de saída.

A alimentação é direcionada por um cilindro hidráulico. O sistema de controle de combustão otimiza o tempo do ciclo para alcançar velocidade uniforme na grelha de combustão.

A Figura 45 ilustra o sistema de alimentação.



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 45 - Sistema de alimentação**

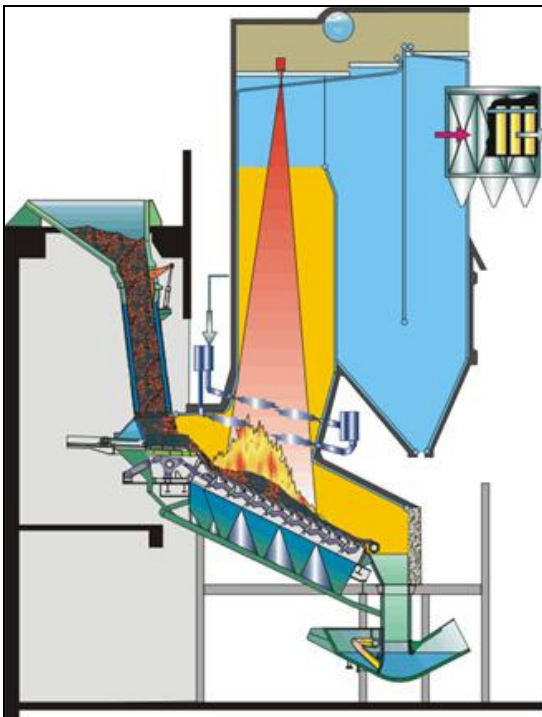
Sistema de Combustão: O sistema de combustão consiste num sistema de forno e grelha, é a essência tecnológica da planta de tratamento térmico de resíduos com geração de energia. São três sistemas diferentes de combustão que podem ser empregados: sistema de combustão convencional, sistema de combustão com recirculação dos gases de combustão e o processo SYNCOM.

Os três sistemas diferem na composição do ar de combustão fornecido:

- no sistema de combustão convencional, o ar é alimentado por baixo e por cima do sistema;

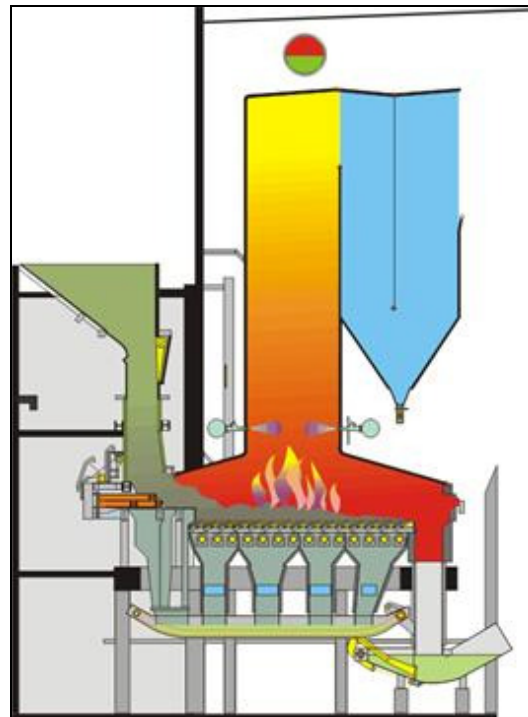
- com recirculação de gases, o ar é repostado apenas por cima juntamente com os gases de combustão recirculados após a remoção dos materiais particulados;
- no processo SYNCOM, há injeção por baixo de ar enriquecido com oxigênio, e os gases de combustão recirculam juntamente com o ar; o sistema possui controle de combustão suportado por câmara de infravermelho.

Os sistemas de queima em grelha utilizados são Grelha de Ação Reversa MARTIN (Figura 46), Grelha Horizontal (Figura 47) e SITY2000 (Figura 48).



Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 46 - Grelha de Ação Reversa**



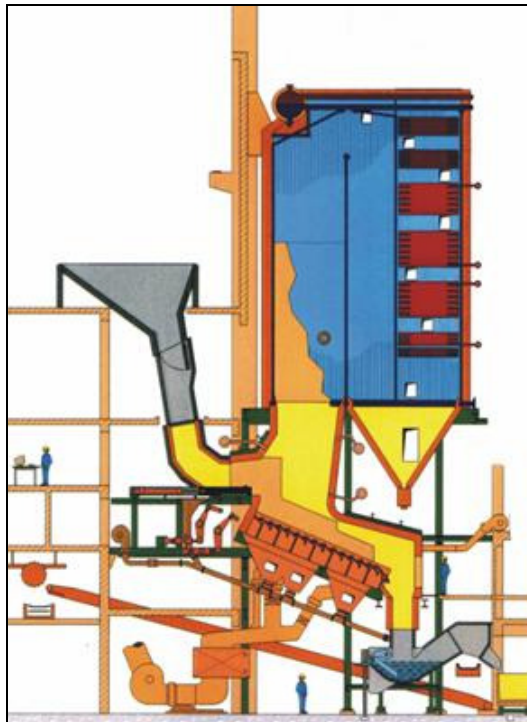
Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 47 - Grelha Horizontal**

Grelha de Ação Reversa: A grelha de ação reversa Martin possui uma inclinação de 26° na direção do transporte de resíduos e inclui vários degraus que estão equipados com grelhas na superfície.

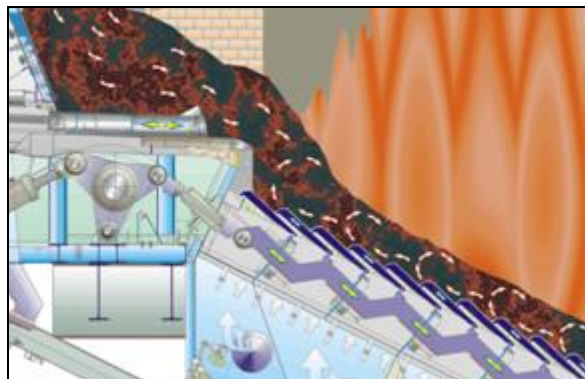
A segunda etapa é o movimento vertical, para cima e para baixo, contra a grelha de inclinação. Agitadores misturam constantemente não só o leito

combustível, mas também novos resíduos alimentados com a massa quente e vermelha já formada. A queima dos resíduos inicia já no começo da grelha e a temperatura do leito combustível atinge 1000 °C ou mais. Os resíduos são queimados e se transformam em cinzas inertes por meio da mistura e do movimento de agitação do leito combustível. A Figura 49 ilustra o movimento da grelha de ação reversa.



Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 48 - SITY2000**

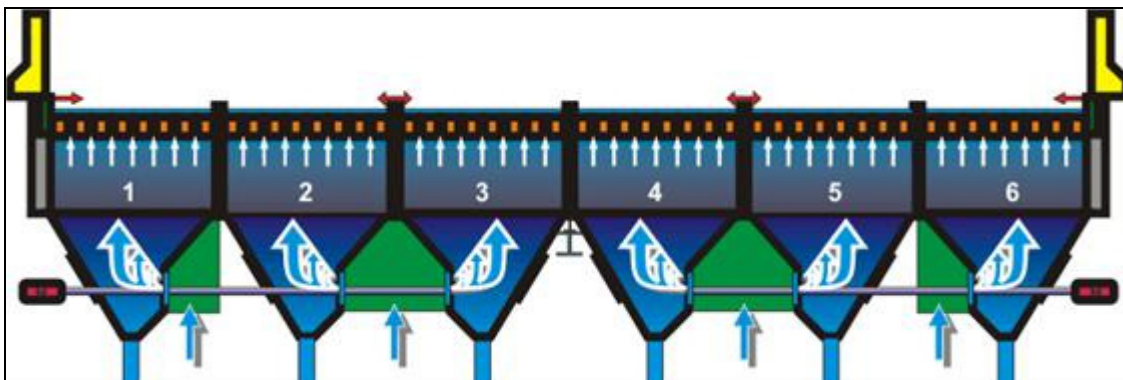


Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 49 - Movimento da Grelha Martin**

O tempo de residência dos resíduos na grelha pode ser definido independentemente da vazão. Um rolo é instalado no final da grelha para controlar a altura do leito de combustível e a camada de cinzas, este rolo é ajustado conforme as condições de combustão. A partir deste ponto as cinzas são encaminhadas para a descarga MARTIN, onde são arrefecidas e descarregadas.

Longitudinalmente, a grelha de ação reversa é subdividida em 3 a 6 zonas separadas, através das quais ar é injetado por baixo de forma controlada, conforme mostra a Figura 50. O ar injetado passa através do leito de combustível até o topo da grelha. A alta resistência aerodinâmica oferecida pela grelha e o estreitamento das lacunas por onde o ar passa promove a distribuição do ar por todo o leito de combustão. Devido o movimento da grelha ser realizado contra a direção de transporte a superfície da grelha é sempre coberta pelo leito de combustível e por uma camada de cinzas, assim, sendo protegidos contra a radiação térmica. Este fator aumenta a vida útil das grelhas.



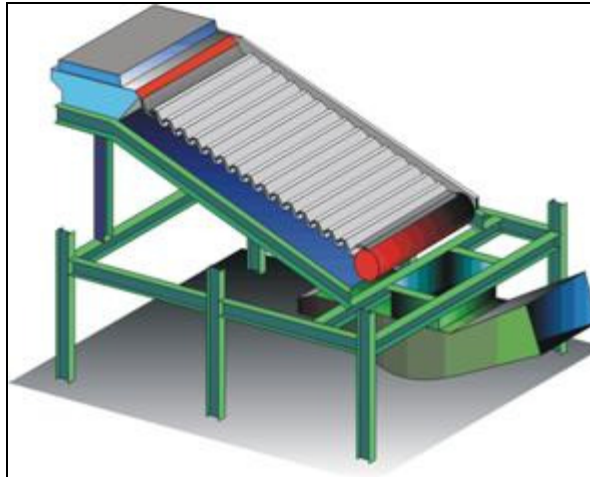
Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 50 - Injeção de ar numa grelha de seis zonas**

Ar é injetado por cima no forno acima do leito de combustível através de numerosos bicos dispostos frente um ao outro na parte da frente e na retaguarda das paredes do forno.

A turbulência dos gases de combustão gera uma excelente eficiência de mistura, elevando a temperatura a valores entre 1000 °C e 1200 °C.

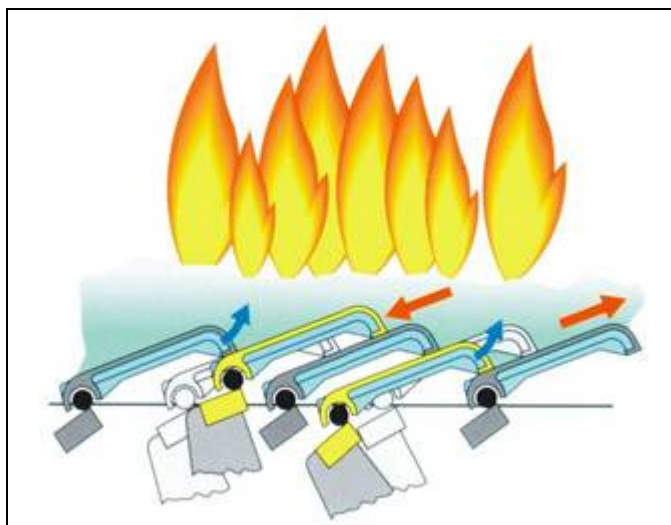
A grelha de ação reversa possui design modular, conforme mostra a Figura 51. Cada módulo contém uma grelha completa com largura variando de 1,5 m a 2,5 m. Até oito módulos podem ser dispostos em paralelo obtendo uma grelha com largura total de mais de 15 m.



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 51 - Módulo da Grelha de Ação Reversa**

Grelha Horizontal: A grelha horizontal Martin consiste na alternância na grelha entre linhas fixas e linhas em movimento. O movimento próximo das linhas da grelha gera um contra movimento, este efeito de transporte e mistura fornece uma ótima queima conforme ilustrado na Figura 52.



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 52 - Movimento da Grelha Horizontal**

A grelha horizontal também possui *design* modular. O comprimento de cada módulo é fixo, mas a largura pode variar de acordo com requisitos específicos. Cada módulo tem seu próprio fornecimento de ar, introduzido por baixo, controlado separadamente. Uma configuração típica de grelha horizontal é de três módulos na direção do fluxo de resíduos. Na Figura 53 pode-ser visualizada uma configuração de grelha horizontal.



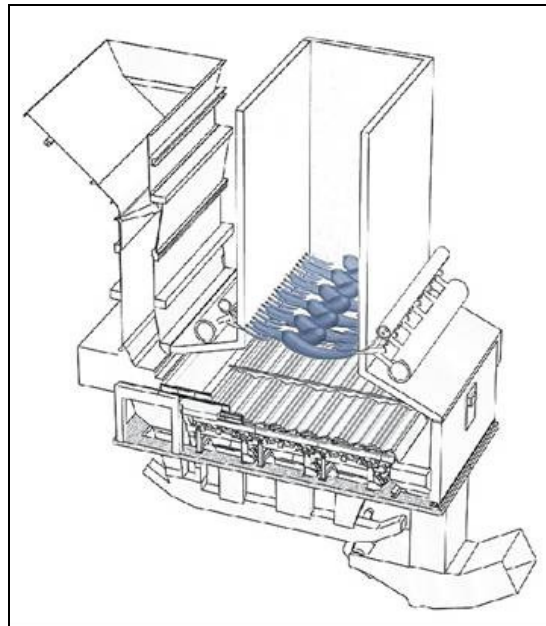
Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 53 - Configuração de Grelha Horizontal**

As propriedades dos componentes dos resíduos sólidos urbanos podem mudar com o tempo devido a mudanças na coleta seletiva, ou na separação dos resíduos, necessitando assim desenvolvimento na água de arrefecimento da grelha para alcançar um tempo de vida útil aceitável. Uma vantagem desse sistema é que o ar sendo alimentado por baixo não possui a necessidade de controle para resfriamento da grelha, ele é apenas controlado para manter a eficiência de combustão. O calor dissipado por meio do sistema de arrefecimento pode ser devolvido na íntegra para o processo.

