

PAULO CONSTANTE RIGATO

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DE UM
INCINERADOR ROTATIVO DE RESÍDUOS VISANDO
AUMENTO DA CAPACIDADE OPERACIONAL**

SÃO CAETANO DO SUL

2008

PAULO CONSTANTE RIGATO

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DE UM
INCINERADOR ROTATATIVO DE RESÍDUOS VISANDO
AUMENTO DA CAPACIDADE OPERACIONAL**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá
de Tecnologia para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia de Processos Químicos e
Bioquímicos.

Linha de Pesquisa: Análise e controle de
processos industriais

Orientador: Prof. Dr. Tah Wun Song

SÃO CAETANO DO SUL

2008

Rigato, Paulo Constante

Estudo da composição da alimentação de um incinerador rotativo de resíduos visando aumento da capacidade operacional/ Paulo Constante Rigato. – São Caetano do Sul: CEUN – IMT, 2008
63 p.

Trabalho de Pós- Graduação – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia , São Caetano do Sul, 2008. Orientador : Prof. Dr. Tah Wun Song.

1. Composição da alimentação 2. Incinerador Rotativo de resíduos 3. Aumento da capacidade operacional I . Rigato, Paulo Constante. II. Instituto Mauá de Tecnologia . Centro Universitário. Escola de Engenharia Mauá. III. Título.

*À Rosana e Giovanna, que de diversas
maneiras me motivaram neste árduo
trabalho.*

*Ao Mestre Tah pela dedicação e sabedoria
na orientação desta dissertação.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Tah Wun Song, que com paciência e dedicação não economizou esforços para que o trabalho tivesse executado com esmero e consistência a fim de que a pesquisa possa apresentar sua contribuição aos demais colegas da área.

À Margareth, que também , sempre nos motivou neste trabalho e espontaneidade ao nos transmitir as informações e orientações necessárias ao andamento da montagem deste trabalho.

*“É sabido que para
dominar natureza é
preciso ser obediente a
ela”. (Francis
Bacon)*

SUMÁRIO

RESUMO	iii
“ABSTRACT”	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
NOMENCLATURA	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA E ABRANGÊNCIA DOS INCINERADORES	1
1.2 IMPORTÂNCIA DA COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INCINERADOS	2
1.3 OBJETIVO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 HISTÓRICO	5
2.2 HISTÓRICO DA INCINERAÇÃO NO BRASIL	10
2.3 INCINERAÇÃO NO BRASIL	11
2.4 A EVOLUÇÃO DA INCINERAÇÃO NO MUNDO	14
2.5 TIPOS DE INCINERADORES	16
2.6 FUNCIONAMENTO DE UM FORNO ROTATIVO	26
2.7 VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO DE UM FORNO ROTATIVO	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 ESCOPO	37
3.2 DESCRIÇÃO DO INCINERADOR ESTUDADO	38
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS INCINERADOS	39
3.4 BALANÇO DE MASSA	41
3.5 METODOLOGIA DE CÁLCULO	44

3.6 ESTUDO DE CASO	48
3.7 RESULTADOS OBTIDOS	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

RESUMO

A incineração é um método de disposição de resíduos perigosos amplamente utilizado, embora às vezes ainda questionado. As razões desse amplo uso são: reduz-se a responsabilidade do gerenciamento ambiental comparado ao aterro, além da diminuição do volume e da toxicidade dos resíduos. Embora a incineração tenha sido utilizada para destruição de resíduos perigosos durante muitos anos, continua sendo objeto de estudos específicos devido à grande variação na composição dos resíduos incinerados, do rigor das condições de processo de incineração, aos altos custos de manutenção, a problemas operacionais e à baixa confiabilidade dos equipamentos e a um número crescente de restrições legais. Na sociedade atual, milhares de toneladas de resíduos são incinerados diariamente, quer sejam de origem municipal, quer sejam de origem hospitalar ou industrial, além dos chamados resíduos perigosos. Dada a larga prática da incineração como forma de gerenciamento de resíduos, passa a ser importante estudar o processo de combustão dos resíduos, principalmente líquidos e sólidos. O presente trabalho visa estudar uma composição de alimentação mais adequada em um incinerador e sua influência no processo. Entre os resíduos sólidos incluídos nesse estudo citam-se: polietileno, papel, resíduos químicos, resíduos farmacêuticos, metais, lodos e materiais similares. Por apresentarem características de queima distintas, devem ser previamente analisados e seus elementos devem estar dentro dos padrões permissíveis de incineração relacionados na licença do incinerador ora em estudo. No presente estudo, não estão inclusos os resíduos hospitalares nem tampouco os resíduos municipais, embora na composição da mistura a ser queimada há uma pequena parcela de lixo doméstico proveniente dos escritórios e cozinhas da indústria. Neste trabalho, foi montada uma planilha eletrônica como uma ferramenta que ajude na operação de um incinerador em sua capacidade plena, de modo a atender a legislação e não exceder a capacidade do equipamento. A análise do estudo indicará a demanda do combustível auxiliar durante o processo e o volume de gás de combustão gerado. Além disso, calcula-se a temperatura atingida no processo a qual deve ser compatível com as restrições do equipamento e da operação. O método foi aplicado em um estudo de caso a partir de dados de uma unidade industrial típica. Observou-se que a diferença entre os

valores experimentais e os previstos pelo modelo, para as temperaturas dos gases efluentes do forno e da câmara de pós-combustão, foi relativamente pequena (inferior a 10%). Com isso, pode-se considerar que há uma razoável consistência nos resultados calculados a partir da modelagem feita. Um outro aspecto relevante que corrobora essa constatação foi o aumento significativo na capacidade do sistema de incineração (de 170 kg/h para 800 kg/h), após a implementação da metodologia proposta. Isso se deve a uma operação mais estável e regular, com menos interrupções para ajustes no processo, em face de um planejamento mais racional da mistura alimentada (previamente estudada através da planilha). O modelo desenvolvido no presente trabalho, com devidas aplicações, pode ser aplicado para outros tipos de incineradores, constitui uma ferramenta prática e útil no gerenciamento de um sistema de incineração, e eventualmente pode ser usado para controle “on-line” e estudos de otimização desses processos.

ABSTRACT

Incineration is a method largely used to dispose hazardous wastes although sometimes it has been questioned. The reasons of its large acceptance are due to the decreasing of responsibility in the environmental management when compared with landfill disposal system, and the reduction of the volume and the toxicity of the hazardous wastes. Despite the incineration has been used to destroy hazardous wastes during a lot of years, new specific studies are still being carried out due to the great variety of the waste composition and severity of the process conditions of incineration, high maintenance costs, operational problems and low reliance of the equipments and a great number of legal restrictions. Nowadays, thousands of tons of municipal, industrial or hospital hazardous wastes are destroyed by incineration method. Due to the large practice of the incineration in management of hazardous wastes it turns important to study the combustions process of the wastes from different states: liquid, solid or gaseous. This work seeks to study a more appropriate feed composition in to the incinerator and its influence. Municipal or hospitals wastes are not included in the present study, although wastes coming from offices and industrial kitchens are considered. Each waste has a specific composition of combustible material that can be solid or liquid and burns with distinct combustion characteristics. The basic components of the fluegas that cause influence in the environmental were considered in the present work.

The hazardous wastes considered in the study include plastics, paper, chemical wastes, pharmaceuticals, metals, sludge, no combustible materials. They are previously analyzed and must accomplish with the patterns of legal emissions and the license of the actual incinerator used in the present study. An electronic spreadsheet was prepared as a tool to help the incinerator operation to attend legal and security requirements and to avoid equipment damages. The study analysis will provide the auxiliary fuel demand and the volume of the fluegas generated. The temperature elevation is calculated through the energy balance and its value is compared to the characteristics so in this moment it is possible to foresee the residence time and temperature that it will be reached.

The present proceeding is implemented into an operating plant, achieving a good agreement between the predicted values of the exit gas temperature (from the kiln and the afterburner)

and the experimental ones (deviation less than 10%). Although extremely simple, the electronic spreadsheet provides a useful tool for a better management of the incineration systems, improving its capacity (an effective increase of 4.7 times was accomplished after its implementation in the industrial incinerator) and reducing the fuel expenditure. Suitable adjustments may further its use into optimization studies and make possible an eventual implementation into an automation or on-line control system.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Características de alguns dos principais incineradores instalados no Brasil	12
Tabela 2.2	Tendências do tratamento térmico de resíduos sólidos na Alemanha	15
Tabela 2.3	Uso de incineração nos países desenvolvidos	16
Tabela 2.4	Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores	20
Tabela 2.5	Impacto do poder calorífico e da umidade no desempenho de um forno	34
Tabela 3.1:	condições de operação do incinerador	39
Tabela 3.2:	Exemplo de planilha de análise de resíduos	41
Tabela 3.3:	descrição dos resíduos incinerados	42
Tabela 3.4:	exemplo 1 de balanço de energia e massa de incineração com alimentação definida de resíduos: caso de aplicação Tetracloroetileno (principal resíduo)	43
Tabela 3.5:	exemplo 2 de balanço de energia e massa de incineração com alimentação definida de resíduos: caso de aplicação Enxofre (principal resíduo)	44
Tabela 3.6:	resultados do estudo de caso I – tetracloroetileno	52
Tabela 3.7:	resultados do estudo de caso II - caso enxofre	53
Tabela 3.8:	comparativo dos resultados de temperatura calculado x obtido em processo – caso tetracloroetileno	53
Tabela 3.9:	comparativo dos resultados de temperatura calculado x obtido em processo – caso enxofre	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de blocos de um processo típico de incineração	1
Figura 2.1 Câmara de combustão fixa	8
Figura 2.2 Sistema de incineração com recuperação de calor	9
Figura 2.3 Câmara de combustão do incinerador de injeção líquida	17
Figura 2.4 Sistema de tubulação para transporte e injeção de líquidos	19
Figura 2.5 Câmara de combustão com leito fluidizado	24
Figura 2.6 Forno rotativo e câmara de pós-combustão	29
Figura 2.7 Vários sistemas de injeção de chama em forno rotativo	31
Figura 3.2 : Tela de CLP com controle de temperatura e combustão	55
Figura 3.3: Tratamento dos gases efluentes do incinerador	56
Figura 3.4: <u>Vista geral do sistema de incineração</u>	57

NOMENCLATURA

$\sqrt{\theta}$ = Raiz quadrada do ângulo

c_p – calor específico em $\text{kg/kg } ^\circ\text{C}$

$c_{p_{cz}}$ – calor específico das cinzas em $\text{kg/kg } ^\circ\text{C}$

D = diâmetro interno em ft

D_i = diâmetro interno do forno em mm

$F = 1,0$ – função de acumulação do leito de sólidos

H = calor latente de vaporização, kcal/kg

H_{pci} = calor de combustão, kcal/kg

L = comprimento do Forno, ft

m - fluxo mássico em kg/h

m_a – massa de água de combustão – kg/h

m_{ag} – massa de água contaminada alimentada ao sistema, kg/h

m_{ars} – massa de umidade presente no resíduo, kg/h

m_{cz} – massa das cinzas efluentes, kg/h

m_{il} – massa de inflamável líquido alimentado ao sistema, kg/h

m_r – massa de resíduo total alimentado ao processo, kg/h

m_{rg} – massa de resíduo geral alimentado, kg/h

m_{rpl} – massa de resíduo plástico alimentado, kg/h

N – velocidade de rotação, rpm

PCI_g - poder calorífico inferior do gás natural, kcal/m^3

Q – taxa de calor sensível, kcal/h

Q_{ac} – poder calorífico da água contaminada, kcal/kg

Q_{GN} - poder calorífico do gás natural, kcal/kg

Q_{il} – poder calorífico do inflamável líquido, kcal/kg

Q_{rg} – poder calorífico do resíduo geral, kcal/kg

Q_{rpl} – poder calorífico do resíduo plástico, kcal/kg

Q_{aevp} – taxa de calor cedido para evaporação da água de combustão, kcal/h

Q_{ars} – taxa de calor cedido para evaporação da água presente no resíduo, kcal/h

Q_{comb} – taxa de calor de combustão do gás natural, kcal/h

Q_{cz} – taxa de calor devido às cinzas efluentes, kcal/h

Q_{rad} – taxa de calor perdido por radiação, kcal/h

Q_{tdis} – taxa de calor total dissipado, perdido, kcal/h

Q_{tdisp} – taxa de calor total disponível, kcal/h

S – ângulo do forno, graus

T – temperatura - °C

T_e - temperatura de entrada dos resíduos - °C

$T_{f_{pc}}$ – temperatura da câmara de combustão- ° C

T_{f_r} – temperatura do forno rotativo- ° C

T_r - tempo de residência em minutos

T_{rf} - tempo de residência em segundos no forno rotativo em segundos.

V_{GN} - volume de gás natural em m^3 / h

V_{GP}^v - vazão de gás de processo, Nm^3 / h

V_{Gpm} - vazão de gás de processo em massa, kg /h

ΔT - diferença de temperatura

θ – ângulo dinâmico, graus da horizontal

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E ABRANGÊNCIA DOS INCINERADORES

A incineração é um processo de engenharia que emprega decomposição térmica via oxidação térmica à alta temperatura (usualmente 900°C ou maior) para destruir a fração orgânica do resíduo e reduzir o volume. Uma sinopse das principais etapas envolvidas no processo está mostrada na figura 1.1.

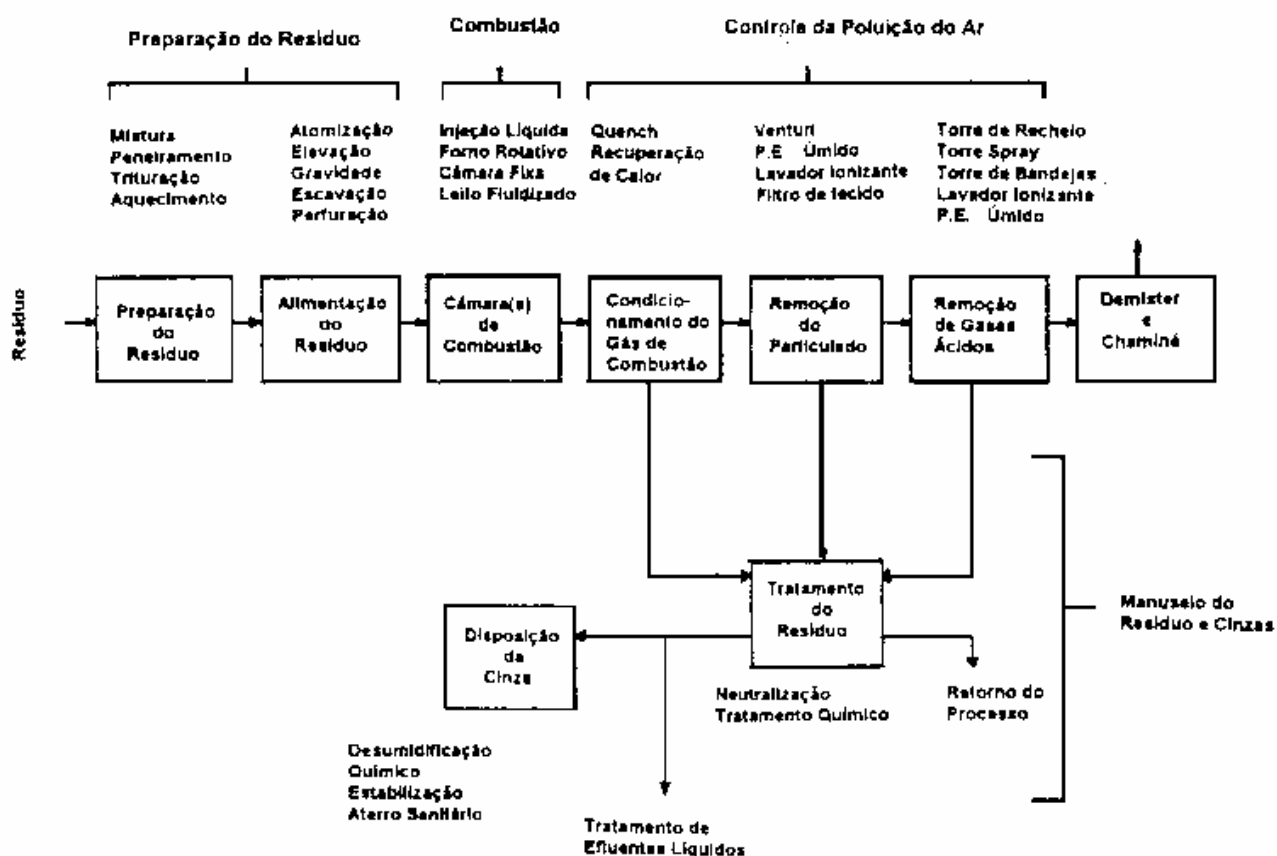


Figura 1.1 – Diagrama de blocos de um processo típico de incineração

Geralmente, resíduos combustíveis ou resíduos com conteúdo significativo de orgânicos são considerados os candidatos mais apropriados à incineração. Tecnicamente, contudo, qualquer resíduo que contenha uma fração orgânica perigosa, não importando quão pequena seja essa parcela, é um candidato funcional para a incineração. Por exemplo, quantidades significativas de água contaminada foram incineradas nos Estados Unidos no começo dos anos 80 (Vogel et al., 1983). Solos contaminados também estão sendo incinerados com frequência. Environmental Protection Agency (EPA), por exemplo, empregou um incinerador móvel para descontaminar 40 toneladas de solo do Missouri, que havia contaminado com 2 kg de compostos de dioxinas cloradas (Tejada, 1985).

Diferentes tecnologias de incineração têm sido desenvolvidas para tratar os vários tipos e formas físicas de resíduos perigosos. Os quatro projetos mais comuns de incineradores são os de injeção líquida, às vezes combinado com incineração de gases e vapores, fornos rotativos, câmara fixa e os de leito fluidizado.

O processo de seleção e projeto de sistemas de incineração de resíduos perigosos pode ser muito complexo. Felizmente, existe uma experiência considerável na manufatura industrial e vários guias úteis de projeto têm sido publicados (Brunner, 1991).

Atualmente, devido à sua abrangência nas aplicações, destaca-se cada vez mais a importância dos processos de incineração de resíduos.

1.2 IMPORTÂNCIA DA COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INCINERADOS

A composição das misturas alimentadas no incinerador é extremamente variável. Mas, por outro lado, um balanceamento bem definido pode representar vantagens muito relevantes, tanto em termos operacionais como econômicos.

No presente trabalho, será estudada uma composição de alimentação de resíduos com diferentes características entre si, como poder calorífico, teores de enxofre, cloro, nitrogênio, flúor, metais e diante da legislação existente, verificar se a vazão de resíduo alimentado no forno irá extrapolar o máximo permitido pelo órgão ambiental, no caso deste estudo, a Cetesb. O objetivo deste procedimento é garantir a eficiência da destruição, considerando as diferenças das características dos resíduos alimentados, pois é justamente este balanceamento que irá permitir a eficiência e o aumento da capacidade em termos de vazão mássica de alimentação.

1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho visa estabelecer um sistema simples de cálculo dos valores das variáveis mais importantes para acompanhar o processo de incineração bem como prever o comportamento das temperaturas que serão atingidas, tanto no forno rotativo, quanto na câmara de pós-combustão. Serão avaliados também o tempo de residência e as emissões dos principais elementos de controle nos gases efluentes.

