

INIS - BR -- 3752

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA  
UNIDADE DE INCINERAÇÃO PARA REJEITOS RADIOATIVOS DE  
NÍVEL BAIXO**

**ANDRÉ WAGNER OLIANI ANDRADE**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear.

**Orientadora: Dra. Bárbara Maria Rzycki**

**SÃO PAULO**  
**1995**



**31 - 12**

Dedico este trabalho:

À Sol, minha esposa

À Mar, minha filha

Que com suas luzes e movimentos  
transformaram minha vida na mais bela e  
doce realidade.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Wilson Mesquita Andrade e Vera Graciana Oliani Andrade irmãos Valéria, Eduardo, Álvaro, Arthur e Viviane pela amizade e ensinamentos de disciplina, força, serenidade e honestidade.

À Prof. Dra. Bárbara Maria Rzycki pela valiosa e segura orientação.

À W. VOLAND INFORMÁTICA por suas acomodações e incansável ajuda durante o transcorrer deste trabalho.

Ao Sr. Arthur Oliani Andrade por ser mais que um irmão, um companheiro e herói.

Aos amigos Júlio Miguel Fernandes, Wladimir C. da Silva e Daniel Narmada Timmermann, pela eterna amizade e incentivo nos momentos difíceis.

Aos Colegas Luis Antônio Haddad, Daniel Liu Chun Hung, Sandra Mara G. Bello, Marcelo de Castro Bertacchi, José Carlos Mierzwa, Rosane Napolitano Raduan, Carlos Silva e João Treco pela valiosa colaboração e incentivo

À Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP) do Ministério da Marinha (MM), pelo fornecimento das instalações e equipamentos.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN/CNEN - SP), pelo fornecimento das instalações e curso de pós-graduação oferecido.

A todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

A DEUS pela oportunidade de viver e aprender sob tua luz

# ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA UNIDADE DE INCINERAÇÃO PARA REJEITOS RADIOATIVOS DE NÍVEL BAIXO

ANDRÉ WAGNER OLIANI ANDRADE

## RESUMO

A incineração tem sido mundialmente consagrada como técnica de redução de volume de materiais combustíveis, por causa da eficiência alta e resultados excelentes. Esta técnica é utilizada desde o século passado como alternativa para a redução do lixo urbano e há quatro décadas, para resíduos perigosos. A indústria nuclear também se empenha no desenvolvimento desta técnica, relacionada ao gerenciamento de rejeitos radioativos de nível baixo de atividade.

Os tipos de incineradores existentes são vários, e a definição de qual sistema é o mais adequado, baseia-se em um levantamento criterioso das características principais relacionadas aos rejeitos radioativos, associados a parâmetros técnicos, econômicos e burocráticos envolvidos.

No Brasil, com o desenvolvimento do programa nuclear autônomo e a expectativa futura do uso intensivo da energia nuclear, projeta-se um crescimento na geração de rejeitos radioativos. Um dos locais onde os volumes de rejeitos serão apreciáveis

é o Centro Experimental ARAMAR (CEA), onde estão sendo desenvolvidos reatores nucleares para propulsão e geração de potência, além de atividades ligadas ao ciclo do combustível nuclear. Neste panorama, é importante avaliar o papel da incineração como técnica de redução de volume nas instalações do CEA, para a implementação de um gerenciamento de rejeitos radioativos adequado.

Neste trabalho foi feito um levantamento dos principais aspectos referentes a um sistema de incineração de rejeitos radioativos de nível baixo de atividade. Estas informações são importantes para um estudo de viabilidade coerente e também para fornecer uma visão clara e imparcial de um tema ainda pouco discutido no cenário nacional.

