

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2003



1110000535



***“Projeto de um Incinerador
Tipo Forno Rotativo para
Resíduos Hospitalares”***

AMAURI MENEZES LEAL JÚNIOR

218



“PROJETO DE UM INCINERADOR TIPO FORNO ROTATIVO PARA
RESÍDUOS HOSPITALARES”

AMAURI MENEZES LEAL JÚNIOR

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica (Área de
Transmissão e Conversão de Energia).

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

535

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior

Guaratinguetá
2003

535

Data: 24/10/03
Valor: 20,00
C/D/T: D

PROJETO DE UM INCINERADOR TIPO FORNO ROTATIVO PARA
RESÍDUOS HOSPITALARES

AMAURI MENEZES LEAL JÚNIOR

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica (Área de
Transmissão e Conversão de Energia)

Ficha catalográfica preparada na Seção de Aquisição e Tratamento da Informação da
Biblioteca - FEG/UNESP

Leal Júnior, Amauri Menezes
L435p Projeto de incinerador tipo forno rotativo para resíduos hospitalares / Amauri
Menezes Leal Júnior. - Guaratinguetá : [s.n.], 2003
92 f. : il.

Bibliografia: f. 88-92
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2003
Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho

1. Combustão I. Título

CDU 621.43

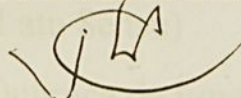
**“PROJETO DE UM INCINERADOR TIPO FORNO ROTATIVO
PARA RESÍDUOS HOSPITALARES”**

AMAURI MENEZES LEAL JÚNIOR

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

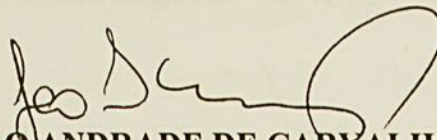
**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

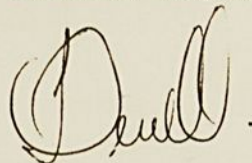


Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Unesp-Feg



Prof. Dr. MARCO AURÉLIO FERREIRA
INPE/Cachoeira Paulista

Julho de 2003

DADOS CURRICULARES

AMAURI MENEZES LEAL JÚNIOR

- NASCIMENTO 09.03.1966 - Lorena/SP
- FILIAÇÃO Amauri Menezes Leal
Enancy Dutra Menezes Leal
- 1987/1992 Curso de Graduação em Engenharia Industrial
Química
Faculdade de Engenharia Química de Lorena
- 1994/1995 Engenharia da Qualidade (Latu Sensu)
Faculdade de Engenharia Química de Lorena
- 2001/2003 Mestrado em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o Grande Arquiteto do Universo, por seu grande amor e fidelidade, por me conceder todos os dias a possibilidade do desbaste da pedra bruta em busca de minha contínua evolução como homem.

À minha amiga e parceira de caminhada no aprendizado pela vida, Elisângela, que em todas as horas procura se fazer presente seja pela compreensão, pela dedicação e pelo apoio.

Aos meus pais, Amauri e Enancy, que me mostraram que tudo que almejo em minha vida pode ser alcançado, desde que seja pela retidão, pelo caráter, pelo amor e pelo carinho.

Aos meus sogros, Edison e Elvira, que apesar da distância sempre deram força e apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior, pela amizade e ensinamentos durante este período de realização do trabalho.

Aos meus colegas da pós-graduação, Alexandre, Diovana, Eliane, Felix, Holanda, Mário, Paulo Gouvea, Paulo Adalberto, Rubens, Zilmara, Paulo Afonso (in memorian), Alonso (in memorian) e Marcos (in memorian), pela amizade e momentos que passamos juntos.

Aos Professores e Funcionários do Departamento de Energia da FE/campus de Guaratinguetá que me auxiliaram quando precisei.

As indústrias BASF unidade de Guaratinguetá, na pessoa do Gerente Wilson Chini que gentilmente permitiu as visitas para acompanhamento da incineração dos resíduos do serviço de saúde do município e pelos dados fornecidos.

APOIO FINANCEIRO

**ESTE TRABALHO CONTOU COM O APOIO FINANCEIRO DA CAPES.
COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR
FEG-UNESP FACULDADE DE ENGENHARIA, CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

LEAL, Jr., A. M. *Projeto de um incinerador tipo forno rotativo para resíduos hospitalares*. Guaratinguetá, 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

O crescimento populacional é visto como uma preocupação constante para os governos quando observado do ponto de vista da qualidade de vida. Muitos problemas fitossanitários tem ocorrência da não destinação adequada dos resíduos, cuja periculosidade é evidente em face aos elementos patogênicos e químicos neles associados. No caso dos resíduos de serviço de saúde a legislação é clara quando cita que a destinação final é a incineração.

Neste trabalho, foram feitos cálculos para o dimensionamento de um incinerador tipo forno rotativo a partir da caracterização dos resíduos de serviço de saúde e do combustível auxiliar empregado (gás natural). Como este tipo de resíduo pode facilmente oscilar o valor de seu poder calorífico, houve a preocupação em manter-se o fluxo de alimentação e variar percentualmente seu PCI.

Conclui-se que estudos concernentes a este tema devem ser continuados visando contribuir para a solução dos problemas ambientais, aprofundando os conhecimentos das alternativas tecnológicas recomendadas para a eliminação destes poluentes caracterizados pela sua periculosidade.

*“O homem é uma corda atada entre o animal e o além-do-homem.
Uma corda sobre um abismo.
O que é grande no homem, é que ele é uma ponte e não um fim. O
que pode ser amado no homem, é que ele é um passar e não um
sucumbir!”*

Nietzsche

LEAL Jr., A. M. *Projeto de um incinerador tipo forno rotativo para resíduos hospitalares.* Guaratinguetá, 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

O crescimento populacional é visto como uma preocupação constante para os governos quando observado do ponto de vista da qualidade de vida. Muitos problemas fito-sanitários tem decorrência da não destinação adequada dos resíduos, cuja periculosidade é evidente em face aos elementos patogênicos e químicos neles associados. No caso dos resíduos de serviço de saúde a legislação é clara quando cita que a destinação final é a incineração.

Neste trabalho, foram feitos cálculos para o dimensionamento de um incinerador tipo forno rotativo a partir da caracterização dos resíduos de serviço de saúde e do combustível auxiliar empregado (gás natural). Como este tipo de resíduo pode facilmente oscilar o valor de seu poder calorífico, houve a preocupação em manter-se o fluxo de alimentação e variar percentualmente seu PCI.

Conclui-se que estudos concernentes a este tema devem ser continuados visando contribuir para a solução dos problemas ambientais, aprofundando os conhecimentos das alternativas tecnológicas recomendadas para a eliminação destes poluentes caracterizados pela sua periculosidade.

PALAVRAS-CHAVES: Incineração, resíduos de serviço de saúde, meio ambiente.

LEAL Jr., A. M. *Project of a rotary kiln incinerator for medical wastes*. Guaratinguetá, 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

The population growth represents a continuing concern for the governments when it is observed in the viewpoint of quality of life. Many sanitary problems are initiated by the inadequate destination of the residues, whose danger is evident because of the associated chemical and pathogenic elements. In the case of medical wastes, the legislation is clear when it mentions that the final destination of those wastes is the incineration.

In this work, the calculations for the kiln rotary incinerator sizing starting from the characterization of the medical wastes and the auxiliary fuel (natural gas) are executed. As the medical wastes can change its lower heat value, analysis of modifying the lower heat value percentage was conducted by maintaining the medical waste feed flow. It was observed that in one situation the temperature of the primary chamber did not approach of the estimated value.

It is concluded that studies on this theme should be continuous seeking the solution of the environmental problems and deepening the knowledge of the technological alternatives recommended for the elimination of these pollutants characterized by their danger.

KEYWORDS: Incineration, medical wastes, environment.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Orientação geral dos subsistemas da incineração e opções de componentes de processos típicos.....	36
FIGURA 3.2 – Câmara de combustão de incinerador de injeção líquida.	38
FIGURA 3.3 – Câmara de combustão de incinerador câmaras fixas típico.....	39
FIGURA 3.4 – Câmara de combustão de leito fluidizado típico.	41
FIGURA 3.5 – Incinerador de ar controlado.	42
FIGURA 3.6 – Incinerador tipo rotativo.	45
FIGURA 4.1 – Secador a seco.....	50
FIGURA 4.2 – Ciclone.....	52
FIGURA 4.3 – Lavador Venturi.....	53
FIGURA 4.4 – Filtro de Mangas.	54
FIGURA 4.5 – Torta do filtro (<i>cake</i>).....	56
FIGURA 4.6 – Precipitador Eletrostático	58
FIGURA 4.7 – Fluxograma	59
FIGURA 5.1 – Tela para controle e instrumentação do incinerador	64
FIGURA 5.2 – Controle do processo após carregamento	65
TABELA 5.7 – Temperatura média no incinerador com PCI reduzido de 75%.....	74
TABELA 5.8 – Valores de W/V em função do excesso de ar normalizado, α , e da razão entre as vazões de resíduos e combustíveis auxiliar, β	78
TABELA 5.9 – Percentagem de oxigênio na saída da câmara de pós-combustão.	81
TABELA 5.10 – Resultados dos dimensionamento das câmaras primária e secundária.....	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	–Percentual de RSS produzido por departamento.....	24
TABELA 2.2	–Tipos e tempo de vida de alguns microrganismos	28
TABELA 2.3	–Concentração de metais pesados na escória.	30
TABELA 3.1	–Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores para as várias formas físicas de resíduos.	37
TABELA 4.1	–Tecnologias para a redução das emissões provenientes da incineração de resíduos.	47
TABELA 5.1	–Composição média dos resíduos de serviço de saúde.....	61
TABELA 5.2	–Controle quantitativo de resíduos de serviço de saúde.	62
TABELA 5.3	–Composição média do gás natural!.....	66
TABELA 5.4	–Temperatura média no incinerador (em K) como função do excesso de ar normalizado, α , e da razão entre as vazões de resíduo e combustível auxiliar, β	71
TABELA 5.5	–Temperatura média no incinerador com PCI reduzido de 25%.....	72
TABELA 5.6	–Temperatura média no incinerador com PCI reduzido de 50%.....	73
TABELA 5.7	–Temperatura média no incinerador com PCI reduzido de 75%.....	74
TABELA 5.8	–Valores de t_R/V em função do excesso de ar normalizado, α , e da razão entre as vazões de resíduo e combustível auxiliar, β	78
TABELA 5.9	–Porcentagem de oxigênio na saída da câmara de pós-combustão.....	81
TABELA 5.10	–Resultados dos dimensionamento das câmaras primária e secundária.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
- GN - Gás Natural
- NBR - Normas Brasileiras
- PGRSS - Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Serviço de Saúde
- RSS - Resíduos de Serviço de Saúde

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Área transversal do incinerador [m^2]
A_{filtro}	- Área total de pano nas mangas [m^2]
C_p	- Calor específico a pressão constante [$\text{cal/mol } ^\circ\text{C}$]
D	- Diâmetro
INC	- Incombustíveis
L	- Comprimento
M_i	- Massa molecular [g/mol]
\bar{M}	- Massa molar média do gás de combustão [g/mol]
MC_p	- Capacidade calorífica molar [$\text{cal/mol } ^\circ\text{C}$]
\dot{m}_{ar}	- Vazão mássica de ar [g/s]
\dot{m}_{comb}	- Vazão mássica de combustível [g/s]
$\dot{m}_{\text{res.}}$	- Vazão mássica de resíduo [g/s]
\dot{m}_{tot}	- Vazão mássica total [g/s]
$\dot{m}_{\text{tot,cp}}$	- Vazão mássica total da câmara primária [g/s]
$\dot{m}_{\text{tot,cs}}$	- Vazão mássica total da câmara secundária (pós-combustão) [g/s]
n	- Número de mols
P	- Pressão [atm]
PCI	- Poder Calorífico Inferior [kcal/kg]
PCS	- Poder Calorífico Superior [kcal/kg]
P.M.	- Peso Molecular
q	- Vazão volumétrica [m^3/s]
R	- Constante universal dos gases [l.atm/mol.K]
Re	- Número de Reynolds
T_i	- Temperatura inicial [$^\circ\text{C}$]
T_f	- Temperatura final [$^\circ\text{C}$]
t_R	- Tempo de residência [s]
V_g	- Vazão volumétrica do gás [m^3/s]
x	- Fração molar
X	- Coeficiente estequiométrico
Y	- Coeficiente estequiométrico
Z	- Coeficiente estequiométrico

SUMÁRIO

SÍMBOLOS GREGOS

α	- Excesso de oxidante [%]	17
β	- Relação entre as vazões de resíduo e combustível	17
ρ	- Massa específica [m^3/kg]	19
μ	- Viscosidade [$kg/m.s$]	19
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
CAPÍTULO 2	- CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE	22
2.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS RSS	22
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS	26
2.3	GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE	28
CAPÍTULO 3	- INCINERADORES	31
3.1	INCINERAÇÃO	31
3.2	INCINERAÇÃO DE RSS	33
3.3	TIPOS DE INCINERADORES	34
3.3.1	PREPARAÇÃO E ALIMENTAÇÃO DE RESÍDUOS	35
3.3.2	CÂMARA DE COMBUSTÃO	37
CAPÍTULO 4	- EQUIPAMENTOS PARA CONTROLE DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	46
4.1	INTRODUÇÃO	46
4.2	EQUIPAMENTOS PARA CONTROLE DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	48
4.2.1	LAVADORES A SECO	49
4.2.2	CICLONES	50
4.2.3	LAVADOR VENTURI	52
4.2.4	FILTRO DE MANGAS	53
4.2.5	PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS	56
CAPÍTULO 5	- PROJETO DE INCINERADOR	60
5.1	INTRODUÇÃO	60
5.2	ESTADO DA ARTE SOBRE A INCINERAÇÃO DE RSS EM GUARATINGUETÁ	61

5.3 COMBUSTÍVEL AUXILIAR	66
5.4 REAÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA INCLUINDO O RESÍDUO	67
5.5 REAÇÃO DE COMBUSTÃO COM EXCESSO DE AR GENÉRICO	68
5.6 TEMPERATURA MÉDIA NO INCINERADOR.....	68
5.7 VARIAÇÃO DO PCI DO RESÍDUO.....	71
5.8 TEMPO DE RESIDÊNCIA	75
5.9 CÁLCULO DAS DIMENSÕES DA CÂMARA PRIMÁRIA	77
5.10 VERIFICAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO	78
5.11 CÁLCULO DA CÂMARA DE PÓS COMBUSTÃO.....	80
5.12 VERIFICAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO (PÓS COMBUSTÃO)	82
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

Os fatores que influenciam a geração dos resíduos podem ser classificados como (MOREIRA, 1995):

- número de habitantes locais;
- área relativa de produção;
- condições climáticas;
- hábitos e costumes da população;
- nível educacional;
- poder aquisitivo;
- tempo e eficiência da coleta;
- tipo de equipamento da coleta;
- nível regulamentações específicas.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como finalidade a identificação do objeto de estudo da pesquisa: projeto de um incinerador tipo forno rotativo para resíduos hospitalares. São apresentados os objetivos, contexto e estrutura da dissertação.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento populacional pode ser encarado como uma preocupação constante para os governos quando observado do ponto de vista da qualidade de vida. Quanto menor a qualidade de vida, mais problemas relacionados à saúde emergem, aumentando, assim, a periculosidade dos resíduos que de alguma forma podem trazer problemas fito-sanitários à população caso não sejam tratados adequadamente.

Os fatores que influenciam a geração dos resíduos podem ser citados como (MOREIRA, 1995):

- número de habitantes locais;
- área relativa de produção;
- condições climáticas;
- hábitos e costumes da população;
- nível educacional;
- poder aquisitivo;
- tempo e eficiência da coleta;
- tipo de equipamento da coleta;
- leis e regulamentações específicas.

Segundo Lora (2000), os métodos tradicionais de tratamento de resíduos são:

- deposição direta em aterros;
- armazenagem em lagoas superficiais;
- injeção em poços profundos.

Na atualidade os métodos tradicionais vem sendo substituídos por:

- minimização dos resíduos na fonte de geração e reutilização dos resíduos;
- tratamento físico-químico-biológico;
- incineração;
- métodos de estabilização química e solidificação.

Antes de se iniciar qualquer atividade com resíduos do serviço de saúde deve-se estar atento à legislação vigente, para que se possa atender a todos os requisitos de proteção ao meio ambiente. A Resolução CONAMA nº 5 (CONAMA Resolução nº 5, 1993) tem em seu contexto o gerenciamento de sólidos oriundos de serviços de saúde, portos e aeroportos, bem como a necessidade de estender tais exigências aos terminais ferroviários e rodoviários. A classificação dos resíduos sólidos segundo a norma é:

GRUPO A: resíduos que apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido a presença de agentes biológicos. Enquadram-se neste grupo, dentre outros: sangue e hemoderivados; animais usados em experimentação, bem como os materiais que tenham entrado em contato com os mesmos; excreções, secreções e líquidos orgânicos; meios de cultura; tecidos, órgãos, fetos e peças anatômicas; filtros de gases aspirados de área contaminada; resíduos advindos de área de isolamento; restos alimentares de unidade de isolamento; resíduos de laboratórios de análises clínicas; resíduos de unidades de atendimento ambulatorial; resíduos de sanitários de unidade de internação e de enfermaria e animais mortos a bordo dos meios de transporte, objeto desta Resolução. Neste grupo incluem-se, dentre outros, os objetos perfurantes ou cortantes, capazes de causar punctura ou corte, tais como lâminas de

barbear, bisturi, agulhas, escalpes, vidros quebrados, etc, provenientes de estabelecimentos prestadores de serviços de saúde.

GRUPO B: resíduos que apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido às suas características químicas. Enquadram-se neste grupo, dentre outros: drogas quimioterápicas e produtos por elas contaminados; resíduos farmacêuticos (medicamentos vencidos, contaminados, interditados ou não-utilizados); e demais produtos considerados perigosos, conforme classificação da NBR 10004 da ABNT (tóxicos, corrosivos, inflamáveis e reativos).

GRUPO C - rejeitos radioativos: enquadram-se neste grupo os materiais radioativos ou contaminados com radionuclídeos, provenientes de laboratórios de análises clínicas, serviços de medicina nuclear e radioterapia, segundo Resolução CNEN 6.05.

GRUPO D: resíduos comuns, todos os demais que não se enquadram nos grupos descritos anteriormente.

Um correto gerenciamento dos resíduos do serviço de saúde (RSS) auxilia na eficácia do processo de incineração e na qualidade da unidade geradora. A CETESB traz a Resolução conjunta SS/SMA/AJDC-1, de 29/06/1998, que aprova as diretrizes básicas e regulamenta tecnicamente a apresentação e aprovação do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde (PGRSS) para o Estado de São Paulo.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

Embora a incineração constitua hoje um recurso largamente empregado no tratamento de resíduos, tendo em vista a alta eficiência de destruição e aplicabilidade para um grande espectro de produtos terminais, a consciência pública é hoje um severo

sensor para as questões de meio ambiente. Tal fato exige que o projeto de um incinerador seja o resultado de uma criteriosa atividade de engenharia que garanta máxima eficiência e mínima interferência com os mecanismos ecológicos.

Praticamente todo tipo de resíduo é passível de incineração, desde aqueles com alto teor de compostos orgânicos até os que os possuem em pequenas quantidades. O processo consiste da decomposição térmica a alta temperatura visando a destruição da fração orgânica, com a conseqüente redução de volume de resíduos estocados.

A preocupação com a disposição dos RSS tem aumentado cada vez mais. De acordo com Idris e Saed (2002), da composição total dos RSS 80% são comparáveis aos resíduos sólidos domésticos. Os 20% restantes incluem resíduos radioativos, farmacêuticos, e resíduos perigosos tais como agentes citotóxicos usados em quimioterapias, entre outros. Com base nas informações apresentadas, este trabalho tem como objetivos:

- Avaliar a incineração de resíduos do serviço de saúde (resíduos hospitalares) em incinerador de dupla câmara tipo forno rotativo.
- Calcular as câmaras primária e secundária de um incinerador deste tipo para resíduos do serviço de saúde. Para tal, será utilizada uma composição do RSS típico da Região de Guaratinguetá.
- Descrever procedimentos de controle de processo de tais incineradores, visando otimizar o desempenho e minimizar as emissões produzidas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1, intitulado “INTRODUÇÃO”, tem como finalidade apresentar o objeto de estudo, o contexto, objetivos e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 “CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE” traz a caracterização média dos RSS.