A geometria do forno, a disposição dos tubos de entrada de ar e a escolha do material refratário são essenciais para garantir uma boa eficiência de queima. A Figura 54 ilustra uma geometria de forno recomendável.



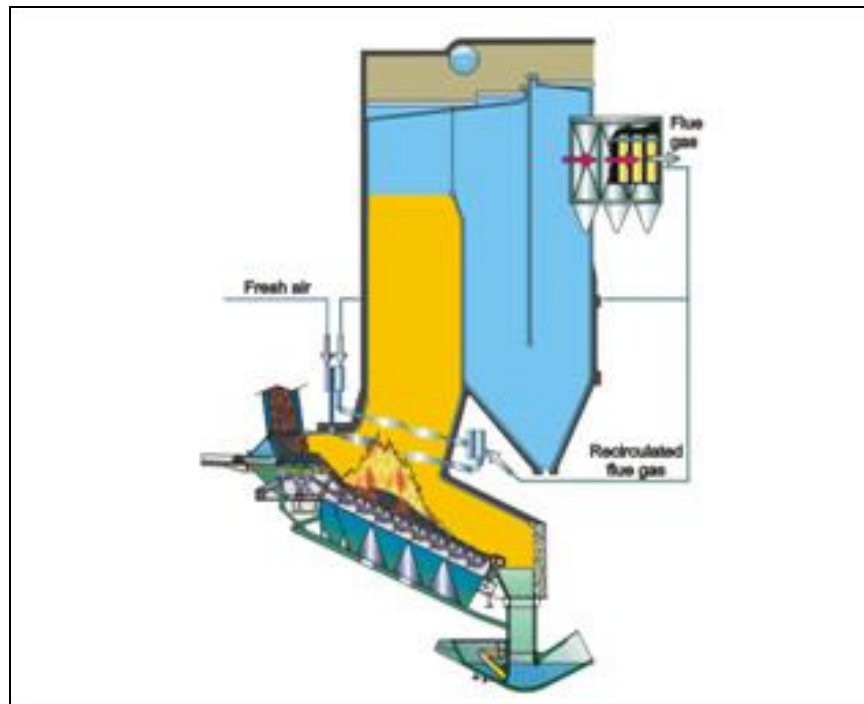


Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 54 - Geometria de forno**

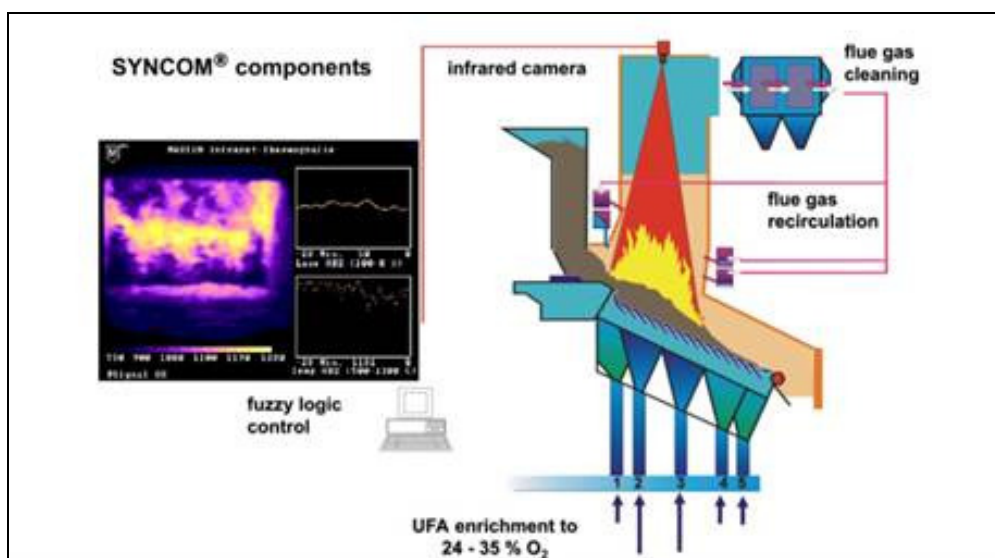
Esse sistema não só minimiza os poluentes relacionados com a combustão como também aumenta a eficiência térmica da planta e reduz a emissão de gases para a atmosfera. Os gases de combustão recirculados são injetados no forno por bicos separados, se necessário uma segunda combustão, ar novo é injetado por outros bicos. Os condutos de recirculação são isolados a fim de evitar a condensação de compostos corrosivos nas paredes e manter mínima a perda de calor. A Figura 55 ilustra o processo de queima com recirculação dos gases de combustão.

Processo SYNCOM: O processo SYNCOM consiste na injeção por baixo de ar enriquecido com oxigênio e recirculação dos gases de combustão. Este sistema possui controle de combustão através de uma câmara de infravermelho. A Figura 56 ilustra o processo SYNCOM.



Fonte: Martin Gmbh (2009)

Figura 55 - Sistema de queima com recirculação dos gases de combustão



Fonte: Martin Gmbh (2009)

Figura 56 - Sistema SYNCOM

A Martin desenvolveu a tecnologia SYNCOM, que faz o uso dos seguintes componentes:

- sistema da base da grelha utiliza o sistema de grelha com ação reversa;
- ar injetado é enriquecido com oxigênio;
- sistema de controle da combustão utiliza tecnologia de infravermelho;
- sistema de injeção de ar com 4 linhas de bicos de injeção;
- recirculação dos gases de combustão.

As vantagens deste sistema são a maior uniformidade de combustão, significativa redução das quantidades de CO presentes nos gases de combustão, temperatura do leito de combustão, na zona de combustão, de aproximadamente 1000 °C ou mais e o fluxo dos gases de combustão se reduz em aproximadamente 35%.

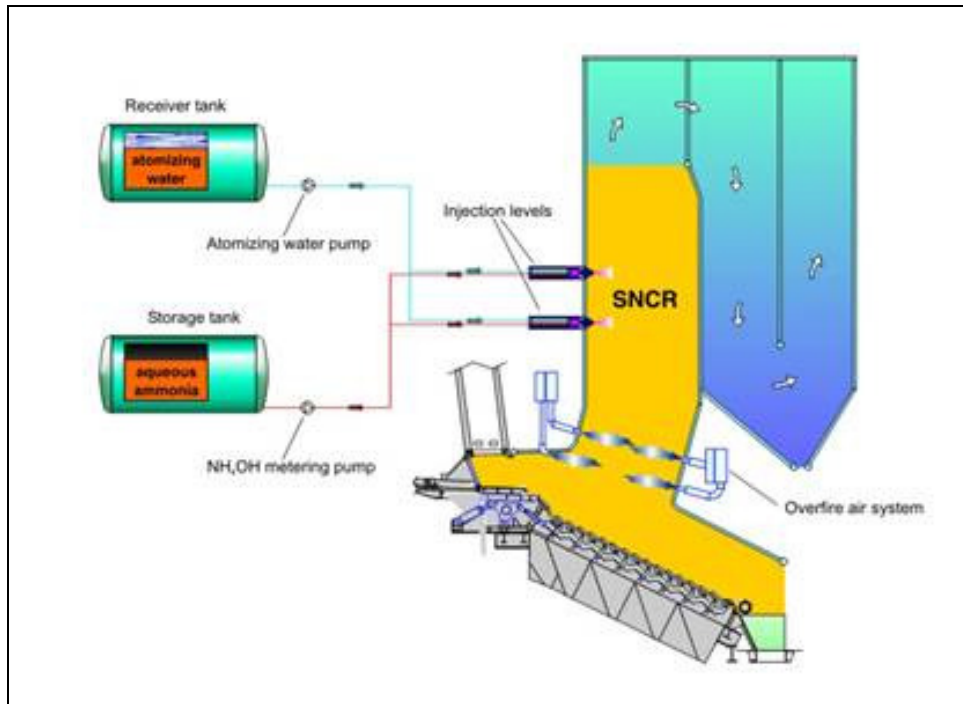
Processo SNCR: A Martin desenvolveu um Sistema de Redução Não Catalítica (SNCR) para reduzir os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) presentes nos gases de combustão em Nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e água pela injeção de um agente redutor, amônia aquosa ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), dentro do forno.

O sistema garante valores de emissão de  $\text{NO}_x$  de no máximo 70 mg/Nm<sup>3</sup>.

A Figura 57 ilustra o processo SNCR.

Os componentes desse processo são uma combinação de requisitos técnicos e econômicos. Precipitadores eletrostáticos, filtros de manga, absorsores em *spray*, purificadores, carvão ativado, sistemas de redução catalítica e não catalítica são exemplos de equipamentos a serem utilizados em várias combinações.

---



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 57 - Processo SNCR**

As plantas construídas pela Martin operam com emissão de poluentes com valores a seguir dos limites estipulados.

A Figura 58 ilustra o processo de limpeza dos gases de combustão.



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 58 - Limpeza dos gases de combustão**

A seguir, algumas fotos de Usinas construídas pela Martin e seus equipamentos.



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 59 - Usina em Amsterdã, Holanda**



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 60 - Usina na Alemanha**



Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 61 - Usina na Itália**



Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 62 - Usina em Milão, Itália**



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 63 - Grelha de Ação Reversa**



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 64 - Grelha Horizontal**



Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 65 - Sistema de recirculação de gases**

## 6.5 Energy Products of Idaho

A Energy Products of Idaho é uma empresa americana, fundada em 1973, que tem por objetivo o desenvolvimento de projetos e soluções na área de meio ambiente, em especial, usinas para o processamento de detritos municipais, hospitalares e industriais utilizando a tecnologia de leito fluidizado.

### A Tecnologia Energy Products of Idaho

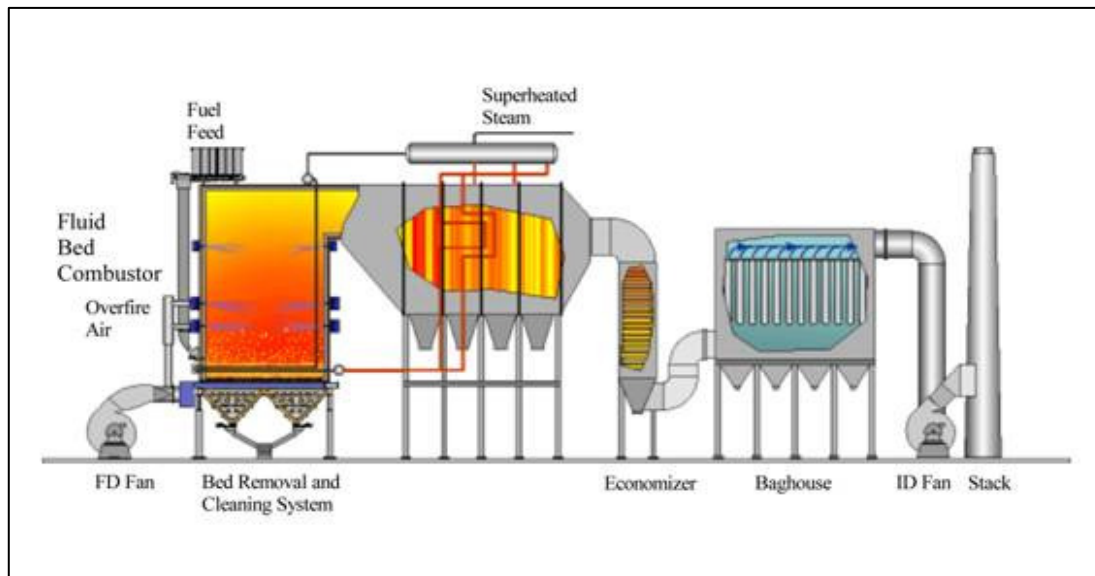
O estado da arte da tecnologia Energy Products of Idaho inclui sistema de combustão em leito fluidizado, sistema de gaseificação em leito fluidizado, caldeira de leito fluidizado, equipamentos de transferência de calor, sistema de distribuição

---



de fluido térmico, sistemas de limpeza de gases, sistema de redução seletiva não-catalítica para redução de  $\text{NO}_x$ , sistema de redução de  $\text{SO}_x$ , entre outros sistemas.

A Figura 66 ilustra um sistema de combustão em leito fluidizado incluindo todas as etapas necessárias para a geração de energia e limpeza dos gases.

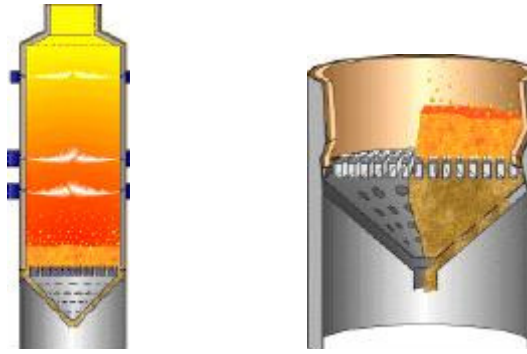


Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 66 - Sistema completo de combustão em leito fluidizado**

## Combustão em Leito Fluidizado

Esse sistema utiliza como recheio um material parecido com areia, suspenso, dentro de uma coluna de ar com a finalidade de queimar diversos tipos e classes de combustível. O uso dessa tecnologia em processos nos quais os combustíveis possuem alta umidade gera uma significativa melhora na eficiência de queima. A Figura 67 ilustra o mecanismo de combustão em leito fluidizado.



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 67 - Combustão em leito fluidizado, coluna inteira e detalhe inferior**

A Energy Products of Idaho possui patenteado um sistema de leito reciclado. Essa tecnologia é a única a oferecer um levantamento uniforme do leito, com ar frio integrado, limpeza automática do leito e reinjeção do mesmo. Este sistema tem a vantagem de operar com quantidades significativas de matéria-prima. Em sistemas de grelha materiais com baixíssimo poder calorífico, as cinzas e as escórias podem causar significativos problemas que exigem uma parada programada. No leito fluidizado esses materiais podem chegar num ponto de fluidização que permite a formação de clínquer. Nesse sistema um desligamento também é necessário para limpar o acúmulo.