# VIABILITY STUDY FOR THE IMPLANTATION OF AN INCINERATION UNIT FOR LOW LEVEL RADIOACTIVE WASTES

ANDRÉ WAGNER OLIANI ANDRADE

## ABSTRACT

Incineration have been a world-wide accepted volume reduction technique for combustible materials due to its high efficiency and excellent results. This technique is used since the last century as an alternative to reduce cities garbage and during the last four decades for the hazardous wastes. The nuclear industry is also involved in this technique development related to the low level radioactive waste management.

There are different types of incineration installations and the definition of the right system is based on a criterious survey of its main characteristics, related to the radwastes as well technical, economical and burocratic parameters.

After the autonomous Brazilian nuclear programme development and the onlook of the future intensive nuclear energy uses, a radwaste generation increase is expected. One of the installations where these radwastes volumes are awaited to be high is the Experimental Center of ARAMAR (CEA). Nuclear reactors for propulsion and power generation have been developed in CEA beyond other nuclear combustible cycle activities. In this panorama it is important to evaluate the incineration role in CEA installations, as a

volume reduction technique for an appropriate radioactive wastes management implementation.

In this work main aspects related to the low level radwaste incineration systems were up rised. This informations are important to a coherent viability study and also to give a clear and impartial overview about a topic that is still non discussed in the national scenery. ]

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>REJEITOS COMBUSTÍVEIS.....</b>	<b>8</b>
2.1.	Fontes de Rejeitos Combustíveis.....	10
2.2.	Tipos de Rejeitos Combustíveis.....	13
2.3.	Classificação de Rejeitos Combustíveis.....	14
2.4.	Considerações Específicas.....	15
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>ASPECTOS NORMATIVOS E LEGISLATIVOS.....</b>	<b>18</b>
3.1.	Competências e Políticas.....	19
3.1.1.	Constituição Federal.....	19
3.1.2.	Competência da CNEN.....	21
3.1.3.	Normas concorrentes ou suplementares relativas às instalações radiativas.....	24
3.2.	Disposições Legais.....	27
3.2.1.	Disposições nacionais.....	27
3.2.2.	Disposições internacionais.....	28

<b>CAPÍTULO 4 ASPECTOS DE PROCESSO DO SISTEMA DE INCINERAÇÃO.....</b>	<b>30</b>
4.1. Segregação e Pré-Tratamento.....	32
4.2. Alimentação dos Rejeitos.....	33
4.3. Combustão de Rejeitos e Dispositivos de Queima.....	35
4.3.1. Câmara de combustão primária.....	36
4.3.2. Câmara de combustão secundária.....	39
4.3.3. Queimadores, grelhas e injetores de ar.....	40
4.4. Tratamento de Gases de Combustão.....	43
4.4.1. Sistema de tratamento de gases por via seca.....	50
4.4.1.1 Filtração em condições de temperatura alta.....	51
4.4.1.2 Esfriamento.....	53
4.4.1.3 Filtração ou separação.....	58
4.4.1.4 Adsorção.....	66
4.4.2. Sistema de tratamento de gases por via úmida.....	67
4.4.2.1 Separação.....	68
4.4.2.2 Esfriamento.....	69
4.4.2.3 Lavagem de gases.....	69
4.4.2.4 Aquecimento dos gases.....	74

4.4.3. Componentes comuns aos sistemas de tratamento por via seca e via úmida.....	75
4.4.3.1 Filtros de eficiência alta.....	75
4.4.3.2 Eliminação dos gases.....	76
4.5. Gerenciamento de Cinzas.....	78
4.5.1. Coleta de cinzas.....	79
4.5.2. Condicionamento de cinzas.....	81
4.6. Instrumentação e Controle do Processo de Incineração.....	84
4.6.1. Tecnologia de controle de processos.....	85
4.6.1.1 Sistema de alimentação.....	89
4.6.1.2 Controle da combustão.....	89
4.6.1.3 Controle do sistema de tratamento de gases de combustão.....	91
4.6.2. Tecnologia de monitoração de processos.....	91
4.7. Monitoração da Radiação.....	92
4.7.1. Tecnologia de monitoração das emissões pela chaminé.....	99
4.7.2. Monitoração de rejeitos líquidos secundários.....	101
4.7.3. Monitoração da concentração de radionuclídeos nas cinzas.....	102
4.7.4. Monitoração do ambiente operacional.....	103
4.8. Aspectos Básicos de Segurança.....	104