O capítulo 3, “INCINERADORES”, tem como abordagem principal os tipos de incineradores, em especial o incinerador rotativo e suas características.

O capítulo 4, “EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO PARA SISTEMAS DE INCINERAÇÃO”, apresenta equipamentos de controle de poluição para minimização das emissões produzidas.

No capítulo 5, “PROJETO DE UM INCINERADOR”, apresenta um estudo teórico referente ao projeto de um incinerador para queima de resíduos de serviço de saúde. Serão levados em consideração os RSS típicos da Região de Guaratinguetá.

O capítulo 6, “CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES”, apresenta as conclusões a respeito do tema além de sugerir continuidade do respectivo trabalho.

Para fins de facilitar os procedimentos para manipulação e destinação na fonte produtora, classificaram-se os resíduos de saúde como:

- Lixo não infeccioso: qualquer resíduo gerado pelas atividades administrativas dos estabelecimentos hospitalares e congêneros, provenientes de áreas não críticas, constituindo-se principalmente de papéis e embalagens em geral.
- Lixo infeccioso: todo e qualquer resíduo, seja ele sólido, líquido ou material vindo de unidades críticas ou semi-críticas, tais como unidade de isolamento de doenças infecciosas-contagiosas, unidade de terapia intensiva e postos de enfermagem.

2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS RSS

A escala de importância na composição química de um resíduo geralmente é maior para todos os resíduos sólidos do que para líquidos, e muito maior em relação aos

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE

A ABNT alterou a denominação de lixo hospitalar para Resíduos de Serviços de Saúde (RSS). Resíduos de ordem médica podem ser quaisquer resíduos gerados por hospitais e laboratórios médicos, clínicas dentárias, farmácias ou clínicas veterinárias. Isto inclui resíduos anatômicos, patológicos, perigosos e outros resíduos (LEE; HUFFMAN, 1996).

Segundo Moreira (1995), os resíduos podem ser encontrados na formas líquida e sólida. Deve-se dar um destaque aos resíduos líquidos, devido à sua maior representatividade na poluição das águas caso não haja um tratamento adequado antes de seu lançamento no meio ambiente. Os resíduos sólidos provocam danos ao solo e também aos lençóis freáticos, quando lançados inadequadamente.

A fim de facilitar os procedimentos para manipulação e destinação na fonte produtora, classificaram-se os resíduos de saúde como:

- **Lixo não séptico:** qualquer resíduo gerado pelas atividades administrativas dos estabelecimentos hospitalares e congêneres, provenientes de áreas não críticas, constituindo-se principalmente de papéis e embalagens em geral.
- **Lixo séptico:** todo e qualquer resíduo, seja ele, sólido, líquido ou materiais vindo de unidades críticas ou semi-críticas, tais como unidade de isolamento de doenças infecto-contagiosas, unidade de terapia intensiva e postos de enfermagem.

2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS RSS

A escala de importância na composição química de um resíduo geralmente é maior para lodos e resíduos sólidos do que para líquidos, e muito maior em relação aos

gases. Tal afirmação vem normalmente da fração de constituintes inorgânicos incombustíveis nos resíduos sólidos que tem relativa importância sobre o sistema de incineração. A presença de elementos tóxicos e compostos também é importante na análise do impacto sobre a segurança do operador, na eficiência do sistema de combustão requerido e no controle da poluição e/ou projeto da unidade como uma incineração de resíduos perigosos (NIESSEN, 1994).

A variação da composição físico-química dos RSS ocorre de acordo com a fonte geradora. A toxicidade do resíduo produzido em cada departamento ou serviço depende da natureza da terapêutica especializada bem como dos procedimentos adotados em cada hospital (LIBERTI et al., 1996). A Tabela 2.1 mostra a percentagem referente à umidade, carbono, hidrogênio, enxofre, sólidos voláteis, cloro, cloretos e poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) das áreas geradoras de RSS, como: maternidade, enfermagem, ortopedia, centro cirúrgico e outros.

A umidade presente nos resíduos sólidos está relacionada ao percentual de matéria orgânica neles presentes. A umidade deve ser considerada como fator importante, pois determina o destino final dos resíduos de serviço de saúde. Pode-se citar o exemplo da incineração de resíduos, cujas as variações de umidade podem alterar determinados fatores operacionais.

De acordo com a Tabela 2.1, as quantidades de carbono, hidrogênio, enxofre, sólidos voláteis, cloro e cloretos mais altos são mais evidentes nos resíduos oriundos da maternidade e centro cirúrgico, onde existe uma maior quantidade de matéria orgânica, como a presença de placenta, sangue e tecidos humanos.

O percentual de hidrogênio dos resíduos proveniente de várias fontes mostrou-se próximos aos teores de hidrogênio dos resíduos domésticos (SAITO, 1983). Tal presença pode ser relacionada com a quantidade de matéria orgânica, podendo também indicar de forma parcial a presença de material plástico nos resíduos.

TABELA 2.1 – Percentual de RSS produzido por departamento (SAITO, 1983).

Fonte Parâmetro	Maternidade	Enfermarias	Ortopedia	Centro Cirúrgico	Outros
Umidade (%)	59,3	24,1	7,8	28,6	12,2
Carbono (%)	32,3	30,8	27,6	27,9	32,0
Hidrogênio (%)	4,7	3,6	2,9	3,9	3,6
Enxofre (%)	0,3	0,0	1,4	0,5	0,3
Sólidos Voláteis (%)	94,3	95,8	-	89,5	95,9
Cloro (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cloretos (%)	0,05	0,08	0,14	0,09	0,09
PCS (kJ/kg)	20.888	17.732	16.016	16.296	18.012
PCI (kJ/kg)	6.652	11.959	-	10.118	14.492

Com relação ao enxofre, não há uma preocupação que mereça destaque devido o resultado apresentar um baixo percentual representativo variando de 0 a 0,5 %, sendo que tais valores estão abaixo dos 2 % recomendados, a não ser com relação aos resíduos provindos da ortopedia, que chegam a atingir 1,4 % pela presença do gesso. Apesar do gesso conter enxofre na forma de sulfato, o mesmo é inerte num processo de incineração.

O teor de sólidos voláteis mostra o percentual em peso dos resíduos que durante o processo de incineração podem ser volatilizados. Deve-se ressaltar ainda que durante o processo de incineração o peso dos RSS pode ser reduzido em até 92 %, devido a sua volatilização.

Os valores do PCS e PCI mostram um bom potencial energético para os resíduos sólidos hospitalares. (SAITO, 1983).

A concentração de carbono possui correlação com o valor do poder calorífico e dos sólidos voláteis, indicando também o teor de matéria orgânica nos resíduos. A

eficiência dos processos de incineração, ou de composição biológica, será tanto maior quanto mais alto for o teor de carbono dos resíduos (SILVA, 1998).

O poder calorífico de um resíduo é a medida de energia liberada quando o resíduo é incinerado. O poder calorífico necessário para sustentar uma combustão está em torno de 11.721 kJ/kg ou mais (LEE; HUFFMAN, 1996). Resíduos com baixo poder calorífico podem ser queimados, porém existe a necessidade da adição de combustível auxiliar para atingir a temperatura adequada. Carbono, hidrogênio e oxigênio ocupam parcelas de destaque nos elementos primários que constituem a fração combustível do resíduo.

A contribuição do nitrogênio é modesta no valor dos cálculos do combustível, porém pode ser significativa por que afeta a formação de NO_x e conseqüente poluição do ar.

O enxofre no resíduo se destaca como resultado na geração de SO_2 e SO_3 durante a incineração podendo causar um impacto considerável na poluição e corrosão de materiais.

O cloro contido nos organoclorados que geram HCl é também visto como importante poluidor do ar e agente corrosivo dos materiais.

O fósforo é importante porque afeta o ponto de fusão dos resíduos e dos depósitos de escória.

O índice de potássio e sódio é um indicador da presença de compostos como NaCl e NaSO_4 , os quais afetam a temperatura de fusão da escória.

Metais pesados e outros elementos tóxicos (especialmente Cd, Hg, Pb, Zn, Cr, Cu, Be, As, Se, Ni e Ag) merecem destaque desde que a combustão não os destrua: eles aparecerão nos resíduos e nas cinzas, talvez até modificando tais resíduos e

sujeitando-os aos regulamentos de resíduos perigosos com conseqüente aumento de custo e uma complexa administração especializada para a disposição dos resíduos (NIESSEN, 1994).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

Não existe uma padronização para a classificação dos resíduos de serviços de saúde, nem mesmo nos países desenvolvidos. Pode-se encontrar na literatura denominações como: resíduos infecciosos, resíduos perigosos e resíduos hospitalares. A título de ilustração seguem algumas definições para resíduos perigosos:

United Nations Environment Programme (UNEP): “Resíduos diferentes dos resíduos radioativos, por razões de sua reatividade química ou tóxica, explosiva, corrosiva ou outras características causando perigo à saúde ou ao meio ambiente se sozinho ou em contato com outros resíduos”.

Alemanha: “Resíduos de origem comercial ou de companhias que, devido à sua natureza, composição ou quantidade, é especialmente perigoso à saúde humana, ar ou água, ou é explosivo, inflamável ou causador de doenças”.

Canadá: “Resíduos que devido a sua natureza e quantidade são potencialmente perigosos à saúde humana ou ao meio ambiente e requerem técnicas especiais de disposição para redução ou eliminação do perigo”.

Estados Unidos: A agência de proteção ambiental (EPA) define como resíduo perigoso qualquer resíduo que apresente alguma das seguintes características (CHAABAN, 2001):

- **Inflamabilidade:** resíduo que pode se incendiar durante rotina de gerenciamento. Não se incendeia somente na presença de perigos imediatos de calor e fumo, mas também podendo espalhar partículas prejudiciais em extensas áreas.
- **Corrosividade:** resíduos que requerem recipientes especiais ou segregação de outros resíduos devido a sua habilidade em dissolver contaminantes tóxicos
- **Reatividade:** resíduos que tendem a reagir espontaneamente. Reagem vigorosamente com ar ou água, por serem instáveis a choques ou calor, gerando gases ou explodindo.
- **Toxicidade:** resíduos que quando gerenciados inadequadamente podem liberar substâncias tóxicas em quantidades suficientes para a saúde humana ou para o meio ambiente.

Segundo Moreira (1995), o Centro de Vigilância Sanitária do Estado de São Paulo apresenta um modelo de classificação criado da fusão de classificações nacionais e estrangeiras, que apresenta a classificação dos RSS como: resíduos infectantes, resíduos especiais e resíduos comuns. De acordo com Zannon (1990) os resíduos hospitalares podem classificar-se em:

- **Resíduos infectantes:** materiais pontiagudos ou de corte (agulhas, lâminas, fragmentos de vidro, entre outros) não importando se sua origem é hospitalar ou doméstica.
- **Resíduos patológicos:** são aqueles oriundos de tratamento de doenças. Podem classificar-se em 4 tipos: tecido e órgãos humanos ou de animais removidos por lesão traumática, cirúrgica ou necropsia; curativos e bandagens; materiais descartáveis contaminados com sangue, urina, pus ou fezes; recipiente contendo cultura de microrganismos.
- **Resíduos especiais:** recipientes que podem conter restos ou resíduos de produtos químicos, radioativos e quimioterápicos.
- **Resíduos comuns ou domésticos:** são aqueles que não tem contato com líquidos orgânicos, tais como secreções e excretos dos pacientes. Tais resíduos assemelham-se aos domiciliares.

2.3 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE

2.3.1 Geração de Resíduos

Segundo Mato e Kaseva (1999), o volume de resíduos gerados pelos serviços de saúde depende das características do hospital, do nível de instrumentação e às vezes do acesso da população ao médico.

Um hospital com 156 leitos, 600 cirurgias/mês, 1.500 internações/mês, por exemplo, descarta em média nove toneladas de resíduos infectantes/mês (REVISTA MEIO AMBIENTE INDUSTRIAL, 2001). A Tabela 2.2 mostra o tempo de vida de alguns microrganismos no lixo.

TABELA 2.2 – Tipos e tempo de vida de alguns microrganismos (REVISTA MEIO AMBIENTE INDUSTRIAL, 2001)

Organismo	Tempo de vida (dias)
Salmonella Typhi	29 – 70
Entamoeba Histolytica	8 – 12
Ascaris Lumbricoides	2000 – 2500
Leptospira Interrogans	15 – 43
Polio Vírus	20 – 170
Bacilo Tuberculose	150 – 180
Larvas e Vermes	25 – 40

Desta forma, o gerenciamento de resíduos transformou-se num problema crucial e de grande interesse para a maioria dos países. Dentre as alternativas técnicas para o gerenciamento de resíduos encontram-se as seguintes orientações:

- Redução de volume com descarte;
- Redução de toxicidade;
- Recuperação de energia.

A redução de volume reduz a grandeza do problema; a redução de toxicidade antes ou durante o processo de descarte torna o resíduo inócuo ao ambiente; a recuperação de energia, além de reduzir a quantidade de resíduo, traz benefícios econômicos.

A agência de proteção ambiental americana (EPA, 1996 a) sugere uma estrutura hierárquica de opções de gerência baseada primeiramente em interesses ambientais. A ordem de prioridade das opções é:

- Redução/minimização de resíduos;
- Separação e concentração de resíduos;
- Troca de resíduos (não aplicável aos RSS);
- Recuperação energética;
- Incineração de resíduos;
- Eliminação final segura.

A seguir são discutidos os principais aspectos de algumas das opções acima apresentadas:

- **Redução/minimização de resíduos:** é considerada como a principal prioridade devido a esta opção resultar em menores quantidades de resíduos, redução do custo operacional para o tratamento do descarte e risco a ele associado.
- **Recuperação energética:** A recuperação da energia pelos resíduos está transformando-se numa opção cada vez mais viável, enquanto que as opções finais para eliminação tornam-se estritamente caras e reguladas.
- **Incineração de resíduos:** A última opção antes do descarte final é a incineração. A incineração reduz o volume dos resíduos destruindo uma grande extensão de componentes e patogênicos.
- **Eliminação final segura:** Eliminação dos resíduos após tratamento, de forma a assegurar sua disposição sem agressão ao ambiente (SAXENA; JOTSHI, 1996).

Segundo Idris e Saed (2002), o tratamento das cinzas dos resíduos incinerados do serviço de saúde pela sua fundição e formação da escória produz um material estável e não perigoso, apesar dos resíduos conterem metais pesados, dentre outros. Isto se explica pela associação dos metais em frações mais estáveis, tais como frações residuais. A Tabela 2.3 mostra valores de concentrações na escória.

TABELA 2.3 – Concentração de metais pesados na escória (mg/kg de material seco) (SANTARSIERO; OTTAVIANI, 1995).

Elemento	Mínimo	Máximo	$\bar{X} \pm DP$	CV (%)
Cd	1,0	8,0	$2,4 \pm 1,0$	41,7
Cr	106	250	154 ± 25	16,7
Cu	60	150	81 ± 15	18,5
Ni	45	125	72 ± 11	15,3
Pb	121	430	185 ± 27	14,6
Zn	180	790	275 ± 50	18,2

Nota: $X \pm DP$ – Média \pm Desvio Padrão e CV – Coeficiente de Variação

CAPÍTULO 3 – INCINERADORES

3.1 INCINERAÇÃO

A incineração é considerada uma forma de disposição final, constituindo-se em um método de tratamento através da decomposição térmica. Seu objetivo maior é a redução da toxicidade e do volume dos resíduos.

Com relação ao porte das unidades de incineração, elas podem variar desde pequenas, sendo projetadas e dimensionadas para um resíduo específico, até grandes instalações com múltiplos propósitos, para incinerar resíduos de diferentes fontes. (INCINERAÇÃO, s.d.).

Além de atingir os objetivos a que a incineração se propõe, deve-se levar em conta a valorização energética advinda dos resíduos. Dentre outros processos, tais como a termólise e a pirólise, a incineração apresenta-se num patamar mais avançado e utilizado nos dias de hoje. O impacto ambiental decorrente do emprego das plantas de incineração pode ser minimizado com a utilização de equipamentos que eliminam os produtos tóxicos e reduzem a necessidade dos aterros controlados.

A tecnologia dos sistemas empregados no mundo é antiga devido à confiabilidade que vários equipamentos apresentam. Deve-se ter em mente que as plantas de incineração não eliminam outros sistemas de tratamento, tais como reciclagem, compostagem, aterros sanitários entre outros, mas devem considerados como complementares.

A incineração, em um programa de gestão, apresenta vantagens como (SILVA, 1998):

- Redução do peso dos resíduos a serem aterrados. Os resíduos finais são destinados, em grande parte, ao aterro controlado e uma pequena parte a aterros de alta segurança.
- Eliminação dos resíduos de forma rápida e segura.

- Acompanhamento e controle contínuo das emissões gasosas.
- Eliminação do risco de combustão espontânea, o que acontece freqüentemente nos aterros.
- Eliminação da possibilidade de contaminação dos lençóis freáticos por lixiviação e geração de maus odores.

A incineração é definida como sendo um processo de redução a aproximadamente 15% no peso e 25% no volume de um resíduo, por intermédio de uma combustão controlada, onde a temperatura, a turbulência e o tempo de residência são os fatores de principal influência. A temperatura causa a queima completa dos resíduos e a total oxidação dos gases gerados; a turbulência promove um contato efetivo das partículas com o oxigênio necessário a sua queima; e o tempo de residência permite que ocorra efetivamente o processo de queima completa.

A eficiência do processo de incineração reside em dois pontos fundamentais:

1. Manutenção da mistura ar-combustível nos níveis exigidos pelo projeto, o que é obtido regulando-se a quantidade de ar injetado.
2. Transferência da maior quantidade de calor gerado durante a combustão, para a massa de resíduos a ser incinerada.

De um modo geral, o melhor valor dos parâmetros citados varia em função de três conceitos:

- Da estrutura química do resíduo que determina: suas propriedades termodinâmicas que, por sua vez, são função de sua composição elementar e sua capacidade calorífica; e seu conteúdo relativo de elementos químicos como C, H, O, N, S, P, halogênios e umidade, que determinam a estequiometria do ar de combustão e permitem prever o fluxo e composição dos gases.
- Da forma física dos resíduos, considerando que quanto mais sólido maior conteúdo energético.

- Do tipo de tecnologia de incineração, que condiciona os três parâmetros: geometria, fluxo de materiais e balanço térmico.

3.2 INCINERAÇÃO DE RSS

Especificamente para os RSS, o objetivo principal é a completa destruição dos agentes patogênicos presentes nos resíduos. Deve-se ressaltar a importância não só da ocorrência dos fatores já mencionados (temperatura, tempo de residência e turbulência), mas, também das práticas de operação dos equipamentos. Como existem grandes variações no poder calorífico dos resíduos, a alimentação do forno deve ser feita de modo contínua e regulada. Isto se deve ao fato de que um excesso na alimentação tem como um resultado indesejado a combustão incompleta do resíduo e conseqüentemente um risco da não destruição dos agentes patogênicos.

De uma forma generalizada, os incineradores de resíduos hospitalares são projetados para atingirem temperaturas muito superiores às necessárias e desta forma assegurar a completa destruição dos agentes patogênicos.

Com relação à escória, é improvável que algum agente patogênico possa sobreviver, já que tais agentes estiveram expostos a temperaturas superiores as que permitiriam sua sobrevivência.

São apresentados três tipos de tecnologias para destruição térmica dos RSS:

1. Plantas especificamente projetadas para destruição térmica dos RSS – **incineração específica.**
2. Incineração dos RSS em fornos de RSU (resíduo sólido urbano) – **incineração conjunta.**
3. Incineração dos RSS em fornos específicos, porém utilizando de forma conjunta o lavador de gases de uma planta de RSU – **incineração combinada.**

A destruição térmica via incineração é um processo que pode atingir temperaturas da ordem de 850 °C ou maiores, com o objetivo de converter o resíduo séptico em um material inerte com menor volume.

Basicamente as plantas incineradoras de RSS possuem quatro equipamentos:

- câmara de combustão primária ou reator (onde os resíduos são tratados a diferentes temperaturas conforme o processo);
- câmara de combustão secundária (onde as temperaturas variam de 800 a 1200 °C em presença de excesso de ar, assegurando desta forma a completa oxidação);
- lavador de gases ou filtro seco (eliminação de gases contaminados e partículas em suspensão);
- chaminé para a exaustão dos gases.