A metodologia desenvolvida será aplicada a um estudo de caso que envolve o incinerador industrial da empresa Clariant, localizada na cidade de Suzano, estado de São Paulo.

Desta forma, o estudo tomará por base de um caso real de incineração, mostrando-se que é possível, através de um ajuste adequado da alimentação, do monitoramento da temperatura no forno e de um gerenciamento das emissões dos efluentes gasosos, conseguir aumentar a capacidade de incineração, além de se garantir uma maior vida útil do equipamento. Os valores típicos das temperaturas de operação são mantidos na faixa de 760 a 870°C. Requer-se ainda um excesso de ar de 25 a 150% para que sejam satisfeitas as condições de queima e se garantir a destruição integral dos resíduos. Por outro lado, o sistema refratário usado nas instalações geralmente não suporta operar sob temperaturas acima de 1400°C, podendo causar o descolamento dos tijolos. Com isso, graças a um controle mais apurado das condições operacionais, principalmente da temperatura e do tempo de residência, a partir de um estudo da melhor combinação dos resíduos alimentados, pode-se favorecer a maximização de uso do forno sem danificá-lo, respeitando as emissões ambientais.

A metodologia desenvolvida no presente trabalho é relativamente simples de ser aplicada, pode ser estendida para diferentes incineradores e serve como ferramenta de auxílio no gerenciamento de um sistema de incineração de resíduos.

Dioxinas e furanos não serão consideradas no presente estudo, pois a sua formação e destruição têm mecanismo específico e, portanto, constituem objeto de abordagem específica. As dioxinas e furanos são membros de uma família de compostos conhecidos quimicamente por dibenzo-p-dioxinas. Esta família caracteriza-se por ter três anéis, sendo dois anéis benzênicos interligados por um par de átomos de oxigênio. Teoricamente, podem ocorrer de um a oito átomos de cloro nas posições substituíveis da dioxina, de forma a possibilitar 75 possíveis congêneres de dioxinas cloradas.

Os furanos são membros de uma família de compostos orgânicos conhecidos quimicamente como dibenzofuranos. Eles têm estrutura similar às das dibenzo-p-dioxinas, exceto que os dois anéis benzênicos são interligados por um anel de cinco lados, contendo somente um átomo de oxigênio.

Com exceção de padrões analíticos, as dioxinas e furanos não são fabricados intencionalmente. Eles podem, contudo, ser gerados como subprodutos na fabricação de outros produtos químicos (tais como alguns pesticidas) ou como um resultado da combustão incompleta ou da recombinação de produtos exauridos na queima de misturas contendo certos compostos orgânicos clorados (esta recombinação depende de fatores, tais como: temperatura variando entre 250°C e 400°C, presença de carbono, cloro, oxigênio, etc). Os limites permissíveis de emissões para chaminés, específicos para dioxinas/furanos, são de 0,5 ng/m³ TEQ (“total equivalent”) a 11% de O₂.

Então, devido aos aspectos muito específicos, o estudo das dioxinas e furanos não será considerado no presente trabalho.

Os capítulos seguintes consistirão da Revisão Bibliográfica (Capítulo 2), onde serão apresentados inicialmente um breve histórico do processo de incineração, a sua evolução no mundo, um histórico e o panorama da incineração no Brasil. Em seguida, serão descritos os tipos de incineradores mais utilizados, principalmente os de fornos rotativos. Ao final da Revisão Bibliográfica, será feita uma discussão das variáveis de processo de incineração. No capítulo 3, serão apresentados a metodologia de cálculo e o estudo de caso, com os respectivos dados de entrada e resultados obtidos. No capítulo 4, será feita a discussão desses resultados e, por fim, no capítulo 5, é apresentada uma sinopse com as considerações finais do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO

Purificação através de fogo é um conceito antigo, sendo que suas aplicações estão registradas nos primeiros capítulos da história, desde citações na bíblia (Livro dos Reis, cap. 23:10) em que, nas cercanias de Jerusalém, o entulho da cidade era queimado e o local utilizado para adoração de deuses pagãos. Grupos nômades como o dos Beduínos com suas jornadas constantes de um local a outro ignoravam as conseqüências do descarte de resíduos em locais abertos. Mesmo hoje em dia, encontram-se, em comunidades desenvolvidas, pilhas de entulhos com odor desagradável. Nos dias de hoje, inclusive nos Estados Unidos, o lixo é queimado em buracos ou sobre o solo. Incluem-se aqui as queimadas de resíduos agrícolas e de resíduos domésticos em áreas rurais (Hering e Greelly, 1921).

Na idade média foi introduzida uma inovação: “o vagão de fogo”. Foi o primeiro incinerador móvel (Hering e Greelly, 1921), composto por um vagão retangular de madeira protegido internamente por uma camada de argila. O vagão, puxado por cavalos, era transportado pelas ruas e os moradores jogavam seus rejeitos dentro da “fogueira móvel”.

Hering e Greeley (1921) lembraram que o primeiro incinerador nos Estados Unidos foi construído em 1885 na ilha do Governador em Nova York. Ainda em 1885, uma instalação municipal foi construída em Allegheny City, no estado da Pennsylvania. Ambas as unidades foram chamadas de crematório de lixo. Eles foram projetados para queimar lixo com carvão como combustível auxiliar. As fornalhas operavam à baixa temperatura. Dificuldades freqüentes eram causadas pela tentativa em reduzir os custos operacionais através da economia de combustível auxiliar. O primeiro incinerador típico popularizado foi construído em 1887, em Des Moines, no estado de Iowa . O lixo era lançado de uma parte superior até o final de uma larga grelha horizontal onde era parcialmente seco, então era removido para um outro compartimento onde era queimado. O combustível auxiliar era carvão ou óleo. Uma adaptação desta fornalha foi construída em Ellwood, no estado de Indiana, em 1893. Uma variação deste projeto foi construída em Minneapolis. O resíduo era secado em uma caixa de aço, suspensa sobre o fogo com circulação de água em tubos de aço. Camisa de aço com circulação de água também era utilizada, para manter a temperatura baixa no equipamento, enquanto, no lado do processo, a combustão ocorria à alta temperatura.

Este conceito de secar o lixo úmido antes da queima resultou em contínuo uso de grelha por mais de 50 anos, cujo desenvolvimento mais detalhado será visto logo mais adiante, com os respectivos desdobramentos das técnicas de secagem dos resíduos.

A incineração, como é conhecida atualmente, começou há cerca de 100 anos, quando o primeiro incinerador de lixo doméstico foi instalado em Nottingham, na Inglaterra (Hering e Greelly, 1921). O uso da incineração nos Estados Unidos cresceu rapidamente a partir da primeira instalação em Governor's Island, Nova York, para mais de 200 unidades, em 1921. Muitos incineradores apresentaram falhas devido à deficiência no projeto, operação inadequada e uso insuficiente de combustível auxiliar.

Uma pequena instalação para queima de lixo foi incorporada ao sistema de geração de vapor em Nova York, em 1903, seguida por duas de escala industrial, em 1906.

Um projeto inglês com capacidade de 300 toneladas por dia operava em 1910, em Milwaukee. Naquela época, as instalações eram alimentadas manualmente, mas sistemas mecânicos foram desenvolvidos de 1910 a 1920 e implementados nas unidades de Savannah, Atlanta e Toronto. Todos os incineradores desse período foram montados com sistemas de caldeiras para geração de vapor. O período de 1920 a 1950 apresentou o desenvolvimento gradual de alimentação de carvão automático, o que conduziu à evolução de quatro modelos específicos. Um é uma modificação da fornalha hemisférica, alimentada diretamente acima do centro da fornalha para uma câmara circular, com ar frio e roletes de ferro fundido comum. Os braços rotativos agitam o material, expondo as superfícies do material e permitindo que pequenos pedaços e cinzas caiam pela grelha para o coletor de cinzas. Dois destes incineradores foram desenvolvidos com capacidade de 100 a 200 ton/dia. Este tipo de incinerador tornou-se comum entre 1940 e 1955.

Um segundo modelo é uma modificação de câmara múltipla. Trata-se de uma grelha na forma de um vertedouro. O mecanismo da unidade usada consiste na parcial rotação da seção longitudinal, começando da grelha desde o topo até a parte baixa, sendo o material revolvido e expondo, então, mais a superfície dos materiais em incineração até o fundo da grelha. Uma das vantagens para este modelo é que o material recentemente carregado não está separado por paredes em várias câmaras, melhorando portanto a sua exposição à chama.

O terceiro tipo tem uma grelha móvel. Ao longo do equipamento, uma parte estreita da fornalha com uma cinta sem fim conduz os resíduos do ponto de alimentação à descarga final, onde o resíduo cai em cascata ao coletor de cinzas, usualmente uma banheira com água. Neste projeto, os resíduos não são misturados enquanto queimam. (Hering, 1925)

O quarto projeto foi trazido da Europa para os Estados Unidos quando um forno rotativo foi construído em Atlanta, Geórgia, em 1925. Este projeto possui uma câmara rotativa onde o resíduo é misturado durante a queima, facilitando o processo, e as cinzas são recolhidas por baixo do forno. Este forno obteve sucesso na operação, produzindo vapor para aquecimento de prédios no centro de Atlanta. Uma instalação similar foi abandonada em Los Angeles, no estado da Califórnia, por excesso de geração de cinzas.

As primeiras unidades eram operadas por batelada e mal operadas. Até os anos 50, os incineradores e seus odores característicos e fumaças eram aceitos como um mal necessário e a operação conduzida da forma mais econômica possível. Com o abandono do conceito da fumaça como sinal de desenvolvimento e o surgimento das regulamentações para poluição do ar, os sistemas começaram a melhorar sensivelmente a partir dos anos 60/70 (Corey, 1969). Estas melhorias incluíram a alimentação contínua, o controle de combustão, o uso de câmaras fixas e múltiplas de combustão (ver figura 2.1), projetos para recuperação de energia (ver figura 2.2) e equipamentos para o controle da poluição do ar (Cross e Hesketh, 1985).

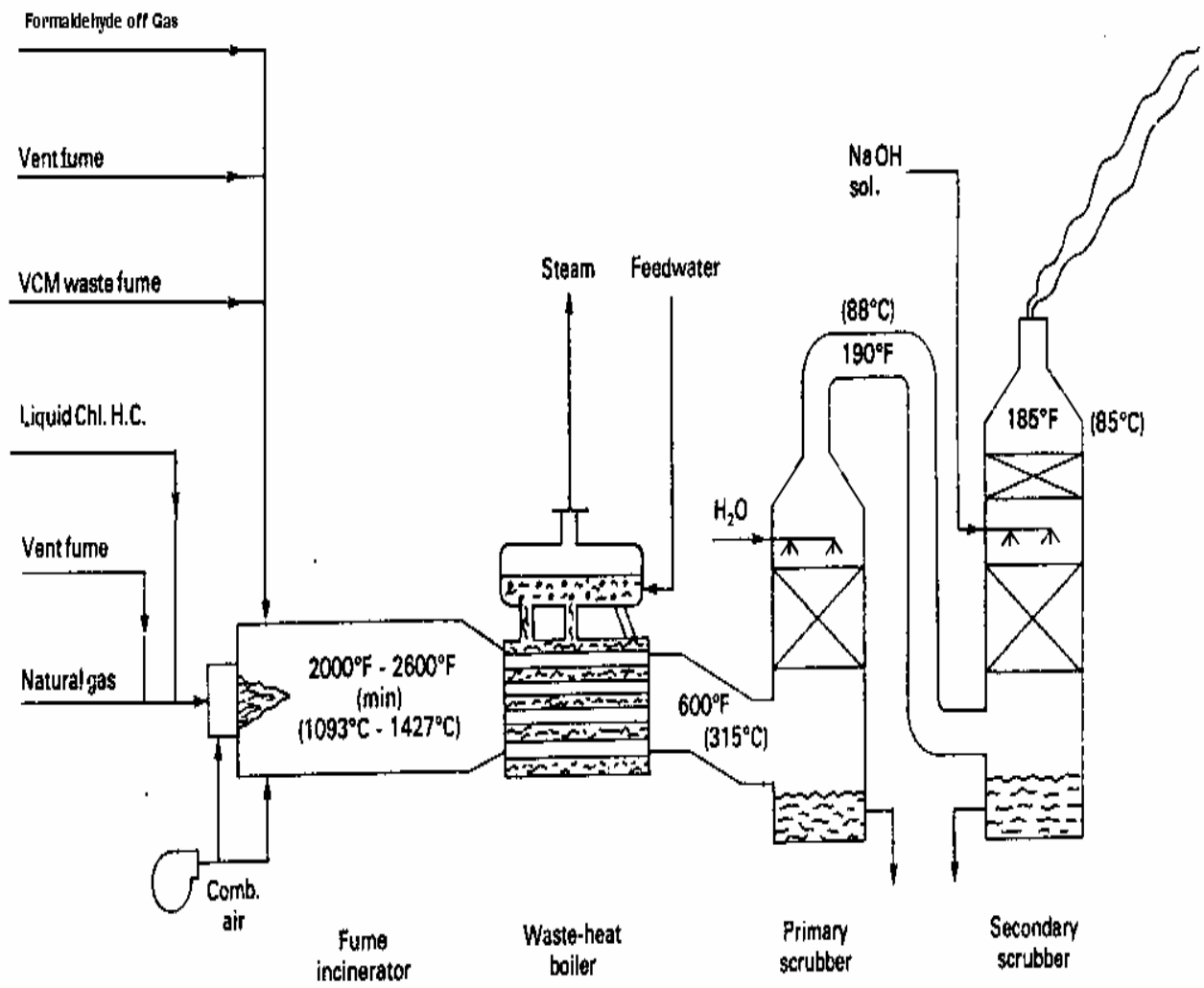


Figura 2.1 - Câmara de combustão Fixa

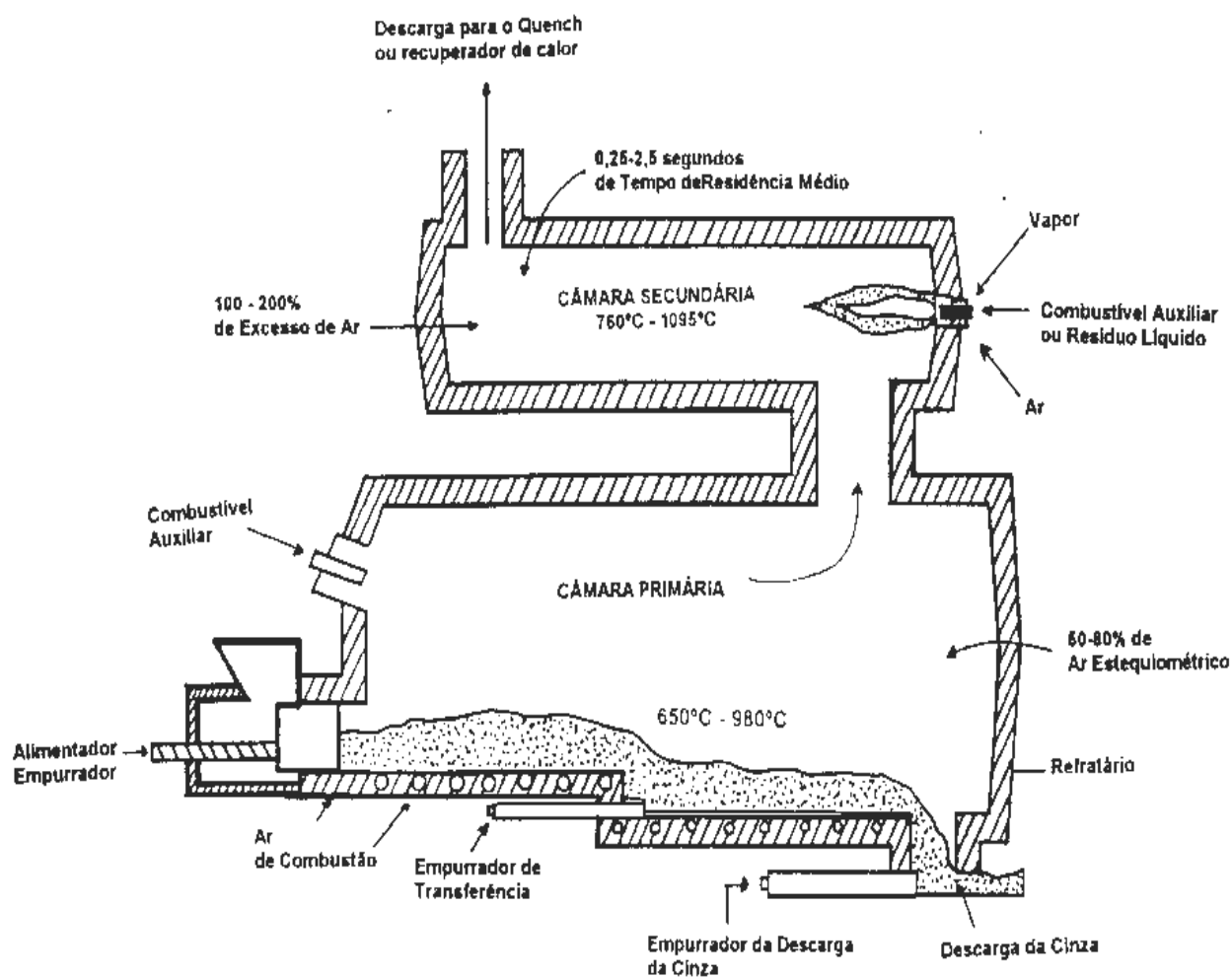


Figura 2.2 - Sistema de incineração com recuperação de calor

2.2 HISTÓRIA DA INCINERAÇÃO DO BRASIL

O primeiro incinerador municipal no Brasil foi instalado em 1896, em Manaus para processar 60 toneladas por dia de lixo doméstico, tendo sido desativado somente em 1958 por problemas de manutenção (Lima, 1991). Um equipamento similar foi instalado em Belém e desativado em 1978 pelos mesmos motivos. Em 1913, foi instalado em São Paulo, no Araçá, um incinerador com capacidade de 40 ton/dia, tendo sido desativado em 1948 e demolido em 1953. Em 1949, foi instalado em Pinheiros, na cidade de São Paulo, um incinerador para 200 ton/dia, que foi desativado em 1990. Dois outros foram também instalados em São Paulo, ambos com capacidade de 300 ton/dia. Em 1959, foi instalado o incinerador de Ponte Pequena e em 1968, o do Vergueiro. Estes equipamentos encontram-se paralisados no momento. Todas estas instalações contaram com tecnologias de gerações hoje ultrapassadas, conforme abordado mais adiante, não tendo a capacidade de atender às exigências das leis ambientais atuais.

Em 1994, foi lançado um mega-projeto, também em São Paulo, para a construção de dois novos incineradores de grande capacidade, cada um com 2500 toneladas por dia (Demajorovic, 1994). Existem também mobilizações da opinião pública através de entidades ambientalistas, que desconhecendo as tecnologias atuais e as garantias de não poluição do meio ambiente, fazem forte pressão contrária. Enquanto isso, o volume de lixo sem destinação adequada cresce assustadoramente (ABES, 1998).

Faz parte também da história da incineração a proliferação de incineradores residenciais prediais, ocorrida no Rio de Janeiro, a partir de 1950, com o surgimento da construção de prédios de vários andares. Estes incineradores foram banidos em 1969/1970 porque eram, em realidade, verdadeiras “caixas” de queimar, sem controle.