4.8.1. Incêndios e explosões.....	106
4.8.2. Contenção da radiação.....	107
4.8.3. Blindagem à radiação.....	108
<b>CAPÍTULO 5 CARACTERÍSTICAS DAS DIFERENTES TÉCNICAS DE COMBUSTÃO.....</b>	<b>109</b>
5.1. Técnicas de Combustão.....	109
5.1.1. Incineração com ar em excesso.....	112
5.1.2. Incineração com ar controlado.....	112
5.1.3. Incineração em leito fluidizado.....	114
5.1.4. Pirólise.....	117
5.1.5. Pirohidrólise.....	120
5.1.6. Incineração por escorificação.....	122
5.1.7. Combustão por fusão de sais.....	122
5.1.8. Combustão por fusão de vidros.....	124
5.1.9. Outras técnicas de combustão.....	126
5.2. Tipos de Incineradores.....	129

<b>CAPÍTULO 6 ASPECTOS COMPARATIVOS DO PROCESSO DE INCINERAÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS .....</b>	<b>138</b>
6.1. Técnicas de Redução de Volume.....	138
6.2. Avaliação Econômica.....	148
6.3. Comparação entre incineração de rejeitos radioativos e incineração de resíduos convencionais.....	151
<b>CAPÍTULO 7 CENTRO EXPERIMENTAL ARAMAR.....</b>	<b>154</b>
7.1. Avaliando a Aplicação do Processo de Incineração no CEA.....	157
7.2. Recomendações para a Implantação do Processo de Incineração no CEA.....	160
<b>CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES.....</b>	<b>162</b>
8.1. Considerações Gerais.....	162
8.2. Conclusões Finais.....	164
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>165</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Diagrama esquemático de algumas etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos.....	6
<b>Figura 2</b>	Classificação discriminada de rejeitos radioativos combustíveis.....	9
<b>Figura 3</b>	Diagrama de blocos que mostra o sistema para a incineração de rejeitos radioativos.....	31
<b>Figura 4</b>	(a) Câmara de combustão com os sistemas de alimentação de rejeitos e coleta de cinzas genérica; (b) câmara de combustão típica, do tipo coluna vertical, com capacidade para 750000 kcal/h e temperatura de 1100 °C.....	38
<b>Figura 5</b>	Diagrama de blocos de um sistema de tratamento de gases por via seca.....	51
<b>Figura 6</b>	(a) filtro de vela cerâmica com dimensões típicas em mm; (b) filtro de fibra cerâmica.....	52
<b>Figura 7</b>	Trocador de calor para o esfriamento dos gases da combustão.....	55
<b>Figura 8</b>	Esfriador de gases por injeção de água ("quencher").....	57
<b>Figura 9</b>	Filtro manga equipado com sistema de ar comprimido e sistema de coleta de cinzas.....	60
<b>Figura 10</b>	Ciclones comerciais típicos.....	63
<b>Figura 11</b>	Precipitador eletrostático.....	65
<b>Figura 12</b>	Diagrama de blocos de um sistema de tratamento de gases por via úmida..	68
<b>Figura 13</b>	Diagrama simplificado de um sistema de lavagem.....	70
<b>Figura 14</b>	Lavador tipo jato de água típico.....	72
<b>Figura 15</b>	Lavador Venturi tipo Leisegang.....	73
<b>Figura 16</b>	Coleta de cinzas.....	80
<b>Figura 17</b>	Comparação entre o volume inicial e o final das cinzas após seu condicionamento.....	82