Pode-se ainda acrescentar outros componentes secundários, mas não de menor importância: sistema de tratamento de efluentes sólidos e líquidos e equipamentos de controle operacional.

Os resíduos sólidos hospitalares, com o decorrer dos anos, têm sido tratados termicamente em diferentes equipamentos, tanto os considerados clássicos como os fornos rotativos ou de grelhas fixas ou móveis, quanto os tecnologicamente mais avançados (leitos fluidizados densos ou circulantes) ou mesmo utilizando técnicas especiais como o enriquecimento do ar de combustão com oxigênio puro e a pré-secagem dos resíduos (SILVA, 1998; LACAVA, 2000).

3.3 TIPOS DE INCINERADORES

Devido as diferentes formas físicas dos resíduos, diferentes tecnologias de incineração são desenvolvidas para seu tratamento. Dentre os incineradores existentes quatro modelos destacam-se como os mais utilizados: injeção líquida (às vezes combinado com incineração de gases e vapores); câmara fixa; leito fluidizado e os fornos rotativos.

Para seleção e desenvolvimento de um projeto de sistema de incineração de resíduos deve-se levar em conta sua complexidade.

Quatro grandes subsistemas podem ser incorporados em um sistema de incineração de resíduos: preparação e alimentação do resíduo; câmara (s) de combustão; controle dos poluentes atmosféricos e manuseio da cinza/resíduo. O conjunto de subsistemas é mostrado na Figura 3.1, 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 do(s) resíduo(s) a ser(em) incinerado(s).

3.3.1 Preparação e alimentação de resíduos

A forma física do resíduo é o fator que determina a metodologia de alimentação do incinerador. Líquidos são misturados e bombeados para o interior das câmaras de combustão por intermédio de atomizadores especialmente projetados. Resíduos que contêm sólidos em suspensão podem sofrer uma filtragem, para que se evite o entupimento dos orifícios do atomizador. A mistura dos resíduos pode ser feita de duas maneiras: antes de serem alimentados na câmara de combustão ou usando-se bicos atomizadores separados para os diferentes tipos de resíduos, sendo que, neste caso, a mistura ocorre dentro da câmara de combustão. A mistura de resíduos também tem como função controlar o teor de cloro do resíduo alimentado no incinerador e também favorecer um melhor controle da combustão limitando o potencial de formação periódica de altas concentrações de cloro livre nos gases de combustão.

Os lodos são normalmente alimentados por intermédio de bombas de cavidade progressiva e lanças resfriadas com água. Parte dos resíduos sólidos pode requerer controle do tamanho das partículas através de fragmentações. Eles podem ser alimentados na câmara de combustão através de empurradores, por gravidade, alimentadores pneumáticos, alimentadores vibradores ou de rosca sem fim ou correia de alimentação. Resíduos em contêineres são usualmente alimentados por gravidade ou empurradores.

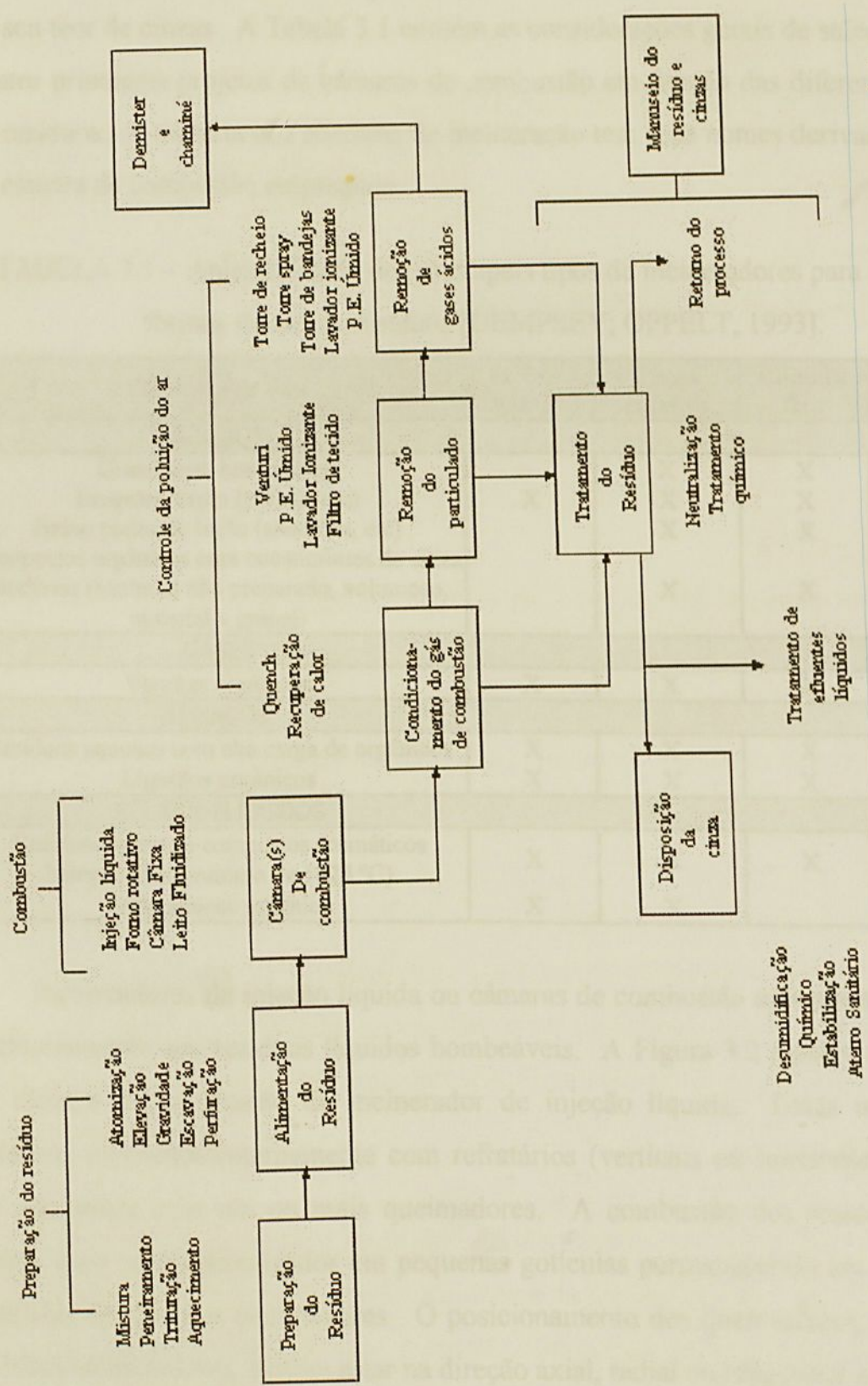


FIGURA 3.1 – Orientação geral dos subsistemas da incineração e opções de componentes de processos típicos [DEMPSEY; OPPELT, 1993].

3.3.2 Câmara de Combustão

A seleção do tipo de câmara de combustão depende da forma física do resíduo e de seu teor de cinzas. A Tabela 3.1 contém as considerações gerais de seleção para os quatro principais projetos de câmaras de combustão em função das diferentes formas de resíduos. A maioria dos sistemas de incineração tem seus nomes derivados do tipo de câmara de combustão empregado.

TABELA 3.1 – Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores para as várias formas físicas de resíduos [DEMPSEY; OPPELT, 1993].

Tipos de resíduos	Injeção líquida	Forno rotativo	Câmara fixa	Leito fluidizado
SÓLIDOS				
Granulares, homogêneo		X	X	X
Irregular, bruto (pellets, etc)	X	X	X	X
Baixo ponto de fusão (alcatrões, etc)		X	X	X
Compostos orgânicos com constituintes de cinza fundíveis (Material não preparado, volumoso, material a granel)		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
SÓLIDOS / LÍQUIDOS				
Resíduo contendo compostos aromáticos halogenados (mínimo de 1024 °C)	X	X	X	
Lodo aquoso orgânico	X	X		X

Incineradores de injeção líquida ou câmaras de combustão aplicam-se quase que exclusivamente aos resíduos líquidos bombeáveis. A Figura 3.2 mostra um esquema de câmara de combustão de incinerador de injeção líquida. Essas unidades são cilindros revestidos internamente com refratários (verticais ou horizontais) podendo ser equipados com um ou mais queimadores. A combustão dos resíduos líquidos ocorre após serem atomizados em pequenas gotículas permanecendo em suspensão e injetadas através dos queimadores. O posicionamento dos queimadores, assim como os bicos atomizadores, podem estar na direção axial, radial ou tangencial à chama.

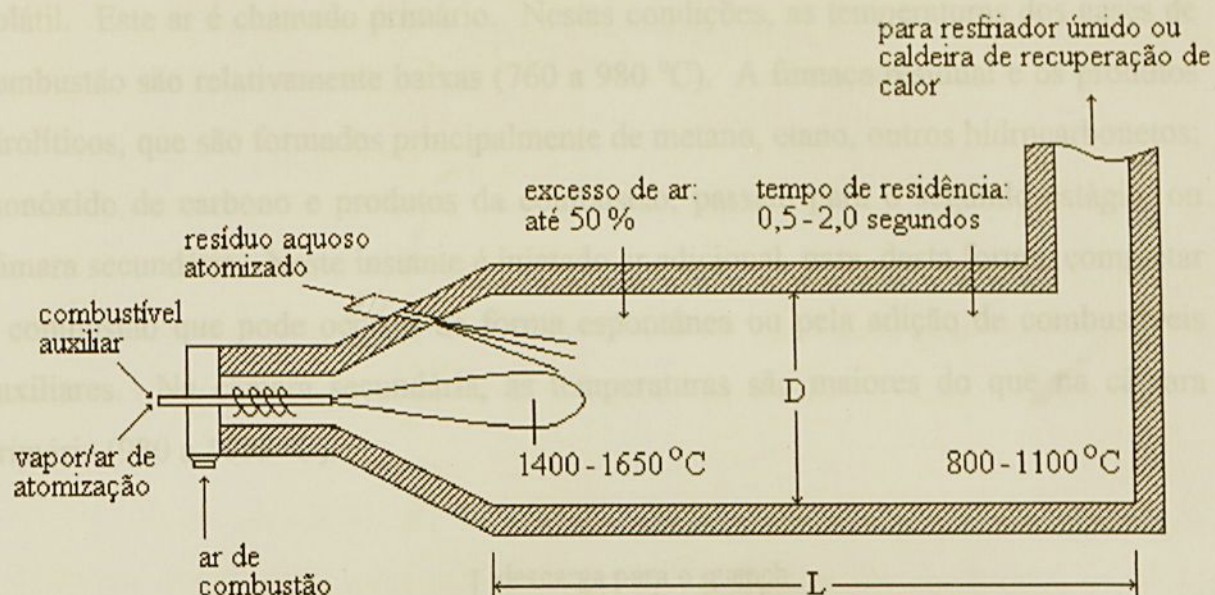


FIGURA 3.2 – Câmara de combustão de incinerador de injeção líquida [DEMPSEY; OPPELT, 1993].

A eficiência da destruição de líquidos em combustores depende fortemente da qualidade da atomização que é considerada, tendo aí seu ponto crítico. Incineradores de injeção líquida vertical são mais utilizados quando os resíduos contêm alta concentração de sais inorgânicos e de cinzas fundíveis, enquanto que os horizontais podem ser usados com resíduos com baixa concentração de cinzas (DEMPSEY; OPPELT, 1993).

Os incineradores de câmaras fixas são também conhecidos como incineradores de ar controlado, incineradores pobres em ar ou pirolíticos, sendo a tecnologia mais usada para incinerar resíduos hospitalares. A Figura 3.3 mostra um esquema deste tipo de incinerador (EPA, 1993).

A combustão do resíduo neste tipo de incinerador ocorre em dois estágios. No primeiro estágio, o resíduo é alimentado dentro da câmara primária de combustão, que é operada com uma quantidade de ar menor, cerca de 50 a 80 % de ar estequiométrico requerido para a combustão. Nesta condição pobre em ar, o calor (provido pela oxidação da fração do carbono fixo) promove a evaporação da maior parte da fração

volátil. Este ar é chamado primário. Nestas condições, as temperaturas dos gases de combustão são relativamente baixas (760 a 980 °C). A fumaça residual e os produtos pirolíticos, que são formados principalmente de metano, etano, outros hidrocarbonetos; monóxido de carbono e produtos da combustão, passam para o segundo estágio, ou câmara secundária. Neste instante é injetado ar adicional, para, desta forma, completar a combustão que pode ocorrer de forma espontânea ou pela adição de combustíveis auxiliares. Na câmara secundária, as temperaturas são maiores do que na câmara primária (980 a 1095 °C).

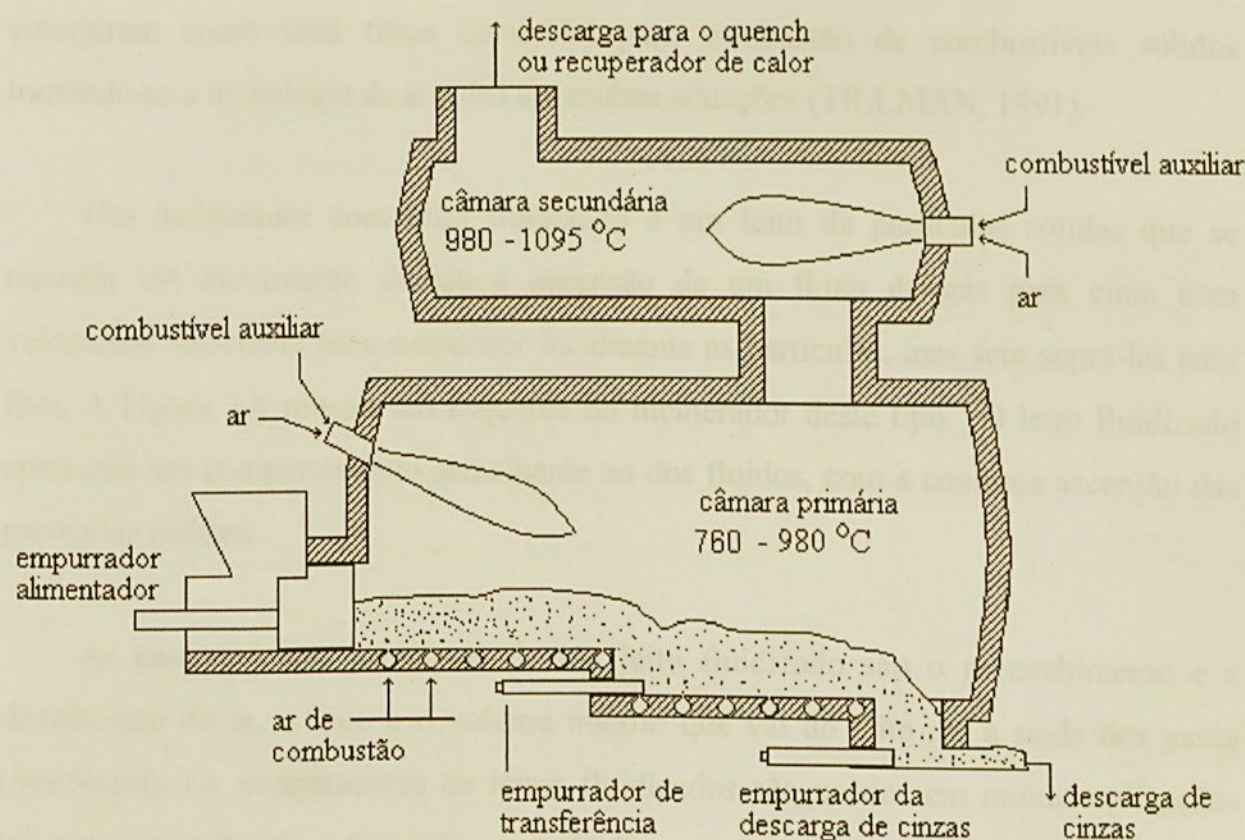


FIGURA 3.3 – Câmara de combustão de incinerador câmaras fixas típico [EPA, 1996 a].

Dependendo do poder calorífico e da umidade contida no resíduo, pode ser necessário energia adicional. Isto pode ser fornecido através de queimadores auxiliares localizados na entrada da câmara secundária (parte superior) para manter a temperatura desejada. Tanto as reações da combustão na câmara primária, quanto a turbulência são controladas e mantidas em baixos níveis pelas condições pobres em ar, minimizando desta forma, o carreamento do material particulado. Com a adição de ar

secundário, o excesso de ar total para os incineradores de câmaras fixas fica na faixa de 100 a 200%.

A alimentação dos incineradores de ar controlado varia no intervalo de 0,6 a 50 kg/min (assumindo um poder calorífico do combustível de 19.700 kJ/kg), sendo que tanto a alimentação de resíduos, quanto a retirada das cinzas pode ser manual ou automática dependendo do tamanho da unidade e opções consideradas.

Na década de 1980, as tecnologias para incineração com leito fluidizado emergiram como uma força comercial para combustão de combustíveis sólidos tornando-se a tecnologia de escolha em muitas situações (TILLMAN, 1991).

Um incinerador com leito fluidizado é um leito de partículas sólidas que se mantém em movimento devido à ascensão de um fluxo de gás para cima com velocidade suficiente para suspender localmente as partículas, mas sem soprá-las para fora. A Figura 3.4 mostra um esquema do incinerador deste tipo. O leito fluidizado apresenta um comportamento semelhante ao dos fluidos, com a contínua ascensão das partículas sólidas.

As características principais de um leito fluidizado são o preenchimento e a distribuição do ar, o leito e o volume interno que vai do leito até a saída dos gases (*freeboard*). Os incineradores de leitos fluidizados são usados em muitas aplicações tais como: metalurgia, calcinações e produção petroquímica.

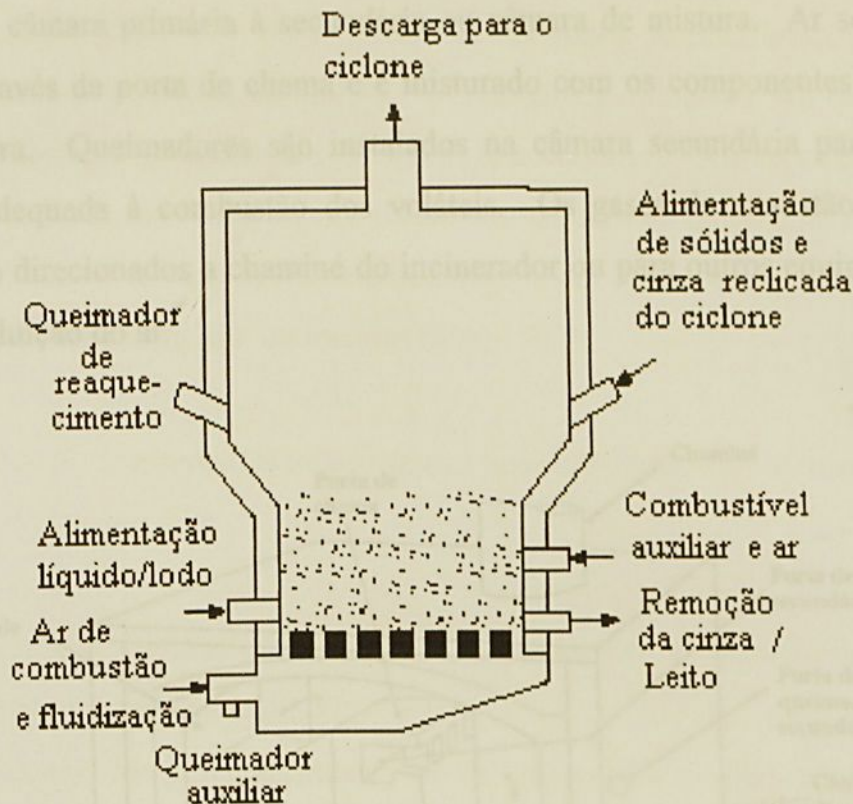


FIGURA 3.4 – Câmara de combustão de leito fluidizado típico [EPA, 1996 a].

Embora combustíveis líquidos e gasosos possam ser queimados nos incineradores de leito fluidizado, a principal aplicação é para combustíveis sólidos tais como o carvão e outros (BORMAN; RAGLAND, 1998).

