

# PROJETO BÁSICO DE CENTRAL TERMELÉTRICA COM INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

**Fernando Akira Uieda**

fernando.uieda@poli.usp.br

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

*Palavras chave:* Termoeletricidade, incineração de resíduos sólidos urbanos, resíduos sólidos domésticos.

## 1. Introdução

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

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

Os três Rs, reduzir a produção de resíduos na fonte geradora, reutilizar visando ao aumento da vida útil dos produtos, reciclar e, principalmente, incorporar à cultura dos resíduos sólidos os aspectos voltados à modificação dos padrões de produção e de consumo sustentável passaram a integrar a agenda dos movimentos sociais e do setor público.

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

A situação é agravada nos grandes centros urbanos, pois as áreas de disposição tornam-se cada vez mais distantes e sua vida útil bastante diminuta em função do descontrolado crescimento populacional e ocupação urbana. Tal fato eleva os custos de transporte e a disposição dos resíduos, o que pode prejudicar a gestão dos serviços e causar impactos ambientais, como: degradação do solo, comprometimento dos corpos d’água e mananciais, contribuição para a poluição do ar e proliferação de vetores de importância sanitária nos centros urbanos, catação de lixo em condições insalubres nos logradouros públicos e nas áreas de disposição final.

Em muitos países, especialmente nos desenvolvidos, é bastante empregada a tecnologia de incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU), que propicia, antes do aterramento dos resíduos, um tratamento térmico no qual ocorre a redução volumétrica. Além disso, o vapor gerado na combustão é utilizado para geração de energia elétrica.

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

## 2. Descrição das etapas

As atividades que serão desenvolvidas durante o ano estão descritas abaixo:

- A. Revisão bibliográfica;
- B. Levantamento dos dados de resíduos sólidos urbanos gerados em São Paulo;
- C. Pesquisa sobre as normas ambientais;
- D. Caracterização das formas atuais de despejo de resíduos sólidos;
- E. Logística e local de implantação da usina;
- F. Estudo do mecanismo de combustão;
- G. Estudo sobre a disposição de cinzas, escória e gases poluentes;
- H. Especificação de todos os equipamentos da planta;
- I. Configuração da planta;
- J. Análise de viabilidade técnica e econômica.

### 3. Resíduos sólidos urbanos

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

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

Segundo pesquisa do IBGE/PNSB realizada em 2000, cada cidadão brasileiro produz entre 0,5 e 1 quilo de lixo domiciliar (182,5 e 365 kg/ano).

No Brasil, o tratamento e/ou disposição dos resíduos não é feito de forma eficiente e adequada, apenas 28% dos RSS e 22% dos RI são tratados adequadamente (ABRELPE, 2005). Com base nos dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE (PNSB, 2000), nota-se que os destinos finais de grande parte do lixo coletado são os vazadouros ou aterros. Uma distribuição entre regiões geográficas indica mais detalhadamente esta realidade, conforme pode ser observado na Tab. (1).

Tabela 1. Unidades de destinação final de lixo coletado

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

Fonte: JACOBI 2006

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

### 4. Incineração

A incineração no Brasil ainda se caracteriza pela existência de grande quantidade de incineradores de porte muito pequeno, instalados em hospitais, casas de saúde, indústrias, aeroportos, prefeituras espalhados pelo Brasil. São equipamentos muito simples, com capacidades inferiores a 100 kg/hora. A grande maioria destes, com honrosas exceções, está hoje desativada ou incinerando de forma precária, em geral com emissões bastante elevadas. A razão principal para tanto é que estes equipamentos são geralmente mal operados e mantidos de forma inadequada.

Na Europa, bem como no Japão, a incineração de RSD é intensa. Legislações específicas para este tipo de gerenciamento de resíduos são atualizadas periodicamente em função de pesquisas, conhecimentos e aumento das pressões dos movimentos verdes. Há uma constante busca para criação de novos materiais e tecnologia para otimização e racionalização do processo.

### 5. Legislação

As normas brasileiras que regularizam a incineração de resíduos sólidos urbanos são escassas e inespecíficas.

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

recepção, armazenamento, alimentação, tratamento das emissões de gases e partículas, tratamento de efluentes líquidos, tratamento das cinzas e escórias”.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) não possui uma legislação que regule a atividade e que estabeleça parâmetros de projeto e de emissão no âmbito dos RSD.