A turbulência gerada pelo vapor no incinerador combinada com um tumultuoso efeito de lavagem gera uma combustão completa e uniforme. Esses fatores são a chave para a máxima eficiência térmica, mínima carbonização e controle da emissão de gases. A alta eficiência da combustão em leito fluidizado é marcada particularmente por solucionar o problema dos combustíveis com baixo poder calorífico e alta umidade característica. Neste sistema são alcançadas altas eficiências de combustão. Numa unidade típica o carvão queima dentro do incinerador a porcentagem superior a 99%.

O sistema da Energy Products of Idaho opera com os mais diversos combustíveis: resíduos da agricultura, resíduos sólidos municipais, resíduos de madeira, lodos industriais e municipais, plásticos, pneus e carvão. A combustão em leito fluidizado também é eficiente para combustíveis de variada consistência. Esta tecnologia demonstra habilidade de queimar essa gama de diferentes matérias-

---

primas num mesmo incinerador. Um exemplo é a San Joaquin Valley Energy Project, unidade que opera a um longo tempo com 68 diferentes tipos de resíduos da agricultura, resíduos urbanos e de madeira. A Energy Products of Idaho também patenteou um sistema de limpeza do leito, esse sistema remove os materiais não combustíveis do leito, a empresa também possui uma unidade para queimar esses resíduos problemáticos utilizando uma quantidade mínima de processos.

As emissões gasosas da combustão em leito fluidizado são baixíssimas quando comparadas com tecnologias convencionais. As baixas temperaturas de combustão com o baixo excesso de ar no leito reduz a formação de certas substâncias como o  $\text{NO}_x$ . A alta eficiência na combustão resulta em emissões gasosas com baixa concentração de CO. Emissões como  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$  são reduzidas no próprio leito pela injeção de calcário e amônia.

Essas funcionalidades aliadas à vasta experiência da Energy Products of Idaho, à variedade de matéria-prima e às exigentes normas de qualidade do ar incluem seis plantas em operação na Califórnia. Essa tecnologia é consistentemente aceita por agências reguladoras ambientais como a Best Available Control Technology (BACT).

Devido a baixas temperaturas de combustão as cinzas geradas no processo não possuem materiais tóxicos, podendo assim ser utilizadas como matéria-prima em outros processos, como, por exemplo, na fabricação de cimento.

Esta tecnologia de combustão em leito fluidizado vem demonstrando grandes habilidades em operar com diferentes tipos de carga.

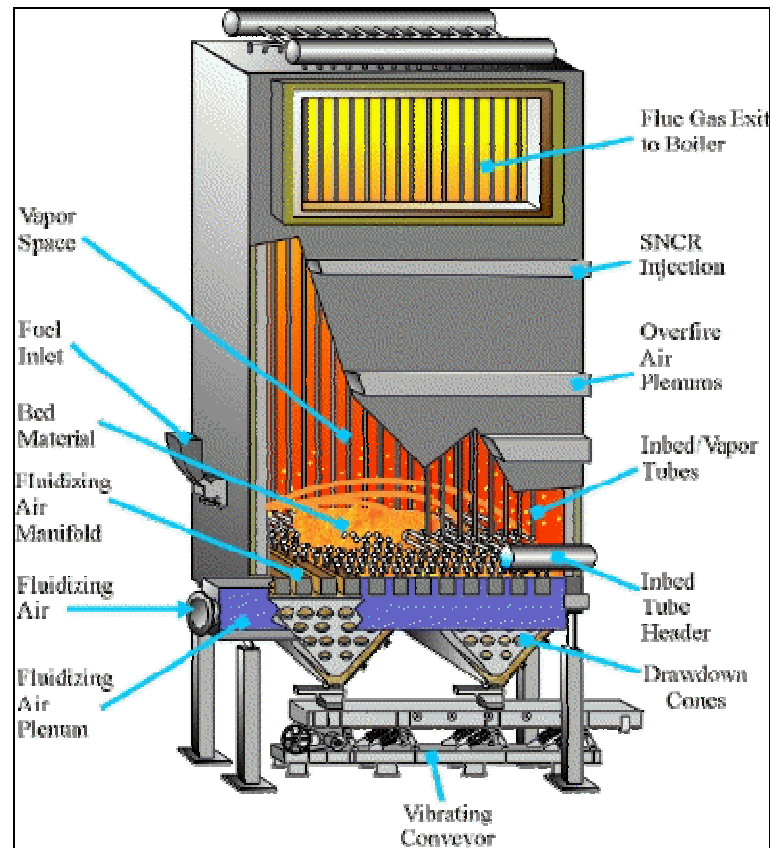
### **Caldeira com leito fluidizado**

O sistema de caldeira com leito fluidizado converte biomassa e outros materiais combustíveis líquidos, sólidos ou vapor em energia.

A característica deste sistema é que ele combina a oxidação térmica em leito fluidizado com avançadas tecnologias de transferência de calor para gerar energia limpa e eficiente através do vapor gerado.

---

A Figura 68 ilustra a caldeira de combustão em leito fluidizado.



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

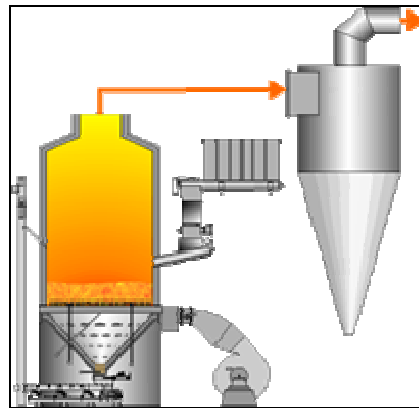
**Figura 68 - Caldeira com leito fluidizado**

### **Gaseificação em leito fluidizado**

Este sistema converte produtos de biomassa em gás combustível que pode ser queimado em uma caldeira, forno, turbina a gás ou outro sistema.

Na gaseificação em leito fluidizado o material do leito pode ser areia, carvão ou uma combinação dos dois. O meio fluidizante é usualmente ar, às vezes oxigênio ou vapor. O combustível é alimentado no sistema por cima do leito ou diretamente dentro dele dependendo do tamanho e densidade do combustível e de como ele afeta a velocidade do leito. Durante a operação a temperatura é mantida entre 1000 °C e 1800 °C.

A Figura 69 ilustra o sistema de gaseificação em leito fluidizado.



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

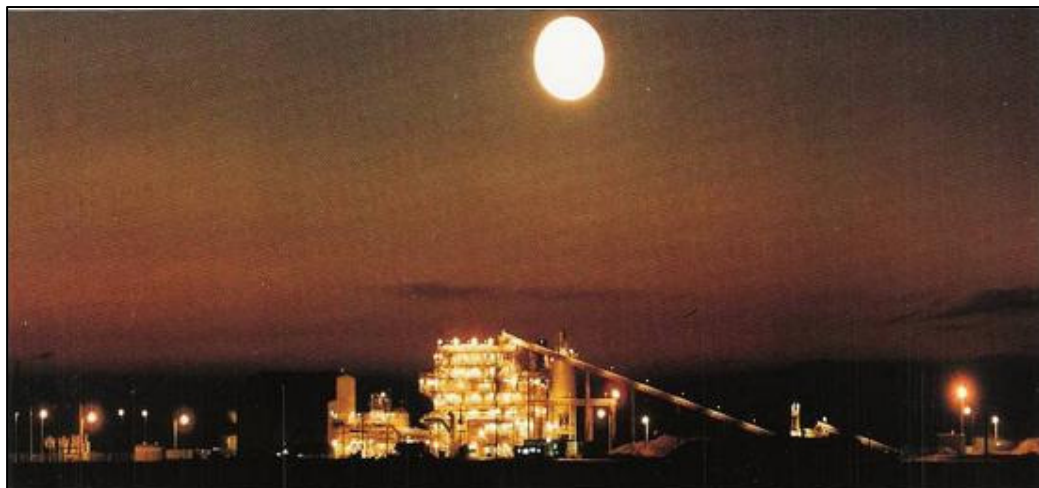
**Figura 69 - Gaseificação em leito fluidizado**

A seguir, algumas fotos de Usinas construídas pela Energy products of Idaho e seus equipamentos, processos e materiais.



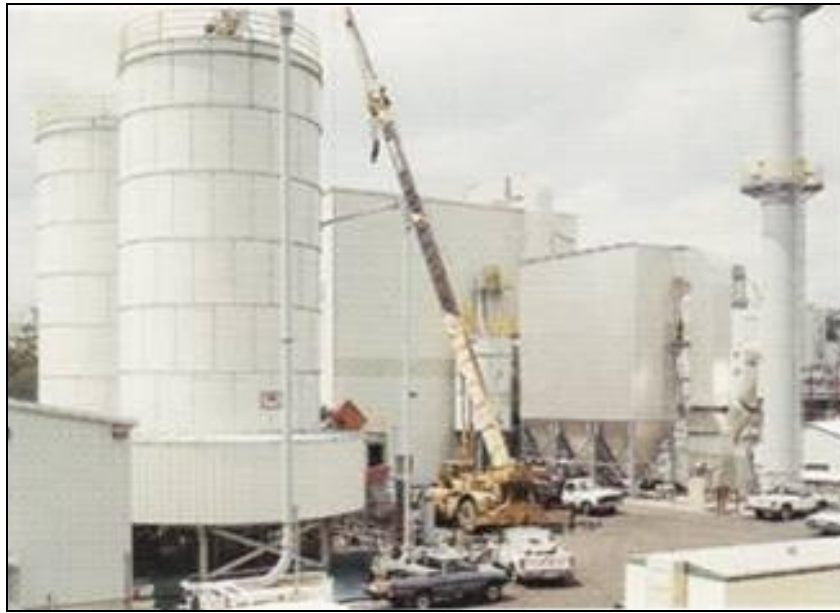
Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 70 - Usina em Spokane, Washington, EUA**



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 71 - Usina em Madera, Califórnia, EUA**



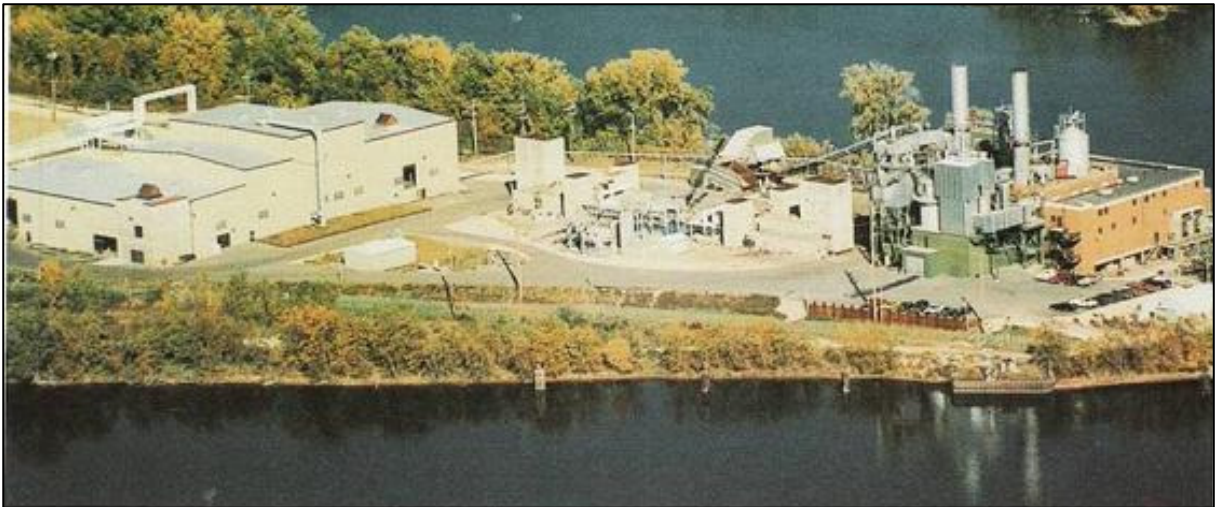
Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 72 - Usina em Brevard, Carolina do Norte, EUA**



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 73 - Usina em Brevard, Carolina do Norte, EUA**



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 74 - Usina em Lacrosse, Wisconsin, EUA**



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 75 - Usina em Ravena, Itália**





Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 76 - Usina na Pensilvânia, EUA**



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 77 - Resíduo final inerte**



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 78 - Fosso para despejo dos detritos sólidos urbanos**



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 79 - Triturador capaz de processar qualquer tipo de resíduo**

## 6.6 Foster Wheeler

A Foster Wheeler é um grupo internacional de engenharia e construção e fornecedora de equipamentos de energia. Entre outros produtos, a companhia oferece estado da arte de caldeiras para geração de calor e energia elétrica. Nos últimos 30 anos, a Foster Wheeler forneceu mais de 300 caldeiras de leito fluidizado circulante, com capacidade de geração entre 7 MW e aproximadamente 1000 MW. Todas as caldeiras compartilham do mesmo princípio de fluidização circulante, contudo, dependendo do combustível, diferenciam-se em *design* e operação.

### A Tecnologia Foster Wheeler

A tecnologia Foster Wheeler emprega uma caldeira de leito fluidizado circulante na queima de CDR e produção de vapor, para geração de energia elétrica. A caldeira de leito fluidizado circulante é composta de quatro seções: fornalha, ciclone, área de passagem livre (*“the idle pass”*) e a área de recuperação de calor.

Na caldeira, não há presença de partes móveis, o que resulta em uma maior disponibilidade, quando comparada a caldeiras convencionais. Os sistemas de alimentação de combustível e de remoção de cinzas são localizados externamente à caldeira, de modo que manutenções nesses sistemas podem ser realizadas enquanto a caldeira opera a plena capacidade.

Para evitar corrosão e erosão, a fornalha é revestida com carbetto de silício. O revestimento promove excelente resistência à abrasão e ao ataque químico com relativamente alta condutividade térmica. Os superaquecedores são construídos com Inconel 625.