Incineradores com excesso de ar são pequenas unidades modulares. Um esquema dos mesmos é mostrado na Figura 3.5. São cubos compactos com uma série de câmaras internas e abafadores, podendo ser operados continuamente ou em batelada.

Normalmente o resíduo é alimentado manualmente na câmara de combustão. A porta de carregamento é então fechada e um pós-queimador é acionado para levar a câmara secundária à temperatura designada (870 a 980 °C). Quando a temperatura é atingida, a câmara primária inicia a queima. O resíduo é seco e queimado pelo calor provido pela câmara de combustão primária, bem como pelo calor irradiado das paredes da câmara. A umidade e os componentes voláteis no resíduo são vaporizados e saem junto com os gases da combustão da câmara primária por uma porta de chama

que conecta a câmara primária à secundária ou câmara de mistura. Ar secundário é adicionado através da porta de chama e é misturado com os componentes voláteis na segunda câmara. Queimadores são instalados na câmara secundária para manter a temperatura adequada à combustão dos voláteis. Os gases de exaustão da câmara secundária são direcionados a chaminé do incinerador ou para outros equipamentos de controle de poluição do ar.

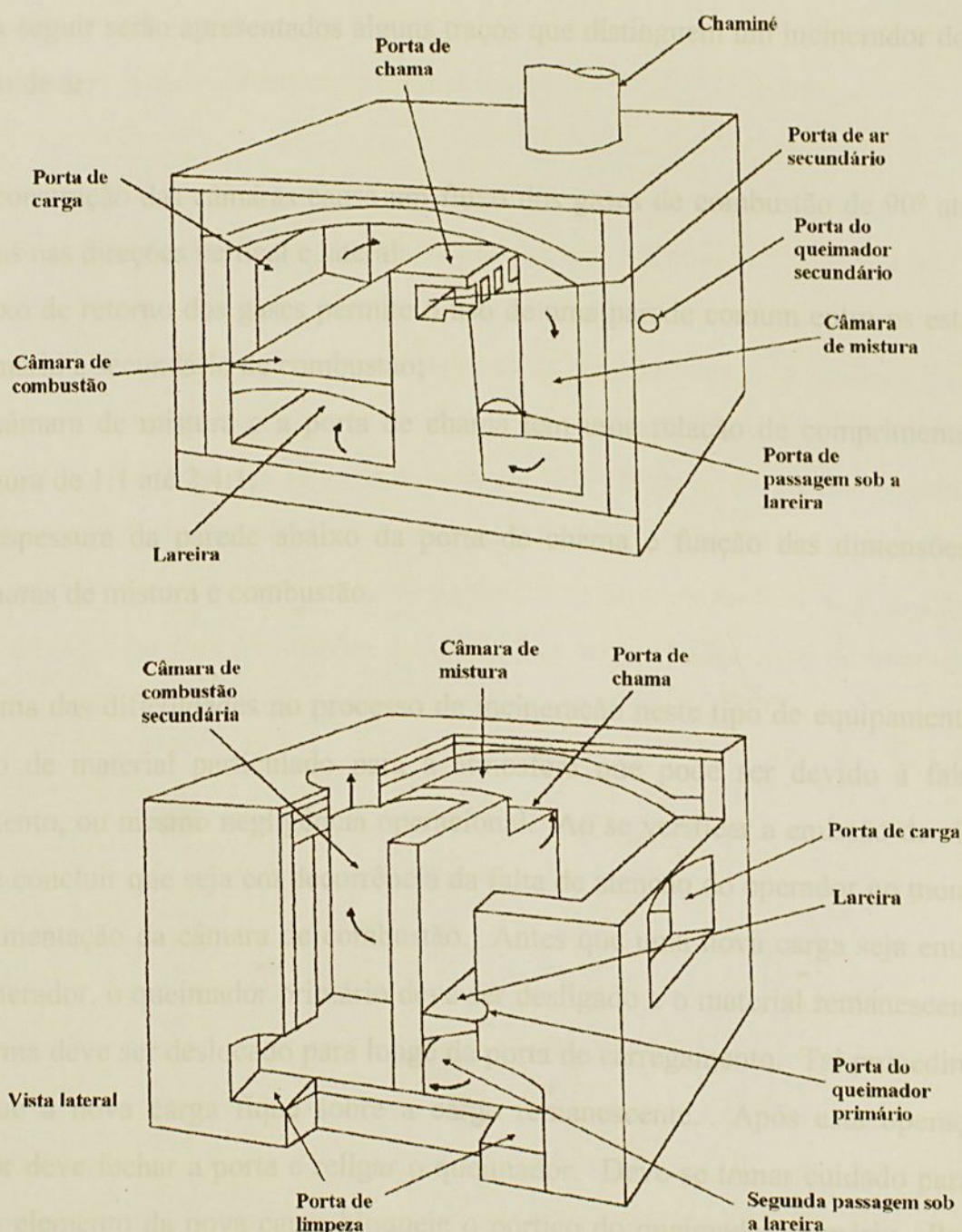


FIGURA 3.5 – Incinerador de ar controlado [EPA, 1993].

Incineradores projetados para queima de resíduos hospitalares, operam com níveis de excesso de ar acima de 300 %. Se resíduos patológicos são queimados, os níveis de excesso de ar próximos a 100 % são mais comuns. Uma redução no excesso de ar ajuda a manter a alta temperatura da câmara quando da queima de resíduos com alto teor de umidade. A capacidade de alimentação para incineradores com excesso de ar é normalmente de 3,8 kg/min ou menos (EPA, 1993).

A seguir serão apresentados alguns traços que distinguem um incinerador do tipo excesso de ar:

1. A construção das câmaras causa um fluxo dos gases de combustão de 90° através delas nas direções vertical e lateral;
2. Fluxo de retorno dos gases permite o uso de uma parede comum entre os estágios primário e secundário de combustão;
3. A câmara de mistura e a porta de chama tem uma relação de comprimento por largura de 1:1 até 2,4:1;
4. A espessura da parede abaixo da porta de chama é função das dimensões das câmaras de mistura e combustão.

Uma das dificuldades no processo de incineração neste tipo de equipamento é a emissão de material particulado para a atmosfera que pode ser devido à falta de treinamento, ou mesmo negligência operacional. Ao se verificar a emissão de cinzas, pode-se concluir que seja em decorrência da falta de atenção do operador no momento da realimentação da câmara de combustão. Antes que uma nova carga seja entregue ao incinerador, o queimador primário deve ser desligado e o material remanescente na plataforma deve ser deslocado para longe da porta de carregamento. Tal procedimento evita que a nova carga fique sobre a carga remanescente. Após esta operação o operador deve fechar a porta e religar o queimador. Deve-se tomar cuidado para que nenhum elemento da nova carga bloqueie o pórtico do queimador primário. Pode-se citar que o operador, com receio de se aproximar das chamas atira a carga através da porta de carregamento sobre o material remanescente na plataforma, causando

desordens na camada de cinzas formada e desta forma a emissão de material particulado pela chaminé do incinerador.

Outro problema a ser citado ocorre quando grandes quantidades de gordura, cabelos ou pelos de animais são expostos diretamente à chama do queimador, havendo uma rápida volatilização dos gases e vapores que causarão a emissão de fumaça preta pela chaminé. Ocorrendo um aumento instantâneo na vazão de gases, se muito grande, a câmara pode se pressurizar e forçar o escape da fumaça pelas frestas e tomadas de ar existentes no incinerador. Para solucionar este problema, deve-se reduzir a potência do queimador, ou mesmo desligá-lo (MENÃO, 1996).

Devido a sua versatilidade o forno rotativo é usado na queima de uma grande variedade de formas físicas de resíduos sólidos sendo utilizado também para incinerar substâncias líquidas ou lodo. Uma característica deste tipo de equipamento que reforça a flexibilidade do sistema é a instalação de queimadores para resíduos líquidos ou pastosos descarregados dentro do forno ou na câmara secundária. Estas unidades são operadas a temperaturas de variam de 800 - 1650 °C de tal forma que fisicamente os resíduos variam de material seco à escórias líquidas. Apesar de haver sistemas que operem com taxas de liberação de calor da ordem de 30 milhões kcal/h, a escala mais comum de tamanho é de 15 milhões de kcal/h e as taxas volumétricas de liberação de calor estão geralmente na faixa de 60-100 kcal/m³s (NIESSEN, 1994).

O forno rotativo é um cilindro horizontal revestido internamente com refratários, cuja montagem se faz com uma pequena inclinação. A Figura 3.6 mostra o esquema deste tipo de incinerador (DEMPSEY; OPPELT, 1993). O movimento rotacional do forno favorece a passagem do resíduo no seu interior melhorando a homogeneização do resíduo. Em relação ao fluxo de gás tem-se dois tipos de movimento do resíduo, que pode ser concorrente ou em contracorrente. De acordo com Dempsey e Oppelt (1993) o tempo de residência dos resíduos no forno é de 0,5 a 1,5 horas, sendo que o controle deste tempo de residência dos sólidos ocorre pela velocidade rotacional do forno (0,5 a 1,0 rpm), pela taxa de alimentação de resíduos e, algumas vezes, pela inclusão de barreiras internas que tem a função de retardar o movimento do resíduo

desordens na camada de cinzas formada e desta forma a emissão de material particulado pela chaminé do incinerador.

Outro problema a ser citado ocorre quando grandes quantidades de gordura, cabelos ou pelos de animais são expostos diretamente à chama do queimador, havendo uma rápida volatilização dos gases e vapores que causarão a emissão de fumaça preta pela chaminé. Ocorrendo um aumento instantâneo na vazão de gases, se muito grande, a câmara pode se pressurizar e forçar o escape da fumaça pelas frestas e tomadas de ar existentes no incinerador. Para solucionar este problema, deve-se reduzir a potência do queimador, ou mesmo desligá-lo (MENÃO, 1996).

Devido a sua versatilidade o forno rotativo é usado na queima de uma grande variedade de formas físicas de resíduos sólidos sendo utilizado também para incinerar substâncias líquidas ou lodo. Uma característica deste tipo de equipamento que reforça a flexibilidade do sistema é a instalação de queimadores para resíduos líquidos ou pastosos descarregados dentro do forno ou na câmara secundária. Estas unidades são operadas a temperaturas de variam de 800 - 1650 °C de tal forma que fisicamente os resíduos variam de material seco à escórias líquidas. Apesar de haver sistemas que operem com taxas de liberação de calor da ordem de 30 milhões kcal/h, a escala mais comum de tamanho é de 15 milhões de kcal/h e as taxas volumétricas de liberação de calor estão geralmente na faixa de 60-100 kcal/m³s (NIESSEN, 1994).

O forno rotativo é um cilindro horizontal revestido internamente com refratários, cuja montagem se faz com uma pequena inclinação. A Figura 3.6 mostra o esquema deste tipo de incinerador (DEMPSEY; OPPELT, 1993). O movimento rotacional do forno favorece a passagem do resíduo no seu interior melhorando a homogeneização do resíduo. Em relação ao fluxo de gás tem-se dois tipos de movimento do resíduo, que pode ser concorrente ou em contracorrente. De acordo com Dempsey e Oppelt (1993) o tempo de residência dos resíduos no forno é de 0,5 a 1,5 horas, sendo que o controle deste tempo de residência dos sólidos ocorre pela velocidade rotacional do forno (0,5 a 1,0 rpm), pela taxa de alimentação de resíduos e, algumas vezes, pela inclusão de barreiras internas que tem a função de retardar o movimento do resíduo

através do forno. O limite da quantidade de resíduo processado no forno pode ser ajustado para quase 20 % do volume do forno controlando-se a taxa de alimentação.

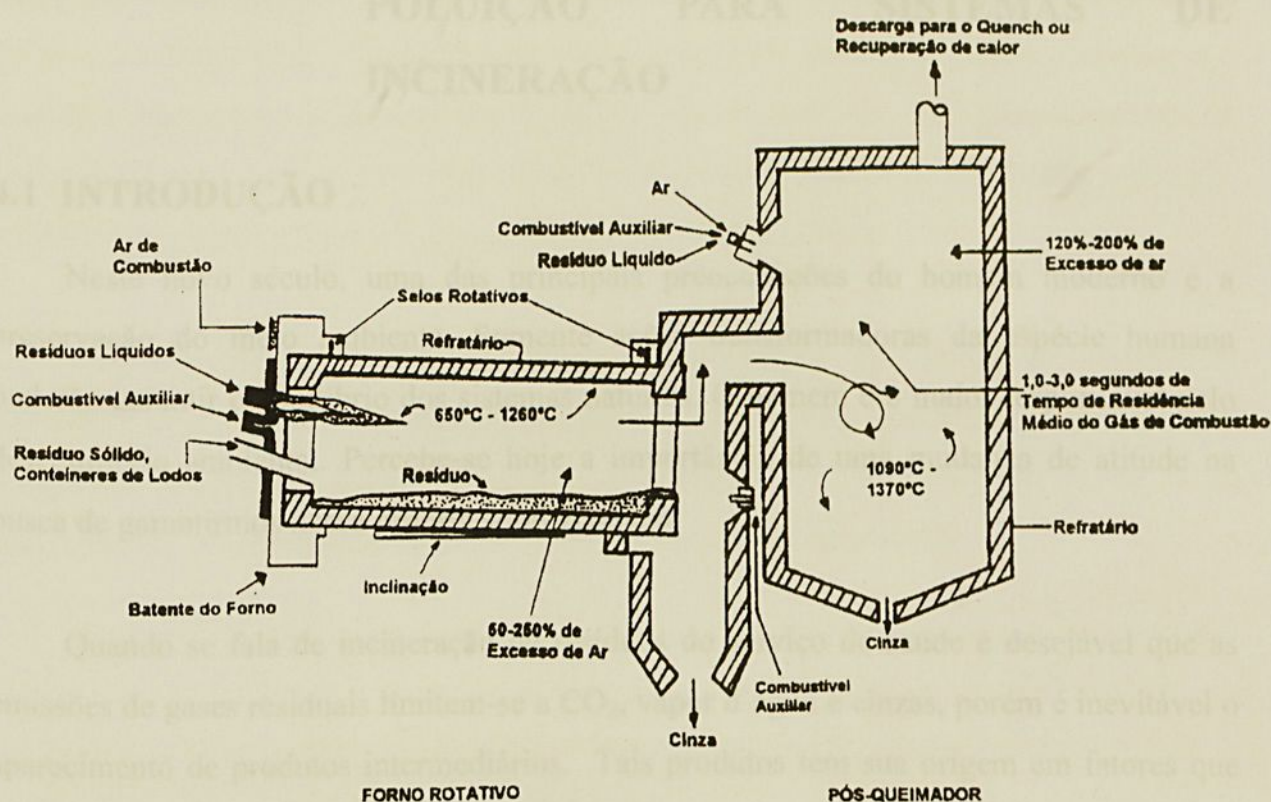


FIGURA 3.6 - Incinerador tipo rotativo [DEMPSEY; OPPELT, 1993].

O forno tem como primeira função transformar os resíduos sólidos em gases, por meio de uma série de volatilizações, destilação destrutiva e reações parciais de combustão. Porém, para completa combustão da fase gasosa é necessário um pós-queimador. O pós-queimador é posicionado diretamente à extremidade de descarga do forno, cujos gases ao saírem, estarão direcionados à câmara de pós-queima. Devido à presença de partículas sólidas alguns sistemas mais recentes têm em sua concepção um "ciclone quente" entre o forno e o pós-queimador. Tal equipamento tem a função de remover essas partículas sólidas evitando problemas de entupimento no pós-queimador. O alinhamento dos pós-queimadores pode ser vertical ou horizontal mantendo suas funções básicas e os mesmos princípios do incinerador de injeção líquida.

CAPÍTULO 4 - EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO PARA SISTEMAS DE INCINERAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste novo século, uma das principais preocupações do homem moderno é a preservação do meio ambiente. Somente ações transformadoras da espécie humana poderão garantir o equilíbrio dos sistemas naturais. O homem é o maior responsável pelo desequilíbrio ambiental. Percebe-se hoje a importância de uma mudança de atitude na busca de garantirmos nossa própria sobrevivência.

Quando se fala de incineração de resíduos do serviço de saúde é desejável que as emissões de gases residuais limitem-se a CO_2 , vapor d'água e cinzas, porém é inevitável o aparecimento de produtos intermediários. Tais produtos tem sua origem em fatores que contribuem e influem para que a combustão seja incompleta. São eles:

- Mistura insuficiente de resíduos e ar;
- falta ou excesso de ar;
- baixas temperaturas de combustão;
- ácido clorídrico;
- cloro e bromo;
- SO_x ;
- óxidos de nitrogênio;
- combustível não queimado;
- metais, óxidos minerais e sais presentes nas cinzas;
- carbono e monóxido de carbono;
- derivados benzênicos;
- dioxinas e furanos

Desta forma, em função do potencial de formação de subprodutos da combustão que acarretam algum impacto ambiental e a fim de atender as normas reguladoras que regem os procedimentos para o funcionamento das unidades de combustão, faz-se necessário o uso de mecanismos e acessórios tais como pós-queimadores que controlam a emissão de subprodutos não queimados e sistemas de tratamento de gases que diminuem a emissão de partículas, gases ácidos e orgânicos residuais (SILVA, 1998).

Segundo Holanda (2003), não é possível sintetizar as diversas tecnologias de controle para emissões de todos os poluentes em apenas uma que satisfaça as diferentes exigências decorrentes do agente poluidor em questão. A Tabela 4.1 mostra, de forma generalizada, as tecnologias mais utilizadas para cada tipo de poluente.

Tabela 4.1 - Tecnologias para a redução das emissões provenientes da incineração de resíduos (Holanda 2003).

Poluente	Opções tecnológicas de controle
Material particulado	Separação centrífuga; precipitação eletrostática; filtração utilizando o filtro de mangas ou lavagem através do lavador a úmido
Ácido clorídrico (HCl)	Lavagem através do lavador a úmido
Ácido fluorídrico (HF)	Lavagem através do lavador semi-seco
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Lavagem através do lavador a úmido ou a seco
Monóxido de carbono (CO)	Oxidação catalítica
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Redução seletiva catalítica ou não-catalítica
Mercúrio (Hg), cádmio (Cd) e chumbo (Pb)	Igual à material particulado
Outros metais pesados	Igual à material particulado
Bifenóis policlorados	Lavagem através do lavador semi-seco ou a seco
Dioxinas e furanos	Igual à material particulado ou à bifenóis policlorados

4.2 EQUIPAMENTOS PARA CONTROLE DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Após incineração, os gases de combustão dos resíduos precisam seguir um fluxo para seu tratamento em sistemas de controle e depuração do ar. Tanto o cloro quanto outros halogênios presentes no resíduo determinarão a necessidade de uma fase de lavagem ou absorção dos gases de combustão a fim de remover o HCl ou outros haloácidos que possam se formar. As cinzas do resíduo não são destruídas no processo de combustão. Dependendo de sua composição, este material poderá sair nos resíduos de fundo, na ponta de descarga do forno rotativo e/ou como material particulado suspenso nos gases de combustão (fly ash).

Equipamentos com alta eficiência são necessários quando particulados decorrentes da combustão dos resíduos perigosos apresentam partículas com diâmetros inferiores a 1 μm .

Um dos sistemas de controle de poluição do ar usados de forma mais comum nas plantas de incineração é composto por um *quench* (esfriador e condicionador de gases), seguido por lavador Venturi de alta energia (remoção de particulados), um absorvedor do tipo torre de recheio (remoção de gases ácidos) e um eliminador de névoas (redução das plumas visíveis de vapor) (RICKMAN, 1990).

Segundo Holanda (2003), emissões de material particulado, Cd e Pb podem ser retidas de maneira eficiente através de dispositivos que utilizam forças eletrostáticas (precipitador eletrostático) ou mesmo através de filtração física (filtro de mangas). Dioxinas e furanos necessitam do resfriamento do gás de escape, além de um filtro de mangas ou de um precipitador eletrostático. Lora (2000) cita a necessidade explícita de se fazer rapidamente o resfriamento do gás num secador spray (*quench*), numa etapa anterior a injeção do carvão ativado. Isto porque 62% a 82% das dioxinas e furanos são emitidos no estado vapor e com a rápida diminuição da temperatura do gás a um patamar de 110 $^{\circ}\text{C}$ as emissões podem ser reduzidas em até 98%.