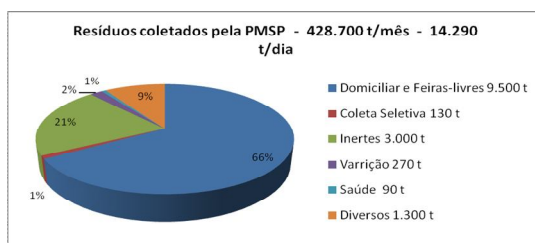
## 6. Panorama atual

### 6.1. Coleta

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

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

O demonstrativo da coleta de lixo em 2008 está separado segundo origem na Fig. (1).



Fonte: Secretaria Municipal de Serviços

Figura 1. Demonstrativo de coleta 2008

### 6.2. Disposição

Como em todo Brasil, o tratamento e/ou disposição dos resíduos não é feito de forma eficiente e adequada na cidade de São Paulo e, com base nos dados apresentados na Tab. (2), nota-se que a maioria dos resíduos sólidos coletados é destinada a aterros sanitários e de inertes.

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

- Possível contaminação ambiental pela ação do chorume, gerado pela degradação biológica da matéria orgânica, atingindo o solo e as águas superficiais e subsuperficiais;
- Gases resultantes da decomposição anaeróbia da matéria orgânica (CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S), que são expelidos para atmosfera contribuindo para o efeito estufa;
- Desperdício de matéria economicamente valorizável, representado pelos materiais recicláveis;
- Desvalorização de espaços urbanos para a localização dos "lixões";
- Proliferação de insetos e agentes patogênicos ao homem e animais.

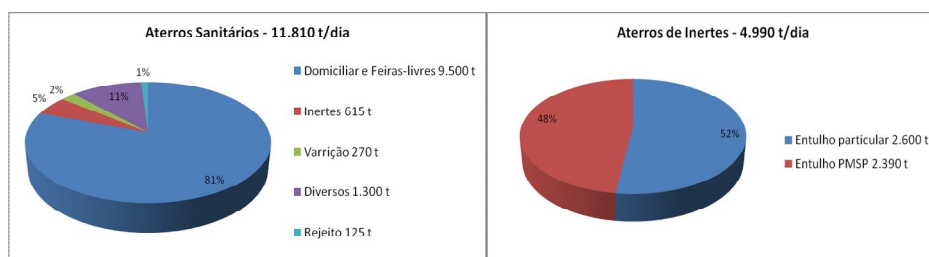
Os transbordos são pontos de destinação intermediários dos resíduos coletados na cidade, criados em função da considerável distância entre a área de coleta e o aterro sanitário. Estas estações de transbordo são, portanto, locais onde o lixo é descarregado dos caminhões compactadores e, depois, colocado em uma carreta que leva os resíduos até o aterro sanitário, seu destino final.

Tabela 2. Destinação primária do lixo por tipo de tratamento

Tipo de Tratamento	Aterro Sanitário e de Inertes	Compostagem	Incinerador Grupo B1	Incinerador Animais	Transbordo	Triagem
2003	2.218.516	334.420	233	780	2.812.346	19.402
2004	1.957.216	193.101	394	890	2.918.884	22.727
2005	2.264.517	0	453	1.023	3.135.309	16.462
2006	2.291.511	0	383	1.090	3.095.356	22.901

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

Conforme a Secretaria Municipal de Serviços, em 2008, a quantidade de resíduos dispostos em aterros foi de 16.800 t/dia, distribuídos nos aterros sanitários e de inertes, cujas composições estão representadas na Fig. (2).



Fonte: Secretaria Municipal de Serviços

Figura 2. Composição dos aterros sanitários e de inertes

Atualmente, os recursos disponíveis para o tratamento dos resíduos do município de São Paulo são:

- Aterros sanitários: Bandeirantes, São João, Sapopemba (desativado), Santo Amaro (desativado), Vila Albertina (desativado) e Jacuí (desativado);
- Aterro de inerte: Itatinga (desativado);
- Transbordo: Vergueiro, Ponte Pequena e Santo Amaro;
- Transbordo de inerte: Vila Leopoldina e Itatinga.