Ar primário é fornecido por um ventilador centrífugo de corrente forçada. O ar inicialmente é aquecido passando por uma serpentina com vapor e então introduzido pela parte inferior da fornalha. O ar entra no leito fluidizado, passando por uma

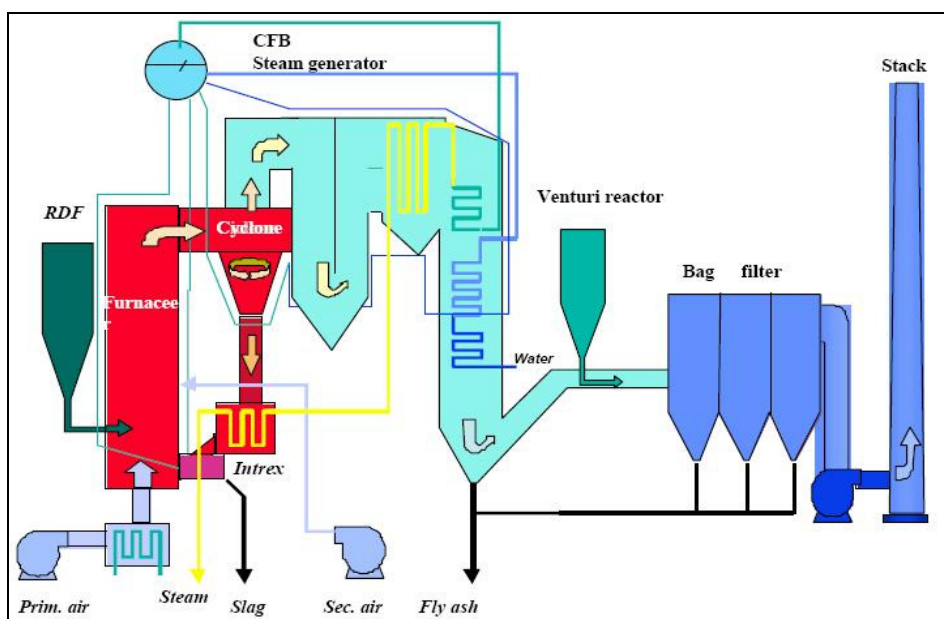
---

grade plana de distribuição de ar. Ar secundário de um ventilador dedicado é injetado na fornalha em dois níveis acima do leito para atingir um arranjo uniforme de combustão. A temperatura de combustão é de 850 °C a 900 °C.

Os gases e sólidos deixam a fornalha passando pelo ciclone, onde os sólidos maiores são separados da corrente gasosa que deixa o ciclone pelo topo. O ciclone singular é completamente resfriado com vapor saturado, o que controla as variações térmicas, torna a operação confiável e reduz o tempo de partida. Os sólidos separados no ciclone retornam para a fornalha, o que promove uma boa queima do carbono.

A Foster Wheeler desenvolveu um trocador de calor integrado (INTREX®), que utiliza os sólidos aquecidos retornados do ciclone separador ou diretamente da fornalha para a troca de calor. O projeto do trocador de calor integrado proporciona uma área de transferência de energia mais eficiente, eficiente controle da transferência de calor, uniformidade na temperatura da fornalha e minimização dos efeitos potenciais de erosão e corrosão.

A Figura 80 a seguir, apresenta uma representação do processo Foster Wheeler de combustão em leito fluidizado circulante.



Fonte: Foster Wheeler (2009)

**Figura 80 - Representação do processo de combustão em leito fluidizado circulante**

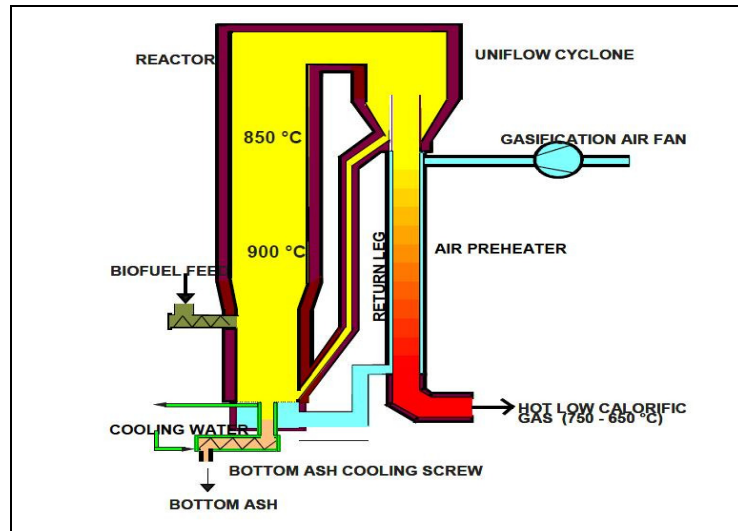
## **A tecnologia Foster Wheeler de gaseificação**

O sistema atmosférico de gaseificação em leito fluidizado circulante desenvolvido pela Foster Wheeler é relativamente simples. Ele consiste de um reator de gaseificação, um ciclone para separar o material do leito circulante do gás, e um tubo para retorno do material circulante para a parte inferior do gaseificador. Todos esses componentes são revestidos com materiais refratários. A partir do ciclone, o gás aquecido produzido flui até o pré-aquecedor de ar localizado abaixo do ciclone.

O ar de gaseificação é soprado por um ventilador de alta pressão através de uma grade localizada no fundo do reator, abaixo do leito de partículas. A velocidade do ar circulante é alta o suficiente para fluidizar as partículas e carregar algumas delas para o ciclone, onde a maior parte é separada do gás e retorna para a parte inferior do gaseificador. Tanto gás como sólidos são recuperados pelo fundo do reator.

Os sólidos circulantes contêm carbono que é queimado com o ar de fluidização, gerando a energia requerida para o processo de pirólise e subseqüentes, mas endotérmicas, reações de gaseificação. O material circulante também serve como condutor de calor e estabiliza a temperatura do processo. As cinzas são acumuladas no fundo do gaseificador e removidas pelo fundo por um parafuso resfriado por água. A Figura 81 apresenta os componentes principais do gaseificador de leito fluidizado circulante.

---



Fonte: Foster Wheeler (2009)

**Figura 81 - Representação do processo de gaseificação em leito fluidizado circulante**

A seguir, algumas fotos de Usinas com tecnologia Foster Wheeler.



Fonte: Foster Wheeler (2009)

**Figura 82 - Planta Lomellina Energia em Parona, Itália**



Fonte: Foster Wheeler (2009)

**Figura 83 - Usina Norrsundet, Finlândia**



Fonte: Foster Wheeler (2009)

**Figura 84 - Usina Portucel, Portugal**



Fonte: Foster Wheeler (2009)

**Figura 85 - Usina Lahti, Finlândia**



Fonte: Foster Wheeler (2009)

**Figura 86 - Usina Electrabel, Bélgica**





Fonte: Foster Wheeler (2009)

**Figura 87 - Usina Corenso, Finlândia**

## **7 COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO TÉCNICA E AMBIENTAL DOS PROCESSOS IDENTIFICADOS**

Na prática, os processos identificados como comercialmente disponíveis e potencialmente adotáveis para a implantação de Plantas de Incineração de Resíduos Urbanos podem ser divididos em duas rotas tecnológicas principais: Queima em Grelhas e Queima em Leito Fluidizado, sendo que esta última poderá seguir dois diferentes conceitos, que são leito borbulhante e leito circulante, em função do porte da instalação.

Quatro variáveis operacionais determinam as principais diferenças de comportamento de desempenho ambiental entre estas rotas tecnológicas.

- pressão de fornalha;
  - temperatura de combustão;
-

- velocidade superficial dos gases na caldeira;
- grau de preparação dos resíduos para a incineração.

## 7.1 Pressão de fornalha

As plantas de tratamento térmico que empregam a combustão em grelhas operam em depressão, ou seja, com pressão de fornalha levemente inferior à atmosférica. Com isso, simplificam-se os sistemas de alimentação de RSU para o incinerador e retirada de cinzas, bem como se tornam remotas as possibilidades de vazamentos de gases em qualquer ponto da planta, garantindo a exaustão destes somente pela chaminé, após todos os tratamentos necessários à remoção de gases e partículas poluentes.

Por outro lado, plantas que operam segundo o princípio de combustão em leito fluidizado, por trabalhar com pressões positivas (levemente acima da atmosférica), requerem sistemas de alimentação de combustível e retirada de cinzas mais sofisticados, tendo em vista conferir estanqueidade à fornalha e impedir a fuga de gases de combustão, que se trata de um risco inerente a plantas de combustão fluidizada.

Para garantir boa performance destes sistemas de alimentação e/ou retirada de sólidos, o resíduo a ser incinerado requer preparação prévia, tendo em vista controlar natureza e tamanho das partículas de resíduos a serem incinerados e minimizar os riscos operacionais.

Esta diferença entre os dois conceitos de tratamento térmico determina uma maior complexidade das plantas de leito fluidizado e, conseqüentemente, investimentos específicos superiores aos normalmente observados em plantas que empregam princípio de queima em grelhas.

---

## 7.2 Temperatura de combustão

Enquanto a combustão em grelhas móveis se realiza em temperaturas entre 1200 °C e 1500 °C, as plantas que operam em leito fluidizado promovem a combustão em temperaturas que oscilam entre 800 °C e 1000 °C.

Para resíduos de mesma natureza, a combustão em leito fluidizado tende a ser mais eficiente, por promover um contato mais íntimo e intenso entre combustível (resíduo sólido urbano) e comburente (ar). Por outro lado, a operação em temperaturas de combustão mais baixa produz cinzas que tendem a ser mais agressivas ao meio ambiente, devido ao fato de que a incineração não confere grau de vitrificação às matérias minerais presentes que, somente calcinadas, permanecem com reatividade elevada e mais susceptíveis a processos de lixiviação.

Neste aspecto, cinzas resultantes da queima em grelha, embora possam ter um maior teor de incombusto (carbono), apresentam elevado grau de vitrificação das matérias minerais e, portanto, um maior grau de inertização, sendo menos agressivas ao meio ambiente e, por isso, passíveis de disposição mais simples ou até de utilização como base para pavimentação, a exemplo do que é feito em muitos países.

Outra consequência operacional importante decorrente das diferenças da temperatura de combustão entre estas duas tecnologias é a formação de NO<sub>x</sub>. A temperatura mais baixa empregada na combustão em leito fluidizado induz à menor formação de NO<sub>x</sub> e, conseqüentemente, resultando em menor consumo de reagentes e/ou catalisadores nos sistemas de denitrificação dos gases (DENO<sub>x</sub> Systems).

Em princípio, plantas baseadas em ambas as tecnologias atendem sem muita dificuldade aos padrões de emissão de NO<sub>x</sub> consagrados. O maior reflexo desta diferença é de ordem econômica, já que os custos de investimento e operação das plantas de combustão em leito fluidizado em relação a sistemas DENO<sub>x</sub> são menores do que os verificados em plantas de queima em grelha.

---

### 7.3 Velocidade superficial dos gases na caldeira

A velocidade superficial é definida pela razão entre a vazão de gases na condição de pressão e temperatura de operação da fornalha e a área seccional desta.

Enquanto a velocidade superficial em fornalhas que empregam grelhas móveis chega a valores máximos da ordem de 3,0 m/s, situando-se em média entre 1,5 e 2,0 m/s, em fornalhas de incineradores que empregam a tecnologia de combustão em leito fluidizado esta velocidade oscila situar-se-á entre 1,5 e 2,0 m/s nos chamados leitos borbulhantes (*bubbling beds*) – utilizados em incineradores de pequeno porte (até 20MW) - e entre 6,0 e 8,0 m/s nos leitos circulantes (*circulating fluidized beds*) – adotados em unidades de maior porte (> 30MW).

Os principais reflexos destas diferenças de velocidade superficial ocorrem nas taxas de arrastamento de partículas, significativamente maiores nas unidades que empregam a tecnologia de combustão em leito fluidizado, em função de velocidades superficiais elevadas e da preparação do resíduo sólido urbano para a queima, que promove a redução do tamanho dos materiais alimentados no sistema de tratamento térmico.

Com isso, as plantas de combustão em leito fluidizado devem ter seus sistemas de coleta de particulados (precipitadores eletrostáticos ou filtros de mangas) mais robustos e eficientes em comparação aos empregados para coleta de partículas da queima em grelhas.

Por este motivo há maior risco de emissão de partículas de incineradores que empregam o princípio da combustão fluidizada e que, não esqueçamos, são partículas sólidas que tendem a ser mais reativas em função da temperatura em que foram incineradas (entre 800 °C e 1000 °C).

---

## 7.4 Preparação dos resíduos para o tratamento térmico

Há diferenças bem significativas entre as necessidades de preparação para o tratamento térmico quando comparados processos que empregam queima em grelhas móveis e leito fluidizado.

A queima em grelhas, por sua maior rusticidade, não exige maiores cuidados com o condicionamento do resíduo sólido urbano, sendo a maior preocupação os teores de matéria orgânica úmida, que reduz o poder calorífico do resíduo e pode chegar a situações que requeiram o uso de combustível auxiliar para a sustentação da queima. Desta forma, a queima em grelhas se reveste de simplicidade conceitual e operacional.

Por outro lado, a mecânica da combustão em leito fluidizado e a pressão positiva na fornalha determinam a necessidade de projetos mais sofisticados e dimensionamento mais apurado tendo em vista garantir a confiabilidade operacional dos incineradores.

Para esta garantia, as especificações do resíduo sólido urbano a ser alimentado nos incineradores são mais rígidas em termos de granulometria e composição, tendo em vista ao bom comportamento deste em moegas e alimentadores/extratores da fornalha.

Resumindo, a escolha entre os dois conceitos será determinada pela natureza do resíduo sólido urbano, seu ciclo de tratamento (coleta, triagem e destinação das cinzas) e as restrições locais.

## 7.5 Conclusão

De um modo geral, todos os fabricantes que ofertam comercialmente plantas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos são tecnicamente aptos a

---

oferecer garantias de desempenho ambiental, tendo em vista atender à legislação ambiental a que deverá ser submetida a planta ofertada.