<b>Figura 18</b>	Estimativa de custo dos processos de condicionamento de cinzas realizado pela Comissão da Comunidade Europeia.....	83
<b>Figura 19</b>	Resposta de um sistema de controle mostrando o efeito das várias ações de controle.....	86
<b>Figura 20</b>	Diagrama esquemático de uma malha de controle por retro alimentação..	87
<b>Figura 21</b>	Diagrama esquemático de uma malha de controle antecipatório.....	88
<b>Figura 22</b>	Sistema típico de amostragem de emissões em um incinerador.....	100
<b>Figura 23</b>	Incinerador francês que trabalha com ar em excesso.....	113
<b>Figura 24</b>	Incinerador com ar controlado para rejeitos radioativos sólidos em Karlsruhe, Alemanha.....	115
<b>Figura 25</b>	Sistema de incineração com leito fluidizado de Rocky Flats, EUA.....	116
<b>Figura 26</b>	Incinerador pirolítico com ar controlado com alimentação por bateladas - Ontário Hydro, Canadá.....	118
<b>Figura 27</b>	Incinerador pirolítico contínuo com ar controlado - Jülich, Alemanha.....	119
<b>Figura 28</b>	Instalação de pirohidrólise em Hanau, Alemanha.....	121
<b>Figura 29</b>	Incinerador por escorificação - Mol, Bélgica.....	123
<b>Figura 30</b>	Desenho esquemático de uma instalação de combustão por fusão em sais..	125
<b>Figura 31</b>	Sistema de combustão em vidros fundidos.....	127
<b>Figura 32</b>	Instalação de digestão ácida em Mol, Bélgica.....	128
<b>Figura 33</b>	Diagrama esquemático da redução de volume por descontaminação do rejeito em seu ponto de geração.....	140
<b>Figura 34</b>	Diagrama esquemático de um processo de tratamento por compactação....	145
<b>Figura 35</b>	Redução de volume (%), aplicando-se algumas técnicas de tratamento de rejeitos radioativos sólidos de nível baixo de atividade.....	146
<b>Figura 36</b>	Redução de volume (%) de resinas de troca iônica utilizando-se técnicas diferentes.....	147

<b>Figura 37</b>	Redução de volume (%) de cinzas de incineração usando-se técnicas diferentes.....	147
<b>Figura 38</b>	Capital de investimento equivalente ao transporte de embalados, construção e operação do repositório final para um volume de 500 m <sup>3</sup> de rejeitos radioativos tratados da Composição 1.....	149
<b>Figura 39</b>	Capital de investimento equivalente ao transporte de embalados, construção e operação do repositório final para um volume de 1400 m <sup>3</sup> de rejeitos radioativos tratados da Composição 1.....	150
<b>Figura 40</b>	Capital de investimento equivalente ao transporte de embalados, construção e operação do repositório final para um volume de 500 m <sup>3</sup> de rejeitos radioativos tratados da Composição 2.....	150
<b>Figura 41</b>	Capital de investimento equivalente ao transporte de embalados, construção e operação do repositório final para um volume de 1400 m <sup>3</sup> de rejeitos radioativos tratados da Composição 2.....	151