A partir de 1970, foi iniciada a fase de implantação de incineradores especificamente desenvolvidos para o tratamento de resíduos especiais, tais como: aeroportuários, hospitalares, industriais e outros perigosos. Nesta fase, entre outros, foram instalados os incineradores das indústrias químicas: Ciba, Basf, Clariant, Bayer, Cetrel, Cinal, aeroportos internacionais de Guarulhos e Rio de Janeiro, Banco Central e em várias Prefeituras, como a de Brasília. Dados da Cetesb afirmam que o Brasil gera cerca de 2,7 milhões de toneladas de resíduos perigosos (Dia a Dia, 1999). Entretanto, muitos técnicos afirmam que o valor real deve ser muito maior que este, considerando-se as dificuldades em se realizarem os levantamentos precisos de geração destes resíduos e mais complexo ainda é o conhecimento dos resíduos estocados, considerados passivos ambientais.

A incineração no Brasil ainda se caracteriza pela existência de grande quantidade de incineradores de porte muito pequeno, instalados em hospitais, casas de saúde, por todo o Brasil. São equipamentos muito simples, com capacidades inferiores a 100 kg/h. A grande maioria destes, com algumas exceções, está hoje desativada ou incinerando de forma precária, em geral com emissões fora de padrão bastante elevadas. A razão principal para tanto é que estes equipamentos são geralmente mal operados e mantidos de forma inadequada. Isto se deve ao fato de que existe o conceito de que trabalhar com lixo é castigo, punição, sendo que as instituições mandam os funcionários com menor qualificação para este tipo de trabalho e dão a mínima atenção ao treinamento e reposição de peças.

2.3 INCINERAÇÃO NO BRASIL

Primeiramente, deve-se ressaltar que, devido ao uso indevido de equipamentos, obsoletos ou devido à operação e manutenção inadequadas destes, o processo de incineração no Brasil ganhou o conceito e imagem de poluidor, nocivo à saúde e prejudicial ao meio ambiente (Amaral, 2000). Esta imagem tem influenciado negativamente nas avaliações e tomadas de decisões que envolvem o tratamento e a disposição de resíduos sólidos, líquidos e pastosos, resultando muitas vezes em posicionamentos que excluem a utilização da incineração em qualquer nível ou estágio de avaliação. Entretanto, sob vários aspectos, a incineração constitui o processo mais adequado para a solução ambientalmente segura de problemas de disposição final de resíduos.

Entretanto, em países desenvolvidos como Alemanha, Japão, Suíça, EUA, este conceito foi revertido e muitas unidades foram construídas recentemente, além do que outras estão em construção, principalmente para a geração de energia. Esta reversão se deu principalmente nos últimos cinco anos, com o avanço das tecnologias de depuração dos gases e dos controles “on line”, por computador, de todas as emissões gasosas e líquidas. Nestes últimos anos, a maioria das instalações de tratamento de gases nas principais fábricas naqueles países foi substituída e hoje atende integralmente às mais exigentes normas de proteção ambiental e a operação destas tem sido, muitas vezes, acompanhada de perto pela comunidade local.

Em países como o Brasil, onde a tecnologia atual tem sido pouco discutida e várias fábricas existentes ainda não foram integralmente atualizadas tecnologicamente, a imagem de poluição perdura, o que tem provocado a quase exclusão deste processo, de significativa importância, nas propostas de sistemas de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (GIRS) e reciclagem de

energia. Em consulta a Cetesb, praticamente não existe solicitação de novos incineradores, principalmente por parte de municípios.

Atualmente, o programa de reciclagem tem sido cada vez mais difundido e aplicado. Mas, por outro lado, os resíduos remanescentes dessa operação constituem os que realmente não têm outra opção de destinação (embora em peso menor) e a incineração se torna a sua opção de descarte. Com isso, o tratamento por incineração representa um aliado muito importante da reciclagem, formando, com esta, um programa integrado (Atkins, 1993).

Um conceito que tem sido cada vez mais difundido na análise de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos é o de levar para aterro os “resíduos últimos”. A noção de resíduos últimos foi introduzida por Lei em 13 de julho de 1992, na França, e tem sido referida por vários autores, como Campos (1999). Ele cita que “resíduo último é aquele que não é mais passível de tratamento, nas condições técnicas e econômicas do momento, principalmente para a extração da parte valiosa do mesmo, ou até para reduzir o seu caráter poluente ou perigoso”. Este conceito, como balizamento para os resíduos a serem aterrados, tem incrementado a tendência mundial de aumentar a utilização da incineração, como um recurso eficaz para ultimar os resíduos e reciclar a energia neles contida.

A tabela 2.1 apresenta alguns dos principais incineradores em operação no Brasil e as suas características principais.

Tabela 2.1 - Características de alguns dos principais incineradores instalados no Brasil

Instalação	Projeto/ Tecnologia	Tipo	Capacidade (ton/ano)	Resíduos Processados	Tratamento de Gases
BASF	Inter-Ude	Rotativo	2.700	RSLP	Lavadores
Guaratinguetá/ SP				Exceto ascaréis	Ácidos/alcalinos
Tribel	Inter-Ude	Rotativo	3.200	RSLP	Lavadores
Belfort Roxo/RJ				Incluindo Difenilas polic.	Ácidos/alcalinos, Separador de gotículas

CETREL Camaçari/BA	Sulzer	Rotativo	10.000	Resíduos Líquidos Organoclorados	Lavadores Ácidos/alcalinos
CETREL Camaçari/BA	Andersen 2000	Rotativo	4.500	Resíduos Sólidos Classe I	Coletor de pó ciclone alcalino
Essencis Taboão da Serra/SP	Inter-Ude	Rotativo	3.200	Resíduo Industrial org.e inorg.	Lavadores Ácidos/alcalinos, Demister e ciclone
Instalação	Projeto/ Tecnologia	Tipo	Capacidade (ton/ano)	Resíduos Processados	Tratamento de Gases
CINAL Marechal Deodoro/AL	CBC/Nittetu Chemical	Câmara horizontal c/ leito reciprocante	11.500	RSLP incl. PCB e organoclorados	Lavadores Ácidos/alcalinos
Clariant Suzano/SP	Inter-Ude	Rotativo	2.700	RSLP	Lavadores Ácidos/alcalinos
ELI LILLY Cosmópolis/SP	Inter-Ude	Rotativo	10.400	RSLP	Lavadores Ácidos/alcalinos
KOMPAC Fortaleza- CE	Kompac	Câmara horizontal com leito reciprocante	10.950	RSLP	Lavadores Ácidos/alcalinos
Rhodia	Rhone	Rotativo	18.000	RSLP	Lavadores

Cubatão/SP	Poulanc					Ácidos/alcalinos
Rhodia	Hoval	Leito fixo	3.600	Resíduos de serviço	Lavadores	
Cubatão/SP		pirolítico		de saúde		Ácidos/alcalinos

2.4 - A EVOLUÇÃO DA INCINERAÇÃO NO MUNDO

Além da análise da incineração no Brasil, é importante conhecer um pouco da evolução do processo em âmbito mundial, que pode ser caracterizada através de gerações ou estágios de desenvolvimento dos sistemas de incineração (Menezes, 1999).

1ª Geração – 1950 – 1965:

Anteriormente a 1950, as instalações existentes eram demasiadamente incipientes, caracterizando-se como um primeiro estágio de evolução somente aquelas instaladas de 1950 a 1965. Nesta fase, a função única era ainda de reduzir o volume do lixo. Os gases eram descarregados diretamente na atmosfera sem tratamento algum. Apareceram aí as primeiras torres de água de refrigeração instaladas sobre a câmara de combustão. A concentração de poeira atingia níveis de 1000 mg/ Nm³ (os sistemas mais modernos atingem atualmente até 3 mg/Nm³). As principais unidades desta geração foram as de Lausanne (1959), Berna (1954), Bruxelas (1957).

2ª Geração – 1965 – 1975:

Nesta época, apareceram os primeiros sistemas de proteção do meio ambiente, que reduziram as emissões a 100 mg/Nm³. Aparecem também os incineradores com câmara dupla, cujo objetivo era melhorar a eficiência de queima. Surgem os primeiros interesses em recuperação de energia para a sua geração e os sistemas de grande capacidade. É fundada a empresa Babcock com sistema de grelhas rolantes.

3ª Geração – 1975 – 1990:

A fase de 75 a 90 é caracterizada, no mundo desenvolvido, pelo aumento do desempenho energético e desenvolvimento das normas de proteção ambiental. O público começa a estar mais

atento aos problemas de poluição. Aparece a introdução dos sistemas complexos de lavagem de gases para reduzir as emissões de gases ácidos, com a neutralização de HCl, SO_x, HF e metais pesados. Além da melhoria das caldeiras, há a melhoria nos processos de combustão dos orgânicos. A automação passa a ser centralizada. Multiplicam-se os centros de tratamento com co-geração de energia.

4ª Geração – 1990 – atual:

Ampliam-se as pressões dos chamados “movimentos verdes”. O tratamento de gases é sofisticado ainda mais, perseguindo a meta de “emissão zero”. Avançam os sistemas para a remoção de outros poluentes como NO_x, dioxinas e furanos. São desenvolvidas as tecnologias avançadas de tratamento para a produção de resíduos finais inertes, que podem ser reciclados ou dispostos sem nenhum problema para o meio ambiente, tal como o uso de plasma térmico. Vários processos estão se sofisticando atualmente no pré-tratamento do lixo, anterior à incineração, para aumentar a sua homogeneização, baixar a umidade e melhorar o poder calorífico, de tal forma a transformá-lo em um combustível de qualidade para a máxima geração de energia. Sofisticam-se também os processos de combustão com o aumento dos sistemas de turbilhamento, que consiste na mistura adequada dos gases de processo com o ar necessário à combustão, secagem, ignição e controle de combustão.

A tabela 2.2 apresenta a evolução do tratamento de resíduos sólidos na Alemanha ao longo do tempo e a tabela 2.3 mostra o elevado percentual de resíduos sólidos urbanos que têm sido processados por incineração nos países desenvolvidos, bem como a recuperação de energia. Hoje vários países, como Suíça e Japão, já projetam para breve atingir um índice superior a 90% no processamento de seus resíduos, em unidades de tratamento térmico.

Tabela 2.2 - Tendências do tratamento térmico de resíduos sólidos na Alemanha

Ano	Nº de unidades	Capacidade de processamento 1000 t/dia	Nº de pessoas servidas		Capacidade média por unidade (t/dia)
			1000 habitantes	% da população	
1980	42	6343	17730	28,9	151

1995	52	10870	24300	30	209
1998	54	11900	32400	40	225
2000	63	13933	48600	60	222

Tabela 2.3 – Uso de incineração nos países desenvolvidos

País	População (milhões)	Geração de lixo (10 ⁶ mil ton/ano)	Nº de incineradores	Relação entre material incinerado e gerado (%)	Recuperação de energia (%)
Suíça	7	2,9	29	80	80%
Japão	123	44,5	1893	72	90%
Dinamarca	5	2,6	32	65	100%
Suécia	9	2,7	21	59	100%
França	56	18,5	100	41	68%
Holanda	15	7,1	9	39	50%
Alemanha	61	40,5	51	30	Sem informação
Itália	58	15,6	51	17	30%
EUA	248	180	168	19	75%
Espanha	38	11,8	21	15	24%
Reino Unido	57	35	7	5	25%
Lima, 1994					

2.5 TIPOS DE INCINERADORES

Diferentes tecnologias de incineração têm sido desenvolvidas para tratar os vários tipos e formas físicas de resíduos perigosos. Os quatro projetos mais comuns de incineradores são os de injeção líquida (ver a figura 2.3), às vezes combinado com incineração de gases e vapores, fornos rotativos, câmara fixa e os de leito fluidizado.

O processo de seleção e projeto de sistemas de incineração de resíduos perigosos pode ser muito complexo. Felizmente, existe uma experiência considerável na manufatura industrial e vários guias úteis de projeto têm sido publicados (Cross, Hesketh, 1985). Assim, embora um exame detalhado dos princípios de projeto esteja além dos objetivos deste trabalho, uma revisão geral dos aspectos mais relevantes dos sistemas de incineração e dos fatores mais importantes poderá ser útil no entendimento da operação e das emissões dos processos de destruição térmica.

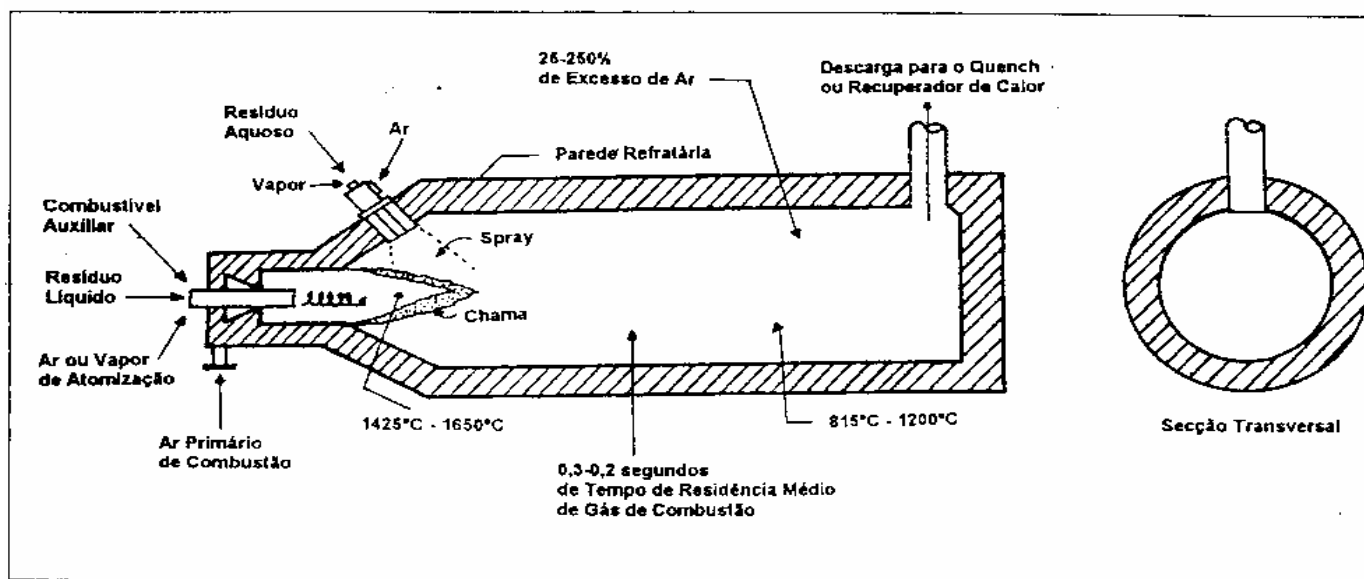


Figura 2.3 - Câmara de combustão do incinerador de injeção líquida.

Os quatro principais sub-sistemas incorporados em um sistema de incineração de resíduos perigosos são: 1- preparação e alimentação do resíduo, 2- câmara de combustão, 3- controle dos poluentes atmosféricos e 4- manuseio da cinza do resíduo. A ordem usual destes subsistemas é mostrada na figura 1.1 (ver item 1.1), junto com as opções típicas de componentes do processo. A seleção da combinação apropriada destes componentes é, em princípio, uma função das propriedades físicas e químicas dos resíduos a serem incinerados.

- 1- Preparação e Alimentação de Resíduos: A forma física do resíduo determina o método adequado de alimentação (US EPA,1981). Líquidos são misturados e bombeados para dentro das câmaras de combustão através de bicos de pulverização (sprays) ou via

queimadores atomizadores especialmente projetados (ver figura 2.4). Resíduos contendo sólidos em suspensão podem necessitar de uma filtragem, para se evitar o entupimento dos bicos sprays, ou aberturas no atomizador. Embora uma combustão auto-sustentada seja possível com resíduos com poder calorífico acima de 2200 kcal/kg (Dempsey e Oppelt, 1993), os resíduos líquidos são preparados para se obter um poder calorífico de no mínimo 4400 kcal/kg, sempre que possível. Para incineração dos resíduos com poderes caloríficos menores, normalmente pode ser requerido combustível suplementar. A mistura (blending) dos resíduos pode ser feita antes que estes sejam alimentados à câmara de combustão ou usando-se bicos sprays separados para os diferentes tipos de resíduos, sendo que, neste caso, a mistura ocorre dentro da câmara de combustão. A mistura de resíduos também é usada para se controlar o teor de cloro do resíduo alimentado no incinerador. Resíduos com um teor de cloro de 70% ou mais podem ser incinerados em incineradores especialmente projetados (Ackerman, Mc Gaughey, Wagoner, 1983) (figura 2.4). A mistura também pode promover um melhor controle da combustão e limitar o potencial de formação periódica de altas concentrações de cloro livre nos gases de combustão. A tabela 2.4 apresenta um resumo da aplicabilidade dos tipos de incineradores.

|

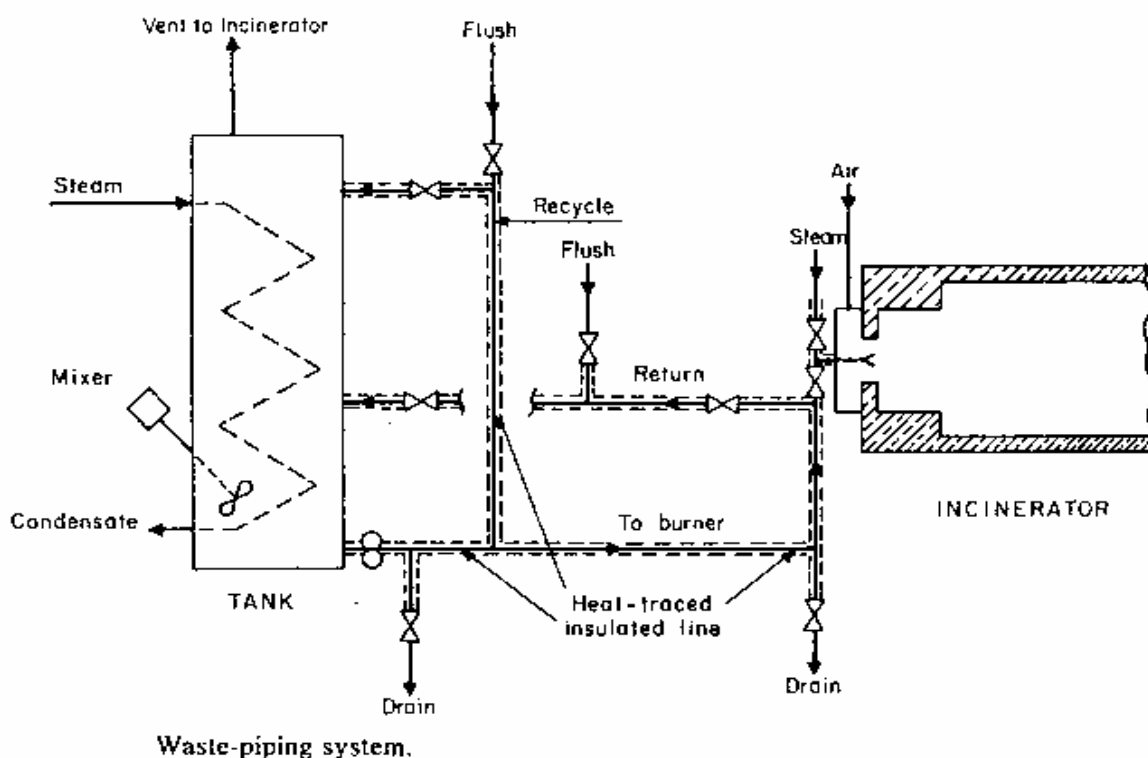


Figura 2.4 – Sistema de tubulação para transporte e injeção de líquidos

Os lodos são, em geral, alimentados, usando-se bombas de cavidade progressiva e lanças resfriadas com água. Parte dos resíduos sólidos podem requerer uma fragmentação para controle do tamanho de partícula. Eles podem ser alimentados na câmara de combustão através de empurradores, por gravidade, alimentadores pneumáticos, alimentadores vibratórios, de rosca sem fim ou correia de alimentação. Resíduos em contêineres são usualmente alimentados por gravidade ou empurradores.