A opção por uma ou outra alternativa tecnológica vai depender do ciclo de tratamento, ou seja, do conjunto de informações do cenário final da Usina, incluindo as características finais do resíduo a ser tratado termicamente, em função de seu condicionamento na origem, forma de coleta, sistema de triagem, classificação e outras formas de tratamento, do porte da Usina e o seu número de módulos, assim como do uso final da energia térmica (vapor /energia elétrica), que em conjunto definem a seleção final de tecnologia, assim como da eficiência e custo global das instalações.

## **8 SELEÇÃO DA REGIÃO DE IMPLANTAÇÃO**

Com o objetivo de selecionar a região foco do estudo de viabilidade da usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica definiu-se uma série de critérios que utilizados em uma análise multicriterial permitiu a seleção final da região.

O capítulo a seguir apresenta um resumo do Estudo “Avaliação de região em Minas Gerais para instalação de usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos – UAER, segundo critérios da ENGEBIO” realizado pela FEAM com o suporte e aval da ENGEBIO que se encontra no Anexo A.

---

## 8.1 Critérios

Foram elaborados pela ENGEBIO e complementados pela Equipe da FEAM uma série de Critérios abordando os aspectos do Meio Ambiente – Antrópico, Físico e Biótico. A Tabela 5 apresenta o conjunto dos critérios utilizados.

**Tabela 5 - Critérios para a seleção da região**

<b>A) Antrópico</b>	
<b>A.1) Social</b>	
<b>Critério</b>	<b>Justificativa</b>
1. Disponibilidade de mão de obra de operação	A disponibilidade e/ou proximidade de mão de obra qualificada (técnicos em mecânica) é um item necessário para a operação.
2. Sistemas de Coleta / Triagem de resíduos	Nível de coleta existente na região é fundamental para a qualidade dos resíduos (combustível) da Usina Térmica. A existência na região de sistemas de recuperação de recicláveis será, portanto, prejudicial (seja coleta informal, centros de triagem, coleta seletiva municipal, entre outros).
3. Destinação final de resíduos urbanos	Consideração e priorização de regiões onde ainda não haja soluções satisfatórias para destinação dos resíduos urbanos.
4. População	Em regiões onde as condições socioeconômicas são desfavoráveis ou precárias, a implementação do empreendimento pode alavancar melhorias.
5. Saúde Pública	As regiões impactadas por questões de saneamento público insuficiente são prioritárias, pois a solução adequada para a destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos pode melhorar o índice de salubridade da região.
<b>A.2) Econômico</b>	
<b>Critério</b>	<b>Justificativa</b>
6. População	Densidade populacional intermunicipal com um mínimo de 350 mil habitantes é necessária, pois define o porte / viabilidade da Usina.
7. Nível Socioeconômico	Em uma população com nível socioeconômico mais elevado implica em um maior índice de geração de resíduos de maior poder calorífico.
8. Custo de Transporte (Veículos coletores)	O custo de transporte (km/t) dos veículos coletores deve ser calculado. Deve-se considerar um raio econômico de no máximo 100 km para o transporte de resíduos urbanos.
9. Custo de Transporte (Veículos transbordo)	A existência de estações de transporte e transbordo dentro do raio de 100 km, pois diminui os custos iniciais de investimento. Calcular os custos de R\$ por t/km de veículo de transbordo e veículo coletor.

<b>A.2) Econômico</b>	
<b>Critério</b>	<b>Justificativa</b>
10.Acesso intermunicipal	Regiões onde existe infraestrutura para o acesso intermunicipal com o objetivo de transportar os resíduos até a Usina são essenciais ao custo de transporte.
11.Localização central da Usina	A microlocalização da Usina deve ser central em relação ao acesso aos demais municípios com o objetivo de diminuir custos de transporte.
12.Municípios do Sistema x Localização central da Usina	Municípios que farão parte do Sistema devem estar em um raio máximo de 100 km da Usina.
13.Resíduos da Região	A existência de outros resíduos com poder calorífico na região deve ser estudada, pois pode representar uma melhoria na eficiência global do sistema de tratamento térmico.
<b>A.3) Político Institucional</b>	
<b>Critério</b>	<b>Justificativa</b>
14.Institucional 1	Região onde eventualmente já exista o conceito de consórcio intermunicipal pode facilitar na implantação do empreendimento.
15.Institucional 2	Efeito de demonstração (existência de região com vocação para um projeto-modelo que sirva como agente promotor) pode ser um critério político.
16.Institucional 3	Variáveis políticas facilitadoras (exemplos: bom relacionamento, pressão do Ministério Público) podem facilitar a implementação de sistemas congêntos.
17.Desapropriação	A existência de áreas viáveis à desapropriação deve ser considerada.
18.Zoneamento municipal e urbano	Devem-se observar as restrições de usos e ocupação de regiões, de acordo com o zoneamento municipal e urbano. Caso exista, deve-se considerar o Plano Diretor Municipal.
<b>B) Físico</b>	
<b>Critério</b>	<b>Justificativa</b>
19.Área impactada	Áreas já degradadas ambientalmente podem ser atrativas para utilizar a usina como projeto de recuperação da área. (Ex: na Espanha a usina de tratamento térmico aproveitou área de mineração já prejudicada sob o ponto de vista ambiental).
20.Recursos de água	A disponibilidade de água para processo, em quantidade e qualidade adequadas para plantas de tratamento térmico são fatores importantes.
21.Linhas de transmissão	A existência de linhas de transmissão de energia elétrica é um fator que deve ser considerado.
22.Relevo	O tipo de relevo existente no local deve ser compatível, implicando em mínimo trabalho de terraplanagem.



<b>B) Físico</b>	
<b>Critério</b>	<b>Justificativa</b>
23.Situação ambiental	Áreas que se apresentem fragilizadas sob o ponto de vista físico ambiental devem ser desconsideradas.
24.Destinação de resíduos sólidos após a queima (cinzas)	Deve-se observar a disponibilidade de áreas para a destinação final das cinzas resultantes do processo.
25.Destinação final de resíduos urbanos	Devem-se priorizar regiões onde ainda não haja soluções satisfatórias para destinação dos resíduos urbanos gerados.
26.Núcleos populacionais	A FEAM deve avaliar a necessidade de estabelecer regras para a distância do limite da área útil do empreendimento a núcleos populacionais. Na Europa, não existem restrições de localização, pois existe normatização de padrões de emissão adequados.
27.Localização próxima a aterro ou lixão desativado	A localização da Unidade ao lado de um aterro ou lixão desativado, com a captação do biogás e sua utilização como combustível auxiliar no processo ou mesmo na geração de energia adicional, dará margem a créditos de carbono oriundos da redução de emissão do metano (cerca de 50% da composição do biogás de aterro) gerado pelo material ali depositado.
28.Resíduos sólidos	Regiões que geram resíduos sólidos cuja destinação final adequada é um problema ambiental são benéficas, pois esses resíduos tendem a aumentar o poder calorífico do combustível. (Ex: serragem, casca de arroz, moinha de carvão vegetal).
<b>C) Biótico</b>	
<b>Critério</b>	<b>Justificativa</b>
29.Existência de Unidades de Conservação (UCs)	Deve-se observar a existência de Unidades de Conservação Estaduais e Federais no entorno do local, assim como suas restrições de usos e zonas tampão.
30.Área de Preservação Permanente (APP)	Deve-se respeitar a ocupação junto à Área de Preservação Permanente - APP (No mínimo de acordo com art. 2º da Lei 4771/65).
31.Espécies endêmicas	Locais onde seja verificada a existência de espécies endêmicas da fauna e/ou flora devem ser evitados ou tomadas medidas efetivas de preservação.
32.Ambientes de relevância ambiental	Ambientes onde sejam diagnosticados fatores ambientais peculiares, de relevância à preservação, ou de aspectos ambientais singulares devem ser desconsiderados, pois a sua preservação é prioritária.

Fonte: Elaboração ENGEBIO

## 8.2 Pré-seleção de regiões

Em uma primeira etapa baseando-se em três critérios especificamente selecionados foram pré-selecionadas 4 (quatro) regiões, centradas nas cidades de Montes Claros (Norte de Minas), Ubá (Zona da Mata), Três Corações (Sul de Minas) e Governador Valadares (Vale do Rio Doce).

### 8.2.1 Região no entorno da cidade de Montes Claros

No raio de 100 km, tendo esta cidade como centro, observa-se uma população urbana de 509.623 habitantes, considerando 23 cidades (IBGE, Contagem 2007), e se estendido o raio até 140 km, acrescenta-se 200.541 hab., relativo a 6 municípios. Trata-se de zona cárstica que dificulta a implantação de aterros. No raio de 100 km há apenas 1 cidade (São João da Lagoa , contemplando 5.775 hab.) que dispõem adequadamente seus resíduos, conforme ICMS-Ecológico. Nessa região em estudo, até 25 km, há apenas 2 cidades (Montes Claros e Glaucilândia), que concentram 69,4% da população; de 25 km a 50 km, há 5 cidades, que contemplam 12,9%; e de 50 km a 100 km, há 16 cidades, que contemplam 17,8%.

Considerou-se nesta avaliação como situação regular do sistema de tratamento e disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) aquela contemplada com ICMS Ecológico – Sub-critério Saneamento Ambiental.

### 8.2.2 Região no entorno da cidade de Ubá

No raio de 100 km, tendo esta cidade como centro, observa-se uma população urbana de 1.660.848 habitantes, considerando 119 cidades (IBGE,

Contagem 2007), e se estendido o raio até 130 km, acrescenta-se 371.736 hab., relativo a 10 municípios. Trata-se de região de topografia acidentada que dificulta a implantação de aterros. No raio de 100 km há 28 cidades (contemplando 661.667 hab.), que dispõem adequadamente seus resíduos, conforme ICMS-Ecológico; Ubá não está incluída entre elas e Juiz de Fora responde por 77,6 % desse valor. Nessa região em estudo, até 25 km, há apenas 9 cidades, que concentram 9,9 % da população; de 25 km a 50 km, há 27 cidades, que contemplam 15,9%; e de 50 km a 100 km, há 83 cidades, que contemplam 74,2%. Destaca-se a existência de indústria moveleira em Ubá, cujos resíduos são potenciais combustíveis complementares.

### *8.2.3 Região no entorno da cidade de Três Corações*

No raio de 100 km, tendo esta cidade como centro, observa-se uma população urbana de 1.235.164 habitantes, considerando 96 cidades (IBGE, Contagem 2007), e se estendido o raio até 134 km, acrescenta-se 287.335 hab., relativo a 7 municípios. No raio de 100 km há 5 cidades (contemplando 85.063 hab.), inclusive Três Corações, que dispõem adequadamente seus resíduos, conforme ICMS-Ecológico. Nessa região em estudo, até 25 km, há apenas 5 cidades, que concentram 16,6% da população; de 25 km a 50 km, há 18 cidades, que contemplam 15,9%; e de 50 km a 100 km, há 73 cidades, que contemplam 67,5%. Trata-se de uma região turística com importantes cidades industriais, tais como, Poços de Caldas, São Lourenço, Varginha, Pouso Alegre e Itajubá.

### *8.2.4 Região no entorno da cidade de Governador Valadares*

No raio de 100 km, tendo esta cidade como centro, observa-se uma população urbana de 858.451 habitantes, considerando 73 cidades (IBGE,

---

Contagem 2007), e se estendido o raio até 120 km, acrescenta-se 415.887 hab., relativo a 9 municípios. No raio de 100 km há 8 cidades (contemplando 301.580 hab.) que dispõem adequadamente seus resíduos, conforme ICMS-Ecológico; Governador Valadares não está incluída entre elas, sendo que as cidades de Ipatinga responde por 79% desse valor. Nessa região em estudo, até 25 km, há apenas 2 cidades, que concentram 31% da população; e de 25 km a 50 km, há 17 cidades, que contemplam 9%; e de 50 km a 100 km, há 54 cidades, que contemplam 60%. A região inclui as cidades de Ipatinga e Santana do Paraíso, que juntamente com Coronel Fabriciano e Timóteo compõem a Região Metropolitana do Vale do Aço.

Após a pré-seleção das macrorregiões, foi efetuada uma coleta detalhada de dados, sendo que a seguir destacamos algumas das informações obtidas, conforme as Tabelas 6 a 12.