## 7. Características da planta

A quantidade de resíduos urbanos gerados na cidade de São Paulo é muito grande, por isso não será possível atender toda esta demanda apenas com uma central termelétrica. Portanto, este trabalho visa a instalação de uma unidade termelétrica em cada aterro sanitário (6 no total, sendo 2 em operação e 4 em manutenção atualmente), ou seja, os resíduos que serão tratados são aqueles destinados somente aos aterros sanitários (11.810 t/dia em 2008). Esta premissa tem o objetivo também de aproveitar toda infra-estrutura instalada e logística já utilizada pelo atual sistema de tratamento de resíduos. Cada unidade em estudo terá capacidade para tratar aproximadamente 1.300 t/dia de RSU, cuja composição está representada na Tab. (3).

Tabela 3. Composição dos RSU

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

Fonte: POLETTTO 2007

### 7.1. Incinerador

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

A simulação da combustão foi feita utilizando o software de combustão industrial Vulcano. Os parâmetros de projeto utilizados como entradas foram:

- Umidade do ar: 19,7 g de H<sub>2</sub>O / kg de ar seco
- Pressão ambiente: 92,63 kPa
- Temperatura ambiente: 25 °C
- Composição elementar do combustível (mostrada anteriormente na Tab. (3))
- Temperatura dos gases de escape: 1.030 °C
- Poder calorífico inferior: 9.340 kJ/kg (POLETTTO, 2007)

Os resultados obtidos foram:

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

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

## 7.2. Caldeira de Recuperação

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

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

Substituindo as variáveis, temos:

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

$$\dot{m}_{agua} = \dot{m}_{vapor} + \dot{m}_{purga} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{purga} = 0,02 \cdot \dot{m}_{vapor} \quad (4)$$

Onde:

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

$$\bar{C}p_{gases} = \text{Calor específico médio dos gases quentes} = 1,21 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{gases} = \text{Variação de temperatura dos gases quentes} = 1.030^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C} = 830^{\circ}\text{C}$$

$$Cp_{agua} = \text{Calor específico da água a } 25^{\circ}\text{C} = 4,19 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{agua} = \text{Variação de temperatura da água} = 275^{\circ}\text{C} - 180^{\circ}\text{C} = 95^{\circ}\text{C}$$

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

$$Cp_{vapor} = \text{Calor específico de vapor a } 400^{\circ}\text{C} = 3,64 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{vapor} = \text{Variação de temperatura do vapor} = 400^{\circ}\text{C} - 275^{\circ}\text{C} = 125^{\circ}\text{C}$$

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

## 7.3. Turbo-Gerador

A capacidade de geração foi calculada em aproximadamente 33 MW (0,47 MWh / t RSU), de acordo com a Eq. (5), sendo que 3 MW serão consumidos na própria planta. O vapor superaquecido entra na turbina a 60 bar e 400 °C e sai a 50 °C. O rendimento do conjunto é de 70%.

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

Onde:

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

$$h_1 = \text{Entalpia na entrada da turbina} = 3.177 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = \text{Entalpia na saída da turbina (isentrópico, 12,3 kPa)} = 2.095 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \text{Rendimento da turbina} = 0,7$$

## 7.4. Sistema de Condensação

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

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

Na entrada do condensador, tem-se líquido e vapor a 50 °C e, na saída, líquido saturado a mesma pressão. O fluido refrigerante utilizado é água, cuja temperatura de entrada é 35 °C e de saída, 45 °C. O balanço térmico neste equipamento é representado na Eq. (6).

$$Q_{cond} = \dot{m}_{vapor} \cdot (h_2 - h_{sat}) = \dot{m}_{agua} \cdot C_p \cdot \Delta T_{agua} \quad (6)$$

Onde:

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

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

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

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

$\Delta T$  = Variação de temperatura da água = 10 °C

Portanto, a vazão de água no circuito condensador-torre de resfriamento-bomba é de 1.995 kg/s ou 7.207 m<sup>3</sup>/h e o condensador deve ter uma carga térmica de aproximadamente 84 MW.

### 7.5. Desaerador

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

A água proveniente do condensador possui as seguintes características:

- Vazão: 142,857 kg/h
- Temperatura: 50 °C
- Líquido saturado

Nestas condições o volume específico é de 0,001 m<sup>3</sup>/kg (BORGNAKKE, 2003).

Assim, o desaerador deverá ter capacidade para uma vazão de água líquida de 143 m<sup>3</sup>/h.