- 2- Câmaras de Combustão: A forma física do resíduo e o seu teor de cinzas determinam o tipo de câmara de combustão a ser selecionado. A tabela 2.4 contém as considerações gerais de seleção para os quatro principais projetos de câmaras de combustão em função

das diferentes formas de resíduos (US EPA, 1981). A maioria dos sistemas de incineração tem seus nomes derivados do tipo de câmara de combustão empregado.

Tabela 2.4 - Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores (US EPA, 1981).

	Injeção Líquida	Forno Rotativo	Câmara Fixa	Leito Fluidizado
Sólidos				
Granulares, homogêneo		X	X	X
Irregular, bruto(pellets, etc)		X	X	X
Baixo ponto de fusão (alcatrões, etc)	X	X	X	X
Compostos Orgânicos com constituintes de cinzas fundíveis		X	X	X
Material não preparado, volumoso, material a granel		X	X	X
Gases				
Vapores orgânicos	X	X	X	X
Líquidos				
Resíduos aquosos com alta carga de orgânicos	X	X	X	X
Líquidos orgânicos	X	X	X	X
	Injeção Líquida	Forno Rotativo	Câmara Fixa	Leito Fluidizado
Sólidos Líquidos				
Resíduo contendo compostos aromáticos halogenados (mínimo de 1204° C)	X	X	X	X
Lodo aquoso orgânico	X	X	X	X

Os incineradores de injeção líquida ou câmaras de combustão são aplicáveis quase que exclusivamente para resíduos líquidos bombeáveis. Essas unidades (figura 2.1, 2.2, 2.3) são em geral cilindros simples, revestidos internamente de refratários (verticais ou horizontais) e equipados com um ou mais queimadores. Os resíduos líquidos são injetados através desses queimadores, atomizados em pequenas gotículas e queimados em suspensão. Os queimadores, assim como os bicos sprays separados de injeção de resíduos, podem estar direcionados axialmente, radialmente ou tangencialmente em relação à chama. Uma melhor utilização do espaço de combustão e taxas maiores de liberação de calor, contudo, podem ser alcançadas com a utilização de queimadores ciclônicos ou vórtex, ou ainda, projetos envolvendo entrada tangencial (Kiang, 1977).

A qualidade da atomização é o ponto crítico para se alcançar alta eficiência de destruição em combustores líquidos. Bicos sprays têm sido desenvolvidos para produzir névoas com diâmetros de partículas pequenas, de até 1μ (Kiang, 1982), que são bem menores, se comparadas com as originadas pelos queimadores de óleo típicos, que produzem gotículas na faixa de 10 a $50 \mu\text{m}$ (Reed, 1981). A atomização pode ser obtida com ar ou vapor à baixa pressão (0,068 a 0,68 bar), ar ou vapor à alta pressão (1,72 a 6,81 bar), ou meios mecânicos (hidráulicos) que usam orifícios especialmente projetados (1,72 a 31450 bar).

Os incineradores de injeção líquida vertical são os preferidos quando os resíduos contêm alto teor de sais inorgânicos e de cinzas fundíveis, enquanto que os horizontais podem ser usados com resíduos com baixo teor de cinzas. No passado, a capacidade típica dos incineradores de injeção líquida era de aproximadamente $7,6 \cdot 10^6$ kcal/h de calor liberado. Atualmente, as unidades com capacidade de até $52 \cdot 10^6$ kcal/h estão em operação. Nos Estados Unidos, fornos rotativos têm sido projetados para uma capacidade de liberação de calor de até $37,7 \cdot 10^6$ kcal/h, mas, na média, os valores típicos estão em torno de $15 \cdot 10^6$ kcal/h (Dempsey e Oppelt, 1993).

Os incineradores de fornos rotativos são os mais versáteis, devido ao fato de serem aplicáveis à destruição de resíduos sólidos, lamas e resíduos em contêineres, assim como os líquidos. Devido a isto, estas unidades estão freqüentemente incorporadas em projetos de sistemas de incineração comerciais e utilizadas na recuperação de áreas de “superfunds”. O forno rotativo é um cilindro horizontal revestido internamente com refratários, montado com uma pequena inclinação. A rotação do forno induz o transporte do resíduo através do forno e melhora a mistura do resíduo a ser queimado. O resíduo pode ser transportado tanto concorrente quanto em contracorrente em

relação ao fluxo de gás. O tempo de residência dos resíduos no forno é geralmente de 0,5 a 1,5 horas (Rovaglio, 1998). O controle deste tempo de residência dos sólidos é feito pela velocidade rotacional do forno (tipicamente de 0,5 a 1,0 rpm), pela taxa de alimentação de resíduos e, algumas vezes, pela inclusão de barreiras internas (chicanas) para retardar o movimento do resíduo através do forno. A taxa de alimentação é também usada para ajustar o limite da quantidade de resíduo que esteja sendo processado no forno para quase 20% do volume do forno.

A função primária do forno é converter os resíduos sólidos em gases, processo este que ocorre através de uma série de volatilizações, destilação destrutiva e reações parciais de combustão. Contudo, para completar as reações de combustão da fase gasosa, é necessário um pós queimador. O pós queimador é ligado diretamente à extremidade de descarga do forno, de onde os gases, saindo deste, são direcionados para a câmara de pós-queima. Em alguns dos sistemas mais recentes, é instalado um "ciclone quente" entre o forno e o pós queimador para remover partículas sólidas que possam criar problemas de entupimento no pós-queimador. Os pós-queimadores podem ser alinhados vertical ou horizontalmente e suas funções básicas têm os mesmos princípios do incinerador de injeção líquida. De fato, várias unidades também incineram resíduos líquidos perigosos através de queimadores separados dentro dos pós-queimadores. Tanto o forno quanto o pós-queimador são, usualmente, equipados com sistema de queima de combustível auxiliar para elevar e manter a temperatura de operação desejada. Algumas vezes, certos operadores costumam queimar os resíduos líquidos no pós-queimador como uma medida de controle de temperatura.

Como constitui o objeto do presente estudo, uma descrição mais pormenorizada deste tipo de incineradores (forno rotativo) será apresentada no item 2.6.

Os incineradores de câmaras fixas, também chamados de ar controlado, incineradores pobres em ar ou pirolíticos, representam a terceira tecnologia atualmente em uso na incineração de resíduos perigosos. Estas unidades empregam processos de combustão de dois estágios, muito parecidos com os fornos rotativos (ver figura 2.1). O resíduo é empurrado ou bombeado para dentro do primeiro estágio, ou câmara primária, e queimado num ambiente que contenha cerca de 50 a 80% do ar estequiométrico requerido para a combustão. Esta condição pobre em ar promove a evaporação da maior parte da fração volátil pelo calor endotérmico provido pela oxidação da fração de carbono fixo. A fumaça resultante dos produtos pirolíticos, que consistem, principalmente, de metano, etano, e outros hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dos produtos de combustão, passa para o segundo estágio ou câmara secundária. Aí, ar adicional é injetado

para completar a combustão, a qual pode ocorrer espontaneamente ou pela adição de combustíveis suplementares. As reações de combustão na câmara primária e as velocidades turbulentas são mantidas em níveis baixos pelas condições pobres de ar para minimizar a reentrada e arraste do particulado. Com a adição de ar secundário, o excesso de ar total para incineradores de câmaras fixas está na faixa 100 a 200% (Dempsey e Oppelt, 1993).

As unidades de câmaras fixas tendem a ter capacidades menores que os incineradores de injeção líquida ou de fornos rotativos, devido às limitações físicas do alimentador e ao transporte de grandes quantidades de resíduos através da câmara de combustão. O custo de capital relativamente baixo e o reduzido potencial de requisitos de controle de particulado fazem dos incineradores de câmara fixa mais atraentes que os fornos rotativos, principalmente nas instalações de pequeno porte dentro de fábricas.

Os leitos fluidizados têm servido, desde há muito tempo, às indústrias químicas como uma operação unitária e têm sido usados para queimar lodos gerados pelos sistemas de tratamento de esgotos municipais (ver figura 2.5). Este tipo de sistema de combustão começou apenas recentemente a ser aplicado na incineração de resíduos perigosos. Os incineradores de leito fluidizado podem ser do tipo circulante ou borbulhante (Rickman, Holder, Young, 1985). Os dois tipos consistem em um vaso de combustão simples, revestido de refratários parcialmente cheios com areia, alumina, carbonato de cálcio ou outro material semelhante. O ar de combustão é suprido através de um distribuidor em forma de pratos, localizado na base do combustor, conforme mostrado na figura 2.5, a uma taxa suficiente para fluidizar (leito borbulhante) ou carrear o material do leito (leito circulante). No projeto de leito circulante, as velocidades do ar são maiores e os sólidos são soprados para cima, separados em ciclones e daí retornam para a câmara de combustão. As temperaturas de operação são normalmente mantidas na faixa de 760 a 870°C e requer-se um excesso de ar na faixa de 25 a 150 %.

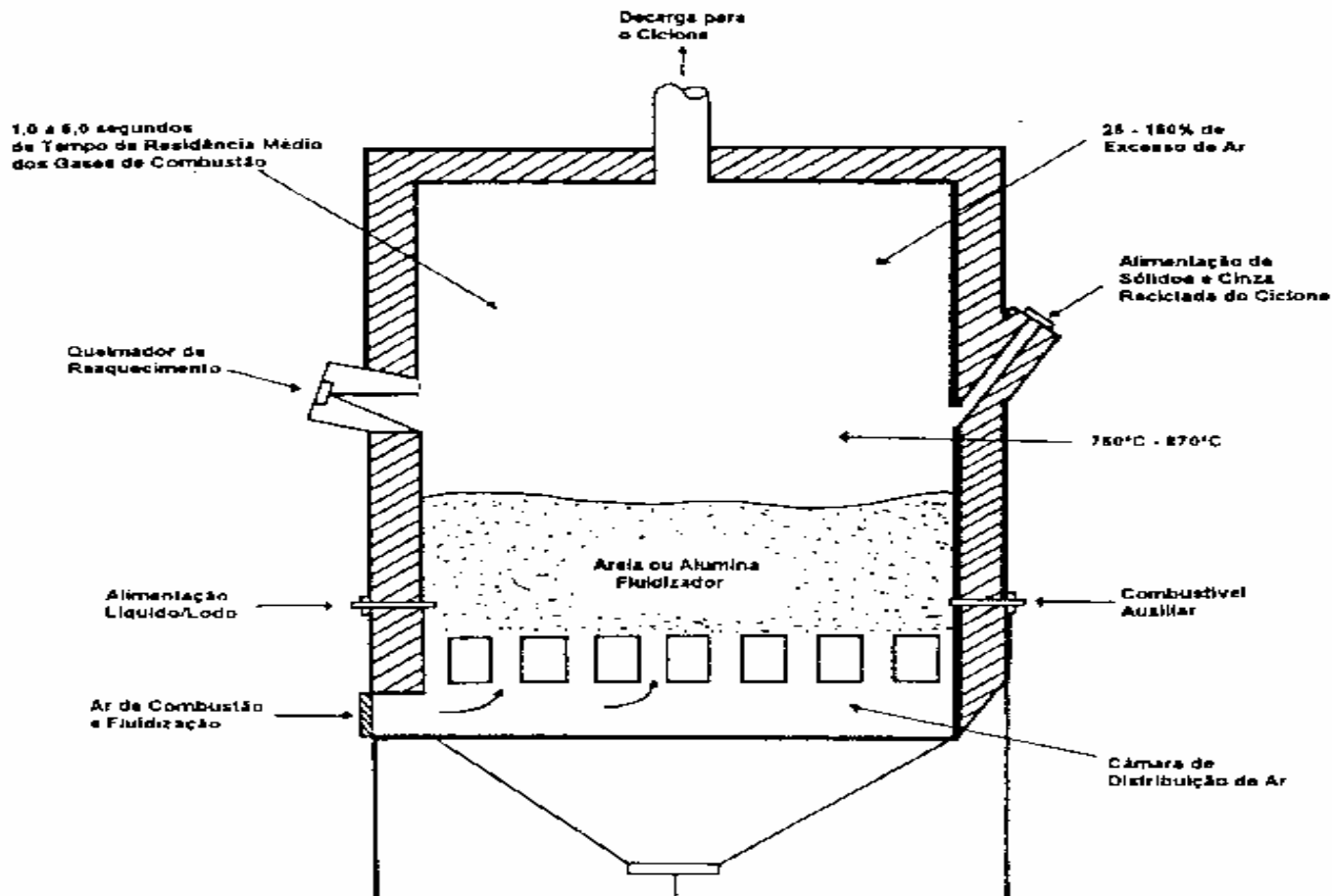


Figura 2.5- Câmara de combustão com leito fluidizado

Os incineradores de leito fluidizado são primariamente utilizados para líquidos, lodos ou materiais sólidos fragmentados, incluindo solos. Para permitir uma boa distribuição do resíduo dentro do leito e remover os sólidos residuais do mesmo, todos os sólidos requerem em geral um pré-peneiramento ou moagem para se obter um tamanho menor que 2 polegadas em diâmetro. Incineradores de leito fluidizado oferecem elevadas razões de gás-sólido, altas eficiências de

transferência de calor, alta turbulência tanto na fase gasosa como na sólida, temperaturas uniformes através do leito e o potencial para neutralização dos gases ácidos com cal, calcário ou adição de carbonato. Os leitos fluidizados também têm uma capacidade potencial para aglomeração de sólidos no leito, especialmente se sais estiverem presentes no resíduo alimentado. Independentemente do tipo de incinerador selecionado, as propriedades químicas e termodinâmicas dos resíduos determinam o tamanho da câmara de combustão e suas condições operacionais: temperatura, excesso de ar, vazões, natureza do controle de poluentes atmosféricos e sistemas de manuseio da cinza e resíduos. São necessários dados da composição elementar e teor de água para se determinarem os requisitos do ar de combustão estequiométrico e para prever a vazão do gás de combustão e sua composição. Estes parâmetros são importantes na determinação da temperatura de combustão, do tempo de residência, da eficiência da mistura de resíduo/combustível/ar e do tipo e tamanho do equipamento de controle de poluentes atmosféricos. É importante entender, contudo, que desvios significativos desses valores têm sido observados na prática, sem prejudicar a destruição do resíduo e eficiência de remoção (Trenholm, 1985).

Um outro tipo de incinerador é o de Plasma Térmico. Quando um gás é aquecido a temperaturas elevadas, há mudanças significativas em suas propriedades. A cerca de 2000°C, as moléculas do gás começam a se dissociar em estado atômico. A 3000°C, os átomos são ionizados pela perda de parte dos elétrons. Este gás ionizado é chamado de plasma. O gás sob o estado de plasma apresenta boa condutividade elétrica e alta viscosidade, quando comparado a um gás no estado normal (Grupo Kompac, 2005).

Um gerador de plasma é um dispositivo que transforma energia elétrica em calor transportado por um gás. Com estes dispositivos, qualquer gás pode ser levado ao estado de plasma e o gás utilizado pode ter participação significativa na reação. O fluxo de calor pode ser medido e controlado e este fluxo pode ser utilizado para aquecer, gaseificar e promover reações químicas em um reator acoplado à tocha de plasma. A eficiência de transformação de uma tocha de plasma está em cerca de 85-90% da energia elétrica utilizada na geração do plasma. Temperaturas típicas alcançadas por plasmas térmicos são da ordem de 15.000°C, embora temperaturas de até 50.000°C sejam possíveis.

Os principais atrativos do uso de plasma na decomposição térmica são:

- Elevadas temperaturas causam rápida e completa pirólise da substância orgânica, assim como fundem e podem vitrificar certos resíduos inorgânicos;

- Alta densidade de energia possibilita a construção de reatores com menores dimensões para as mesmas capacidades, também favorece a construção de equipamento móvel;
- O uso de energia elétrica reduz a vazão total de gás combustível, dessa forma resultando em menores instalações para processamento dos gases efluentes e o grande número de opções de gases para geração do plasma torna flexível o controle sobre os fatores químicos do processo;
- Com menores instalações e alta densidade de energia, tempos de partida e paradas são reduzidos;
- Favorece a pirólise de substâncias sensíveis à radiação ultravioleta, como os organoclorados.

2.6 FUNCIONAMENTO DE UM INCINERADOR ROTATIVO

O forno rotativo é um cilindro revestido internamente com material refratário e é montado com leve inclinação em relação ao plano horizontal. A rotação do forno provê o transporte do resíduo através do forno e promove a mistura do resíduo com o ar de combustão. É aplicável para a incineração de resíduos perigosos sólidos e líquidos (ver figura 2.6).

Os fornos podem ser projetados para cargas de 5 a 10% do volume interno, com o tempo de residência relativamente pequeno, ou seja, menos de uma hora. Neste caso, não são usadas chicanas. A transferência de calor desenvolve-se na parte carregada do forno. Numa primeira etapa, a transferência de calor dá-se por radiação das paredes do forno. A relação de parede do forno para superfície do leito aumenta com o decréscimo da carga no forno. Uma carga parcialmente adequada, leve, resulta numa mistura melhor do leito, promovendo aquecimento do leito.

Caso o tempo de residência requerido seja grande, maior que 1 hora, por exemplo, um sistema de chicanas, constituído de anteparos convenientemente dispostos, pode ser instalado ao final do forno, aumentando, com isso, o tempo de residência. Este tipo de recurso aumenta a carga no forno, mas, por aplicação prática, não deve ultrapassar de 15 a 20% do volume interno do forno.

O tamanho das partículas resultantes deve ser avaliado para se ter uma previsão do comportamento no gás de processo. O tamanho também influencia no tempo de residência e na temperatura de processo.

O poder calorífico e a umidade do resíduo alimentado são fatores que influenciam diretamente na quantidade de combustível e no volume do gás de processo. A umidade existente afeta o comportamento do material na primeira etapa de incineração. Dependendo do teor de umidade, pode ocorrer aglomeração de material, o que é indesejável.

Para uma dada taxa de produção, o tamanho do forno e a respectiva carga são funções da densidade do material no processo.

O ângulo de repouso do material influi no tempo requerido para transportar o material através do forno, influenciando, portanto, no tempo de residência.

Em suma, as seguintes características do material devem ser definidas para o planejamento da incineração: composição química, calor específico, distribuição, poder calorífico, umidade, densidade aparente, ângulo dinâmico de repouso.