## LISTA DE TABELAS

Tabela I	Classificação de rejeitos radioativos conforme norma CNEN-6.05.....	5
Tabela II	Identificação da geração de rejeitos radioativos em diferentes etapas do ciclo do combustível nuclear.....	11
Tabela III	Identificação da geração de rejeitos radioativos em diferentes etapas do ciclo do combustível nuclear.....	12
Tabela IV	Classificação de rejeitos radioativos combustíveis.....	15
Tabela V	Características dos rejeitos combustíveis que tem influência sobre algumas etapas do processo de incineração.....	16
Tabela VI	Poder calorífico de materiais combustíveis típicos.....	17
Tabela VII	Características dos gases resultantes da combustão de rejeitos radioativos.	44
Tabela VIII	Eficiência de limpeza de alguns equipamentos pertencentes ao sistema de tratamento de gases de combustão.....	49
Tabela IX	Composição mais comum das cinzas de incineração.....	79
Tabela X	Monitoração em um processo de incineração.....	93
Tabela XI	Situação Mundial sobre o uso da incineração para tratamento de rejeitos radioativos.....	129
Tabela XII	Experiência mundial de tratamento de rejeitos radioativos por combustão..	132
Tabela XIII	Tecnologias empregadas no tratamento de rejeitos radioativos.....	141
Tabela XIV	Tecnologias empregadas no tratamento de alguns tipos de rejeitos líquidos de nível baixo de atividade.....	142
Tabela XV	Tecnologias empregadas no tratamento de alguns tipos de rejeitos sólidos úmidos de nível baixo.....	142
Tabela XVI	Tecnologias empregadas no tratamento de alguns tipos de rejeitos sólidos secos de nível baixo de atividade.....	143

## GLOSSÁRIO

### **Aerossol -**

Sistema disperso cujo meio de dispersão é gasoso e a fase dispersa consiste de partículas sólidas ou líquidas. Os aerossóis são formados por dispersão (pulverização/atomização) e condensação. O processo de combustão dá origem aos aerossóis tanto por dispersão como por condensação.

### **Armazenagem Inicial -**

Armazenagem temporária de rejeitos radioativos no espaço físico da instalação que os tenha gerado, conforme definido na norma CNEN NE-6.06 /55/.

### **Blindagem -**

Material de proteção contra a radiação interposto entre uma fonte de radiação e o meio ambiente onde ele se encontra.

### **CNEN -**

Comissão Nacional de Energia Nuclear.

### **Contaminação Radioativa -**

Presença indesejável de materiais radioativos em qualquer material, meio ou local.

### **Controlador -**

Equipamento que compara a variável controlada com um valor desejado e emite um sinal de saída em função do desvio verificado.

**Descontaminação -**

Remoção de contaminantes radioativos com o objetivo de reduzir os níveis de radioatividade até valores estabelecidos por normas vigentes no país.

**Depósito Final -**

Depósito destinado a receber, em observância aos critérios estabelecidos pela CNEN, os rejeitos radioativos provenientes de armazenagem inicial, depósitos intermediários e depósitos provisórios. É designado também por repositório, ou local, onde se realiza a disposição final dos rejeitos radioativos.

**Depósito Intermediário -**

Depósito destinado a receber e, eventualmente acondicionar rejeitos radioativos, objetivando a sua futura reutilização, ou remoção para depósito final, em observância aos critérios de aceitação e outras normas estabelecidas pela CNEN.

**Disposição Final -**

Colocação de rejeitos radioativos embalados em um repositório ou em um determinado local sem intenção de recuperá-los. Disposição também abrange atividades de descarga direta, tanto de efluentes gasosos como líquidos, no ambiente obedecidos os limites estabelecidos por normas do país.

**Dispersóide -**

Agente dispersante de partículas.

**Dose Equivalente -**

É a grandeza que permite avaliar o efeito biológico da radiação. Ela considera o tipo de radiação ionizante, a energia e a distribuição da radiação no tecido. A unidade no Sistema Internacional é Joule por quilograma ( $J\ kg^{-1}$ ). O nome restrito é o Sievert (Sv) e a unidade especial é rem, sendo  $1\ Sv = 100\ rem$ .

**Elemento Primário -**

Sensor que está em contato com a variável e utiliza ou absorve energia do meio controlado para dar ao sistema uma medida da variação da variável controlada.