**Tabela 6 - Sedes municipais e População urbana**

Região em Estudo	Nº de sedes municipais (faixas à cidade polo - km)				População Urbana (hab.) (raios à cidade polo - km)		
	0 a 25	25 a 50	50 a 100	Total	0 a 25	25 a 50	50 a 100
Montes Claros	2	5	16	23	353.436	419.019	509.623
Ubá	9	27	83	119	164.999	428.319	1.660.848
Três Corações	5	18	73	96	204.526	401.160	1.235.164
Governador Valadares	2	17	54	73	265.725	343.184	858.451

Fonte: Feam (2009)

Tabela 7 - Disposição final de resíduos sólidos urbanos

Região em Estado	Nº de sedes municipais	Número de sedes municipais e percentual da população segundo a forma de disposição final dos resíduos					
		Lixão	Aterro Contr.	Aterro Sanitário	A.Sanit.+ UTC	UTC	UTC irregular
Montes Claros	23	17 (94,8%)	4 (3,5%)	0 (0%)	0 (0%)	2 (1,7%)	0 (0%)
Ubá	119	52 (40,2%)	34 (13,0%)	3 (35,3%)	1 (0,8%)	26 (7,2%)	3 (2,9%)
Três Corações	96	51 (43,7%)	38 (47,1%)	1 (5,3%)	1 (0,8%)	5 (3,1%)	0 (0%)
Governador Valadares	73	48 (56,8%)	8 (3,5%)	6 (34,5%)	0 (0%)	9 (4,2%)	2 (1,0%)

Fonte: Feam (2009)

Tabela 8 - Porcentagem da população com ICMS Ecológico

Região em Estado	% da População total com ICMS Ecológico - RSU		
	No raio até 25 km à cidade polo	No raio até 50 km à cidade polo	No raio até 100 km à cidade polo
Montes Claros	0	0	1,1
Ubá	3,4	5,2	39,8
Três Corações	5,0	5,0	6,9
Gov. Valadares	0	0	35,1

Fonte: Feam (2009)

Tabela 9 - Condições socioeconômicas

Região em estudo	IDH-M médio (0,5 a 0,8)		Cidades com IDH-M alto (0,8 a 1)	PIB <i>per capita</i> predominante (R\$/hab.)
	Cidade Polo	% da população na faixa 0,5 – 0,7		
Montes Claros	0,783	82,6	Nenhuma	1.000 a 2.000
Ubá	0,773	32,8	Viçosa e Juiz de Fora	2.000 a 5.000
Três Corações	0,780	2,1	Alfenas, Varginha, Lavras, Itajubá, Pouso Alegre, São Lourenço	2.000 a 5.000
Governador Valadares	0,772	75,3	Ipatinga	1.000 a 5.000

Fonte: Feam (2009)

Tabela 10 - Municípios x Coleta de Lixo

Região em Estudo	Número de municípios por faixa percentual de coleta de resíduo domiciliar			
	Até 50%	50 a 80%	80 a 100%	Dado não disponível
Montes Claros	0 (0,0%)	1 (4,3%)	17 (73,9%)	5 (21,7%)
Ubá	1 (0,8%)	14 (11,8%)	96 (80,7%)	8 (6,7%)
Três Corações	2 (2,1%)	11 (11,5%)	81 (84,4%)	2 (2,1%)
Gov. Valadares	4 (5,5%)	22 (30,1%)	46 (63,0%)	1 (1,4%)

Fonte: Feam (2009)

Tabela 11 - Custo e distancia média de coleta de RSU

Região em estudo	Cidades na região ou próximas	Pop. Urbana (IBGE-2007)	Custo de coleta (R\$/t)	Distância média até unidade (km)
M. Claros	Taiobeiras	23.983	48,01	25
Ubá	Juiz de Fora	513.348	43,76*	<15
Três Corações	P. de Caldas	140.455	52,35	<15
	Itajubá	79.461	84,01	<15
Governador Valadares	C. Fabriciano	99.425	48,01	25
	Gov. Valadares	260.396	74,70	<15
	Timóteo	75.994	96,41	30

(\*) o serviço não é terceirizado, o custo médio é de R\$ 12,03/km (PMJF, 2009)

Fonte: Feam (2009)

Tabela 12 - Consórcios Intermunicipais nas regiões em estudo

Região em estudo	Consórcios de Saúde			Consórcios para Aterro Sanitário		
	Nº	Nº municípios na região	Pop. Urbana (hab.)	Nome e Nº total municípios	Nº municípios na região	Pop. Urbana (hab.)
Montes Claros	5	19	141.141	-	-	-
Ubá	10	78	667.006	CISAB (58)	37 (8 c/ICMS)	967.123
				CIEAR* (8)	8 (3 c/ICMS)	28.463
Três Corações	9	93	1.176.898	CIMASAS (5)	5 (s/ICMS)	91.269
				CIMISA* (13)	13 (s/ICMS)	149.701
Governador Valadares	8	70	589.603	Em Santana do Paraíso o AS recebe RSU de outras 4 cidades		

(\*) em elaboração

Fonte: Feam (2009)

### 8.3 Seleção da Região

Finalmente, para a escolha da região que melhor possui as características para a implantação da usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica estipulou-se uma ponderação comparativa dos critérios selecionados admitindo-se como padrão a pontuação relacionada na Tabela 13.

**Tabela 13 - Pontuação para a ponderação comparativa**

Dados insuficientes para análise (assinalados com asterisco) ou o critério não se aplica nesta etapa	0
Situação desfavorável ao critério	1
Situação favorável ao critério	2
Situação muito favorável ao critério	3

Fonte: Feam (2009)

Com base na pontuação estipulada acima se pode comparar quantitativamente as regiões e selecionar a que melhor preenche os critérios necessários. A Tabela 14 mostra a pontuação obtida pelas regiões em cada um dos critérios utilizados e o somatório da pontuação.

**Tabela 14 - Consolidação dos critérios**

CRITÉRIO		Região em estudo			
		Montes Claros	Ubá	Três Corações	Governador Valadares
Social	Macro	10	9	8	10
	Micro	-	-	-	-
Econômico	Macro	10	11	12	11
	Micro	-	-	-	-
Político-	Macro	7	8	8	8



CRITÉRIO		Região em estudo			
		Montes Claros	Ubá	Três Corações	Governador Valadares
Institucional	Micro	0	0	0	0
Físico/ Ambiental	Macro	8	5	7	4
	Micro	5	7	7	7
Biótico	Macro	-	-	-	-
	Micro	0	0	0	0
<b>SOMATÓRIO</b>		<b>40</b>	<b>40</b>	<b>42</b>	<b>40</b>

Fonte: Feam (2009)

Pela análise da tabela acima podemos admitir como melhor região de implantação da usina a Região Sul de Minas Gerais, entorno da cidade de Três Corações. A localização desta cidade pode ser vista no mapa da Figura 88.

Nesta região, devido à cidade de Três Corações já possuir aterro sanitário, podemos também considerar como possibilidade a implantação da usina nos municípios de Varginha ou Três Pontas, que também se encontram bem posicionadas fisicamente na região. A Tabela 15 mostra um comparativo dessas cidades baseado nos critérios mais relevantes para a implantação da Usina.

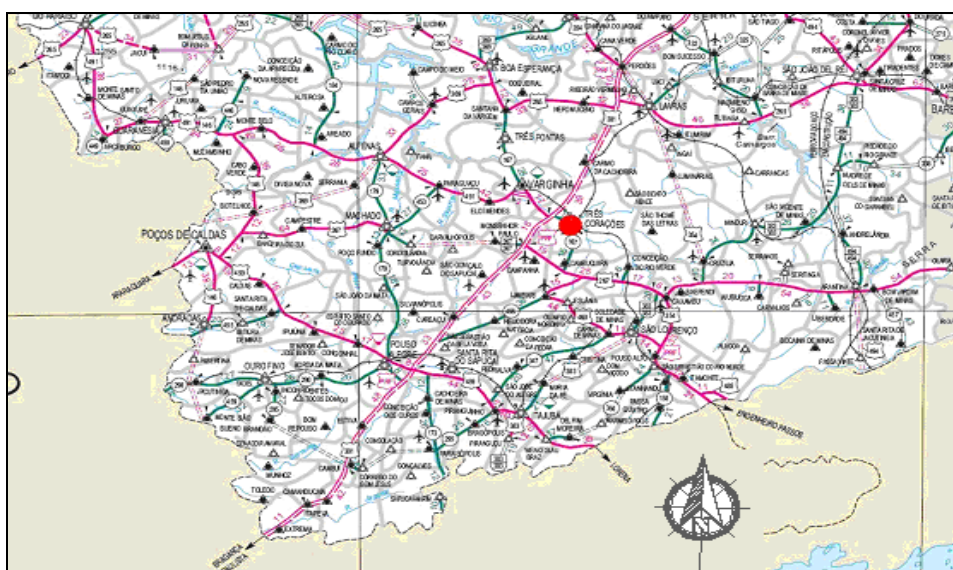


Figura 88 - Mapa da região de Três Corações

Tabela 15 - Comparativo das cidades para implantação da Usina

<b>Cidade / Critério</b>	<b>Três Corações</b>	<b>Varginha</b>	<b>Três Pontas</b>
<b>População (habitantes)</b>	64.895	112.321	43.966
<b>IDH</b>	0,78	0,824	0,773
<b>Cidade mais distante (100 km)</b>	Cachoeira de Minas (6.638 hab.)	São Lourenço (40.441 hab.)	Candeias (16.125 hab.)
<b>Lixão</b>	Não	Não	Não
<b>Aterro Controlado</b>	Não	Sim	Sim
<b>Aterro Sanitário</b>	Sim	Não	Não
<b>Aterro Sanitário e UTC Licenciado</b>	Não	Não	Não
<b>UTC</b>	Não	Não	Não
<b>UTC Irregular</b>	Não	Não	Não
<b>ICMS Ecológico (população)</b>	61.650	Não	Não
<b>Percentual de coleta de resíduo</b>	80 a 100%	80 a 100%	80 a 100%
<b>Consórcio de Saúde</b>	Não	Sim	Sim
<b>Consórcio de Aterro</b>	Não	Não	Não

Fonte: Feam (2009)

Porém, a região de implantação ainda se encontra em estudo, visto que a cidade de Varginha possui Licença Prévia e de Instalação para aterro sanitário. As alternativas finais de localização da usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos – UAER será definida somente após o estudo de locação das estações de transbordo.

## 9 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA E PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA REGIÃO ESCOLHIDA

### 9.1 Composição gravimétrica

A nível nacional não existe uma metodologia de informações confiáveis de caracterização de resíduos sólidos urbanos. Portanto, buscando definir uma caracterização de resíduo a ser utilizada no estudo, inicialmente analisemos a composição gravimétrica em diferentes cidades e estados do Brasil e do Mundo. A Tabela 16 mostra a porcentagem de matéria orgânica encontrada em cada região.

**Tabela 16 - Porcentagem de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos**

Município/Região	Ano	População	IDH	Tipo de coleta	Matéria Orgânica (%)
Porto Alegre RS	1997	1.500.000	0,865	seletiva	52,1
Porto Alegre RS	2002	1.330.000	0,865	seletiva	43,83
Canela RS	2005	38.318	0,818	seletiva	42,3
Alvorada RS	2008	207.142	0,768	seletiva	55,5
São Marcos RS (1)	2006	18.961	0,843	seletiva	56,9
Pedras de Fogo PB	2007	25.861	0,568	regular	68
Pernambuco (aterro)	2007	-	0,692	regular	46,3
Recife PE	1999-2002	1.549.980	0,797	regular	63,4
Campo Grande MS (1)	2002	747.189	0,814	regular	64,5
Joinville SC (1)	2002	492.101	0,857	seletiva	49,8
Santa Catarina (1)(2)	2002	1.750.000	0,84	seletiva/regular	45,4
França (1)	2002	64.473.140	0,955	-	28,8
Portugal (1)	2002	10.617.575	0,9	-	45
Usina Elk River - USA (3)	2002	-	-	-	9

(1) O ano se refere à publicação do artigo, não necessariamente à coleta de dados

(2) Média de 47 Municípios

(3) CDR - Combustível Derivado de Resíduo

Fonte: ENGEBIO (2002)

Observando a Tabela 16 pode-se verificar uma grande diferença entre a Região Sul do Brasil e o restante do país. A fração de matéria orgânica na região sul (Rio Grande do Sul e Santa Catarina) fica na faixa de 40% a 60% enquanto em outros estados esta fração é superior a 60%, com exceção dos dados de Pernambuco no ano de 2007 que possui fração de matéria orgânica de 46,3%, porém esta análise foi realizada em um aterro e não no resíduo coletado diretamente da população urbana, o que pode gerar um erro devido à rápida decomposição da matéria orgânica.

Nos países como França e Portugal a fração de matéria orgânica também é relativamente baixa, porém devido à falta de dados não podemos comparar com a realidade brasileira. A Usina de Elk River, Estados Unidos, tem uma fração de matéria orgânica muito baixa, 9%, devido ao processamento do resíduo sólido urbano em combustível derivado de resíduos. Conforme informado por ELK- RIVER, o resíduo chamado CDR, queimado na Usina, é o resíduo sólido urbano que recebe um tratamento que consiste em moer, peneirar e retirar os não combustíveis (via arraste) obtendo-se no final, papel e plásticos com granulometria controlada (inferior a 15 cm).

No Brasil, a média nacional de matéria orgânica presente nos resíduos de origem urbana está atualmente na ordem de 56%, um histórico dessa média pode ser visto na Tabela 17.

**Tabela 17 - Porcentagem de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos no Brasil**

Ano	Matéria Orgânica (%)
1992	52,5
1999	52,5
2006	52
2007	56,4

Fonte: Pereira Neto e Lelis(1999) ,Elaboração ENGEBIO

Os dados da tabela acima foram retirados de artigos que não citam a fonte de origem, não fornecendo um correto embasamento para que possam ser utilizados neste estudo.

---

Com base em dados coletados em literatura e artigos publicados podemos estimar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na Região Sul do estado de Minas Gerais.

A Tabela 18 mostra os valores encontrados em porcentagem, em peso úmido, de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos em diferentes regiões do estado.

A quantidade de resíduos sólidos urbanos vem aumentando com o passar dos anos, porém a sua composição tende a permanecer a mesma, como podemos verificar comparando os dados da região da Zona da Mata (1999) e da cidade de Ponte Nova (2008) que está localizada nesta região. Com base nos dados da tabela acima podemos verificar que a análise gravimétrica do Município de Ponte Nova, localizado na Zona da Mata, realizada no ano de 2008 coincide com o valor encontrado para a matéria orgânica na região da Zona da Mata no ano de 1999.

**Tabela 18 - Porcentagem (em peso úmido) de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais**

<b>Município/Região</b>	<b>Ano</b>	<b>População</b>	<b>IDH</b>	<b>Tipo de coleta na Região</b>	<b>Matéria Orgânica (%)</b>
Sul de Minas	1999	2.463.618	0,757	regular	66,5
Norte de Minas	1999	1.591.507	0,658	regular	66,5
Rio Doce	1999	1.588.122	0,669	regular	67,4
Zona da Mata	1999	2.145.945	0,712	regular	66,3
Alto Paranaíba	1999	2.159.047	0,792	regular	67,1
Triângulo	1999		0,816	regular	66,8
Central	1999	405.143	0,754	regular	65,8
Centro Oeste	1999	922.656	0,789	regular	63,2
Paracatu	1999	82.850	0,76	regular	68,9
Jequitinhonha	1999	24.879	0,65	regular	70,1
Belo Horizonte	2002	2.412.937	0,839	seletiva	52,9
Belo Horizonte (aterro)	2004		0,839	seletiva	61,6
Montes Claros	2004	358.271	0,783	regular	65
Ponte Nova	2008	57.482	0,766	regular	66,3
<b>Média</b>					<b>65,3</b>

Fonte: Pereira Neto e Lelis(1999); Elaboração ENGEBIO

O valor médio da porcentagem de matéria orgânica encontrado para as cidades nas quais foram realizadas pesquisas de caracterização dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais foi de 65,3%.