O fluxo de material no forno rotativo é determinado pela inclinação do forno e velocidade de rotação e pelas características do material, como já descritas acima. O forno instalado de modo inclinado propicia que o leito de sólidos avance pelo forno pela ação da força da gravidade. Ao girar o forno, o material quebra a superfície devido à inclinação e cai pela superfície inclinada, promovendo a homogeneização do leito.

A inclinação de um forno varia normalmente de 0,02 m a 0,04 m por metro linear. Um aumento na inclinação aumenta o fluxo de transporte de material no forno.

A velocidade de rotação varia de 0,5 a 1,5 rpm para as cargas mais pesadas e, para fornos menos carregados, é de 1 a 3 rpm (Freeman,1989).

Pode-se fazer uma série de combinações de diâmetros e comprimentos de fornos, o que influenciará no tempo de residência. Contudo, para resíduos sólidos, a aplicação da relação comprimento versus diâmetro varia de 3 para 1 até 10 para 1 (Freeman,1989). Após a definição das dimensões do forno, a velocidade do gás de processo pode então ser calculada.

A quantidade do gás de processo resulta da combustão, evaporação da água e outros produtos gasosos de reações químicas. As perdas de calor por radiação devem ser consideradas na avaliação do balanço térmico a fim de se garantir a temperatura de processo correta para o processo.

Se o objetivo do processo é volatilizar orgânicos para subsequente destruição na corrente gasosa, o material a ser descontaminado é alimentado no mesmo lado do queimador de combustível do

forno: sólidos e gases fluem no mesmo sentido, ou seja, em fluxo paralelo concorrente. Esta operação também é sugerida quando o material a ser processado contém inflamáveis ou quando a reação química for exotérmica, pois assim resulta num tempo de residência maior para destruir orgânicos (Freeman,1989).

Em situações onde quantidades significativas de água são evaporadas e reações endotérmicas ocorrem, o fluxo contracorrente é recomendado, porque, neste caso, torna-se mais eficiente. O forno é alimentado no lado oposto ao queimador. Sólidos e gases fluem em sentidos opostos.

Em adição aos comentários acima, seguem algumas considerações mecânicas, que merecem atenção. A relação entre o diâmetro e o comprimento do forno determina quantos suportes serão requeridos. Especificações para espessura das paredes do forno, virolas, rolamentos, suportes, motores são definidas pela carga total do forno. O maior componente da carga do forno é o revestimento refratário no forno.

O revestimento refratário é selecionado de modo a otimizar o capital aplicado e os custos de operação. A função dos refratários de um forno é proteger o aço estrutural e minimizar as perdas de calor por radiação. A potência requerida para girar o forno é função do seu peso, da velocidade de rotação, do diâmetro do forno, comprimento e dimensões do sistema de tracionamento deste.

A selagem de um forno é uma tarefa importante e difícil. Uma operação eficiente de um forno requer que a entrada de ar indesejado seja evitada com a montagem de um sistema eficiente e adequadamente mantido. Ar em excesso pode gerar consumo excessivo de combustível e prejudicar o controle do processo.

Após o processamento no forno rotativo, os gases ainda contêm orgânicos voláteis que precisam ser incinerados, assim passam por uma câmara de pós-combustão (CPC), revestida por material refratário e dimensionado de modo a garantir um tempo de residência de pelo menos 2 segundos a uma temperatura média de 1200°C (Bébar, 2002). Um queimador adicional normalmente é instalado para garantir a queima dos voláteis orgânicos presentes. Este equipamento pode ser circular ou com seção quadrada e instalado na posição vertical.

Finalmente, os gases efluentes são tratados para remoção de materiais particulados, componentes químicos, tais como SO_x, NO_x, CO, VOC (compostos orgânicos voláteis), cloro, metais etc. Usa-se, em geral, uma bateria de ciclones, seguida de um sistema de lavagem de gases. A tecnologia envolvida constitui estudos específicos.

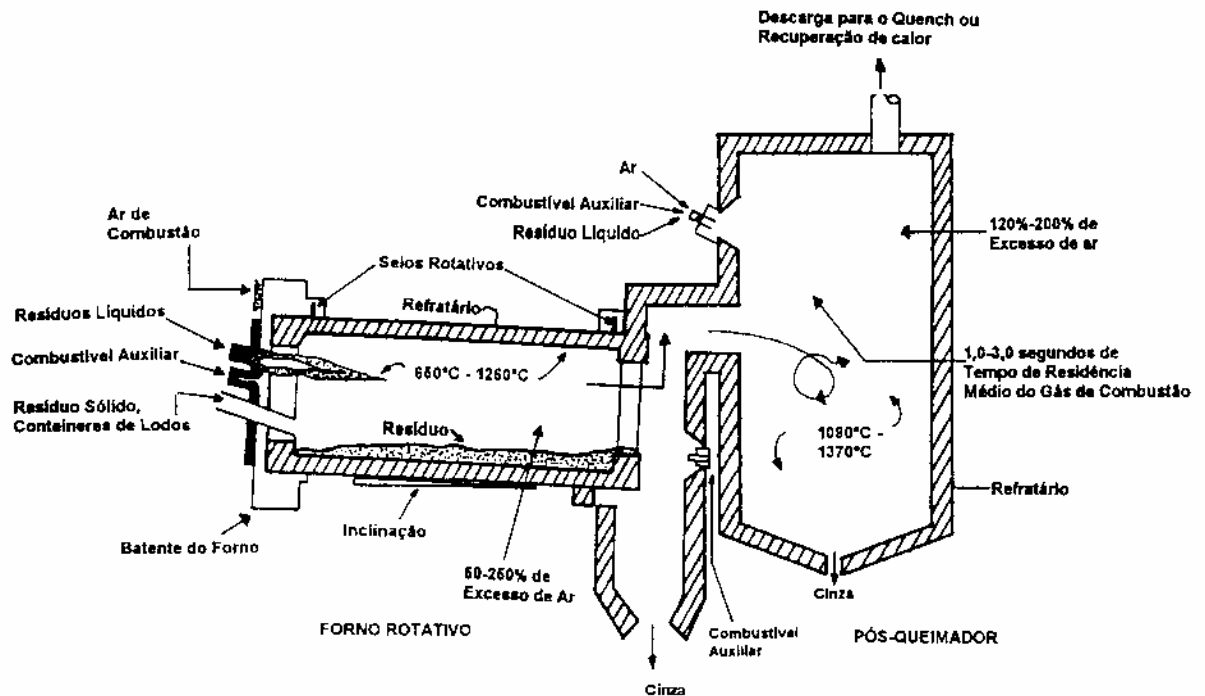


Figura 2.6- Forno rotativo e câmara de pós -combustão

Os resíduos que podem ser incinerados num forno rotativo são: PCBs (bifenilas policloradas), resíduos químicos (solventes, orgânicos, resinas, fármacos), lodos das estações de tratamento de efluentes, entulhos, embalagens diversas de plásticos, lixo doméstico.

As principais vantagens do uso de um incinerador de forno rotativo são:

- Incinerar uma grande variedade de resíduos líquidos e sólidos,
- Incinerar materiais que passam pela fase de fusão,
- Capacidade independente para resíduos líquidos e sólidos,
- Possibilidade de alimentar tambores e barricas,
- Adaptável a vários mecanismos de alimentação,
- Caracterizado por alta turbulência e exposição ao ar de combustão dos resíduos sólidos,

- Remoção contínua de cinzas que não interfere com o processo de oxidação,
- Sem partes móveis dentro do forno,
- Adaptável ao uso de lavadores úmidos dos gases efluentes,
- O tempo de residência é adaptável aos componentes não voláteis pelo ajuste da velocidade de rotação do forno,
- O resíduo pode ser alimentado diretamente, sem tratamentos prévios como pré-aquecimento, mistura etc.,
- Os fornos podem trabalhar a até 1400°C, permitindo a destruição de compostos difíceis de sofrer destruição térmica,
- Permite o ajuste da velocidade de rotação de um forno de acordo com as características do resíduo em processo.

Em relação às desvantagens de um incinerador rotativo, citam-se:

- Alto custo de investimento,
- Na operação, deve ser tomado cuidado para prevenir a danificação do refratário,
- Material particulado pode ser conduzido para fora do forno sem combustão completa,
- Material esférico ou cilíndrico pode ser retirado sem sofrer combustão completa,
- O forno rotativo requer ar em excesso para compensar perdas em vazamentos em selos,
- Altas temperaturas podem danificar os mecanismos internos,
- Alta carga de material particulado,
- Eficiência térmica relativamente baixa em relação à de outros incineradores,
- Problemas de manutenção dos selos de vedação podem causar dificuldades na operação do forno.

Um forno de incineração rotativo típico usado para destruição de resíduos perigosos inclui os seguintes componentes: sistema de alimentação de resíduos, forno rotativo propriamente dito, sistema de alimentação do combustível auxiliar, câmara de pós-combustão (CPC) e equipamentos de controle de poluição,

As dimensões do forno variam conforme as condições de operação, com valores típicos de comprimento em torno de 6 m e diâmetro de 3 m.

A temperatura de operação varia de 820°C a 1600°C. Por causa disso, os fornos são normalmente revestidos com tijolos refratários e não têm partes metálicas expostas ao calor, podendo trabalhar a altas temperaturas e apresentam baixa corrosão. O tempo de residência varia de alguns

segundos para os gases a algumas horas (resíduos sólidos). Pós-queimadores, normalmente usados com fornos rotativos, são câmaras de combustão empregadas para destruir, por oxidação, hidrocarbonetos gasosos não destruídos no incinerador. Há três tipos de CPC: chama direta, térmico, e catalítico. Os de chama direta e térmico são similares, mas eles “destroem” os vapores orgânicos por métodos diferentes. Uma porcentagem de vapores passa diretamente pela chama numa unidade direta de queima. Numa unidade térmica, os vapores remanescentes numa atmosfera oxidante de alta temperatura devem permanecer num tempo suficiente no forno para completar as reações de oxidação. Equipamentos catalíticos podem ser incorporados para acelerar as reações de oxidação. Podem ser usados para incineração de alguns resíduos líquidos, co-incineração, pirólise quando alguns gases não são reciclados.

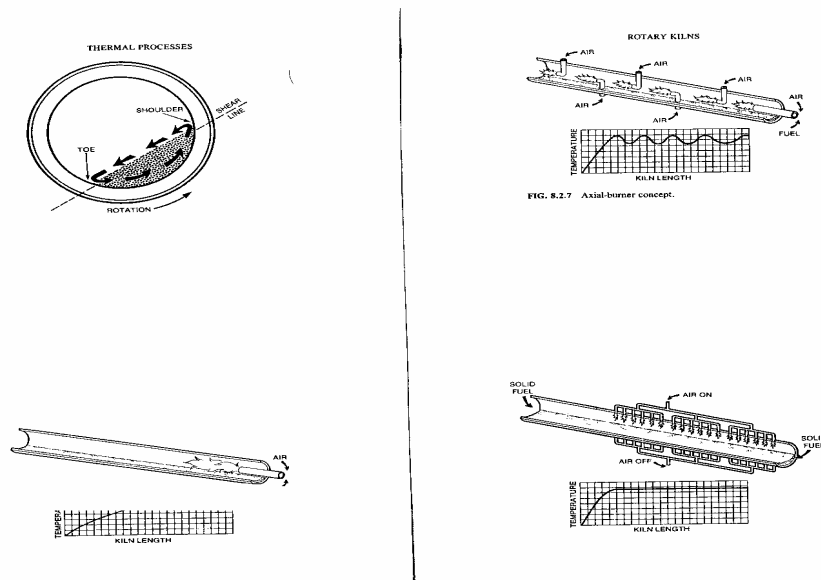


Figura 2.7- Vários sistemas de injeção de chama em fornos rotativos

2.7 VARIÁVEIS DE PROCESSO DE UM FORNO ROTATIVO

O sistema de operação de um forno rotativo deve considerar as seguintes variáveis, para avaliar a performance e com respeito aos critérios de projeto do equipamento:

- Capacidade de transferência térmica do forno em $\text{kcal/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$
- Tempo de retenção dos sólidos e tempo e temperatura requeridos para completa destruição dos componentes indesejáveis
- Velocidade do gás de processo
- Vazamento de ar para dentro do sistema
- Temperatura excessiva
- Máxima temperatura admissível para o refratário

- Limitações mecânicas com respeito ao resíduo alimentado e sistema de retirada de cinzas
- Perdas de calor
- Limites de operação
- vazão do gás de processo

Em relação ao incinerador utilizado no presente trabalho, quanto ao atendimento dos limites de emissão (CONAMA 316, 2002) e garantia da performance, as seguintes condições devem ser observadas e controladas durante o processo:

- Temperatura do forno rotativo (900°C no mínimo, pois está descrito na licença de funcionamento)
- Vazão de gás natural para manutenção de temperatura no forno e na CPC
- Vazão de ar de combustão de ar dos queimadores de gás natural
- Vazão de ar secundário da câmara de combustão, no presente estudo, 600 Nm³/h mínimo.
- Temperatura na CPC (1250°C no máximo, por causa dos refratários)
- Concentração de oxigênio com no mínimo 5% e máximo de 20%, antes de passar para o “quench”, etapa seguinte de incineração, que consiste na diminuição rápida da temperatura dos gases.
- Concentração de monóxido de carbono, sendo o valor máximo permitido de 100 mg/Nm³, no caso de ultrapassado este valor, intertravam-se as entradas de resíduos sólidos líquidos e sólidos a fim de ajustar a concentração de saída
- Pressão interna do forno (-0,5 mbar a fim de se garantir a vedação de ar do incinerador para o meio ambiente)
- Finalmente, temperatura dos gases efluentes enviados aos Equipamentos de Controle de Poluição, vazão de água dos lavadores de gases e pH da água de lavagem, controlada entre 8,0 e 9,0 com solução aquosa de soda a 8%.

No presente estudo, constituem, como foco do estudo, as variáveis quanto à permissão dos elementos que podem ser incinerados e devem satisfazer, se devidamente balanceados, as restrições no controle do processo em termos de temperaturas e emissões.

Estimar o ponto ótimo da capacidade térmica de um incinerador, forno e CPC não é uma tarefa tão simples. Um método de duas etapas para se determinar a capacidade pode ser empregado para

uma larga variedade de resíduos alimentados ao sistema. Integram este sistema atributos de projeto, tais como balanços de energia e de massa.

Em geral, a capacidade nominal do sistema de incineração é determinada na etapa de incineração no forno rotativo, comparando-se a capacidade de geração de calor e a capacidade de projeto do forno.

Desta maneira, uma avaliação clara é necessária para prever a capacidade de tratamento, sendo que balanços de energia e massa sozinhos “blindam” os critérios de avaliação de performance. Avaliando-se em duas etapas, pode ser usado o seguinte critério: para um mix de resíduos específico, pode-se obter uma referência da capacidade do equipamento, que é função da composição de alimentação e da entalpia de combustão, sendo que este procedimento pode ser referenciado para vários tipos de incineradores. Este método exemplificado a seguir considera todas as variáveis relevantes de processo do ponto de vista térmico e em termos de balanço de energia global.

A habilidade de estimar a capacidade de tratamento do incinerador permite ao operador do sistema otimizar ou identificar alternativas de melhorias do ponto de vista ambiental e operacional.

A performance do sistema, para uma dada condição de processo, depende dos seguintes fatores:

- ✓ excesso de ar
- ✓ vazão de gás de processo
- ✓ balanço energético
- ✓ balanço material, de onde podem ser desenvolvidas curvas de desempenho massa x kcal/kg, por exemplo

Num segundo estágio, estas condições devem ser avaliadas em relação a outros aspectos:

- ✓ capacidade de transferência de calor do forno
- ✓ tempo de retenção de sólidos
- ✓ velocidade dos gases
- ✓ entradas de ar falso
- ✓ temperatura
- ✓ temperatura máxima do refratário
- ✓ capacidade de alimentação de resíduos e extração das cinzas
- ✓ perdas de calor
- ✓ permissões limites de operação

O exemplo, a seguir, pode tornar mais claro o entendimento do exposto acima: para uma determinada mistura de alimentação de resíduos, entender a avaliação de capacidade de um incinerador, admitindo-se que os seguintes resíduos são alimentados a um dado forno (não é o forno do presente estudo):

1. Sólidos: 1000 kg/h e 556 kcal/kg
2. Lodo de petróleo: 1000 kg/h e 1100 kcal/kg
3. Óleo residual: 500 kg/h e 8300 kcal/kg

Considerando-se uma alimentação total de 2,5 ton/h, a taxa total de calor liberado é de 5.806.000 kcal/h, sendo o calor por unidade de massa alimentada igual a 2322 kcal/kg. Não se alimenta resíduo na câmara de pós combustão. Assim a capacidade total do sistema é igual à capacidade do forno.

A capacidade real de tratamento do forno é definida pela aplicação dos fatores específicos derivados da capacidade teórica e dos dados práticos da tabela 2.5 (ver a seguir), baseadas em balanços térmicos e de massa, para uma faixa de composição de resíduos e capacidade calorífica. (Zwayyed, 1998).

A capacidade nominal de alimentação de um forno é função dos valores do calor de combustão dos componentes assim como do teor de umidade presente em cada um deles. A tabela 2.5 mostra a variação da capacidade de um forno estudado por Zwayyed, 1998, de acordo com a umidade do resíduo. Vale ressaltar que o valor da capacidade do forno nessa tabela pode alterar-se caso o valor do poder calorífico for reduzido de 2000 para 1000 kcal/kg.

Tabela 2.5: Impacto do calor de combustão e umidade na capacidade teórica de um forno.

Umidade no Resíduo, %	Capacidade do Forno aumenta, ton/h	Porcentual alterado
25	18,0	121
20	11,8	119
15	12,3	117
10	8,5	116
5	7,8	114
0	5,2	106

Determinação da capacidade real de um forno para tratamento de resíduos: No exemplo, a seguir, será apresentado o estudo de caso para um resíduo alimentado que tem baixo calor de combustão, composto por 5,5% de matéria orgânica, 69,5% de cinzas e 25% de água e calor de combustão de 555 kcal/kg.

Baseado nos dados fornecidos, é termodinamicamente possível processar 10,1 ton/h de um resíduo de baixo poder calorífico a temperatura de 1100°C e cinzas a 900° C. Isto pode ser feito mantendo-se um fluxo de gás de processo na CPC de 145700 m³/h (a 5,0% de oxigênio).

Impacto do tamanho do forno:

Para baixo poder calorífico, a função primária do forno é transferir calor ao resíduo. A uma taxa de 10,1 ton/h, 2,5 ton/h de água devem ser evaporadas, 7,1 ton/h de cinzas serão aquecidas a 900°C para atingir destruição do resíduo e dos orgânicos presentes.

Supondo um forno revestido com diâmetro de 4,1 m e comprimento de 10,7 m e usando o resíduo acima citado, ele tem capacidade suficiente de transferir calor para cumprir o que foi descrito até agora. Admite-se que, com estas dimensões, um forno possa transferir 40688 kcal/h/ m² de área do refratário do forno. A esta taxa, o forno transfere $5,6 \times 10^6$ kcal/h de calor. Para atender 10,1 ton/h, uma transferência de $2,05 \times 10^6$ kcal/h /h é preliminarmente requerida. Obviamente, um forno destas dimensões oferece muito mais área de troca térmica do que a necessária para atingir a taxa de alimentação citada, sendo que cada metro linear transfere $0,52 \times 10^6$ kcal/h. Assim, 2,8 m lineares de forno são requeridos para tratar o resíduo, os 7,9 m restantes podem se usados para manter as cinzas à temperatura de processo e eliminar traços de orgânicos. A velocidade do gás de processo é de 0,60 m/s, que é baixa para este tipo de processo. Para aquecer as cinzas de 100° C para 900°C, $0,66 \times 10^6$ kcal/h são requeridos, equivalentes a 1,3 m lineares de forno. Para secar o resíduo, 3,9 m lineares são requeridos, sendo que os 2,0 restantes são usados para manter as cinzas sob temperatura para remover os traços de orgânicos em aproximadamente 24 minutos, conforme o estudo apresentado em Zwayyed, 1998.