### 7.6. Filtro de mangas

Devido à composição dos resíduos sólidos urbanos, o ambiente formado pelos gases de sua combustão é muito agressivo, devido a componentes como Cl<sub>2</sub>, HCl, S, metais alcalinos e metais pesados como Zn e Sn. Antes de serem emitidos para a atmosfera, eles passam por um sistema de limpeza de gases composto por um filtro de mangas e um lavador de gases úmidos. O primeiro é responsável pela remoção de material particulado e o segundo, pela remoção dos gases ácidos, orgânicos e óxidos de nitrogênio.

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

- Vazão nominal: 195.000 kg/h
- Velocidade superficial de referência: 1,2 m/min (de acordo com o fabricante)
- Área filtrante: 9.800 m<sup>2</sup>
- Dimensões das mangas: 160 mm de diâmetro e 5.200 mm de comprimento (padrão dos fabricantes)
- Quantidade de mangas: 3.750 mangas
- Concentração de particulado máxima admissível na saída: 70 mg/Nm<sup>3</sup> (de acordo com a resolução CONAMA 316/2002)

### 7.7. Lavador de Gases

O lavador de gases úmidos é especificamente utilizado para absorção de gases tóxicos como SO<sub>2</sub>, HF, HCL, H<sub>2</sub>S, mas também exerce a função de remover materiais particulados, funcionando como um “refinamento” no gás previamente limpo pelo filtro de mangas.

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

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

## 7.8. Fluxograma da Central Termelétrica

Na Fig. (3) é apresentado o fluxograma da central termelétrica com valores de processo em pontos relevantes.

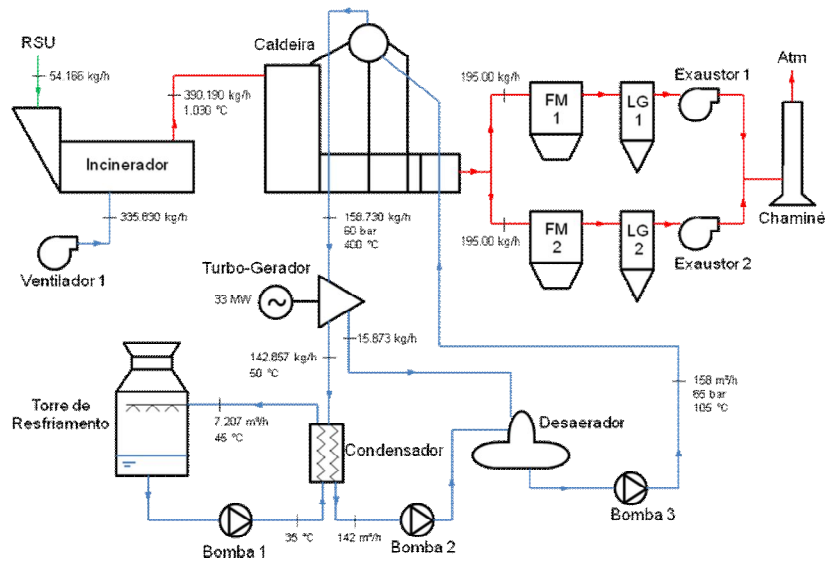


Figura 3. Fluxograma da planta

## 8. Subprodutos do processo

Durante a incineração dos resíduos sólidos, diversos tipos de subprodutos são gerados: no forno do incinerador tem-se a formação da escória; no filtro de mangas ocorre a retenção das cinzas; os lavadores de gases úmidos produzem resíduos líquidos; os gases emitidos pela chaminé também são subprodutos do processo.

### 8.1. Escória e Cinzas

A escória e as cinzas resultantes deste tratamento térmico representam cerca de 8% do total de lixo tratado em peso, de acordo com dados fornecidos pela empresa Usina Verde e são considerados resíduos perigosos, principalmente as cinzas, devido à maior concentração de metais pesados. Segundo Gripp, 1998, a produção de cinzas de um incinerador é, dependendo do tipo das instalações e da composição do combustível, cerca de 10% da quantidade produzida de escória.