Com base nesses dados podemos considerar que a quantidade, em porcentagem, de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos na região do Sul de Minas permanece a mesma, ou muito próxima do valor encontrado no ano de 1999 para a mesma região, que foi de 66,5%.

Analisando os dados coletados, assume-se como composição gravimétrica média para a fração de matéria orgânica na região Sul de Minas Gerais o valor de 66,5%.

A composição gravimétrica aproximada dos resíduos sólidos urbanos na região Sul de Minas Gerais está apresentada na Tabela 19.

**Tabela 19 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Sul de Minas Gerais**

<b>Componente</b>	<b>Composição (%)</b>
Papel	4,2
Papelão	5,9
Vidro	2,2
Matéria Orgânica	66,5
Metais	3,8
Plásticos duros	2,3
Plásticos	6,7
Inertes	8,4
Umidade	47

Fonte: Pereira Neto e Lelis; Elaboração ENGEBIO

## 9.2 Poder calorífico

Poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa (ou volume no caso dos gases) liberada na oxidação de um determinado combustível. O poder calorífico pode ser inferior ou superior. O poder calorífico inferior é a energia liberada na forma de calor e o poder calorífico superior é a soma da energia liberada na forma de calor e da energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de oxidação.

A Tabela 20 mostra os valores de poder calorífico inferior em diversas usinas instaladas, na sua maioria, na Europa e na Elk-River situada nos Estados Unidos relacionados com a capacidade de processamento de cada usina.

**Tabela 20 - Poder Calorífico Inferior e Capacidade das usinas na Europa e Elk-River (EUA)**

<b>Usina</b>	<b>Capacidade Toneladas/Ano</b>	<b>PCI (kcal/kg)</b>
CVE A	46.000	2164
Porto	370.000	2036
CVE G	86.000	2190
Selemap	420.000	2050
CVE H	100.000	2152
Andorre	60.000	2242
CVE B	156.000	1435
CVE F	48.000	2388
CVE Dinamarca	380.000	2011
CVE França	18.700	2014
CVE França	37.500	2009
CVE França	75.000	2009
CVE Avenne	200.000	2004
CVE Irlanda	200.000	2018
CVE Italia	300.000	2009
CVE UK	50.000	2018
CVE UK	100.000	2018

Usina	Capacidade Toneladas/Ano	PCI (kcal/kg)
CVE UK	200.000	2152
ELK-RIVER	300.000	2800
LIPOR	380.000	1838

Fonte: ENGEBIO (2002)

Em levantamento de dados de 18 Usinas termelétricas na Europa, processando resíduos domiciliares constata-se uma variação de PCI do resíduo processado variando entre 1200 kcal/kg a 2089 kcal/kg, com uma média de 1795 kcal/kg.

No caso da região Sul de Minas Gerais pode-se estimar o poder calorífico inferior dos resíduos sólidos gerados por meio da seguinte fórmula:

$$\text{PCI (bruto)} = [\text{PCS (base seca)} \times (1 - \text{cinzas} - m)] - (m \times L)$$

Onde:

PCI = Poder Calorífico Inferior

PCS = Poder Calorífico Superior

m = massa de água (umidade)

L = Calor Latente de Vaporização = 583 kcal/kg

Os valores de poder calorífico superior em base seca, teor de cinzas e umidade para cada fração da composição dos resíduos sólidos urbanos da região Sul de Minas Gerais definidas no capítulo 9, item 9.1, deste relatório, estão apresentados na Tabela 21.

---



Tabela 21 - Poder Calorífico, Teor de cinzas e Umidade dos RSU

Componente	Composição (%)	PCS (kcal/kg) (Base Seca)(*)	Cinzas (%)	Umidade (%)
Papel	4,2%	3800	5%	21%
Papelão	5,9%	3800	5%	21%
Vidro	2,2%	-	-	-
Matéria Orgânica	66,5%	4300	3%	66%
Metais	3,8%	-	-	-
Plásticos duros	2,3%	10300	3%	2%
Plásticos	6,7%	10300	3%	5%
Inertes	8,4%	0	100%	2%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>-</b>	<b>11%</b>	<b>47%</b>

(\*) PDRS Santa Catarina, 2003

Fonte: Pereira Neto e Lelis (1999); ENGEBIO & BURGEAP (2003)

Considerando os dados da Tabela 21 e as fórmulas descritas a seguir pode-se gerar a Tabela 22, com os valores de poder calorífico inferior e poder calorífico superior em base úmida para os resíduos estudados.

PCI (Bruto) = [PCS (Base seca) x (1-cinzas-umidade) - (L x umidade)] x composição

PCS (Bruto) = PCS (Base seca) x (1-cinzas-umidade) x composição

Onde:

PCI = Poder Calorífico Inferior

PCS = Poder Calorífico Superior

L = Calor Latente de Vaporização = 583 kcal/kg

Tabela 22 - Poder Calorífico Inferior e Superior dos RSU de Minas Gerais

Componente	PCI (kcal/kg) (Bruto)	PCS (kcal/kg) (Bruto)
Papel	113	118
Papelão	159	166
Vidro	-	-
Matéria Orgânica	631	886
Metais	-	-
Plásticos duros	225	225
Plásticos	633	635
Inertes	-1	0
<b>Total</b>	<b>1759</b>	<b>2030</b>

Fonte: Elaboração ENGEBIO

O valor do poder calorífico inferior base úmida encontrado, 1759 kcal/kg, está dentro da faixa de variação do poder calorífico inferior dos resíduos utilizados nas usinas térmicas europeias que é de 1200 kcal/kg a 2089 kcal/kg.

Considerando os dados coletados e os resultados obtidos os parâmetros a serem utilizados no decorrer deste estudo para os resíduos sólidos urbanos gerados na região Sul de Minas Gerais são:

- Teor de Cinzas: 11%;
- Umidade: 47%;
- Poder Calorífico Inferior base úmida: 1800 kcal/kg.

## 10 CONSULTA FORMAL A FORNECEDORES DOS PROCESSOS PRÉ-SELECIONADOS

A consulta aos fornecedores detentores de tecnologias de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica está em andamento.

As empresas que foram contatadas são as seguintes:

- CNIM;
- INOVA;
- Foster Wheeler;
- Martin;
- Energy Products of Idaho;
- USINAVERDE;
- Kuttner/Kompogas.

O documento enviado para estas empresas solicitando orçamento encontra-se no Anexo B: *Request for Proposal*.

---

ANEXOS

**Anexo A: FEAM – “Avaliação de região em Minas Gerais para instalação de usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos – UAER , segundo critérios da ENGEBIO”**

## **Anexo B: Request for Proposals-RFP- Rev 3**

## **Anexo B**

### **REQUEST FOR PROPOSALS – RFP– rev 3**

#### **WASTE TO ENERGY PLANT**

##### **1. INTRODUCTION**

The State Environmental Agency of Minas Gerais – FEAM is performing technical and economic evaluations of alternatives for Municipal Waste Management Program, subsidizing planning activities for the final deposition of the waste produced in the main cities of the State. Among a series of proposed alternatives, the waste incineration in Waste-to-Energy (WTE) Plants seems to be a reliable solution. To confirm such approach, a State-of-Art and Pre-Feasibility Study was demanded to ENGEBIO ENGINEERING LTD., a consulting company located in Porto Alegre, RS, Brazil, which has been involved in a number of studies on waste treatment and management for private and government clients in several Brazilian states.

##### **2. OBJECTIVE**

The objective of this Request for Proposals – RFP is call for “BUDGETARY PROPOSALS” for the EPC Supply of Waste-to-Energy Plants, as well as to gather basic information for the estimation of the operation costs of these Plants. Several recognized technology suppliers for such kind of facility are requested to send proposals and technical information which will feed the economic modeling on the WTE Feasibility Study.

##### **3. PROJECT BACKGROUND**

###### **3.1 LOCALIZATION**

The WTE Plant will be located near one of highly populated areas within the State of Minas Gerais. After the conclusion of the Feasibility Study, the region chosen as the best location for the viability of incineration plant is the southern region of Minas Gerais State. The following Figure 1 show the location of the region.



Figure 1: Localization

The city center of the southern region of Minas Gerais State was considered Três Corações city. The following Exhibits 1 and 2 show summary data of the region. The details of the population are attached (Annexe I).

Exhibit 1: Municipalities

Distance from Três Corações city - Km	Numbers of the Municipal Offices
0 - 25	5
25 - 50	18
50 - 100	73
Total	96



Exhibit 2: Population

<b>Distance from Três Corações city - Km</b>	<b>Urban Population - inhabitants</b>
0 - 25	204.401
0 - 50	401.170
0 - 100	1.235.164

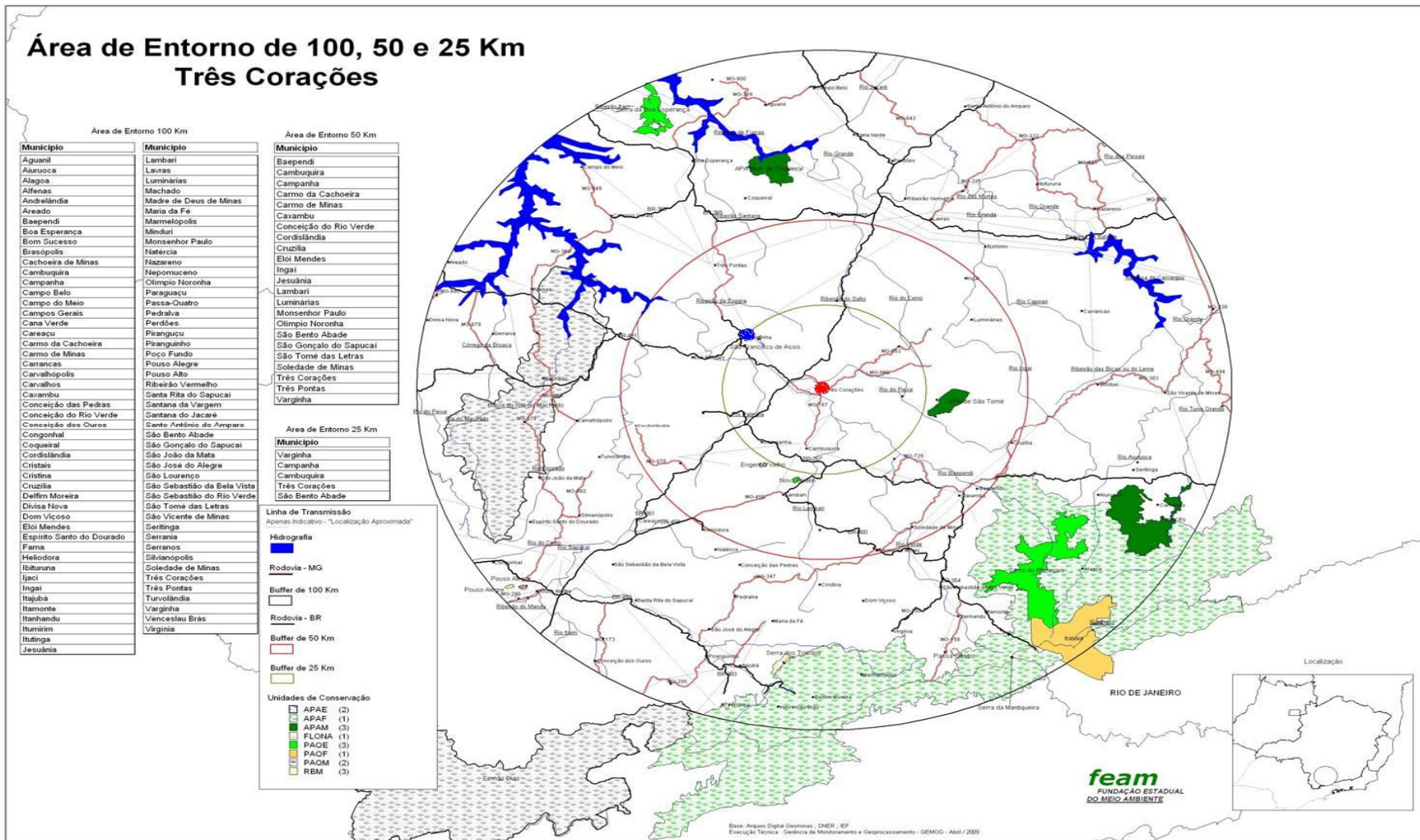


Figure 2: Localization of the possible cities

### 3.2 WASTE AVAILABILITY AND COMPOSITION

The expected quantity of waste to be incinerated will be in the range of 300 t/day the first 5 years to 600 t/day after the first 10 years of operation. The average composition of one of the main potential location is shown in the Exhibit 3 and should be used by the proposer as reference fuel for the preliminary design of the WTE Plant.

Exhibit 3: Waste Composition

Component	%
Paper	4,2
Cardboard	5,9
Glass	2,2
Moist Organic Waste	66,5
Metals	3,8
Heavy (hard) Plastics	2,3
Ordinary Plastics	6,7
Inerts	8,4

### 3.3 SITE CONDITIONS

Exhibit 4: Meteorological Data

Parameter	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Yr (2008)
Average Temperature (°C)	23	24	22	22	17	17	14	19	18	22	22	22	21
Maximum Temperature (°C)	28	30	29	28	26	24	26	27	27	28	29	29	27
Minimum Temperature (°C)	18	17	17	14	11	11	9	11	12	16	16	17	14
Average Wet BulbTemp. (°C)	19	21	20	23	20	15	18	22	18	23	21	23	20
Relative Humidity (%)	90	80	80	75	85	80	60	50	70	85	75	80	75
Precipitation (mm)	300	140	220	220	60	30	10	70	80	140	300	200	1600
Max. Precipitation - 24h (mm)	35	90	45	37	1.2	7	0	9	27	52	58	82	90
Wind Speed (m/s)	12.7	5	2.5	2	3.5	1.5	2.5	5	3	2.75	3	3.25	3.6

#### 4. GENERAL SPECIFICATIONS

The proposals should consider the following assumptions:

4.1 – It will be used mass burning concept, which means that no previous selection of recycling materials will be done and the WTE Plant will burn all the raw waste.