Par um forno de mesmas dimensões, mas com alta taxa de calor (2000 kcal/h), é possível alimentar 2,5 ton /h de resíduos nas condições de processo. Neste caso, o teor de umidade é menor (10%). Baseando-se nas dimensões anteriores, o principal objetivo, neste caso, é avaliar a velocidade do gás de processo, assim a capacidade de transferência é de 41285 kcal/h m³ e a velocidade de 0,6 m/s, valores muito baixos. Num forno rotativo típico, a velocidade varia de 0,6 a 6,0 m/s e estes valores são influenciados por vários fatores, tais como: tamanho de partícula,

densidade, turbulência, alta velocidade do gás. A 2 rpm de velocidade de rotação do forno, o tempo de retenção é de aproximadamente 36 minutos, o que é satisfatório.

Em geral, o tempo de retenção varia de quase 0 a 60 minutos, quanto maior o tempo de retenção, melhores as condições de destruição dos materiais orgânicos.

Para as mesmas condições acima, seja um sistema com as seguintes dimensões: 1,82 m de diâmetro interno e 7,60 m de comprimento: $1,79 \times 10^6$ kcal/h de calor podem ser transferidos pelos refratários para evaporar a água dos resíduos e aquecer as cinzas. Assim, o forno não será capaz de tratar 10,1 ton/h de resíduos pela falta de área de troca de calor disponível. Pelas considerações de troca de calor, 8,7 ton/h podem ser tratadas. Pode ser observado que 71.315 kcal/h são transferidos por metro linear do forno. Contudo, 8,8 m são necessários para secar e aquecer o resíduo a 900°C; 2,43 m de comprimento adicionais são necessários para tratar o resíduo na temperatura requerida.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ESCOPO Conforme mencionado anteriormente, o objetivo do presente trabalho consiste em agrupar, numa única planilha, os dados, as especificações e as principais condições operacionais de processo, relevantes quanto ao aspecto de processo e emissões conforme legislação em vigor. A legislação a ser seguida é o Conama 316 , 2002.

Os elementos químicos a serem monitorados na incineração e seus respectivos valores de controle são definidos na licença de funcionamento da Cetesb, sendo referenciado ao Conama 316, 2002, para uma dada instalação, pois os valores são definidos em função da capacidade do sistema todo em destruir e tratar os gases efluentes. Para o sistema de incineração estudado no presente trabalho (ver a sua descrição no item 3.2), devem ser atendidas as seguintes especificações.

- 1- Elemento cloro: taxa de alimentação máxima = 50,0 kg/h
- 2- Elemento enxofre: taxa de alimentação máxima = 8,6 kg/h
- 3- Elemento nitrogênio: taxa de alimentação máxima = 18,0 kg/h
- 4- Elemento flúor: taxa de alimentação máxima = 0,50 kg/h
- 5- Metais das classes I, II ,III: vazão total das três classes = 27,0 g/h
- 6- A carga térmica total dos elementos envolvidos não deve ultrapassar de 2,75 Gcal/h, pois se trata da capacidade limite do forno (dado de projeto)

Através do valor do item 6 e de outros dados de processo, pode-se estimar as temperaturas a serem atingidas no forno e na câmara de pós-combustão (CPC) respectivamente. Estes cálculos e a comparação dos resultados com os valores impostos pelas restrições de processo serão descritos mais detalhadamente no próximo item. A estrutura de cálculo da planilha consiste nos seguintes aspectos.

Na planilha, devem ser indicadas a quantidade de resíduo alimentada, em kg/h, e a respectiva composição química, especificamente os elementos anteriormente citados para que se possa apurar o montante de cada elemento alimentado por resíduo e efetuando-se a totalização deste elemento proveniente de cada resíduo e a correspondente alimentação e comparando-se se ele não ultrapassa os valores permissíveis da licença..

A temperatura no forno é obtida através de dados de PCI (poder calorífico inferior), umidade presente, gerada por combustão, a perda de calor por radiação, vazão dos gases efluentes, entalpia

de combustão do gás natural para sustentação de temperatura (lembrando que a licença exige o valor mínimo de 900°C, podendo ser eventualmente desligado o queimador de gás natural, de acordo com a temperatura num dado momento).

Um outro parâmetro relevante para a avaliação da eficácia do sistema é o tempo de residência dos resíduos sólidos no forno assim como o dos gases efluentes; essa parte também será discutida a seguir. Este valor é apenas informativo, não sendo parte integrante da planilha

3.2 DESCRIÇÃO DO INCINERADOR ESTUDADO

O incinerador ora em estudo está localizado na unidade industrial da empresa Clariant S. A., localizada em Suzano - SP e apresenta as seguintes características:

O forno rotativo apresenta revestimento de refratários à base de Al_2O_3 , tem 6,0 m de comprimento e 1,5 m de diâmetro interno, ângulo de inclinação de 3%, velocidade de rotação entre 0,3 a 1,0 rpm. A câmara de pós-combustão (CPC) tem dimensões de 2,806 m x 1,806 m e 10,895 m de altura, com revestimento interno de refratário. O ar é propulsado por um exaustor com 1300 mm de pressão estática e vazão máxima de 8600 Nm^3/h e vazão média de 5500 Nm^3/h . Um queimador de gás natural, com consumo médio de 32,0 Nm^3/h , é usado para atingir a temperatura mínima de 900°C no forno rotativo e mais complemento de ar secundário para combustão dos resíduos de 600 Nm^3/h . Na CPC, o consumo médio de gás natural é de 25,0 Nm^3/h . A temperatura na CPC não deve ultrapassar de 1250°C para resguardar a sua parede de tijolos refratários. Após a saída dos gases de combustão, estes são resfriados e passam por um sistema de tratamento de gases. As cinzas como sub produto da incineração são retiradas continuamente no final do forno rotativo. O forno não possui sistema de isolamento térmico, permitindo-se assim a dissipação de calor gerado ao ambiente.

Os resíduos sólidos incinerados são tipicamente plásticos, fármacos, papelão, papéis, lixo em geral, etc. Incluem-se ainda os resíduos líquidos inflamáveis, águas residuais contaminadas, além de eventual gás residual, composto de hidrogênio, amônia, ar e umidade. A taxa de alimentação dos resíduos é, em média, de 800 a 850 kg/h.

As condições de operação do incinerador estudado estão apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: condições de operação do incinerador

Temperatura forno rotativo (°C)	Temp CPC (°C)	Rotação do forno (rpm)	Pressão forno (mbar)	Vazão gás natural (Nm ³ /h)	Limitantes : licença de funcionamento por elemento
900	1250	0,5-1,0	-0,5	33,0	Cloro – Cl=20,0 kg/h Enxofre – S=3,6 kg/h
					Nitrogênio – N= 18,0 Fluor – F=0,50 Metais pesados classe I = 4,0 g/h
					Metais pesados classe II = 5,4 g/h Metais pesados classe III = 27,0 g/h

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS INCINERADOS

Os resíduos a serem incinerados são amostrados estatisticamente. Coletam-se em geral 10% das embalagens de resíduos sólidos e, no caso de líquidos, faz-se uma amostra homogênea, através da recirculação por bomba. Em seguida, os produtos são analisados no Laboratório da empresa Clariant S. A., fazendo-se determinação do teor de cloro, nitrogênio, flúor, enxofre, além de metais pesados, poder calorífico, umidade. As análises seguem as normas NBR10004 e ASTM. A partir dos dados analisados, faz-se uma previsão da permissibilidade de alimentação em função dos resultados obtidos, pois as licenças definem os limites de alimentação de concentração dos elementos.

Para resíduos sólidos, os tempos típicos de residência no forno estudado são em torno de 6

minutos, estimados pela equação proposta por Freeman, 1989: $T = \frac{1,77 \times F \times L \times \sqrt{\theta}}{S \times D \times N}$, onde L =

comprimento do forno, D = diâmetro interno, S = inclinação do forno (em graus em relação ao plano horizontal), N = rotação (em rpm), θ = ângulo de repouso do material (também expresso em graus em relação ao plano horizontal).

Deve-se destacar que há casos em que este tempo mencionado poderá ser maior, dependendo das condições de operação do forno e das suas dimensões.

Desta forma, conhece-se preliminarmente a possibilidade de alimentação individual do resíduo. Posteriormente, estes dados serão transportados e balanceados na planilha geral onde se considera o respectivo poder calorífico. As análises dos resíduos após caracterização são atualizadas anualmente.

Os resíduos do presente estudo são divididos em quatro grupos:

1-Plásticos

2- Águas contaminadas

3- Líquidos inflamáveis

4- Resíduos “diversos” tais como resíduos de escritório, restos de processos de reatores, etc.

As características de cada grupo estão descritas na tabela 3.2 e posteriormente no balanço de massa.

sistema, umidade do ar introduzido e água de combustão gerada, portanto a fórmula básica dos resíduos deve ser levantada, também. Na tabela 3.3, estão mostrados os valores típicos de uma mistura alimentada no presente estudo.

Tabela 3.3: Descrição dos resíduos incinerados

	análise	unidade	resultado
Tetracloroetileno	PCI	kcal/kg	5781
	cloro	%	84,7
PEAD	PCI	kcal/kg	10965
	cinzas	%	1,62
	cloro	%	1,16
solo	metais Classe I	mg/kg	15
Uréia Técnica	N	%	45
	S	%	0,07
	PCI	kcal/kg	2723
	S	%	99,5
Enxofre	PCI	kcal/kg	2262
	água	%	0,04
PVC	Cloro	%	54
	fluor	mg/kg	65
	S	%	0,65
solo	agua	%	19,72
	pci	kcal/kg	24
	mn	mg/kg	98,5

*PEAD = polietileno de alta densidade

Foram estudados dois casos na instalação industrial: no primeiro, o principal resíduo (o resíduo em estudo, em termos de poder calorífico, portanto não necessariamente o de maior vazão alimentada) é o tetracloroetileno e, no segundo, enxofre. Nas tabelas 3.4 e 3.5, estão apresentados os respectivos balanços de energia desses dois casos.

Comparando-se as cargas térmicas totais na entrada e na saída do sistema, pode-se observar, então, que há uma boa consistência nos balanços de energia nesses casos estudados.

Tabela 3.4: Exemplo 1 de balanço de energia e massa de incineração com alimentação definida de resíduos: caso de aplicação Tetracloroetileno (principal resíduo)

ENTRADAS				
	Taxa de alimentação (kg/h)	Poder calorífico inferior (kJ/g)	Poder calorífico inferior (kcal/kg)	Carga térmica (kcal/h)
Tetracloroetileno	20,0	24,20	5781,38	115627,6
Solo	542,0	0,12	28,668	15538,06
PEAD	238,0	45,90	10985,51	2609791
Sub-total da alimentação	800,0			
Ar processo	8721,50			
Gás natural	24,75			285384
TOTAL	9546		TOTAL	2,74 x 10⁶
SAÍDAS				
	Taxa de alimentação (kg/h)	Poder calorífico inferior (kJ/g)	Poder calorífico inferior (kcal/kg)	Carga térmica (kcal/h)
Perda por radiação e convecção				137000
Umidade do resíduo	250			147276
cinzas	165			30625
Água combustão	401,26			328751
Gases efluentes	8730			2,14 x 10 ⁶
TOTAL	9546			2,78 x 10⁶

Nota: O gás natural só é usado no processo para ajuste eventual de temperatura.

Tabela 3.5: Exemplo 2 de balanço de energia e massa de incineração com alimentação definida de resíduos: caso de aplicação Enxofre (principal resíduo)

ENTRADAS				
	Taxa de alimentação (kg/h)	Poder calorífico inferior (kJ/g)	Poder calorífico inferior (kcal/kg)	Carga térmica (kcal/h)
Enxofre	3,2	9,47	2262,38	7239,626
Solo	587,0	0,12	28,668	16828,12
PEAD	210,0	45,90	10985,51	2302757
Sub-total da alimentação	800,2			
Ar processo	7721,50			
Gás natural	24,75			285384
TOTAL	8546		TOTAL	2,33 x 10⁶
SAÍDAS				
	Taxa de alimentação (kg/h)	Poder calorífico inferior (kJ/g)	Poder calorífico inferior (kcal/kg)	Carga térmica (kcal/h)
Perda por radiação/onvecção				137000
Umidade resíduo	250			147276
Cinzas residuais	165			328751
Água combustão	301			200000
Gases efluentes	7830			2,14 x 10 ⁶
Total	8546			2,39 x 10⁶

Nota: O gás natural só é usado no processo para ajuste eventual de temperatura

3.5 METODOLOGIA DE CÁLCULO

3.5.1 Composição e vazão dos resíduos na mistura da alimentação

Seja m_r a vazão global de resíduos líquidos e sólidos, alimentados no forno rotativo (em kg/h).

Sejam x , y , z e w respectivamente as composições médias típicas (em %) de cada grupo presente na mistura da alimentação, a saber: Resíduos plásticos, Resíduos “gerais” (incluindo-se fármacos, lixo doméstico e diversos), Água contaminada e Líquidos inflamáveis.

Então, a vazão mássica de cada grupo de resíduos (em kg/h) será dada por:

$$\text{Resíduos Plásticos :} \quad \left(\frac{x}{100}\right) \times m_r = m_{rpl}, \text{kg/h} \quad (1)$$

$$\text{Resíduos Gerais:} \quad \left(\frac{y}{100}\right) \times m_r = m_{rg}, \text{kg/h} \quad (2)$$

$$\text{Água contaminada:} \quad \left(\frac{z}{100}\right) \times m_r = m_{ag}, \text{kg/h} \quad (3)$$

$$\text{Inflamáveis líquidos:} \quad \left(\frac{w}{100}\right) \times m_r = m_{il}, \text{kg/h} \quad (4)$$

$$\text{TOTAL:} \quad m_r = m_{rpl} + m_{rg} + m_{ag} + m_{il} \quad (5)$$

3.5.2 Taxa de “Calor de Combustão”

Através do poder calorífico inferior (kcal/kg) de cada grupo de resíduo, determinado por análise em laboratório, e da respectiva vazão na alimentação determinada anteriormente, pode-se estimar a taxa de “calor bruto total” gerado no forno, conforme mostrado a seguir.

$$\text{Resíduos Plásticos:} \quad Q_{rpl}, \text{kcal/kg} \times m_{rpl}, \text{kg/h} = Q_{rpl}, \text{kcal/h} \quad (6)$$

$$\text{Resíduos Gerais:} \quad Q_{rg}, \text{kcal/kg} \times m_{rg}, \text{kg/h} = Q_{rg}, \text{kcal/h} \quad (7)$$

$$\text{Água contaminada:} \quad Q_{ag} = 0 \quad (8)$$

$$\text{Líquidos inflamáveis:} \quad Q_{il}, \text{kcal/kg} \times m_{il}, \text{kg/h} = Q_{il}, \text{kcal/h} \quad (9)$$

$$\text{Gás Natural:} \quad Q_{comb}, \text{kcal/Nm}^3 \times V_{GN}, \text{Nm}^3/\text{h} = Q_{il}, \text{kcal/h} \quad (10)$$

$$Q_{total} = Q_{rpl} + Q_{rg} + Q_{ag} + Q_{il} + Q_{comb} \quad (11)$$

3.5.3 “Perdas” de calor

Bonner, T.,1981 sugere que a taxa de calor dissipada ao ambiente por convecção e radiação é em torno de 5 % da taxa do calor de combustão. Assim:

$$Q_{total}, \text{kcal/h} \times 0,05 = Q_{rad}, \text{kcal/h} \quad (12)$$

Adotando-se o valor de 589,10 kcal/kg para o calor latente de vaporização da água, a taxa de calor dissipado pela evaporação da umidade dos resíduos é dada por:

$$m_{ars} \times 589,10 \text{ kcal/kg} = Q_{ars}, \text{ kcal/h} \quad (13)$$

Além disso, ocorre evaporação da água formada na combustão. Essa quantidade é diferente quando se queima gás natural ou um outro grupo de resíduos (plásticos, “resíduos gerais” ou líquidos inflamáveis). A seguir, estão mostrados os cálculos correspondentes à carga térmica envolvida para cada um desses casos de queima.

Para a combustão de gás natural, formam-se 1,58 kg de água/Nm³ de gás natural. Com isso, a taxa de calor dissipado pela evaporação dessa quantidade de água é de 1,58 x 33 Nm³/h x 589,10 = 30715,0 kcal/h, para um consumo médio de gás de 33 Nm³/h

Analogamente, tem-se:

Plásticos (formam-se 1,28 kg de água/kg de plástico): 1,28 x m_{rpl} x 589,10 = 754,0 m_{rpl} kcal/h

Resíduos gerais (forma-se 0,56 kg de água/kg de resíduo, de acordo com os dados médios da EPA): 0,56 x m_{rg} x 589,10 = 329,9 m_{rg} kcal/h

Líquidos inflamáveis (formam-se 1,048 kg de água/kg de resíduo): 1,048 x m_{il} x 589,10 = 617,3 m_{il} kcal/h

A taxa total de calor dissipado por evaporação da água formada na combustão é Q_{aevp}.

Ainda no item de “perdas” de calor, há de se levar em conta a carga térmica referente às cinzas que saem do sistema, dada por:

$$Q_{cz} = m_{cz} \times c_{pcz} \times (T_{fr} - T_e) \quad (14)$$

onde m_{cz} é a vazão mássica das cinzas, c_{pcz} o seu calor específico, T_{fr} e T_e as temperaturas do forno e da entrada dos resíduos respectivamente.

Então, a taxa total das “perdas” de calor é de:

Radiação + Convecção:	Q _{rad}
Evaporação de umidade:	Q _{ar}
Evaporação de água de umidade:	Q _{aevp}
Cinzas efluentes do sistema:	Q _{cz}
TOTAL	Q _{td}

Com isso, a taxa de calor “disponível” fica sendo de:

$$Q_D = Q_{total} - Q_{td} \quad (15)$$

3.5.4 Temperatura no forno rotativo

A temperatura no forno é de extrema importância na incineração, tanto em termos da destruição dos contaminantes como na preservação da vida útil dos refratários usados. O valor dessa temperatura (T_2) é obtido através de:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q_{disp}}{cp_{gp} \times V_{Gpm}} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (16)$$

onde T_2 = temperatura média dos gases de combustão, em $^\circ\text{C}$; T_1 = temperatura de entrada do processo, em $^\circ\text{C}$; Q_{disp} = taxa de calor disponível, em kcal/h; cp_{gp} = calor específico médio, em kcal/ $^\circ\text{C}$ kg; V_m = vazão mássica dos gases de combustão, em kg/h. A participação do gás natural já foi citada anteriormente.