4.2.1 Lavadores a seco

A tecnologia dos lavadores a seco para controle de gases ácidos é usada freqüentemente. Quando em combinação com um precipitador eletrostático, o sistema pode controlar as emissões de dioxinas, furanos, material particulado (e metais), SO_2 e emissões de HCl. A combinação dos sistemas lavador a seco/filtro de mangas é mais comum de ser encontrada do que a combinação lavador a seco/precipitador eletrostático.

No lavador a seco, a lama de cal é injetada por um atomizador ou outro dispositivo nebulizador. A água da lama evapora para resfriar o gás de escape enquanto a cal reage com os gases ácidos para formar sais de cálcio que podem ser removidos por um dispositivo de controle do material particulado.

Este equipamento é projetado de tal modo que o contato entre os gases e a lama seja suficiente para a reação de neutralização e para que o tempo de residência produza um produto seco antes de deixar o dispositivo. O tempo de residência no dispositivo varia de 10 a 15 segundos. O particulado que deixa o sistema contém cinzas, sais de cálcio, água e lama hidratada não reagida.

Os parâmetros que afetam significativamente o desempenho deste dispositivo são a temperatura na saída e a relação estequiométrica lama de cal/gás ácido. A aproximação da temperatura de saturação na saída é controlada pela quantidade de água na lama. A remoção do gás ácido é mais efetiva quanto menor for a aproximação da temperatura de saturação, mas a temperatura deve ser alta suficiente ($140\text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente) para assegurar que a lama e os produtos da reação estejam adequadamente secos antes de sua remoção do dispositivo.

A relação estequiométrica é a relação molar de cálcio na alimentação da lama de cal dividido pela quantidade teórica de cálcio requerida para reagir completamente com HCl e SO_2 do gás de escape. Em uma relação de 1,0, o nº de mols de cálcio é igual aos mols a soma do nº de mols de HCl e de SO_2 que estão entrando. Entretanto, devido às limitações

de transferência de massa, mistura incompleta, e diferentes taxas de reação (o SO_2 reage mais lentamente do que o HCl), é requerida uma quantidade teórica maior de cal na alimentação do equipamento.

A relação estequiométrica usada nos sistemas dos lavadores a seco pode variar dependendo do nível de redução do gás ácido requerido, da temperatura do gás na saída do equipamento, e do tipo de dispositivo de controle do material particulado usado. A cal é alimentada de forma suficiente para reagir com a maior concentração ácida de gás esperada sem que ocorra uma diminuição severa de desempenho. O índice de cal na lama equivale geralmente a 10% do peso, mas não pode exceder 30% do peso, pois isto pode causar a obstrução dos bocais do sistema e do pulverizador de alimentação da lama de cal. A Figura 4.1 mostra um esquema deste equipamento (EPA, 1996 b).

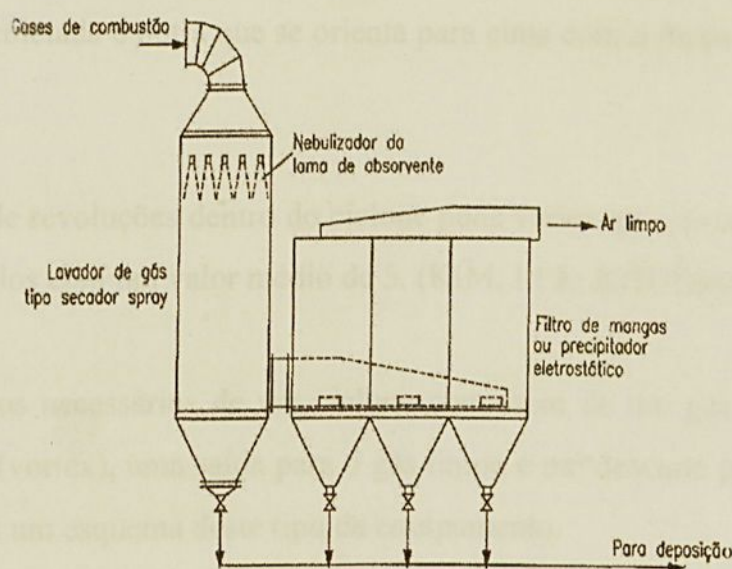


FIGURA 4.1 – lavador a seco [LORA, 2000].

4.2.2 Ciclones

Ciclones são largamente usados como um equipamento de separação ou classificação de tamanho para fluxos gás-sólidos devido sua estrutura ser simples e de

baixo custo. Com a evolução dos componentes do ciclone, a classificação de partículas da ordem de sub-microns tem sido atingida (YOSHIDA et al, 2001).

Utilizando-se materiais e métodos apropriados em sua construção, os ciclones podem ser adaptados e operados em circunstâncias extremas tais como: gases a altas temperaturas, altas pressões, e corrosivos (XIANG; LEE, 2001).

Pequenos ciclones são usados para controle da poluição do ar em ambientes através de amostragem, enquanto grandes ciclones são usados para remover grandes quantidades de partículas dos gases industriais.

O modelo de ciclone mais comum apresenta uma entrada de fluxo tangencial e fluxo reverso. É geralmente sabido que o fluxo consiste em uma espiral dupla: uma para baixo com a partícula coletada e outra que se orienta para cima com o fluxo dos gases limpos na saída do tubo.

O número de revoluções dentro do ciclone pode variar aproximadamente de 0,3 a 10 para vários modelos com um valor médio de 5. (KIM; LEE; KHULMAN, 2001)

Os elementos necessários de um ciclone consistem de um gás de entrada no qual produz o vórtice (vortex), uma saída para o gás limpo e um descarte para as partículas. A Figura 4.2 mostra um esquema deste tipo de equipamento.



FIGURA 4.2 - Ciclone [STERN, 1977].

4.2.3 Lavador Venturi

O lavador Venturi é um dos dispositivos de controle da poluição do ar que remove eficientemente partículas muito pequenas, da ordem de 0,3 a 5 μm nos fluxos gás-sólidos. Este equipamento é robusto e simples podendo ser usado com gases ácidos e corrosivos, bem como com partículas aderentes (GONÇALVES et al, 2001).

O lavador Venturi utiliza líquidos para coletar os particulados. Neste equipamento, o líquido é introduzido na forma de jatos, atomizando-se rapidamente transformando-se em pequenas gotas.

O desempenho deste equipamento é afetado diretamente pela atomização do líquido, que está diretamente ligada à concentração e distribuição espacial das gotas. Uma injeção

líquida que atinja uma boa cobertura de gotas na constrição do Venturi pode aumentar seu desempenho, minimizando o uso do líquido e reduzindo assim os custos operacionais.

Um lavador de Venturi é mostrado esquematicamente na Figura 4.3 no qual o gás que leva as partículas é acelerado na convergência. O aumento da energia cinética é obtido às custas da redução de pressão. Na divergência, a velocidade é reduzida, permitindo assim, alguma recuperação da pressão.

O modo mais comum de introdução do líquido é por pequenos orifícios localizado no começo da garganta, embora outras formas de injeção líquida possam ser usadas. Como líquido passa através dos orifícios ele assume a forma de jatos, inicialmente transversal ao fluxo do gás. Devido ao gás de arraste, os jatos seguem trajetórias curvilíneas antes de serem atomizados completamente em gotas muito pequenas (GONÇALVES; COSTA; COURY, 2003).



FIGURA 4.3 – Lavador Venturi [GONÇALVES; COSTA; COURY, 2003].

4.2.4 Filtro de Mangas

Segundo Holanda (2003), o filtro de mangas (FM), ou *fabric filter*, ou ainda *baghouse*, é um equipamento largamente utilizado no controle de poluentes que

apresentem particulados e/ou traços de metais pesados com diâmetro $> 0,3 \mu\text{m}$. Como componentes básicos destaca-se um meio filtrante (sacos tubulares de um tecido específico), uma armação (em forma de gaiola) sustentadora das mangas e um mecanismo cuja função é a remoção das partículas que ficam acumuladas no tecido das mangas.

O processo de retirada dos particulados inicia-se com a entrada do fluxo de gases pela parte inferior do FM próxima aos silos de coleta. Os gases com particulados, ao atravessar as mangas, são filtrados ficando o material sólido retido no tecido.

Com a repetição do processo seguido de limpeza, o tecido apresenta uma camada denominada *cake* (torta de filtro) que é uma fração dos particulados que ficou retida permanentemente no meio filtrante (tecido+*cake*). Tal efeito promove uma eficiência dos FMs da ordem de 99,0% a 99,9% durante a retenção de pequenas partículas. A Figura 4.4 mostra este tipo de equipamento.

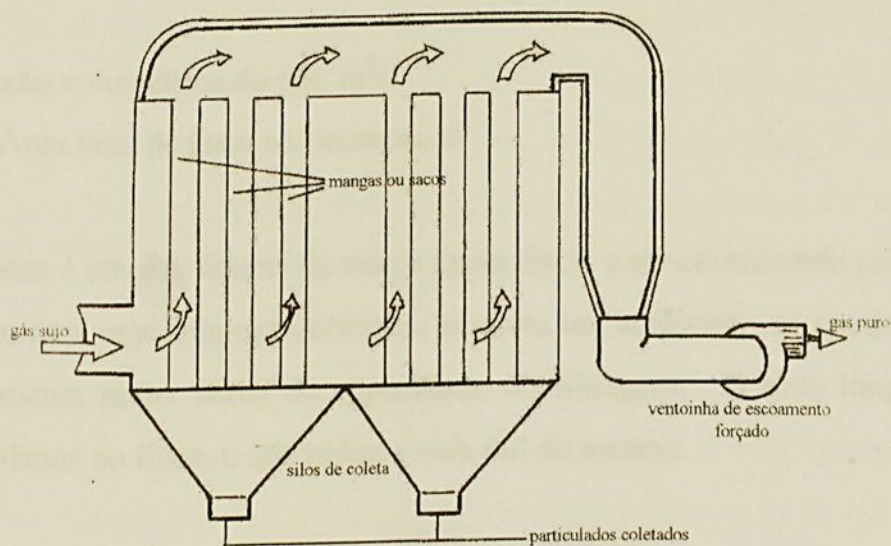


FIGURA 4.4 – Filtro de Mangas (FM) [HOLANDA, 2003].

A classificação dos FMs pode ser de acordo com a forma de limpeza das mangas, atendendo a direção do fluxo de gás (segundo o sentido interior da manga para fora e

vice-versa) e de acordo com a localização do ventilador do sistema (a sucção ou a pressão).

O consumo de energia do filtro objetiva vencer a resistência aerodinâmica total, formada pela resistência das mangas, da torta do filtro (*cake*) e dos dutos correspondentes: os valores típicos da queda de pressão estão na faixa de 1-5 kPa. A Figura 4.5 mostra um esquema da torta do filtro.

De acordo com Lora (2000), um parâmetro de grande importância a ser avaliado é a relação gás/pano (também conhecida como relação ar/pano). É a relação entre o fluxo volumétrico de gás e a área de pano das mangas. A equação 4.1 mostra a esta relação.

$$[\text{Gás/Pano}] = \frac{V_g}{A_{\text{filtro}}}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.1)$$

Onde:

V_g : Vazão volumétrica do gás, m^3/s

A_{filtro} : Área total de pano nas mangas, m^2 .

A limpeza é um dos fatores de maior importância a ser considerado para este tipo de equipamento, pois uma limpeza deficiente acarreta um acréscimo na queda de pressão e conseqüentemente numa perda da capacidade de filtragem. Já uma limpeza vigorosa pode causar danos no filtro, o que reduz a vida útil do mesmo.

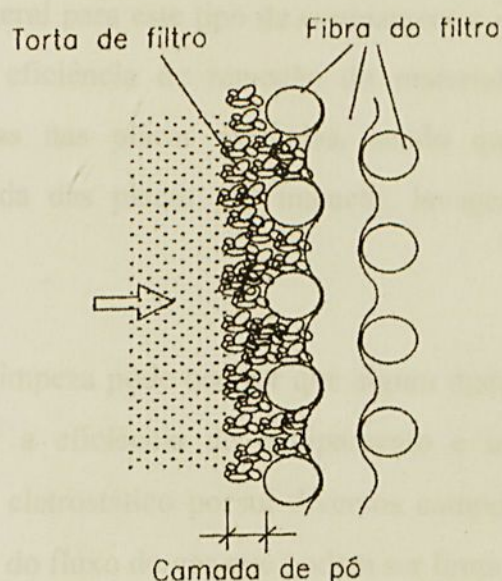


FIGURA 4.5 – Torta do filtro (*cake*) [LORA, 2000].

4.2.5 Precipitadores Eletrostáticos

É um equipamento utilizado no controle de particulados que através de forças elétricas movimentam as partículas desde o fluxo de gases até os eletrodos coletores. Devido a seu princípio de funcionamento é o único equipamento cujas forças de remoção atuam somente sobre as partículas e não sobre o fluxo de gás. Desta forma, proporciona uma eficiência de separação da ordem de 99,5% (LORA, 2000). A Figura 4.6 mostra um esquema deste equipamento.

Os precipitadores eletrostáticos consistem em uma série de eletrodos de descarga de alta tensão (20 kJ/Coulomb a 100 kJ/Coulomb – 20kv a 100 kv) e de placas metálicas aterradas através do qual o fluxo de gás com material particulado flui. Os íons carregados negativamente formados por este campo de alta tensão (conhecido como "corona"), fazem com que as partículas carregadas migrem para serem coletadas nas placas aterradas.

Existe uma regra geral para este tipo de equipamento: quanto maior a área da placa coletora, maior será a eficiência de remoção do material particulado. As partículas carregadas são coletadas nas placas aterradas, sendo que a camada resultante do particulado será removida das placas por impacto, lavagem, ou por outro método e coletada em um funil.

Neste processo de limpeza pode ocorrer que algum material coletado volte ao fluxo de gás. Para assegurar a eficiência do equipamento e uma boa ação coletora dos eletrodos, o precipitador eletrostático possui diversos campos energizados, situados em série, ao longo do sentido do fluxo do gás que podem ser limpos independentemente.

Na migração do material particulado as partículas menores possuem velocidades mais baixas do que partículas maiores e conseqüentemente são mais difíceis de se coletar. Este fator tem especial importância devido a quantidade de cinzas que possuem diâmetros menores do que $1 \mu\text{m}$. Devido a isto, a eficácia de remoção do material particulado estará diretamente relacionada a grandes áreas coletoras e baixas velocidades do fluxo de gás.

Como um indicador aproximado de eficiência, pode-se utilizar a área específica de remoção dos precipitadores eletrostáticos. Este indicador é calculado dividindo-se a área de coleta da placa do eletrodo pela taxa de fluxo do gás sendo expresso em m^2 por $304.8 \text{ m}^3/\text{min}$ de fluxo de gás. Quanto mais elevado o valor deste indicador, mais elevada será a eficiência do equipamento (EPA, 1996 b).

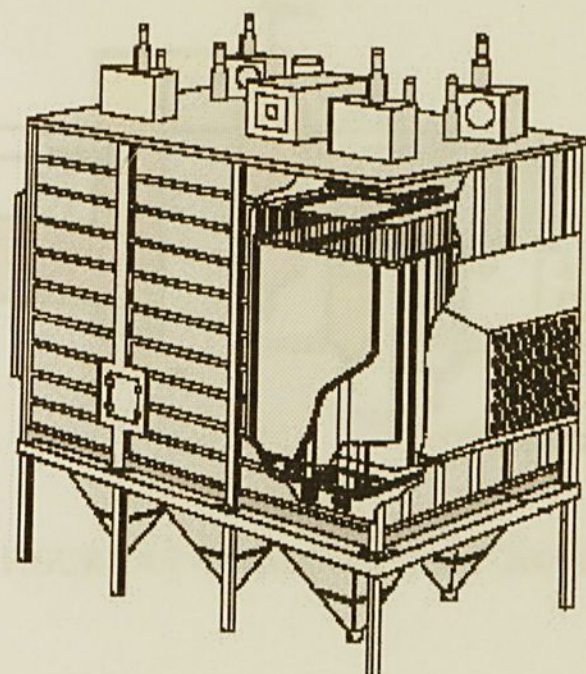
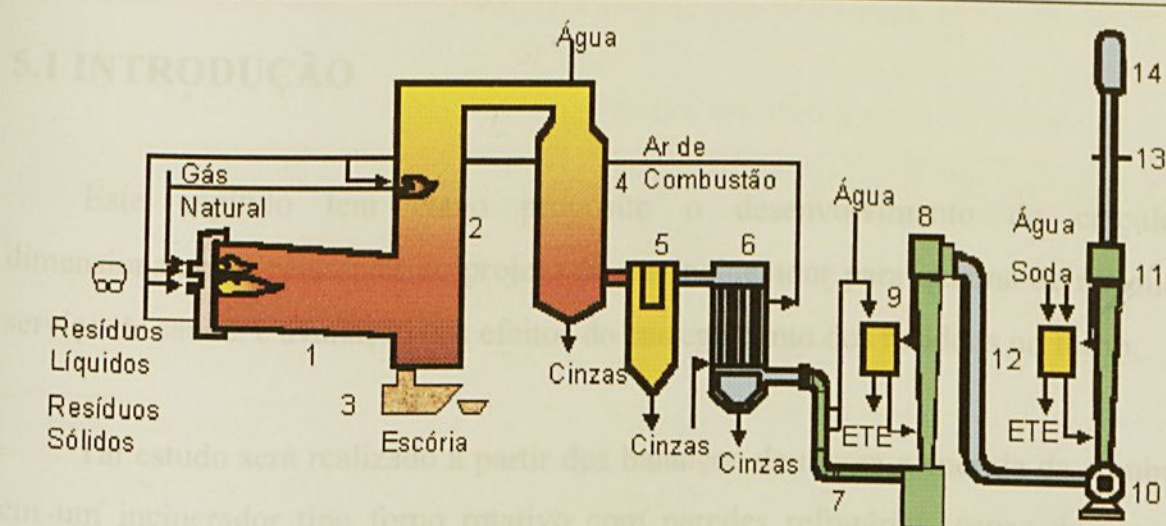


FIGURA 4.6 – Precipitador Eletrostático [EPA, 1996 b].

A seguir é mostrada na Figura 4.7 um fluxograma de alguns destes equipamentos utilizados na planta industrial da BASF S/A em Guaratinguetá.

FIGURA 4.7 – Fluxograma (BASF 2001)⁶.

1. Forno rotativo
2. Câmara de pós-combustão
3. Transportador de escórias
4. Lavador a seco
5. Ciclones
6. Pré-aquecedores de ar de combustão
7. Pós-resfriador
8. Lavador Venturi
9. Tanque intermediário
10. Exaustor
11. Lavador Venturi
12. Tanque intermediário
13. Plataforma de amostragem
14. Chaminé

⁶ Manual de orientação ao cliente – ed. 2001

CAPÍTULO 5 – PROJETO DE UM INCINERADOR

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como propósito o desenvolvimento de cálculos e dimensionamento referentes ao projeto de um incinerador para queima de resíduos de serviço de saúde, e avaliação dos efeitos do carregamento dos resíduos no forno.

Tal estudo será realizado a partir dos balanços de massa e energia da combustão em um incinerador tipo forno rotativo com paredes refratárias, capaz de processar resíduos à razão de 100 kg/h, utilizando gás natural - GN (11.386 kcal/kg de poder calorífico inferior).

Para o desenvolvimento do cálculo no projeto será considerado para a câmara primária a temperatura de 1000 °C e tempo de residência de 2 segundos e para a câmara secundária a temperatura de 1200 °C e tempo de residência de 2 segundos. Deve-se ter em mente que tais parâmetros podem variar dependendo do tipo de resíduo e das necessidades do cliente.

O presente estudo foi realizado a partir de dados coletados da composição média dos resíduos do serviço de saúde gerados no Hospital Frei Galvão, no município de Guaratinguetá, SP, que possui 150 leitos. A composição média desses resíduos é apresentada na Tabela 5.1.¹

Os resultados obtidos e apresentados em tabelas relacionarão os diferentes parâmetros permitindo, desta forma, a determinação dos requisitos de vazão de combustível auxiliar, vazões de ar e de combustão e volume da câmara.

De acordo com Oliveira (2001), os valores para o poder calorífico inferior médio de resíduos são: 3.777,7 kcal/kg para o papel, 3.777,7 kcal/kg para as gazes e compressas e

¹ Caracterização fornecida pelo Dr. Luiz Fernando Costa Nascimento (Hospital Frei Galvão).