4.2 – The WTE should be designed to burn at least 300 t/day. Future expansion might be considered.

4.3 – The High Heat Value (HHV) of the waste should be estimated by the proponent taking into account the waste composition shown on Exhibit 1.

4.4 – The scope of supply for the EPC Contract should consider the WTE Plant since de Waste Reception until the Ash Silos and Electrical Power included.

4.5 – General Information to include in the proposal:

4.5.1 – Expected Water Consumption in the incineration plant

4.5.2 – Gas Cleaning Technologies employed

4.5.3 – Expected Properties of the Ash

4.5.4 – Method for Ash Disposal and inherent costs

4.5.5 – Expected Plant Performance

4.5.5.1 – Thermal Efficiency

4.5.5.2 – Air Emissions (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, VOC, Dioxins, Heavy Metals and

Particulates)

4.5.5.3 – Noise & Smell

4.5.5.4 – Plant Availability (Programmed & Forced)

4.5.5.5 – Internal Load

4.5.6 – Quantification and Qualification of Operation Staff

4.5.7 – Reagents and Sorbents Consumptions

4.5.8 – Land Requirements and Infrastructure

4.5.9 – Time Required for Plant Completion

4.5.10 – Equipment Required

4.5.11 – Layout of the Plant

4.5.12 – Global budget estimative for a turnkey-plant (individual prices ) :

- Waste Handling
- Thermal Treatment
- Heat utilization
- Flue gas treatment
- Residue treatment

- Auxiliary installations
- Electrical Power System
- Civil and Infrastructure
- Erection supervision and commissioning is
- Degree of nationalization of the furniture
- Exclusions

4.6 – The Proposal should include a Reference List of similar facilities supplied by the Proponent

#### 5. DEADLINE FOR PROPOSALS

Budgetary Proposals should be sent to ENGEBIO by 29<sup>th</sup> June.

ENGEBIO Engenharia Ltda  
Rua Joao Abbott, 482 - Petropolis  
CEP 90460-150, Porto Alegre/RS  
Brazil

#### 6. ADDITIONAL TECHNICAL INFORMATION

The proponent may include relevant information and special features of the offered technology.

## REFERÊNCIAS

ASME-AMERICAN SOCIETY of MECHANICAL ENGINEERS. **Vinyl medical products and incineration: allegations and facts**. Estados Unidos. Disponível em: <<http://c3.org/chlorine~issues/health>>. Acessado em 15 abr. 2009.

BENITEZ, Jaime. **Process engineering and design for air pollution control**. PTR Prentice Hall, 1993. 466 p.

BUREAU DE RECHERCHE GEOLOGIQUES ET MINIERES (França). **Les Enjeux de Géosciences - Mâchefers d'incinération : un nouveau matériau pour le développement durable**. Paris, 2004. Disponível em: <<http://www.brgm.fr/dcenewsFile?ID=131>>. Acesso em: 16 agosto 2010.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; BARROS, R. T. V. **Avaliação da densidade de resíduos sólidos urbanos dispostos em um aterro experimental**. Minas Gerais. Disponível em: <[http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/BR05410\\_Catapreta.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/BR05410_Catapreta.pdf)>. Acesso em: 22 abril 2009.

CAIXETA, Dalma Maria. Geração de energia elétrica a partir da incineração de lixo urbano: O caso de Campo Grande / MS. **CEMPRE** Novas pesquisas apontam para importantes avanços, São Paulo, n. 64, jul./ago. 2002. Disponível em: <[http://4ccr.pgr.mpf.gov.br/documentos-e-publicacoes/trabalhos-cientificos/dissertacao\\_dalma.pdf](http://4ccr.pgr.mpf.gov.br/documentos-e-publicacoes/trabalhos-cientificos/dissertacao_dalma.pdf)>. Acesso em: 6 maio 2009.

CETESB, **Incineração**. São Paulo. 1997. 21 p. (Apostilas Ambientais).

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n. 003 de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre os níveis emissão de aldeídos no gás e escapamento de veículos com motor a álcool. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder executivo, Brasília, DF, 22 ago. 1990. Seção I. p. 15.937 a 15.939.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n.. 316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder executivo, Brasília, DF, 20 de nov. 2002. Seção 1. p. 92-95.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n.357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder executivo, Brasília, DF, 18 de mar. 2005. Seção 1. p. 58-63.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n.382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder executivo, Brasília, DF, 2 de jan. 2007. Seção 1. p. 131.

CONSTRUCTIONS INDUSTRIELLES DE LA MÉDITERRANÉE. **Waste Incineration**. Disponível em: <[http://www.cnim.com/hi/act\\_intervention.htm](http://www.cnim.com/hi/act_intervention.htm)> Acesso em 4 maio 2009.

CORBITT, Robert A. **Standard handbook of environmental engineering**. New York: McGraw-Hill, 1990. 1274 p.

DEMPSEY, Clyde. R.; OPPELT, E. Timothy. **Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica atual**. São Paulo: CETESB/EET, 1987. 80 p.

Energy Products of Idaho. **Energy Products of Idaho Technology**. Disponível em: <<http://www.energyproducts.com/EPITechnology.htm>>. Acesso em 4 maio 2009.

ENGEBIO. **Avaliação do Projeto de Destinação Final dos Resíduos Sólidos Urbanos de origem Domiciliar e Hospitalar, incluindo usina termoelétrica, recuperação de “lixão”, coleta, transporte e aterro sanitário, apresentados pela, PMCG - Prefeitura Municipal de Campo Grande – MS**. São Paulo, 2002.

ENGEBIO & BURGEAP. **Plano Diretor Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos - PDRS**. Santa Catarina, 2003.

ENVIRONMENTAL AGENCY IN ENGLAND AND WALES. **Publications and Reports**. Disponível em: <<http://www.environment-agency.gov.uk/research/library/publications/default.aspx>>. Acesso em 4 maio 2009.

FARIA, Mário Rubens. Antunes. **Caracterização do resíduo sólido urbano da cidade de Leopoldina-MG: proposta de implantação de um centro de triagem**, 2005. Disponível em: <[http://www.btdt.unitau.br/tesdesimplificado/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=32](http://www.btdt.unitau.br/tesdesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=32)>. Acesso em: 7 maio 2009.

FEAM - **Avaliação de região em Minas Gerais para instalação de usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos – UAER , segundo critérios da ENGEBIO** Belo Horizonte – Minas Gerais, 2009.



Foster Wheeler. **Foster Wheeler Power Group**. Disponível em: < <http://www.fwc.com/GlobalPowerGroup/index.cfm>>. Acesso em 4 maio 2009.

GRIPP, W. G. **Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo**. São Carlos: 1998. 208 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

JARDIM, Nilza Silva (Coordenação). **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: IPT/CEMPRE, 1995. 278 p.

KOMPAC & KOENERGY. **O Plasma Térmico – Solução final para os resíduos perigosos**. São Paulo, 1999. Catálogo.

KOMPAC & KOENERGY. **Usinas termoeletricas a lixo - EDR energia derivada dos resíduos - CDR combustível derivado dos resíduos**. São Paulo, 2005. Catálogo.

KREITH, Frank. **Handbook of solid waste management**. McGraw-Hill, 1994. 912 p.

LIMA, A.X. **Estudo de viabilidade técnico-econômica de uma usina de incineração de resíduos urbanos no ABCD**. São Paulo, 1994.

LIMA, L. M. Q. **Tratamento de lixo**. São Paulo: Helmus, [1985]. 242 p.

**LIPOR II** – Valorização Energética de 1200 toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos por dia, ao serviço do Desenvolvimento Sustentável. Cidade do Porto, Portugal.

MAGALHÃES, M. A.; MAGALHÃES, A. B. S. Avaliação qualitativa e potencial para aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos gerados em Ponte Nova, Minas Gerais, Brasil. In: XXXI CONGRESSO INTERAMERICANO AIDIS, 2008, Santiago-Chile. Disponível em: <[http://74.125.93.132/search?q=cache:gZ72Y-w\\_AyUJ:documentos.aidis.cl/Trabajos%2520Oral/Tema%2520VI%2520-2520Residuos%2520S%25F3lidos/VI-Magalh%25E2es-Brasil.doc+Avalia%C3%A7%C3%A3o+qualitativa+e+potencial+para+aproveitamento+dos+res%C3%ADduos+s%C3%B3lidos+urbanos+gerados+em+Ponte+Nova&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk](http://74.125.93.132/search?q=cache:gZ72Y-w_AyUJ:documentos.aidis.cl/Trabajos%2520Oral/Tema%2520VI%2520-2520Residuos%2520S%25F3lidos/VI-Magalh%25E2es-Brasil.doc+Avalia%C3%A7%C3%A3o+qualitativa+e+potencial+para+aproveitamento+dos+res%C3%ADduos+s%C3%B3lidos+urbanos+gerados+em+Ponte+Nova&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk)>. Acesso em: 7 maio 2009.

MARTIN GMBH. **Martin Technology**, 2009.- Disponível em: <<http://www.martingmbh.de>> . Acesso em: 17 abr. 2009.

MENEZES, Ricardo A. Amaral; GERLACH, José. Luiz; MENEZES, Marco. Antônio. Estágio atual da incineração no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E LIMPEZA,7, 2000, Curitiba . Disponível em: <<http://www.luftech.com.br/arquivos/art07.htm>>. Acesso em: 8 maio 2009.

Ministry of the Environment – Government of Japan. **Quality of the Environment in Japan 1998**- Disponível em: < <http://www.env.go.jp/en/wpaper/1998/ch1-1.html>>. Acesso em: 17 nov. 2009.

MIQUEL, Gérard; POIGNANT, Serge. **Rapport sur les nouvelles techniques de recyclage et de valorisation des déchets ménagers et des déchets industriels banals**. Paris, 1999. Disponível em: < <http://www.senat.fr/rap/o98-415/o98-4150.html>>. Acesso em: 16 agosto 2010.

MONTEIRO, José Henrique Penido.; [et.al]. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, IBAM, 2001. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/manualrs/indice.pdf>>. Acesso em: 8 maio 2009.

MURPHY, Michael L. **Design and Performance Requirements for a Fluidized Bed Boiler firing Municipal Refuse Derived Fuel in Ravenna, Italy.** Savannah, Georgia, 1999. Disponível em: <<http://www.energyproducts.com/Documents/Ravenna2a.PDF>>. Acesso em: 8 maio 2009.

NATIONAL ENERGY EDUCATION DEVELOPMENT PROJECT. **Museum of Solid Waste.** Disponível em: <<http://www.need.org/Guides-Subject.php#Sources>>. Acesso em: 4 maio 2009.

NUNES, Nuno Carlos Lapa dos Santos. **Contributo para a Avaliação de Ecocompatibilidade de Novos Materiais para a Construção Civil.** 2004. 433 f. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente) - Universidade Nova de Lisboa Faculdade de Ciências e Tecnologia, Nova Lisboa, 2004.

PEREIRA NETO, João. Tinôco. P.; LELIS, Marcelo de. Paula. Neves. Variação da composição gravimétrica e potencial de reintegração ambiental dos resíduos sólidos urbanos por região fisiográfica do estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 20, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...ABES**, 1999.

PENNER, S.S. Waste incineration and energy recovery. **Energy: the international journal**, Vol, 13, Nº.12, pg. 845-851, 1988. Disponível em: <<http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=107226&indexSearch=ID>>. Acesso em: 8 maio 2009.

PLANO DIRETOR REGIONAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – **PDRS**. Regiões Metropolitanas de Florianópolis, Vale do Rio Itajaí, Foz do Rio Itajaí. Florianópolis – SC: Tractebel Energia, CODESC, fev. 2003.CD-ROM.

QUINA, Margarida Maria João de. **Processos de Inertização e Valorização de Cinzas Volantes: Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2005. 423 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2005.

Relatório de Visita técnica SISEMA FEAM/DPED Nº 01/2008. **PROJETO USINAVERDE – Tratamento térmico de Resíduos Sólidos Urbanos com Geração de Energia elétrica**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2008.

RMA Publications. **More Than Waste**. Disponível em: <<http://www.morethanwaste.com/Site/Default.aspx/9F5AB915A8C63203D5D8>>. Acesso em : 18 nov 2009.

ROCHA, G. H. T.; LANG, L. C. **Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares – ênfase nos resíduos domésticos potencialmente perigosos**. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL.

SACNARC. **ScanArc Plasma Technology**- Disponível em: <<http://www.scanarc.se>>. Acesso em: 17 jun. 2009.

SCOTTISH ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. **Air Publications**. Disponível em: <[http://www.sepa.org.uk/air/air\\_publications.aspx](http://www.sepa.org.uk/air/air_publications.aspx)>. Acesso em 4 maio 2009.

STRICKLAND, Jonathan. **Como funcionam os conversores de plasma**. Traduzido por HowStuffWorks Brasil, 2008. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/conversor-de-plasma.htm>>. Acesso em: 8 maio 2009.

USINAVERDE. **Tecnologia UsinaVerde**. Disponível em: <<http://www.usinaverde.com.br/tecnologia.php?cod=3D1F7E27-42EF-FFE5-BE21-F1D126D77DDD>>. Acesso em 4 maio 2009.

Von Roll Inova. **Grate Combustion System; Waste is our Energy**. Zurich, 2005. Disponível em: <<http://www.aee-vonrollinova.ch/>>. Acesso em: 16 maio 2009