No caso:

$$V_{GP} \times \rho_{GP} = V_m, \text{kg/h} \quad (17)$$

sendo V_{GP} a vazão volumétrica dos gases efluentes, em Nm^3/h e ρ_{GP} a sua densidade, em kg/Nm^3 .

3.5.5 Temperatura na câmara de pós-combustão

Sendo V_{GN} a vazão de gás natural (Nm^3/h) e o seu poder calorífico à temperatura do forno (kcal/Nm^3), a carga térmica envolvida, em kcal/h, será de

$$V_{GN} \times Q_{GN} = Q_{comb} \quad (18)$$

Assim, a temperatura na câmara de pós-combustão é dada por:

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_{comb}}{cp_{gp} \times V_{gpm}} \quad (19)$$

onde V_{gpm} = vazão mássica do gás de processo.

Nota-se que, por se tratar de um valor relativamente pequeno (em torno de 3%), não foi considerada, nesse cálculo, a vazão do ar usado na combustão.

3.5.6 Tempo de residência dos resíduos sólidos

Um outro parâmetro de interesse é o do tempo de residência do resíduo sólido no forno, estimado, segundo Freeman, (1989), através de:

$$T = \frac{1,77 \times F \times L \times \sqrt{\theta}}{S \times D \times N} \quad (20)$$

onde T = tempo de residência (em min), F = função de acúmulo do leito de resíduos sólidos, L = comprimento do forno (em ft), θ = ângulo dinâmico em relação a horizontal em graus, S = ângulo de inclinação do forno rotativo em relação a horizontal em graus, D = diâmetro interno do forno, em ft; N = velocidade de rotação do forno (em rpm).

3.5.7 Tempo de residência dos gases:

O tempo de residência dos gases deve ser calculado para a passagem pelo forno rotativo e pela câmara de pós combustão.

No forno rotativo: vazão do gás de processo = V_{GP} , m³/h, a temperatura T₂ e pressão atmosférica absoluta local igual a 0,93 bar.

Diâmetro interno do forno: Di, em mm e

Comprimento do forno: L, em mm

$$\text{Volume: } V = \frac{\pi \times Di^2}{4}, \text{ em m}^3 \quad (21)$$

Então, o tempo de residência dos gases no forno rotativo, em segundos, é dado por:

$$Trf = \frac{Vfr}{3600 V_{GP}}, \text{ em segundo} \quad (22)$$

Na cpc: altura: h_{cpc} m

$$\text{Dimensões : largura } l_1 \text{ em m } \times l_2, \text{ volume= } h_{cpc} \times l_1 \times l_2 \quad (23)$$

Vazão, V_{GPcpc}, em m³/s

Com isso, o tempo de residência dos gases pela cpc fica sendo de:

$$Trf_{cpc} = \frac{V_{cpc}}{3600 V_{GPcpc}} \text{ em segundo} \quad (24)$$

3.6 ESTUDO DE CASO

A seguir, será apresentado um estudo de caso típico, considerando valores obtidos em uma unidade industrial típica, para as variáveis analisadas.

3.6.1 Vazão e composição dos resíduos:

A vazão mássica total de resíduos alimentados considerada é de 800 kg/h, compostos de líquidos e sólidos, assim distribuídos de acordo com cada grupo:

Resíduos Plásticos :	30 % do total = 800 kg/h x 0,30 = 240 kg/h
Resíduos Gerais (Fármacos, lixo, diversos):	35 % do total = 800 kg/h x 0,35 = 280 kg/h
Água contaminada:	30 % do total = 800 kg/h x 0,30 = 240 kg/h
Inflamáveis líquidos:	5 % do total = 800 kg/h x 0,05 = <u>40 kg/h</u>
TOTAL:	800 kg/h

3.6.2 Taxa de calor bruto gerado:

Resíduos Plásticos:	$8350 \text{ kcal/kg} \times 240 \text{ kg/h} = 2.004.000 \text{ kcal/h}$
Resíduos Gerais:	$2800 \text{ kcal/kg} \times 280 \text{ kg/h} = 784.000 \text{ kcal/h}$
Água contaminada:	0
Líquidos inflamáveis:	$4500 \text{ kcal/kg} \times 40 \text{ kg/h} = \underline{180.000 \text{ kcal/h}}$
<u>Gás Natural: 6.000 Kcal/Nm³</u>	$\times 33 \text{ Nm}^3/\text{h} = 198.000 \text{ kcal/h}$
TOTAL	3.166.000 kcal/h

Comentário: usualmente o queimador de gás natural é desativado quando os resíduos alimentados ao forno conseguem manter a temperatura mínima de operação (em torno de 900°C). Portanto, o gás natural somente é usado quando da partida do forno ou após as paradas de manutenção.

3.6.3 Perdas de calor:

3.6.3.1 Perda ao ambiente por convecção e radiação

A taxa de calor perdido ao ambiente foi admitida igual a 5 % da carga térmica total, ou seja,
 $0,05 \times 2.968.000 \text{ kcal/h} = 148.400 \text{ kcal/h}$

3.6.3.2 Evaporação da umidade dos resíduos:

$250 \text{ kg/h} \times 589,10 \text{ kcal/kg} = 147.276 \text{ kcal/h}$

3.6.3.3 Evaporação da água de combustão:

Gás Natural (EPA)

Formam-se 1,58kg de água/Nm³ de gás natural: $1,58 \times 33 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 589,10 = 30.715 \text{ kcal/h}$

Plásticos:

Formam-se 1,28 kg de água/kg de plástico: $1,28 \times 240 \times 589,10 = 180.971 \text{ kcal/h}$

Resíduos gerais

Forma-se 0,56 kg de água/kg de resíduo: $0,56 \times 280 \times 589,10 = 92.370 \text{ kcal/h}$

Líquidos inflamáveis:

Formam-se 1,048 kg de água/kg de resíduo : $1,048 \times 40 \times 589,10 = 24.695 \text{ kcal/h}$

Total de calor por evaporação: 328.751 kcal/h

3.6.4 Carga térmica devida a cinzas que saem do sistema:

$$Q = 167,7 \times 0,21 \times (900 - 25) = 30625 \text{ kcal/h}$$

Total das Perdas:

Radiação:	148.400 kcal/h
Evaporação de umidade:	147.276 kcal/h
Evaporação de água de umidade:	328.751 kcal/h
Cinzas efluentes do sistema:	<u>30.625 kcal/h</u>
TOTAL	655.052 kcal/h

Com isso, a taxa de calor total “disponível” é de:

$$2.968.000 \text{ kcal/h} - 655.052 \text{ kcal/h} = 2.312.948 \text{ kcal/h}$$

3.6.5 Temperatura do forno rotativo:

A vazão dos gases efluentes considerada é de $8.613 \text{ Nm}^3/\text{h}$, valor médio medido com densidade $\rho = 1,10 \text{ kg/m}^3$. Assim, tem-se:

$$V_{\text{GPM}} = 1,10 \times 8.613 = 9474,3 \text{ kg/h}$$

A temperatura no forno rotativo é dada por:

$$T_2 = 25^\circ\text{C} + \frac{2312948 \text{ kcal/h}}{0,26 \text{ kcal/}^\circ\text{Ckg} \times 1,1 \times 8600} = 965^\circ\text{C}$$

Para se destruírem os componentes orgânicos, é necessário se atingir uma temperatura mínima, que, no caso em estudo, é de 900°C . Dado o balanço acima, consideram-se as condições de alimentação e vazão do processo adequadas.

3.6.6 Temperatura na câmara de pós-combustão:

Seja a vazão de gás natural = $28,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$, com poder calorífico a $963,9^\circ\text{C} = 5010 \text{ kcal/h}$. Com isso, tem-se:

$$28,0 \times 5010 \text{ kcal/h} = 1.402.280 \text{ kcal/h}$$

A vazão do ar usado na combustão na câmara de pós-combustão é em torno de 200 Nm³/h, ou seja, menos de 2,5 % em relação à vazão global, e, com isso, não será em conta na estimativa da temperatura nesse equipamento.

Portanto, a temperatura na câmara de pós-combustão é dada por:

$$T_3 = 963,9^\circ C + \frac{140280 \text{ kcal} / h}{0,26 \text{ kcal} / ^\circ C \text{ kg} \times 1,1 \times 8600} = 1028^\circ C$$

Nesta etapa, o objetivo é complementar e garantir a destruição dos resíduos, que se resume aos gases efluentes do processo de combustão. Nesta etapa, os gases podem chegar à temperatura mais alta. Para o arranjo dado, 1020° C é um bom valor, porque usualmente se evita ultrapassar de 1100°C, por se correr o risco de se danificarem os refratários e ocorrer desperdício de energia, pois a eficiência de destruição não sofre modificação.

3.6.7 Tempo de residência dos resíduos sólidos:

Conforme visto anteriormente, o tempo de residência dos resíduos sólidos no forno pode ser estimado através de:

$$T = \frac{1,77 \times 1,0 \times 20 \times \sqrt{\theta}}{21 \times 5 \times 0,5} = 6,25 \text{ min}$$

Dadas as condições do processo e do tamanho do incinerador, obtém-se um tempo médio de residência dos resíduos sólidos de 6,25 min, o que é indicativo de um tempo de residência relativamente baixo. Isto pode provocar, dependendo do resíduo sólido, um comprometimento da eficiência da destruição do resíduo. Assim, os resíduos sólidos deverão ser avaliados quanto à necessidade de tempo de residência, para sua destruição.

3.6.8 Tempo de residência dos gases

Forno rotativo: vazão dos gases = 8613 Nm³/h, convertida a 951,9°C, fica sendo de 38628,4 m³/h = 10,73 m³/s

Diâmetro interno do forno 1500 mm e L= 6050 mm, volume= 10,79 m³. Tempo de residência no forno rotativo:

$$10,79 \text{ m}^3 / 10,73 \text{ m}^3/\text{s} = 1,0 \text{ seg}$$

Na cpc: altura: 10895 mm

Dimensões da câmara de pós-combustão: 2806 mm x 1806 mm volume: 55,21 m³

Vazão (1008,8°C): $40440 \text{ m}^3/\text{h} = 11,23 \text{ m}^3/\text{s}$

Assim o tempo de residência dos gases na cpc é de: $55,21/11,23 = 4,9 \text{ s}$,

Total: $4,9 \text{ s} + 1,0 \text{ s} = 5,9 \text{ segundos}$ de residência, o que está adequado (Zwayyed, 1998)

3.7 RESULTADOS OBTIDOS

Conforme mencionado em 3.4, foram estudados dois casos em escala industrial, com os principais resíduos sendo tetracloroetileno e enxofre respectivamente. Nas tabelas 3.6 e 3.7, estão mostrados os resultados obtidos experimentalmente para os dois casos estudados.

O esquema desse sistema de incineração está apresentado na figura 3.2, onde A210 representa o forno rotativo de incineração e A310 é a câmara de pós-combustão (CPC). Na figura 3.3, consta o esquema da instalação subsequente à CPC (não faz parte do escopo do presente trabalho) e, na figura 3.4, uma vista geral do sistema de incineração.

A adequação da mistura alimentada nos dois casos foi previamente verificada através da planilha eletrônica desenvolvida no presente trabalho.

Tabela 3.6: resultados do estudo de caso I - tetracloroetileno

	Taxa da alimentação (kg/h)	Vazão do elemento (kg/h)			
		S	Cl	MP*	F
Enxofre	3,2	3,0			
Solo	587,0		0,1	0,06	0,046
PEAD	210,0		2,1		
Observação: atende a licença	Total dos elementos	3,0	2,2	0,06	0,046
Entalpia total- Gcal/h	2,32	Máximo projeto: 2,75			

* MP = metais pesados

Tabela 3.7: resultados do estudo de caso II - caso enxofre

	Taxa da alimentação (kg/h)	Vazão do elemento (kg/h)				
		S	Cl	MP*	F	N
Percloroetileno	25		20			
Solo	542,0			0,06	0,046	0,27
PEAD	238,0					2,38
Observação: atende a licença	Total dos elementos		20	0,06	0,046	2,65
Entalpia total- Gcal/h	2,76	Máximo projeto: 2,75				

* MP = metais pesados

Nas tabelas 3.8 e 3.9, estão apresentados os valores das temperaturas dos gases no forno e na CPC, medidos nos dois ensaios, e previstos pelo presente modelo matemático, usando-se como dados de entrada os valores desses ensaios realizados. Vale destacar que os medidores das temperaturas dos gases são T12001 (no forno) e T13001 e 13002 (na CPC), conforme mostrados na figura 3.2. A precisão desses medidores é de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Pode-se observar que há uma razoável concordância entre os valores determinados pela planilha de cálculos implementada neste trabalho e os medidos na instalação industrial (desvios menores que 10%). Ressalta-se que os valores dessas temperaturas estão adequados em relação aos especificados pelo sistema de incineração, tanto em termos da decomposição térmica dos resíduos como da proteção às paredes de tijolos refratários.

Tabela 3.8: comparativo dos resultados de temperatura calculado x obtido em processo – caso tetracloroetileno

Temperaturas °C	calculada		medida		
	Forno	CPC	Forno	CPC	
	991	1055	978	1023	

Tabela 3.9: comparativo dos resultados de temperatura calculado x obtido em processo – caso enxofre