7.833,3 kcal/kg para os plásticos misturados. Já de acordo com Wark e Richards (1999), o calor latente de vaporização da água a 25°C e 1 atm é de, aproximadamente, 583 kcal/kg.

TABELA 5.1 - Composição média dos resíduos de serviço de saúde.

Resíduo	n° mols/100 g de resíduo	Porcentagem (%)
Papel (C ₆ H ₁₀ O ₅)	0,199	32,32
Incombustíveis*	-	30,34
Água (H ₂ O)	0,359	6,46
Gazes, compressas (C ₆ H ₁₀ O ₅)	0,040	6,46
Plásticos (CH ₂) _n	0,179	2,87
Res. Lanchonete (aprox. H ₂ O)	1,197	21,54

* Gesso, agulhas, vidros.

O poder calorífico inferior do resíduo hospitalar pode ser calculado a partir de (WARK; RICHARDS, 1999):

$$PCI_{\text{resíduos}} = \sum x_i \times PCI_i \quad (5.1)$$

$$PCI = [(3.777,7 \times 0,3232) + (3.777,7 \times 0,0646) + (7.833,3 \times 0,0287) - (583 \times 0,280)]$$

$$PCI_{\text{resíduos}} = 1.526,6 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad \text{ou} \quad PCI_{\text{resíduos}} = 6.390,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

5.2 ESTADO DA ARTE SOBRE A INCINERAÇÃO DE RSS EM GUARATINGUETÁ

Com a aprovação da Lei municipal 2.335 de 04 de dezembro de 1991, na qual a Câmara Municipal autoriza o Poder Executivo de Guaratinguetá a permutar imóveis de seu patrimônio por benfeitorias a serem executadas pela BASF Brasileira S.A., o município deu um salto para solucionar o problema na disposição final de seus resíduos do serviço de saúde.

Pela Lei, a BASF se compromete a incinerar e receber no aterro industrial 5 toneladas mensais dos resíduos provenientes do serviço de saúde após incineração dos mesmos em seus equipamentos. No ano de 1994 deu-se início à operação do incinerador e à eliminação desses resíduos.

Apesar das quantidades acordadas inicialmente serem de 60 toneladas por ano, dados da prefeitura municipal mostram que em 2002 foram incineradas 76.345 kg de RSS. A Tabela 5.2 mostra o controle quantitativo desses resíduos.

TABELA 5.2 Controle quantitativo de resíduos de serviço de saúde (Prefeitura, 2002)². Informação verbal.

Meses	Total de bombonas	Total de quilos
Janeiro	380	6.190
Fevereiro	382	5.660
Março	329	5.650
Abril	374	6.760
Maio	371	6.570
Junho	331	5.920
Julho	372	6.790
Agosto	378	6.860
Setembro	366	6.835
Outubro	349	6.530
Novembro	356	6.640
Dezembro	319	5.940
Valor médio	359	6.362
Total	4307	76.345

² Informação fornecida pelo Engenheiro André Luiz de Paula Marques, da Prefeitura de Guaratinguetá/SP, em março de 2003.

Através da colaboração da BASF, foram permitidas visitas para acompanhamento da queima desses resíduos, o que contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

O incinerador BASF com capacidade de 2.700 t/ano é do tipo forno rotativo e trabalha com um intervalo de temperatura de 900 a 1200 °C. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, a tela da visão geral para controle e instrumentação do processo de incineração e do incinerador no momento imediato a um carregamento.

A Figura 5.1 mostra uma visão geral do monitoramento do sistema. Como já comentado no Capítulo 3 pode-se perceber quatro equipamentos: a câmara de combustão primária ou reator com temperatura de 956 °C e pressão de - 0,23 mbar (onde os resíduos podem ser tratados a diferentes temperaturas conforme o processo); a câmara de pós-combustão com temperatura 966 °C em presença de excesso de ar assegurando desta forma a completa oxidação dos gases advindo da câmara primária (no quadro é mostrado o percentual de O₂ e as concentrações de NO_x, CO, SO₂ e suas emissões corrigidas. Caso não houvesse tais correções, bastaria a diluição dos produtos de combustão após a saída da câmara de pós combustão para gerar valores de concentrações menores do poluente de interesse); lavador de gases (eliminação de gases poluentes e partículas em suspensão) e chaminé para a exaustão dos gases.

A Figura 5.2 dá uma visão mais objetiva do conjunto incinerador e pós-incinerador desde sua alimentação, cujo monitoramento inclui temperatura, pressão e rotação.

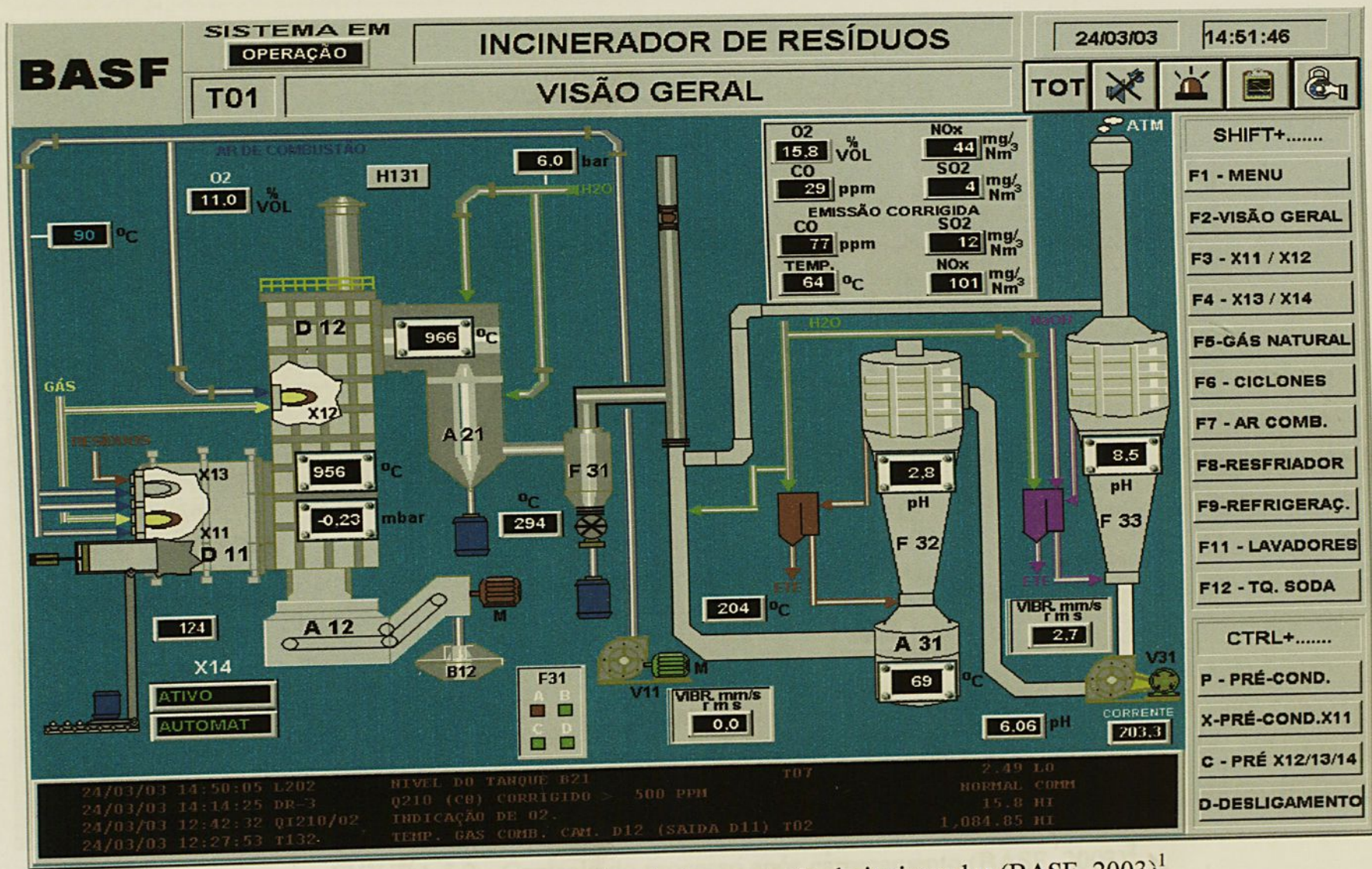


FIGURA 5.1 - Tela para controle e instrumentação do incinerador (BASF, 2003)¹

¹ Tela cedida da BASF S/A



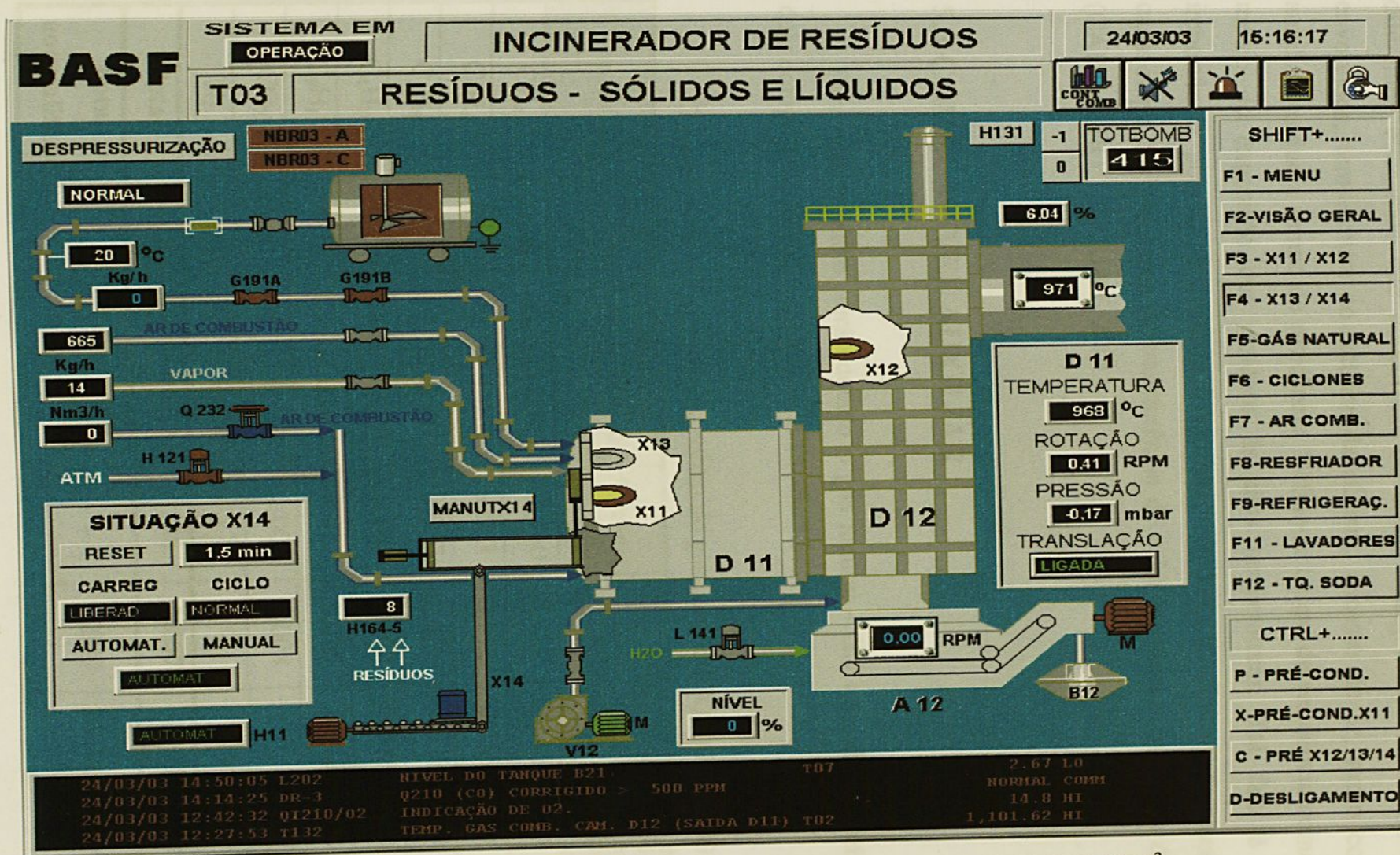


FIGURA 5.2 - Controle do processo após carregamento (BASF, 2003)²

² Tela cedida da BASF S/A



Ao se avaliar o projeto de um incinerador, deve-se perceber que existem diferentes elementos que concorrem de forma antagônica, tais como os custos envolvidos, temperatura no interior da câmara, excesso de ar, razão combustível auxiliar/resíduo e tempo de residência. Define-se tempo de residência como o tempo médio de exposição dos resíduos às altas temperaturas. Tal fato é de suma importância, pois há necessidade de um intervalo de tempo finito para a conclusão de cada etapa dos processos de transferência de calor e massa e trajetória das reações (CARVALHO; MCQUAY, 2001)

5.3 COMBUSTÍVEL AUXILIAR

Para este trabalho, será adotado o gás natural - GN (gasoduto Bolívia-Brasil), cuja composição média é mostrada na Tabela 5.3.

TABELA 5.3 - Composição média do gás natural (COMGAS, 2003).

Componente	% vol.	P.M.	Massa	% mas.	Quantidade de átomos			
					C	H	O	N
CH ₄	91,08	16	14,573	83,160	0,911	3,643	0	0
C ₂ H ₆	5,58	30	1,674	9,553	0,112	0,335	0	0
C ₃ H ₈	0,97	44	0,427	2,437	0,029	0,078	0	0
C ₄ H ₁₀	0,05	58	0,029	0,165	0,002	0,005	0	0
C ₅ H ₁₂	0,1	72	0,072	0,411	0,005	0,012	0	0
CO ₂	0,8	44	0,352	2,008	0,008	0	0,016	0
N ₂	1,42	28	0,398	2,271	0	0	0	0,028
Total	100	-	17,524	100	1,067	4,073	0,016	0,028
Total normalizado	-	-	$\frac{100}{17,524}$	-	6,089	23,242	0,091	0,160

Portanto, tem-se que em 100 g de GN:

$$\text{GN} = \text{C}_{6,089} \text{H}_{23,242} \text{O}_{0,091} \text{N}_{0,160}$$

Da equação (5.1), tem-se:

$$\text{PCI}_{\text{comb}} = (0,9108 \times 191.759) + (0,0558 \times 341.261) + (0,0097 \times 488.527) + (0,0005 \times 635.384) + (0,001 \times 782.040)$$

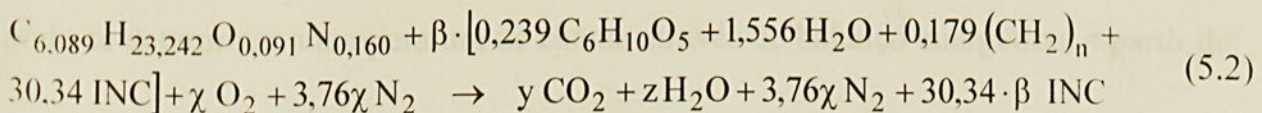
$$\text{PCI}_{\text{comb}} = 199.534 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol}} \quad \text{ou} \quad \text{PCI}_{\text{comb}} = 835.253 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Sabendo-se que nas condições normais de temperatura e pressão, 1 kmol ocupa 22,4 m³:

$$\text{PCI}_{\text{comb}} = 8.907 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3}, \quad \text{ou} \quad \text{PCI}_{\text{comb}} = 11.386 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad \text{ou} \quad \text{PCI}_{\text{comb}} = 47.662 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

5.4 REAÇÃO DE COMBUSTÃO ESTEQUIOMÉTRICA INCLUINDO O RESÍDUO

Considerando que 100 g de GN vão incinerar 100β g de resíduos, sendo β a relação fluxo mássico do resíduo e fluxo mássico do combustível auxiliar, e considerando-se a composição média do RSS da Tabela 5.1 a reação de combustão fica:

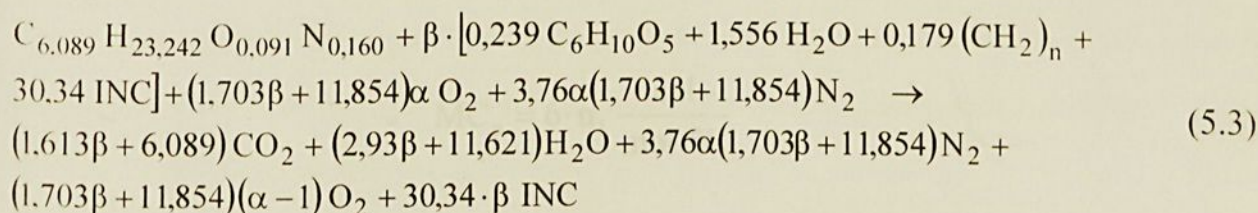


Da conservação de átomos:

- C: $6,089 + 0,239 (6\beta) + 0,179\beta = y \therefore y = 1,613\beta + 6,089$;
- H: $23,242 + 0,239 (10\beta) + 1,556 (2\beta) + 0,179(2\beta) = 2z \therefore z = 2,930\beta + 11,621$;
- O: $0,091 + 0,239 (5\beta) + 1,556\beta + 2\chi = 2y + z \therefore \chi = 1,703\beta + 11,854$.

5.5 REAÇÃO DE COMBUSTÃO COM EXCESSO DE AR GENÉRICO

Como não se pode obter as condições ideais acima mencionadas há necessidade de se adaptar a reação para que o excesso de ar seja utilizado, o qual será considerado na forma normalizada, com $\alpha = (1 + \text{excesso de ar})$, α é definido como o excesso de ar normalizado. A equação de combustão do resíduo com excesso de ar pode ser escrita como:



5.6 TEMPERATURA MÉDIA NO INCINERADOR

A temperatura dos gases de combustão será calculada em função das variáveis β e α . De acordo com Bonner et al. (1981), aceita-se como restrição o fato de que 5% do calor gerado é transferido para o exterior da câmara através da parede. Neste sentido, pode-se determinar a temperatura de chama através do balanço energético, a partir de:

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} \left[\sum_i n_i c_{p,i} \right] dT + \Delta H_1 \quad (5.4)$$

sendo:

- ΔH = calor de combustão do combustível auxiliar e do resíduo;
- n_i = número de moles de cada um dos componentes gasosos dos produtos de combustão ($i = \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2, \text{N}_2$);
- $C_{p,i}$ = calor específico a pressão constante de cada componente gasoso;
- T_i = temperatura inicial dos reagentes ($T_i = 25^\circ\text{C}$ ou 298 K);
- T_f = temperatura dos gases de combustão (a ser calculada);
- ΔH_1 = calor latente de vaporização da água a 25°C (583 cal/g).

Para o cálculo da energia necessária ao aquecimento dos incombustíveis é preciso estimar a capacidade calorífica molar, MC_p . De acordo com Niessen (1994), a lei de Kopp pode ser usada:

$$MC_p = 6 \cdot n_1 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{C}} \quad (5.5)$$

sendo n_1 igual ao número total de átomos na molécula.

Para muitos compostos inorgânicos, a capacidade calorífica média se situa na faixa de 0,2 a 0,3 $\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{C}}$, valores que são assumidos razoáveis.