Os cuidados com a escória e as cinzas são necessários desde o seu manejo na usina de incineração até a sua correta disposição e/ou estabilização. As alternativas para disposição são:

- Aterramento (método mais corrente).
- Construção civil.
- Pavimentação de áreas urbanas, suburbanas, rurais e estacionamentos.
- Criação de ilhas artificiais e avanços de superfície sobre o mar (no Japão, por exemplo)

### 8.2. Emissões atmosféricas

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

#### 8.2.1. NO<sub>x</sub>

Algumas técnicas que podem ser utilizadas para controlar e reduzir a produção e emissão de NO<sub>x</sub> são:

- Uso de aditivos, ou seja, modificação química no processo de combustão pela incorporação de produtos químicos no combustível ou no oxidante para reduzir a geração de NO<sub>x</sub>. A viabilidade desta técnica é fortemente influenciada por dois fatores: custo e efeitos do aditivo no processo de produção.
- Injeção de líquidos ou gases inertes para reduzir os picos de temperatura. Usualmente é utilizado água.
- Processo SNCR: neste processo, a redução de NO<sub>x</sub> é alcançada com a utilização do processo SNCR (Selective Non Catalytic Redutcion) com amônia, produzindo gás nitrogênio e água. Sua eficiência de redução é maior entre 870 °C e 1.090 °C.

### 8.2.2. SO<sub>x</sub>

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

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

### 8.2.3. PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos)

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

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

### 8.2.4. Dioxinas e Furanos

A tecnologia de injeção de adsorvente é um efetivo agente de supressão da formação de PCDD/PCDF quando utilizada de maneira apropriada. Takacs e Moilanen, 1991 supõem que a injeção de amônia atua na prevenção da formação de PCDD/PCDF tanto na câmara de combustão, onde a amônia compete pelo cloro disponível com os hidrocarbonos (precursores das dioxinas), quanto na formação de dioxinas através das cinzas volantes que atuam como catalisador, já que a amônia, em temperaturas apropriadas, produz o radical NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, que provavelmente envenena o catalisador, reduzindo assim a formação de PCDD/PCDF nos gases de combustão e nos equipamentos de remoção de particulados.

Estratégias de pós-tratamento que transformam as dioxinas geradas durante a combustão em espécies não-tóxicas podem ser adotadas com grande efetividade. Dentre elas, há a adsorção em carvão ativado e a oxidação catalítica com a utilização de um catalisador apropriado – por exemplo, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e WO<sub>3</sub> com Substrato de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou TiO<sub>2</sub>.

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

## 9. Viabilidade econômica

O investimento total está orçado em R\$ 169.060.000,00, incluindo equipamentos, obras civis e instalações elétricas.

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

A análise de viabilidade econômica foi feita utilizando os métodos de payback, valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR).

A movimentação de capital e os resultados estão expressos na Tab. (4).

Tabela 4. Estudo de viabilidade econômica

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

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

Além de haver um retorno do investimento em 5 anos (que pode ser conseguido com a venda do excedente de energia elétrica gerada), e não haver um limite para a vida útil da usina desde que sejam feitas as manutenções preventivas (o que não acontece com os aterros), ainda há a possibilidade da geração e comercialização dos chamados



créditos de carbono. Isso porque este método de tratamento dos RSU previne a emissão do metano que seria exalado na decomposição dos materiais orgânicos em um aterro. Outra forma de ganho é a possibilidade de recepção de benefícios fiscais vindos do Estado.

Em São Paulo, por exemplo, e em mais 12 Estados Brasileiros, existe o chamado ICMS ecológico que constitui um repasse financeiro para municípios que desenvolvem ações de preservação ambiental.

## 10. Comparação: incineração x aterro sanitário

A comparação entre o método de destinação final dos RSU proposto neste trabalho e o atual, e mais comum, foi feito levando-se em conta 4 abordagens: custo de implantação e operação, geração de energia, impacto ambiental e créditos de carbono. Sucintamente, a Tab. (5) mostra esta comparação.

Tabela 5. Comparação entre o método da incineração e o aterro sanitário

	<b>Incineração</b>	<b>Aterro Sanitário</b>
Custo de implantação e operação	Implantação maior	Operação maior Vida útil limitada
Geração de energia	400 kWh / t RSU	20 kWh / t RSU
Impacto ambiental	Menor	Maior
Créditos de carbono	Maior	Menor

## 11. Análise e resultados

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

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

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

As normas brasileiras ainda estão se adequando a este novo cenário mundial para oferecer ao Brasil condições necessárias para a implantação dessa tecnologia alternativa. A tendência dessas novas legislações é abranger não só a questão da limitação dos níveis de emissão de uma unidade, mas também determinar os parâmetros de projeto que devem ser obedecidos, os procedimentos básicos a serem seguidos e exigir a sistemática de monitoramento necessária ao controle de toda a central termelétrica.