Temperaturas °C	calculada		medida			
	Forno	CPC	Forno	CPC		
	1190	1254	1090	1198		

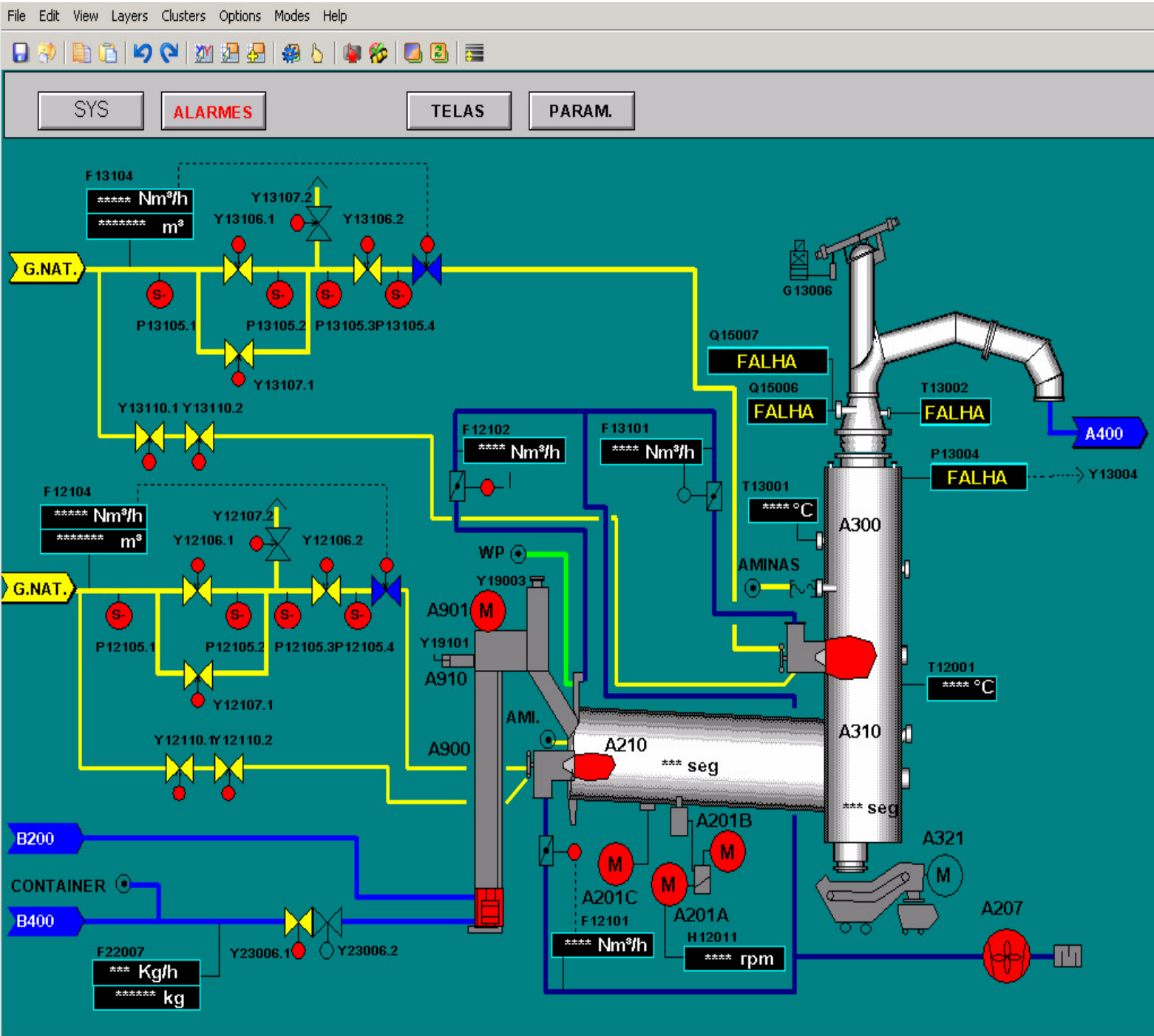


Figura 3.2: Tela de CLP com controle de temperatura e combustão

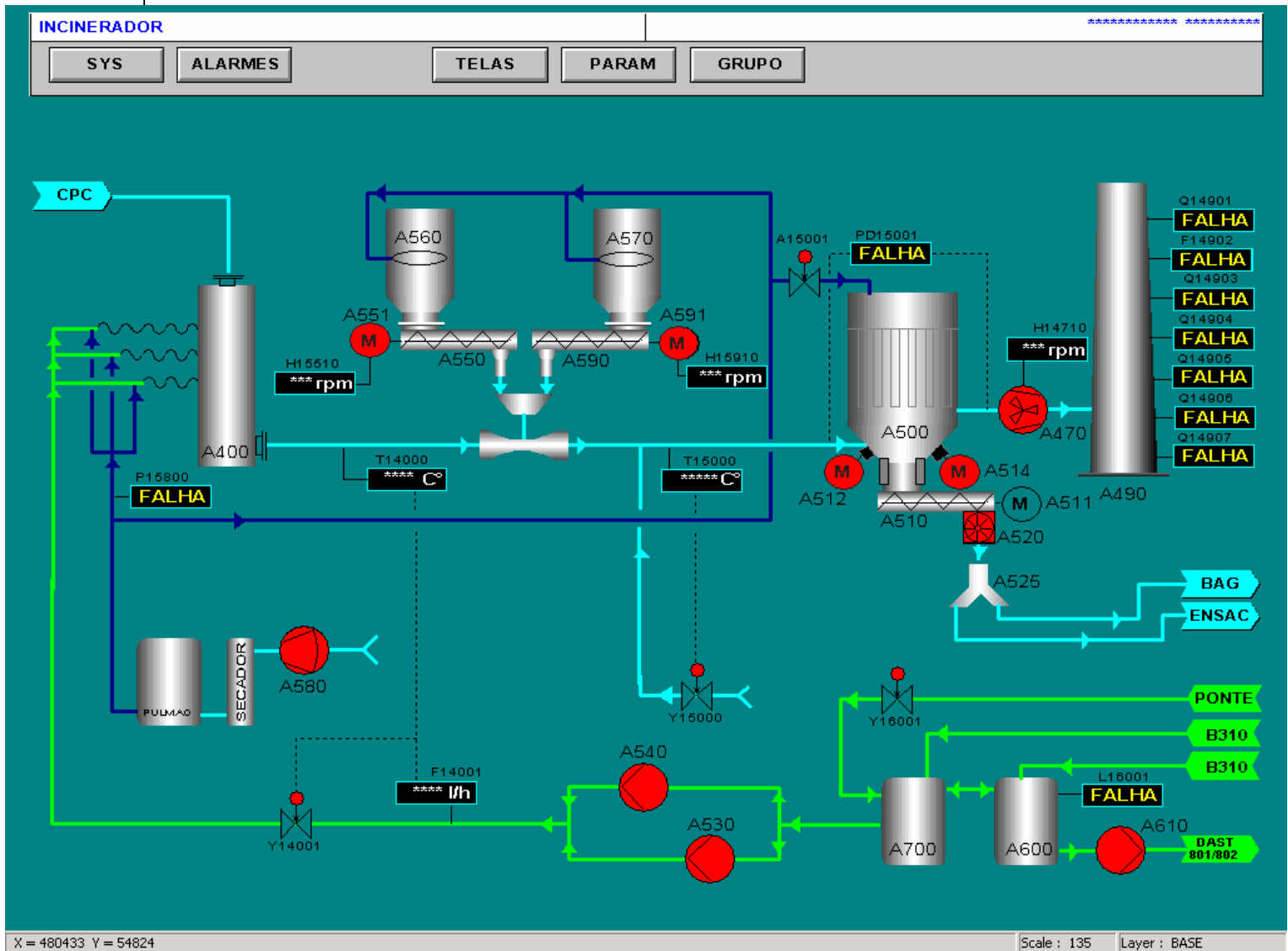


Figura 3.3: Tratamento dos gases efluentes do incinerador

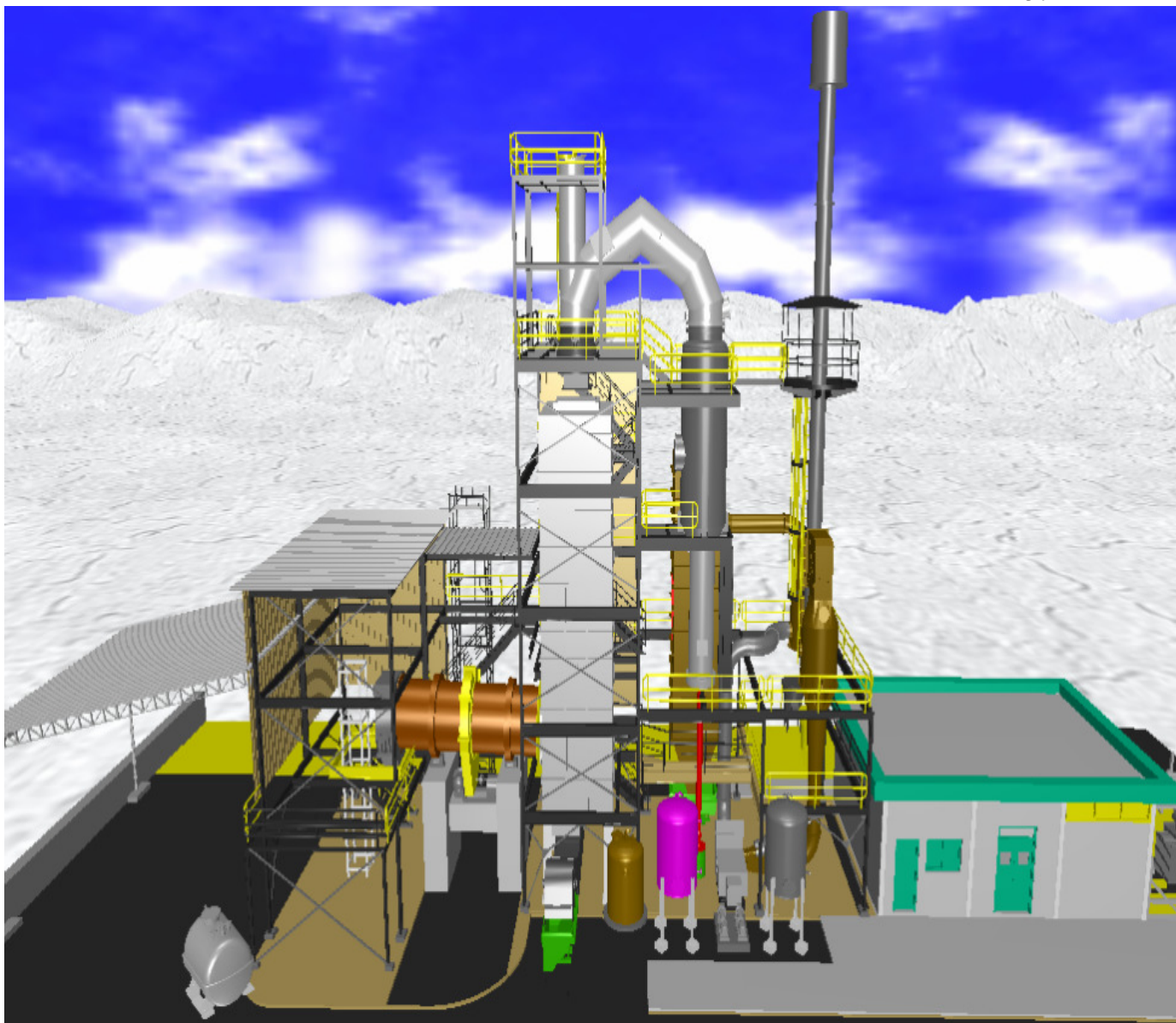


Figura 3.4 - Vista geral do sistema de incineração

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O escopo do presente trabalho é desenvolver uma planilha eletrônica com os principais dados de entrada e saída de um sistema de incineração, para permitir um gerenciamento mais ágil e conseqüente melhoria na capacidade de alimentação assim como uma composição mais adequada dessa mistura introduzida no forno.

Nessa planilha (ver tabela 3.3), está descrita a composição química dos elementos críticos definidos pela legislação ambiental vigente. Em seguida, em função da taxa de alimentação (em kg/h) do elemento presente nas diversas correntes de resíduos da mistura alimentada no forno, faz-se em seguida a soma pela coluna por elemento. Esse valor total é confrontado com o limite máximo permissível, definido pela licença de operação do sistema. Caso o valor resultante na mistura de alimentação ultrapasse o limite permitido, na planilha constará a informação dessa anomalia.

A vazão de alimentação a ser considerada no processo de incineração é dada pelo valor mínimo das taxas aceitáveis de acordo com o limite imposto por cada elemento crítico.

Nas colunas da planilha, está relacionado também o valor do poder calorífico inferior (PCI), em kcal/kg, de cada resíduo alimentado. Este valor é obtido experimentalmente a partir dos resultados de análise em laboratório. Assim, em função da vazão alimentada, obtém-se a taxa de calor total gerado em Gcal/h. O forno tem uma capacidade pré-determinada em valor do projeto para dissipação de calor. Então, deve ser feita a verificação entre esse limite nominal e o valor calculado a partir das características da mistura alimentada.

Há também na planilha duas colunas onde constam os resultados obtidos dos balanços de massa e de energia, referentes às temperaturas do forno rotativo (deve ser de no mínimo 900°C, para garantir a degradação térmica dos resíduos) e da câmara de pós-combustão (limite máximo de 1250°C, por questões construtivas do equipamento).

Quanto aos outros elementos de emissão, tais como SO_x, NO_x, HCl, CO, CO₂, serão mostrados apenas como indicativos na planilha, sem uma preocupação precípua no seu controle, pois há sistemas de tratamento subseqüente à incineração (como equipamentos para lavagem de gases) e não constituem objeto de estudo proposto no presente trabalho.

Desta forma, com a planilha, pode-se definir as melhores condições de incineração, considerando-se as propriedades de incineração de cada resíduo. Conjugados em balanços

entálpico e de massa, pode-se fazer um aproveitamento maior e melhor das condições de incineração, permitindo-se uma adequação da capacidade de incineração em termos mássicos, e respeitando concomitantemente as normas ambientais vigentes. Deve-se ter em conta que processos de incineração controlada em condições adequadas não são baratos e o melhor aproveitamento do equipamento pode viabilizar economicamente este processo sempre questionado.

Tendo-se um planejamento da alimentação, tanto do ponto de vista químico quanto energético, é possível manter o sistema, através de alimentação contínua dos resíduos, um amortecimento das oscilações dos parâmetros de controle de processo. De fato, ao se implementar a presente metodologia no gerenciamento de alimentação do incinerador industrial estudado, obteve-se um aumento expressivo de capacidade (de 170 kg/h para 800 kg/h) devido a uma operação mais estável e regular, sem interrupções freqüentes para ajustes. Convém destacar que a etapa controladora da capacidade do sistema de incineração não se encontra nas operações subseqüentes à câmara de pós-combustão.

Além das condições controladas de incineração, os gases efluentes também são exaustivamente monitorados e a sua disposição e controle também é objeto de intensiva investigação com amplo campo de pesquisa. Dados os cenários do desenvolvimento econômico mundial, a incineração é, sem dúvida, um processo que deve ser considerado e estudado, pois, para respeitar o meio ambiente, a técnica deve ser apurada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Incineração é um processo de engenharia que usa a decomposição térmica via oxidação para converter um resíduo a um material menos tóxico ou não tóxico. O resíduo deve ser combustível para incineração e o produto de combustão deve ser adequado à posterior disposição final. Duas variáveis importantes para uma incineração apropriada são: tempo de residência no incinerador e temperaturas de operação. Estas condições variam de acordo com a composição química do resíduo, forma física e o tipo de incinerador.

A temperatura, tempo de residência, concentração de oxigênio, relação ar - resíduo são as variáveis primárias que afetam a eficiência da combustão em qualquer tipo de incinerador. Por outro lado, as melhores condições de operação são determinadas somente com base na experiência prévia com o resíduo ou testes reais. Desta forma, o foco da avaliação está em se saber se uma dada condição de operação pode ser atingida ou não, para se destruir um determinado resíduo.

A completa destruição de um resíduo requer uma dada taxa de liberação de calor, suficientemente alta para se atingir a temperatura acima do ponto de ignição dos constituintes do resíduo. Nos casos em que os intermediários de combustão são mais estáveis que o resíduo original, maiores temperaturas serão requeridas para a combustão completa .

Considerando-se que a transferência de calor e massa e que a oxidação requerem um intervalo de tempo finito, a temperatura requerida deve ser avaliada em relação ao tempo proposto de residência na câmara de combustão. A cinética da reação e os coeficientes de transferência aumentam em função da temperatura, diminuindo assim o tempo de residência requerido.

Em sistemas de fornos rotativos e câmaras de pós-combustão para incineração de líquido, um excesso de ar de 10 a 20% deve ser considerado. Para resíduos homogêneos e com queima eficiente, pode-se considerar 5% de excesso de ar como adequado. Excesso de ar exagerado, por outro lado, deve ser evitado porque pode gerar problemas no controle da chama.

Em se tratando de resíduos sólidos, um excesso de ar de 140 a 210% pode ser necessário, dependendo da temperatura desejada ou do poder calorífico do resíduo. Para resíduos aquosos, este excesso pode ser diminuído, contudo excessos menores que 100% podem não garantir uma interação adequada ar/sólido.

Assim, pode ser adequado manter-se a câmara de pós- combustão a uma temperatura maior que a do forno rotativo porque só resíduos líquidos ou gasosos são incinerados nesta parte do sistema.

Na avaliação da temperatura do sistema, os seguintes fatores devem ser analisados:

- a temperatura é suficientemente alta para volatilizar, oxidar parcialmente ou converter todos os orgânicos do resíduo para o estado gasoso,
- A temperatura é adequada para tratar os resíduos sólidos em função do tempo de residência,
- a temperatura da câmara de pós-combustão é suficientemente alta para aquecer todos os resíduos volatilizados e intermediários de combustão acima da temperatura de ignição e manter a combustão,
- A temperatura é adequada em relação a outras variáveis de processo,
- Em quais pontos a temperatura é monitorada.

Temperaturas em fornos rotativos podem chegar a 1600°C, conforme indicações da literatura, mas no caso estudado, a estrutura é para 1100°C. Daí, há a necessidade do balanço térmico para se verificar a temperatura a ser atingida, devido principalmente à dificuldade de se mensurar o excesso real de ar envolvido no processo.

Quanto ao tempo de retenção do resíduo no incinerador, deve-se avaliar:

- Identificar o tempo de retenção dos sólidos.
- Este tempo de retenção é adequado com base na experiência ou dados de combustão.
- Estimar o tempo de retenção dos sólidos isoladamente.
- O tempo de retenção estipulado é viável de ser atingido.
- A relação da mistura ar/sólidos é função da velocidade de rotação do forno, para uma dada velocidade dos gases praticamente constante. Se a velocidade de rotação aumenta, os sólidos são conduzidos mais rapidamente ao longo do forno. Valores típicos de velocidades de rotação variam de 0,3 m/min a 1,5 m/min.
- O tempo de retenção dos sólidos é afetado diretamente pela velocidade de rotação do forno. Existe um ponto ótimo entre o tempo de retenção e a relação ar/sólidos. A relação é melhorada pelo aumento da velocidade de rotação, mas o tempo de retenção dos sólidos é reduzido. A mistura ar/sólidos é melhorada, também, pelo aumento do excesso de ar que, por sua vez, pode-se reduzir a temperatura do forno. Assim, existe uma relação de equilíbrio entre estas variáveis.

No presente trabalho, foi desenvolvida uma planilha eletrônica para o gerenciamento da composição da mistura alimentada em um incinerador contínuo. O procedimento foi testado e

implementado numa unidade industrial, com resultados satisfatórios, conseguindo-se um aumento significativo na capacidade do sistema de incineração (mais de 4,5 vezes).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de engenharia de sanitária e ambiental. **Lixo no Brasil – Uma Bomba de Efeito Retardado**. São Paulo. 1998.
- Ackerman, D. G.; Mc Gaughey, J. F.; Wagoner, D. E. **At Sea Incineration of PCB-Containing Wastes On Board the MN/T Vulcanus**, US EPA, 600/7-83-024, NTIS PB 83-207647, 1983.
- Amaral, R. **Estágio atual da incineração no Brasil**. ABLP, VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 2000.
- Atkins, G. Integrating Material and Energy Recycling. **Wastes Management**, 2ª ed. Pg163, 1993.
- Bayer, J. E. Incinerators Operation. **Journal of Hazardous Materials**. Amsterdam, n° 22, p. 243-247, 1989.
- Bébar, L. Waste to Energy in the field of thermal processing of waste. **Applied Thermal Engineering**, República Tcheca, n° 22, p. 897-906, 2002.
- Bonner, T. et al. **Hazardous Waste Incineration Engineering**. Monsanto Research Corporation, 1981.
- Bowman, C. T. Kinetics of pollutant formation and destruction in combustion, Prog Energy Combustion. **Prog. Energy Combust. Science**, vol. I, p. 33-45, 1975.
- Brunner, C. A. **Handbook of Incineration Systems**. Mc Graw Hill Inc, 1991.
- Campos, J. Reflexões sobre a Gestão de Resíduos Industriais. **Limpeza Pública**, n° 52, p. 54-58, 1999.
- Conama, **Resolução nº 316 de 29 de outubro de 2.002**, atribuídas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990.
- Corey, R. C. **Principles of Incineration**. John Wiley and Sons, New York, 1969.
- Cross, F. L.; Hesketh, H. E. **Controlled Air Incineration**. Technomic Publishing Co, 1985.
- Demajorovic, J. **Meio Ambiente e Resíduos: Avanços e Limitantes na Cidade de Viena e Lições para São Paulo**. Dissertação de Mestrado, São Paulo, Escola de Administração de Empresas de São Paulo, FGV, 1994 .
- Dempsey, C. R.; Oppelt, E. T. Incineração de Resíduos Perigosos – uma visão crítica atual. **Journal of the Air and Waste Management Association**, vol. 43, p.3-61 1993.

- Dia a Dia – Incineração de resíduos é tema de publicação – **Saneamento ambiental**, n° 57, pg 48-50, 1999.
- Freeman, M. H. **Standard Handbook of Hazardous and Waste treatment and Disposal**. Mc Graw Hill, New York, 1989
- Grupo Kompac, **Plasma Térmico- Solução final para resíduo**, seminário, 2005
- Hering, R.; Greelly, A. S. **Collection and Disposal of Municipal Refuse**. McGraw Hill, New York, 1921.
- Himmelblau, D. M. **Engenharia Química, Princípios e Cálculos**. PHB, Rio de Janeiro 1996.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Conservação de energia na indústria de fertilizantes**. São Paulo, 1985.
- Kiang, Y. H. **Metry Hazardous Waste Processing Technology**. Ann Arbor Science, Ann Arbor, 1982.
- Kiang, Y. H. **Total hazardous waste disposal through combustion..** Marcel Dekker, New York , USA, 1977.
- Lima, L. M. Q. **Tratamento de Lixo**. 2ª edição, Hemus São Paulo, 1991.
- Menezes, A. **Projetos e Tratamento por Destruição Térmica (Incineração) de Resíduos Sólidos Urbanos e Especiais – Indicadores Operacionais – Capítulo do curso: Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**, 1999.
- Niessen, W. R. **Combustion and Incineration Processes**. Marcel Dekker, New York, USA, 1978.
- Perry, R. H. Chilton, C. H. **Manual de Engenharia Química**, Guanabara Dois, 1985.
- Reed, R. D. **Furnace Operations**. 3rd Edition, Gulf Publishing, Houston, Texas, 1981.
- Rickman, W. S.; Holder, N. D.; Young, D. T. Circulating bed incineration of hazardous wastes. **Chemical Engineering Progress**, vol. 81, n° 3, p. 34, 1985.
- Rovaglio, M. Dynamic model of waste incineration plants with rotary kilns: Comparisons between experimental and simulation data. **Chemical Engineering Science**, vol. 53, n° 15, p 2727-2742, 1998 .
- Stehlik, P. Simulation of process for thermal treatment of wastes. **Waste management**, 2ª ed, p. 435-442, 2000.
- Tejada, S. The blue goose flies! **EPA Journal**, october, 1985.

- Tillman, D. **The combustion of solids wastes**. San Diego, Academic Press, p. 23-274, 1991.
- Trenholm, A. **Summary of Testing Program of Hazardous Waste Incinerators**”, in **Proceedings of the 11th Annual Research Symposium, Incineration and Treatment of Hazardous Waste**, EPA/600/9-85/028, NTIS PB 86-199403, September, 1985.
- U. S. EPA **Engineering HandBook on Hazardous Waste Incineration**. SW-889, NTIS PB 81-248163, 1981.
- U. S. EPA. **Engineering Handbook on Hazardous Waste Incineration**. SW-889, NTIS PB81-248163, 1981.
- U. S. EPA. **Engineering Handbook on Hazardous Waste Incineration**. SW-889, NTIS PB 81-248163, 1981.
- U. S. EPA. Environmental Protection Agency. **Air Pollution Engineering Manual**, Danielson, 2^a ed, p. 437-534, 1973.
- Vogel, G. et al. **Composition of Hazardous Waste Currently Incinerated**. Mitre Corp. U S EPA, 1983.
- Wentz, C. **Hazardous Waste Management**. McGraw-Hill, New York, p. 251-294, 1995.
- Zwayyed, S. K. Predicting actual incinerator system capacity. **Chemical Engineering**, USA, n° 105, p.115-122, 1998.