Utilizou-se para este cálculo $C_{p, \text{INC}} = 0,3 \text{ cal/mol } ^\circ\text{C}$. Os incombustíveis foram considerados como descartados da câmara primária com elevação de 1000°C , o que pode ser interpretado como uma diminuição do PCI do resíduo de:

$$\left(30,34\beta \text{ g INC} \times \frac{0,3}{1000} \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{g INC}} \right) \frac{1000 \text{ }^\circ\text{C}}{100 \text{ g GN}} = 9,10\beta \frac{\text{kcal}}{100 \text{ g GN}}$$

O valor de ΔH pode ser calculado considerando-se a perda de energia pelas paredes de 5%, pela seguinte equação:

$$\Delta H = 0,95 \cdot \left[1138 \frac{\text{kcal}}{100 \text{ g GN}} + (152,6 - 9,1) \beta \frac{\text{kcal}}{100 \text{ g res.}} \right]$$

De acordo com Perry e Chilton (1973), os calores específicos a pressão constante dos produtos de combustão são:

$$c_{p,\text{CO}_2} = 10,34 + 0,00274T - 195,500 T^{-2} \quad [\text{cal}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{mol de CO}_2)]; \quad (5.6)$$

$$c_{p,\text{H}_2\text{O}} = 8,22 + 0,00015T + 0,00000134T^2 \quad [\text{cal}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{mol de H}_2\text{O}); \quad (5.7)$$

$$c_{p,\text{O}_2} = 8,27 + 0,000258T - 187,700 T^{-2} \quad [\text{cal}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{mol de O}_2)]; \quad (5.8)$$

$$c_{p,\text{N}_2} = 6,50 + 0,00100T \quad [\text{cal}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{mol de N}_2)]. \quad (5.9)$$

Substituindo as equações (5.6) a (5.9) na equação do balanço de energia [equação (5.4)], introduzindo o valor de ΔH e efetuando as integrações, tem-se:

$$\begin{aligned} \Delta H = & \int_{298}^{T_f} \left[(1,613\beta + 6,089) \cdot (10,34 + 0,00274T - 195,500T^{-2}) + \right. \\ & + (2,93\beta + 11,621) \cdot (8,22 + 0,00015T + 0,00000134T^2) + \\ & + (1,703\beta + 11,854) \cdot (\alpha - 1) \cdot (8,27 + 0,000258T - 187,700T^{-2}) + \\ & \left. + (3,76) \cdot \alpha \cdot (1,703\beta + 11,854) \cdot (6,5 + 0,001T) \right] dT \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H = & [\beta \cdot (26,679 + 55,705 \cdot \alpha) + 387,745 \cdot \alpha + 60,452] \cdot (T_f - 298) + \\ & [\beta \cdot (0,002 + 0,003 \cdot \alpha) + 0,024 \cdot \alpha + 0,007] \cdot (T_f^2 - 298^2) + \\ & [\beta \cdot (319,653,1 \cdot \alpha - 4,311,5) + 2,224,995,8 \cdot \alpha - 1,034,656,3] \cdot (T_f^{-1} - 298^{-1}) + \\ & (1,310 \times 10^{-6} \cdot \beta + 5,195 \times 10^{-6}) \cdot (T_f^3 - 298^3) \end{aligned}$$

A solução desta equação tem como resultado valores de T_f (K) em função de α e β . Os resultados estão mostrados na Tabela 5.4.

TABELA 5.4 – Temperatura média no incinerador (em K) como função do excesso de ar normalizado, α , e da razão entre as vazões de resíduo e combustível auxiliar, β .

α	β									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2166	2107	2061	2025	1996	1972	1951	1934	1919	1906
1,1	2051	1998	1957	1924	1897	1875	1857	1841	1827	1815
1,2	1949	1900	1863	1833	1809	1789	1772	1757	1745	1734
1,3	1857	1813	1779	1752	1730	1711	1696	1682	1671	1660
1,4	1775	1735	1703	1678	1658	1641	1626	1614	1603	1594
1,5	1701	1663	1634	1611	1592	1577	1563	1552	1542	1533
1,6	1633	1599	1572	1550	1533	1518	1506	1495	1486	1478
1,7	1572	1540	1515	1495	1478	1465	1453	1443	1435	1427
1,8	1516	1486	1462	1444	1429	1416	1405	1396	1388	1380
1,9	1464	1436	1414	1397	1383	1371	1360	1352	1344	1337
2	1417	1391	1370	1354	1340	1329	1319	1311	1304	1298
2,1	1373	1348	1329	1314	1301	1290	1281	1273	1267	1261
2,2	1332	1309	1291	1276	1264	1254	1246	1238	1232	1226
2,3	1295	1273	1256	1242	1230	1221	1213	1206	1200	1194
2,4	1260	1239	1223	1210	1199	1190	1182	1175	1170	1165
2,5	1227	1208	1192	1180	1169	1161	1153	1147	1141	1137

5.7 VARIAÇÃO DO PCI DO RESÍDUO

No estudo em questão, houve a preocupação em avaliar uma possível variação no PCI do resíduo mantendo-se constante a taxa de alimentação. Foram montadas tabelas, na qual variou-se o PCI do resíduo em 25%, 50% e 75% para, dessa forma, determinar quais os

melhores valores para β , α e temperatura no projeto da câmara primária. Para esse estudo a temperatura de trabalho na câmara é considerada da ordem de 1000 °C. Deve-se salientar que como β é a razão entre o fluxo mássico do resíduo e o fluxo mássico do combustível auxiliar, quanto maior o valor de β , menor será a quantidade de combustível auxiliar utilizada reduzindo dessa forma, os custos envolvidos.

A Tabela 5.5 mostra os valores da temperatura média no incinerador como função do excesso de ar normalizado, α , e da razão entre as vazões de resíduo e combustível auxiliar, β , quando o PCI do resíduo está a 75%.

TABELA 5.5 Temperatura média no incinerador (em K) com PCI reduzido de 25%.

α	β									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2122	2022	1958	1901	1854	1816	1783	1755	1731	1710
1,1	2009	1918	1858	1805	1762	1727	1696	1670	1648	1628
1,2	1909	1825	1769	1720	1680	1647	1619	1595	1574	1555
1,3	1819	1741	1689	1644	1606	1575	1549	1526	1507	1490
1,4	1738	1666	1617	1575	1540	1511	1486	1465	1446	1430
1,5	1666	1598	1552	1512	1479	1452	1429	1409	1391	1376
1,6	1600	1536	1493	1455	1424	1398	1377	1358	1341	1327
1,7	1539	1480	1439	1403	1374	1350	1329	1311	1296	1282
1,8	1485	1428	1389	1356	1328	1305	1285	1268	1254	1241
1,9	1434	1381	1344	1312	1286	1264	1245	1229	1215	1203
2	1388	1338	1302	1272	1247	1226	1208	1193	1179	1168
2,1	1345	1297	1264	1235	1211	1191	1174	1159	1146	1135
2,2	1306	1260	1228	1200	1177	1158	1142	1128	1116	1105
2,3	1269	1226	1195	1168	1146	1128	1112	1099	1087	1077
2,4	1235	1193	1164	1138	1117	1100	1085	1072	1061	1051
2,5	1203	1163	1135	1110	1090	1073	1059	1047	1036	1026

A Tabela 5.6 mostra os valores da temperatura média no incinerador como função do excesso de ar normalizado, α , e da razão entre as vazões de resíduo e combustível auxiliar, β , quando o PCI do resíduo está a 50%.

TABELA 5.6 Temperatura média no incinerador (em K) com PCI reduzido de 50%.

α	β									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2077	1951	1852	1773	1709	1655	1609	1570	1536	1506
1,1	1962	1843	1751	1677	1617	1567	1524	1487	1455	1428
1,2	1864	1754	1668	1599	1542	1495	1455	1420	1390	1364
1,3	1777	1673	1593	1528	1475	1430	1393	1360	1332	1308
1,4	1699	1601	1525	1464	1414	1372	1337	1306	1280	1256
1,5	1628	1536	1464	1407	1359	1320	1286	1257	1232	1210
1,6	1563	1477	1409	1354	1310	1272	1240	1213	1189	1168
1,7	1505	1423	1359	1307	1264	1228	1198	1172	1150	1130
1,8	1452	1374	1312	1263	1223	1189	1160	1135	1113	1094
1,9	1403	1328	1270	1223	1184	1152	1124	1101	1080	1062
2	1358	1287	1231	1186	1149	1118	1092	1069	1049	1032
2,1	1316	1248	1195	1152	1117	1087	1062	1040	1021	1005
2,2	1278	1213	1162	1121	1087	1058	1034	1013	995	979
2,3	1242	1180	1131	1091	1059	1031	1008	988	970	955
2,4	1209	1149	1102	1064	1033	1006	984	964	948	933
2,5	1178	1120	1075	1038	1008	983	961	943	926	912

A Tabela 5.7 mostra os valores da temperatura média no incinerador como função do excesso de ar normalizado, α , e da razão entre as vazões de resíduo e combustível auxiliar, β , quando o PCI do resíduo está a 25%.

TABELA 5.7 Temperatura média no incinerador (em K) com PCI reduzido a 75%

α	β									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2032	1871	1738	1643	1552	1489	1429	1377	1333	1294
1,1	1920	1768	1649	1554	1476	1410	1354	1306	1264	1228
1,2	1824	1682	1571	1481	1407	1346	1293	1248	1209	1175
1,3	1738	1605	1500	1416	1346	1288	1239	1196	1159	1127
1,4	1662	1536	1437	1357	1292	1237	1190	1150	1115	1084
1,5	1592	1473	1380	1304	1242	1190	1146	1108	1075	1045
1,6	1530	1417	1328	1256	1197	1148	1106	1070	1038	1010
1,7	1473	1365	1281	1213	1157	1110	1069	1035	1005	978
1,8	1420	1318	1238	1173	1119	1074	1036	1003	974	949
1,9	1373	1275	1198	1136	1085	1042	1006	974	947	922
2	1329	1236	1162	1103	1054	1012	977	947	921	898
2,1	1288	1199	1129	1072	1025	985	951	922	897	875
2,2	1251	1165	1098	1043	998	960	927	899	875	854
2,3	1216	1134	1069	1016	973	936	905	878	855	834
2,4	1184	1114	1042	991	949	914	884	858	836	816
2,5	1154	1077	1017	968	928	894	865	840	818	799

Visto que o excesso de ar para este tipo de incinerador varia entre 50 a 250%, os melhores valores para β e α da Tabela 5.4 foram 8 e 2,1 respectivamente. Isto se justifica pelo critério econômico, pois quanto maior o valor de β , menos combustível auxiliar será usado.

Caso haja uma redução de até 25% no PCI do resíduo com no mínimo 50% de excesso de ar, como indicado na Tabela 5.5, a temperatura do processo manter-se-á numa faixa de 1136 °C (1409 K) garantindo ainda, a temperatura do projeto e a completa destruição do resíduo.

Para uma redução de 50% no valor do PCI, Tabela 5.6, os valores de β e α foram de 7 e 1,5 com uma temperatura de 1013 °C (1286 K) o que garante ainda o patamar de temperatura desejado.

Para uma redução de 75% no valor do PCI, Tabela 5.7, os valores de β e α foram de 4 e 1,5 com uma temperatura de 1031 °C (1304 K), ou seja, para se manter a temperatura do projeto terá que ser consumida uma quantidade maior de combustível auxiliar.

5.8 TEMPO DE RESIDÊNCIA

Um parâmetro fundamental para o projeto é o tempo de residência médio dos gases dentro do incinerador, levando-se em conta que as diversas reações químicas necessitam de tempo hábil para sua conclusão. O valor médio deste parâmetro é:

$$t_R = \int \frac{dV}{\dot{q}} \quad (5.10)$$

sendo V o volume da câmara e \dot{q} a vazão volumétrica média dos gases dentro do incinerador; o volume da câmara é então calculado em função do tempo de residência pré-estabelecido e do cálculo de \dot{q} .

Porém,

$$\dot{q} = \bar{v}A = \frac{\dot{m}_{tot}}{\rho} \quad (5.11)$$

Sendo \bar{v} , \dot{m}_{tot} , e ρ , respectivamente, a velocidade, a vazão mássica total e a massa específica média dos gases de combustão, e A a área transversal do incinerador. Desta forma, a expressão para o tempo de residência (t_R) será:

$$t_R = \frac{V\rho}{\dot{m}_{\text{tot}}} \quad (5.12)$$

Considerando o comportamento dos gases de combustão próximo do de um gás perfeito, temos:

$$t_R = \frac{V\bar{M}}{RT_f \dot{m}_{\text{tot}}} \quad (5.13)$$

sendo P a pressão (1 atm), \bar{M} a massa molecular média do gás de combustão e R a constante universal dos gases perfeitos ($0,08206 \text{ atm.l.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$).

Para uma certa vazão mássica de resíduo genérica, \dot{m}_{res} , obter-se-á, para \dot{m}_{tot} :

$$\dot{m}_{\text{tot}} = \dot{m}_{\text{res}} + \dot{m}_{\text{comb}} + \dot{m}_{\text{ar}} - \dot{m}_{\text{INC}}, \quad \text{mas: } \dot{m}_{\text{INC}} = 0,3034 \cdot \dot{m}_{\text{res}}$$

$$\dot{m}_{\text{tot}} = \dot{m}_{\text{res}} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{\beta} + \frac{[(1,703\beta + 11,854) \cdot 32 + (3,76) \cdot (1,703\beta + 11,854) \cdot (28)] \cdot \alpha}{100 \cdot \beta} \right\} - \dot{m}_{\text{INC}}$$

$$\dot{m}_{\text{tot}} = \dot{m}_{\text{res}} \left[1 + \frac{1}{\beta} + \frac{(2,338 \cdot \beta + 16,273) \cdot \alpha}{\beta} \right] - 0,3034$$

Por outro lado, a massa molecular média dos gases de combustão, obtida de

$M = x_i \cdot M_i$, é dada por:

$$\bar{M} = \frac{(1,61\beta + 6,09) \cdot 44 + (2,93\beta + 11,62) \cdot 18 + (1,70\beta + 11,85)(\alpha - 1) \cdot 32 + (3,76)\alpha(1,70\beta + 11,85) \cdot 28}{1,61\beta + 6,09 + 2,93\beta + 11,62 + 1,70\beta\alpha - 1,70\beta + 11,85\alpha - 11,85 + 6,38\beta\alpha + 44,56\alpha}$$

$$\bar{M} = \frac{69,39\beta + 233,03\beta\alpha + 1626,84\alpha + 97,88}{2,85\beta + 8,08\beta\alpha + 56,41\alpha + 5,86}, \quad (\text{g/mol}).$$

Inserindo os valores $\dot{m}_{\text{res}} = 100 \text{ kg/h} = 27,78 \text{ g/s}$, $P = 1 \text{ atm}$, $R = 0,08206 \text{ atm} \cdot \text{l/mol} \cdot \text{K}$, \dot{m}_{tot} e \bar{M} dados pelas respectivas fórmulas, obtém-se a seguinte equação para a relação t_R/V :

$$\frac{t_R}{V} = \frac{(69,39\beta + 233,03\beta\alpha + 1626,84\alpha + 97,88) \cdot 1000}{[2,85\beta + (8,08\beta + 56,41) \cdot \alpha \cdot 5,86] (0,08026) \cdot T_f \cdot 27,78 \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta} + \frac{233,78\beta + 1627,32}{100 \cdot \beta}\right) \alpha} \quad (\text{s/m}^3).$$

com os dados da Tabela 5.4, obtém-se os valores de t_R/V em função de α e β . Os resultados são apresentados na Tabela 5.8.

5.9 CÁLCULO DAS DIMENSÕES DA CÂMARA PRIMÁRIA

O Governo Federal, através de Portarias, regulamenta o tratamento de resíduos sólidos via incineração. A Norma Brasileira – NBR 1265 de dezembro de 1989, com o título de “Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos – Padrão de Desempenho” regulamenta tal procedimento, estabelecendo que na câmara de combustão a temperatura dos gases deve ser no mínimo de 850 °C, o tempo de residência dos sólidos de no mínimo 60 minutos, e o tempo de residência dos gases de no mínimo 2,0 segundos.

Para o cálculo da câmara primária serão adotados, de acordo com a Tabela 5.4, os valores de $\beta = 8$ e $\alpha = 2,1$ que correspondem a uma temperatura de 1.273 K ou 1000 °C, o que está de acordo com a proposta do projeto.

Como $t_R = 2 \text{ s}$ e $\frac{t_R}{V} = 0,85 \frac{\text{s}}{\text{m}^3}$ temos que o volume da câmara é igual a 2,35 m^3 . Uma relação de aspecto L/D entre 2,5 e 4,0 é razoável para uma câmara de incineração (BONNER et al., 1981). Com $V = 2,35 \text{ m}^3$ e $D = 0,95 \text{ m}$, temos $L = 3,32 \text{ m}$, o que dá uma relação $L/D = 3,5$.

TABELA 5.8 – Valores de t_R/V (s/m^3) em função do excesso de ar normalizado, α , e da razão entre as vazões de resíduo e combustível auxiliar, β .

α	β									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,42	0,72	0,95	1,12	1,27	1,39	1,48	1,57	1,64	1,70
1,1	0,38	0,66	0,87	1,04	1,18	1,29	1,38	1,46	1,52	1,58
1,2	0,36	0,62	0,81	0,97	1,09	1,20	1,29	1,36	1,42	1,48
1,3	0,33	0,57	0,76	0,91	1,03	1,12	1,21	1,28	1,34	1,39
1,4	0,31	0,54	0,71	0,85	0,96	1,06	1,13	1,20	1,26	1,31
1,5	0,29	0,51	0,67	0,80	0,91	1,00	1,07	1,13	1,19	1,24
1,6	0,27	0,48	0,63	0,76	0,86	0,94	1,01	1,08	1,13	1,17
1,7	0,26	0,45	0,60	0,72	0,82	0,90	0,96	1,02	1,07	1,12
1,8	0,25	0,43	0,57	0,68	0,78	0,85	0,92	0,97	1,02	1,06
1,9	0,23	0,41	0,55	0,65	0,74	0,81	0,88	0,93	0,98	1,02
2	0,22	0,39	0,52	0,62	0,71	0,78	0,84	0,89	0,93	0,97
2,1	0,21	0,37	0,50	0,60	0,68	0,75	0,80	0,85	0,89	0,93
2,2	0,20	0,36	0,48	0,57	0,65	0,72	0,77	0,82	0,86	0,89
2,3	0,20	0,34	0,46	0,55	0,63	0,69	0,74	0,79	0,83	0,86
2,4	0,19	0,33	0,44	0,53	0,60	0,66	0,71	0,76	0,80	0,83
2,5	0,18	0,32	0,42	0,51	0,58	0,64	0,69	0,73	0,77	0,80

5.10 VERIFICAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO

De acordo com Bonner et al. (1981) é recomendado que o regime de escoamento no interior da câmara seja turbulento, com número de Reynolds, Re , superior a 5000. O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} = \frac{\rho \bar{v} A}{\mu \frac{\pi}{4} D} = \frac{4 \dot{m}_{tot}}{\pi \mu D} \quad (5.14)$$

sendo ρ , \bar{v} , μ e \dot{m}_{tot} a massa específica, a velocidade média, a viscosidade do gás e a vazão mássica do gás, respectivamente, e D e A são o diâmetro e a área da seção reta da câmara, respectivamente.

A viscosidade do gás de combustão foi considerada como a do ar à temperatura de 1273 K, cujo o valor é $4,91 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$. Esta aproximação é justificada devido a grande quantidade de nitrogênio existente nos gases de combustão no produto. Por outro lado, para um cálculo com maior precisão pode-se utilizar a seguinte expressão (PERRY; CHILTON, 1973):

$$\mu_{mistura} = \frac{\sum_i X_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum_i X_i M_i^{1/2}} \quad (5.15)$$

na qual X_i , μ_i , e M_i são a fração molar, a viscosidade e a massa molecular individual de cada componente do gás, respectivamente.

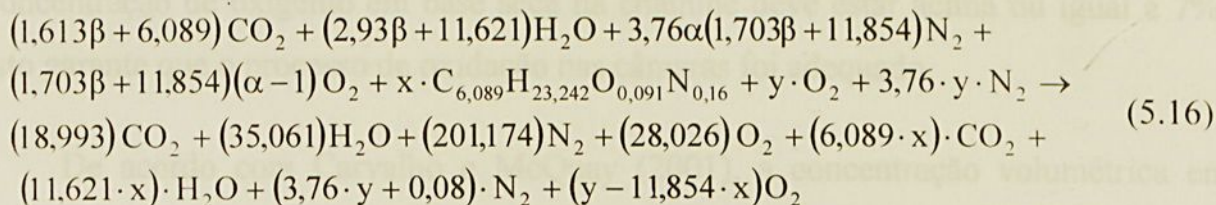
A partir destas considerações obtém-se:

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} = \frac{\rho \bar{v} A}{\mu \frac{\pi}{4} D} = \frac{4 \dot{m}_{tot}}{\pi \mu D} = \frac{4 \cdot (0,278)}{\pi \cdot 4,91 \times 10^{-5} \cdot 0,95} = 7.588,$$

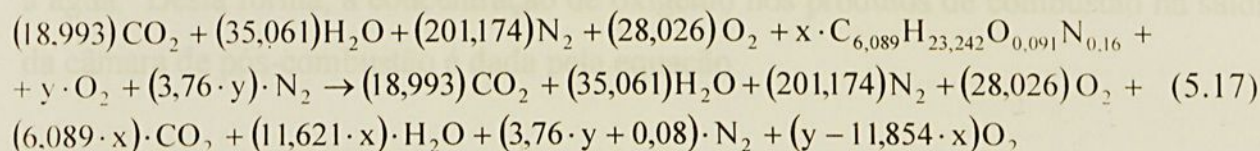
que é superior a 5000 atendendo, desta forma, o nível de turbulência desejado.