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

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

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

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

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

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

## 12. Referências

- A. ARAUJO S/A. Industrialização do Lixo Urbano: Aterro, Compostagem, Incineração. São Paulo, 1992.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2005. Disponível em: <[http://www.abrelpe.com.br/panorama\\_2005.php](http://www.abrelpe.com.br/panorama_2005.php)>. Acesso em: 10 abr. 2009.
- AQUAFIL – Tratamento de Água Ltda. <<http://www.aquafil.com.br>>. Acesso em: 11 nov. 2009
- BAWKON, B. Incineration Technologies for Managing Solid Waste. Pollution Engineering, pag. 96-102, set, 1991.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E.; WYLEN, G. J. V. Fundamentos da termodinâmica. Tradução da sexta edição inglesa: Euryale de Jesus Zerbini. Edgard Blücher. São Paulo, 2003.
- CCREM – CANADIAN COUNCIL OF RESOURCE AND ENVIRONMENT MINISTERS. Municipal Solid Waste Incineration Guidelines. Canadá, 1991.
- CETESB. Sistema de Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde. Norma E-15011, São Paulo, 1997.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. 2002. Resolução Conama nº 316. Disponível em: <[www.mma.gov.br/conama](http://www.mma.gov.br/conama)>. Acesso em: 01 abr. 2009.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Municipal Solid Waste Factbook, ver. 4.0, Office of Solid Waste, 1997.
- FOUHY, K. Legislation Scrubs Flue Gas Emissions. Chemical Engineering, jun, 1992.
- GITMAN, L. J. Princípios de administração financeira. 10 ed, Pearson Addison Wesley. São Paulo, 2007.
- GRIPP, W. G. Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo. 1998. 209 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- JACOBI, P.; BESEN, G.R. Gestão de resíduos sólidos na Região Metropolitana de São Paulo: avanços e desafios. *São Paulo em Perspectiva*, São Paulo, Fundação Seade, v. 20, n. 2, p. 90-104, abr./jun. 2006. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br>>; <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 10 abr. 2009.
- JUNGMANN, G. Pollutant Emissions Reduced by Retrofitting Waste Incineration Plants. ABB Reviews, pag 15-20, feb, 1993.
- LIMA, L. M. Q. Tratamento de Lixo. 2ª edição, Editora Hemus, São Paulo, 1991.
- LORAM, R. G. Energy From Waste: Current Progress in Sweden. Energy World, num. 164, pag 3-5, 12, nov, 1988.
- LOWE, P.; GROEGER, G. The Revival of Incineration in the UK. Water Science and Technology, vol. 23, num. 10-12, pag. 1803-1810, 1991.
- MENEZES, R. A. A.; CEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 2000, Curitiba. Disponível em: <<http://www.luftech.com.br/arquivos/art07.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2009.
- NILSSON, K. Emission Standards for Waste Incineration. Sweden, Paper presented in ISWA Annual Conference. Waste Management in Europe 1992. Netherlands, sep, 1990.
- PATEL, N.; HIGHAM, I. MSW Combustion: Economics and Projections for Energy Recovery to the Year 2000. IWM Proceedings, pag 8-12, apr, 1995
- POLETTI, J. A.; SILVA, C. L. Influência da Separação de Resíduos Sólidos Urbanos para Fins de Reciclagem no Processo de Incineração com Geração de Energia. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco, 2007.
- PROEMA – ENGENHARIA E SERVIÇOS LTDA. Estudo de Impacto Ambiental – EIA: Usina de Processamento de Resíduos Sólidos Domiciliares com Incineração, Recuperação de Energia Elétrica e dos Materiais Reaproveitáveis – Sapopemba. São Paulo, out, 1994.
- SECRETARIA MUNICIPAL DE SERVIÇOS DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. <<http://portal.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/servicoseobras/coletadomiciliar/0001>>. Acesso em: 01 jun 2009.
- USINA VERDE. <[www.usinaverde.com.br](http://www.usinaverde.com.br)>. Acesso em: 01 jun 2009.
- VULCANO. Programa de Combustão Industrial. Fornecido pela empresa Dynamis Mecânica Aplicada Ltda.
- WASTE MANAGEMENT WORLD. Tulsa: PennWell Corporation, 2006 – Bimensal.

## BASIC PROJECT OF THERMOELECTRIC PLANT WITH MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION

**Fernando Akira Uieda**

Polytechnic School of University of São Paulo  
fernando.uieda@poli.usp.br

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

**Keywords.** Thermoelectricity, incineration of municipal solid waste, household waste.