5.11 CÁLCULO DA CÂMARA DE PÓS COMBUSTÃO

Observando os produtos da reação da equação 5.3 e adicionando-se gás natural na câmara de pós-combustão tem-se:



Substituindo-se os valores de $\beta = 8$ e $\alpha = 2,1$:



A temperatura desejada para o processo de pós-queima é 1473 K. Substituindo as equações (5.6) a (5.9) na equação do balanço de energia [equação (5.4)], introduzindo o valor de ΔH do gás natural e efetuando as integrações, tem-se:

$$\begin{aligned}
 1.138.625 \cdot x \cdot 0,95 \cdot 1000 = & \int_{1273}^{1473} [(18,993) \cdot (10,34 + 0,00274T - 195.500T^{-2}) + \\
 & + (35,061) \cdot (8,22 + 0,00015T + 0,00000134T^2) + (28,026) \cdot (8,27 + 0,000258T + 187700T^{-2}) + \\
 & + (201,174) \cdot (6,5 + 0,001T)] dT + \int_{298}^{1473} [(6,089 \cdot x) \cdot (10,34 + 0,00274T - 195.500T^{-2}) + \\
 & + (11,621 \cdot x) \cdot (8,22 + 0,00015T + 0,00000134T^2) + (y - 11,854 \cdot x) \cdot (8,27 + 0,000258T + 187700T^{-2}) \\
 & + (3,76 \cdot y + 0,08) \cdot (6,5 + 0,001T)] dT
 \end{aligned}$$

ou seja,

$$975.437,85 \cdot x = 495.246,46 + 42.112,39 \cdot y$$

Neste ponto será levantada a hipótese da possibilidade de que o excesso de ar advindo da câmara primária seja suficiente para o processo de pós-combustão, isto é, $y = 0$, do que obtém-se $x = 0,508$.

Segundo CETESB (Resolução de Diretoria nº 007/97/D de 06/02/97), a concentração de oxigênio em base seca na chaminé deve estar acima ou igual a 7%, isto garante que o processo de oxidação nas câmaras foi adequado.

De acordo com Carvalho e McQuay (2001), a concentração volumétrica em termos de fração molar de cada um dos gases de combustão é a relação entre o número de mols de cada um deles e a soma dos números de mols de todos os produtos, exceto a água. Desta forma, a concentração de oxigênio nos produtos de combustão na saída da câmara de pós-combustão é dada pela equação:

$$\%O_{2,BS} = \frac{28,3 + y - 11,854 \cdot x}{248,29 - 5,765 \cdot x + 4,76 \cdot y} \cdot (100)$$

A Tabela 5.9 mostra a variação da concentração de oxigênio nos gases de combustão na saída da câmara de pós-combustão.

TABELA 5.9 – Percentagem de oxigênio na saída da câmara de pós-combustão

y	x	%O ₂ BS
0,00	0,508	8,97
0,50	0,529	8,99
1,00	0,551	9,01
1,50	0,572	9,02
2,00	0,594	9,04
2,50	0,616	9,05
3,00	0,637	9,07
3,50	0,659	9,08
4,00	0,680	9,10
4,50	0,702	9,11
5,00	0,724	9,13

Pode-se observar que quando o valor de y é zero a percentagem de oxigênio em base seca é 8,9%, o que atende ao desejado e confirma a hipótese sugerida.

Para o cálculo das dimensões da câmara de pós-combustão, primeiramente deve-se calcular o m_{tot} vindo da câmara primária menos as cinzas, somando-se o gás natural introduzido na câmara de pós-combustão: $\dot{m}_{\text{GN,cp}} + \dot{m}_{\text{res}} - \dot{m}_{\text{cinzas}} + \dot{m}_{\text{GN,cs}}$

Para $\beta = 8$ e $\alpha = 2,1$ e $\dot{m}_{\text{res}} = 27,78 \frac{\text{g}}{\text{s}}$:

$$\dot{m}_{\text{tot,cp}} = \dot{m}_{\text{res}} \cdot \left[1 + \frac{1}{\beta} + \frac{(2,338 \cdot \beta + 16,273) \cdot \alpha}{\beta} \right] = 286,31 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{\text{tot,cs}} = 286,31 - (27,78) \cdot \left(\frac{30,34}{100} \right) + (0,508) \cdot \left(\frac{100}{8} \cdot \frac{1}{3,6} \right) = 279,67 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Da equação 5.13 tem-se:

$$\frac{t_R}{V} = \frac{(1) \cdot (28,104) \cdot (1000)}{(0,08206) \cdot (1473) \cdot (279,67)} = 0,83 \frac{\text{s}}{\text{m}^3}$$

Para um tempo de residência igual a 2 segundos, e uma relação de aspecto $L/D = 3,6$ temos $V = 2,41 \text{ m}^3$ com um comprimento $L = 3,40 \text{ m}$ e um diâmetro $D = 0,95 \text{ m}$.

5.12 VERIFICAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO (PÓS COMBUSTÃO)

Para a temperatura de 1473 K, $\mu = 5,49 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$. Com $D = 0,95 \text{ m}$ e a equação

5.14, tem-se $Re = 6811$, que é superior ao valor mínimo de 5000 indicando, desta forma, um nível de turbulência adequado ao projeto.

A tabela 5.10, mostra de forma agrupada os resultados dos parâmetros e dimensionamento das câmaras primária e secundária.

TABELA 5.10 – Resultados do dimensionamento das câmaras primária e secundária.

Parâmetros	Câmaras		PCI reduzido de		
	Primária	Secundária	25%	50%	75%
Temp. °C	1000	1200	1136	1013	1031
β	8	8	8	7	4
α	2,1	2,1	1,5	1,5	1,5
DIMENSÕES DAS CÂMARAS					
Dimensões	Primária com TR = 2 s		Secundária com TR = 2 s		
Diâmetro (m)	0,95		0,95		
Compr. (m)	3,32		3,40		
Volume (m ³)	2,35		2,41		
Nº Re	7588		6811		

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O crescimento populacional pode ser encarado como uma preocupação constante para os governos quando observado do ponto de vista da qualidade de vida. Quanto menor a qualidade de vida, mais problemas relacionados à saúde emergem, aumentando assim a possibilidade de que tais resíduos possam de alguma forma trazer problemas fito-sanitários à população caso não sejam tratados adequadamente.

Métodos tradicionais de tratamento de resíduos tem sido substituídos pela minimização dos resíduos na fonte de geração, por tratamento físico-químico-biológico, pela incineração e por métodos de estabilização química e solidificação.

Para melhor atender as necessidades da unidade geradora e a proteção ao meio ambiente deve-se, antes de mais nada, consultar a Resolução CONAMA nº 5 que aborda em seu contexto o gerenciamento de sólidos oriundos de serviços de saúde, portos e aeroportos, bem como a necessidade de estender tais exigências aos terminais ferroviários e rodoviários.

Embora a incineração constitua hoje um recurso largamente empregado no tratamento de resíduos, devido à sua alta eficiência de destruição e aplicabilidade para um grande espectro de produtos terminais, as questões de meio ambiente são vistas como um severo censor. Tal fato exige que o projeto de um incinerador seja o resultado de uma criteriosa atividade de engenharia que garanta máxima eficiência e mínima interferência com os mecanismos ecológicos.

Os incineradores podem variar desde pequenas unidades, projetadas e dimensionadas para um resíduo específico, até grandes instalações com múltiplos propósitos, para incinerar resíduos de diferentes fontes. Dentre os incineradores existentes, quatro modelos destacam-se como os mais utilizados: injeção líquida (às vezes

combinado com incineração de gases e vapores); câmara fixa; leito fluidizado e os fornos rotativos.

A caracterização físico-química do RSS é de extrema importância, pois determinará diversos parâmetros no projeto do incinerador. A escala de importância na composição química de um resíduo geralmente é maior para lodos e resíduos sólidos do que para líquidos, e muito maior em relação aos gases. Tal afirmação vem normalmente da fração de constituintes inorgânicos incombustíveis nos resíduos sólidos que tem relativa importância sobre o sistema de incineração. A presença de elementos tóxicos e compostos também é importante na análise do impacto sobre a segurança do operador, na eficiência do sistema de combustão requerido e no controle da poluição e/ou projeto da unidade como uma incineração de resíduos perigosos. A variação da composição físico-química dos RSS ocorre de acordo com a fonte geradora. A toxicidade do resíduo produzido em cada departamento ou serviço depende da natureza da terapêutica especializada bem como dos procedimentos adotados em cada hospital

Neste trabalho executou-se cálculos para dimensionamento das câmaras primária e secundária de um incinerador tipo rotativo, partindo da análise da composição do resíduo de serviço de saúde do hospital Frei Galvão do município de Guaratinguetá e do combustível auxiliar, neste caso, gás natural.

Segundo Lee e Huffman (1996) o poder calorífico necessário para sustentar uma combustão está em torno de 11.721 kJ/kg ou mais. Os RSS utilizados no estudo apresentaram um poder calorífico da ordem de 6.390,35 kJ/kg, que por si só não sustentam a combustão porém, foram suficientes para a obtenção da temperatura desejada (1000 °C) com valores de $\beta = 8$ e $\alpha = 2,1$. Além disso, houve a preocupação em avaliar uma possível variação no PCI do resíduo mantendo-se constante a taxa de alimentação. Foram montadas tabelas, na qual variou-se o PCI do resíduo em 25%, 50% e 75% para, dessa forma, determinar quais os melhores valores para β , α e temperatura no projeto das

câmaras primária e secundária. Com uma redução de 25% no PCI do resíduo com no mínimo 50% de excesso de ar, a temperatura do processo manteve-se numa faixa de 1136 °C garantindo ainda, a temperatura do projeto e a completa destruição do resíduo. Para uma redução de 50% no valor do PCI, os valores de β e α foram de 7 e 1,5 com uma temperatura de 1013 °C garantindo ainda o patamar de temperatura desejado. Para uma redução de 75% no valor do PCI, os valores de β e α foram de 4 e 1,5 com uma temperatura de 1031 °C, ou seja, para se manter a temperatura do projeto terá ser consumido uma quantidade maior de combustível auxiliar, o que aumenta o custo do processo.

No projeto da câmara primária com um tempo de residência de 2 segundos o comprimento, volume e diâmetro da câmara foram respectivamente 2,50 m, 2,35 m³ e 0,85 m sendo que o valor do diâmetro foi determinado por existir comercialmente. Outro fator que determina a escolha do diâmetro é o número de Reynolds que é um dos parâmetros de grande importância no projeto. Caso fique abaixo de 5.000, deve-se reduzir o diâmetro e recalculer o número de Reynolds. Neste trabalho o valor do número de Reynolds foi de 8.725.

Para o projeto da câmara secundária (pós-queima) foi determinada uma temperatura de operação de 1200 °C, mantendo-se $\beta = 8$ e $\alpha = 2,1$. A partir deste ponto avaliou-se a possibilidade de que o excesso de ar advindo da câmara primária fosse suficiente para atender a completa oxidação dos gases na câmara secundária, o que foi confirmado através do cálculo de percentagem de O₂ em base seca, cujo o índice calculado foi de 8,97%. Esta característica atende à exigência da legislação da CETESB, que estabelece um índice mínimo de O₂ em base seca de 7%.

Recalculando o fluxo mássico de produtos da combustão oriundos da câmara primária e utilizando um tempo de residência igual a 4 segundos, foram determinadas as dimensões da câmara secundária com comprimento aproximadamente igual a 3,50 m.



diâmetro igual a 0,90 m, perfazendo um volume de aproximadamente igual a 4.50 m³. O número de Reynolds calculado desta câmara foi de 6.641.

Em função do potencial de formação de subprodutos da combustão que acarretam algum impacto ambiental e a fim de atender as normas ambientais que regem os procedimentos para o funcionamento das unidades de combustão, faz-se necessário o uso de mecanismos e acessórios tais como pós-queimadores que controlam a emissão de subprodutos não queimados e sistemas de tratamento de gases que diminuem a emissão de partículas, gases ácidos e orgânicos residuais. Deve-se destacar que não é possível sintetizar as diversas tecnologias de controle para emissões de todos os poluentes em apenas uma que satisfaça as diferentes exigências decorrentes do agente poluidor em questão. Sendo assim, foi citado neste trabalho apenas alguns equipamentos que estão entre os mais comuns nas unidades incineradoras.

Apesar de existirem muitos trabalhos abordando o tema incineração de RSS, este busca contribuir para solução do problema ambiental e uma melhoria da qualidade de vida da população. Tais rejeitos necessitam de destinação adequada, que no caso, de acordo com a legislação devem ser incinerados. Dessa forma, são recomendados esforços que visem um aprofundamento na pesquisa com diferentes alternativas tecnológicas para a eliminação destes poluentes, de modo que sua periculosidade seja neutralizada de forma segura e com o menor impacto ambiental possível de acordo com a legislação vigente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos. São Paulo, 1987. Disponível em: <http://www.abntdigital.com.br>.

BONNER, T.A.; CORNETT, C.L.; DESAI, B.O.; FULLERKAMP, J.M.; HUGHES, T.W.; JOHNSON, M.L.; KENNEDY, E.D.; McCORMICK, R.J.; PETERS, J.A.; ZANDERS, D.L., **Engineering Handbook of Hazardous Waste Incineration**, Chapter 2, Monsanto Research Corporation, Dayton, OH, 1981.

BORMAN, G. L.; RAGLAND, K. W. **Combustion Engineering**. Madison: WCB/McGraw-Hill, 1998. 601p.

CARVALHO, J. A.; McQUAY, M.Q., **Princípios de combustão: aplicações em processos de engenharia**, Apostila do Curso de Processos e Equipamentos de Combustão, Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP, Campus de Guaratinguetá, 2001.

CHAABAN, M. A.. Hazardous waste source reduction in materials and processing technologies. **Materials Processing Technology**, v. 119, p. 336 – 343, 2001.

COMGAS. Disponível em: <http://www.comgas.com.br/pt/home/index.asp>. Acesso em: 20 mar. 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Legislação Estadual: controle da poluição ambiental**. São Paulo: Série Documentos, 1999. 498p.

DEMPSEY, C.R.; OPPELT, E. T., Incineration of hazardous waste, a critical review update. **Journal of the Air and Waste Management Association**, 43(1):25-73, 1993.

EPA (Environmental Protection Agency). **Medical Waste Incineration**, 1993. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s03-pdf>. Acesso em: 06 jan. 2003.

EPA (Environmental Protection Agency). **Draft Technical Support Document for HWC MACT Standards**, Washington, v.1, fev.1996a. Disponível em: http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/combust/tech/tsd_v1.pdf. Acesso em: 23 jan. 2003.

EPA (Environmental Protection Agency). **Refuse Combustion**, 1996b. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s01.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2003.

GONÇALVES, J. A. S., ALONSO, D. F., COSTA, M. A. M., AZZOPARDI, B. J... Evaluation of the models available for the prediction of pressure drop in Venturi scrubbers. **Journal of Hazardous Materials**, v. B81, p. 123-140, 2001.

GONÇALVES, J. A. S., COSTA, M. A. M., HENRIQUE, P. R., COURY, J. R. Atomization of liquids in a Pease-Anthony Venturi scrubber Part I. Jet dynamics. **Journal of Hazardous Materials**, v. B97, p. 267-279, 2003.

HOLANDA, M.R. **Perspectivas da Co-geraçãocom Resíduos Sólidos Municipais sob a Ótica da Gestão Ambiental**. 2003. 232f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

IDRIS, A.; SAED, K. Characteristics of slag produced from incinerated hospital waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 93, p. 201-208, 2002.

INCINERAÇÃO. **e-meioambiente**, Resíduos sólidos. Disponível em: http://www.e-meioambiente.com.br/r_inciner.htm. Acesso em: 26 fev. 2003.

KIM, H. T., LEE, K. W., KULHMAN, M. R. Exploratory design modifications for enhancing cyclone performance. **Journal of Aerosol Science**, v. 32, p. 1135-1146, 2001.

LACAIVA, P. T. **Investigação experimental do enriquecimento do ar na incineração de resíduos aquosos**. 2000. 283f. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

LEE, C. C.; HUFFMAN, G. L. Medical waste management/incineration. **Journal of Hazardous Materials**, v. 48, p. 1-30, 1996.

LIBERTI, L.; TURSI, A.; CONSTANTINO, N.; FERRARA, L.; NUZZO, G. Optimization of infectious hospital waste management in Italy: Part I - Waste characterization by origin. **Waste Management & Research**, v. 14, p. 417 – 431, 1996.

LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 1. Ed. Brasília: Aneel. 2000. 503p.

MATO, R. R. A. M.; KASEVA, M. E. Critical review of industrial and medical waste practices in Dar es Salaam City. **Resources Conservation and Recycling**, v. 25, p. 271-287, 1999.

MENÃO, M. C. **Projeto de um incinerador de lixo patológico hospitalar**. 1996. 45f. Trabalho de Graduação - Faculdade Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

MOREIRA, V. P. **Caracterização dos resíduos de serviços de saúde no município de Bauru**. 1995. 125f. Dissertação (Mestrado em Projeto, Arte e Sociedade – Área de

Concentração em Planejamento Urbano e Regional: Assentamentos Humanos) – Faculdade Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

NIESSEN, W. R. **Combustion and Incineration Processes: Applications in Environmental Engineering**. 2nd. New York: Dekker. 1994. 659p.

OLIVEIRA, S. de. **Resíduos Sólidos Urbanos**. 2001. 19 f. Apostila (Agronomia – Área de concentração: Departamento de Recursos Naturais) Faculdade de Ciências Agrônomicas Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

PERRY, R.E.; CHILTON, C.H., **Chemical Engineers' Handbook**. McGraw-Hill Book Company, 1973.

RESOLUÇÃO CNEN 6.05, 1985. Disponível em: http://www2.cnen.gov.br/seguranca/normas/ne_605.pdf. Acesso em: 10 fev. 2003

RESOLUÇÃO CONAMA N°5, 1993. Disponível em: <http://www.lei.adv.br/conama01.htm>. Acesso em: 26 fev. 2003.

RESOLUÇÃO CONJUNTA SS/SMA/AJDC-1, 1998. Disponível em: http://www.cvs.saude.sp.gov.br/legis.asp?classe=legis_resid&name=Resíduos%20Sólidos. Acesso em 10 fev. 2003.

REVISTA MEIO AMBIENTE INDUSTRIAL, A situação atual dos resíduos hospitalares no Brasil, ed. 29, n° 28, 2001.

RICKMAN, W.S. **Handbook of Incineration of Hazardous Wastes**. San Diego CRC Press, Inc., 1990.

SAITO, L. M. Resíduos hospitalares. **XII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Santa Catarina, 1983.

SANTARSIERO, A.; OTTAVIANI, M. Evaluation of heavy metals in slags from medical waste incinerator. **Microchemical Journal**, v. 51, p. 166-169, 1995.

SAXENA, S. C.; JOTSHI, C. K. Management and Combustion of Hazardous Wastes. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 22, p. 401-425, 1996.

SILVA, C. L. **Incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde com proposta de utilização de biogás**. 1998. 140f. Tese (Livre-Docência em Engenharia Mecânica) – Faculdade Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista. Bauru.

STERN, A. C.. **AIR POLLUTION**. 3rd, v. IV. New York: Academic Press. 1977.

TILLMAN, D. A. **The Combustion of Solid Fuels and Wastes**. San Diego: Academic Press, Inc. 1991. 373p.

WARK Jr, K., RICHARDS, D. E. **Thermodynamics**. 6 th. Boston. 1999. 1156 p.

XIANG, R., LEE, K. W., Effects of cone dimension on cyclone performance. **Aerosol Science**, v. 32, p.549-561, 2001.

YOSHIDA, H., FUKUI, K., YOSHIDA, K., SHINODA, E. Particle separation by linoya's type gas cyclone. **Powder Technology**, v. 118, p. 16-23, 2001.

ZANNON, U. Riscos infecciosos imputados ao lixo hospitalar. Realidade epidemiológica ou função sanitária? **Revista Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 23, p. 163 – 170, 1990.