**Exposição -**

A grandeza exposição, cujo símbolo é X, foi a primeira grandeza definida para fins da radioproteção. Esta grandeza é uma medida da habilidade ou capacidade dos raios X e  $\gamma$  em produzir ionizações no ar. As unidades no Sistema Internacional é Coulomb por quilograma de ar ( $C\ kg^{-1}$ ) o que equivale a  $6,25 \times 10^{18}$  íons por quilograma de ar. A unidade especial é o Roentgen (R) sendo que  $1R = 2,58 \times 10^{-4}$

**Fuligem -**

Aerossol formado por aglomerados de partículas de carbono impregnados com alcatrões, resultantes da combustão incompleta de material carbonáceo.

**Fumaça -**

Aerossol resultante da combustão incompleta, constituindo-se predominantemente de carbono e outros materiais combustíveis. Em geral presente em quantidade suficiente para poder ser observado de modo independente na presença de outros aerossóis, o diâmetro de partícula submicrônica, maior ou igual a  $0,01\ \mu m$ .

**Fumo -**

Aerossol formado por condensação, composto de partículas sólidas com  $\phi < 1\mu\text{m}$ .

**Incineração -**

A incineração é definida como um processo controlado de redução de peso e volume dos materiais, através da decomposição térmica via oxidação.

**Incinerador -**

Qualquer dispositivo, aparato, equipamento ou estrutura usados para promover o processo de incineração via oxidação.

**Instalação Nuclear -**

Instalação na qual é produzido material nuclear, é processado, reprocessado, utilizado, manuseado ou estocado em quantidades relevantes, a juízo da CNEN. As instalações nucleares são: reator nuclear; usina que utilize combustível nuclear para produção de energia térmica ou elétrica para fins industriais; fábrica ou usina para a produção ou tratamento de materiais nucleares, integrante do ciclo do combustível nuclear; usina de reprocessamento de combustível nuclear irradiado; depósito de materiais nucleares, não incluindo local de armazenagem temporária usada durante o transporte.

**Instalação Radiativa -**

Estabelecimento onde se produzem, processam, manuseiam, utilizam, transportam ou se armazenam fontes de radiação, excetuando-se as instalações nucleares e os veículos transportadores de fontes de radiação.

**Material Nuclear -**

É um elemento nuclear, ou seus subprodutos, conforme define as normas e legislações vigentes no país.

**Material Particulado -**

Qualquer substância, exceto água pura, que exista em fase sólida ou líquida, em suspensão na atmosfera, com dimensões microscópicas ou submicroscópicas, maiores que as dimensões moleculares ( $\cong 2\text{Å}$ ). Os materiais particulados em suspensão na atmosfera são definidos como aerossóis.

**Material Radioativo -**

Material cujos componentes podem ser constituídos de um ou mais emissores de radiação, eletromagnética ou partículas direta ou indiretamente ionizantes.

**Meia-Vida -**

Tempo necessário para que a atividade de um radionuclídeo caia à metade de seu valor inicial, pelo processo de decaimento radioativo.

**Nível de Radiação -**

Taxa de dose equivalente expressa em milisievert por hora (mSv/h), conforme definido na norma CNEN NE-5.01 /56/.

**Nuclídeo -**

Átomo caracterizado por um número de massa e um número atômico determinados, e que tem vida média suficientemente longa para permitir a sua identificação com um elemento químico.

**Partícula  $\alpha$  -**

É a radiação menos penetrante dos três tipos mais comuns de radiação,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , e dependendo de sua energia pode ser freada por poucos centímetros de ar ou uma fina folha de papel. Esta partícula é similar ao núcleo do átomo de hélio (He), possui dois prótons e dois nêutrons e é, portanto, uma partícula relativamente grande. As partículas alfa produzem uma ionização total muito intensa nos materiais por onde passam.

**Partícula  $\beta$  -**

Partícula elementar emitida por um núcleo durante o seu decaimento radioativo. Uma partícula  $\beta$  carregada negativamente é idêntica a um elétron. A partícula  $\beta$  carregada positivamente é chamada pósitron. A radiação  $\beta$  é mais penetrante que a partícula  $\alpha$  e pode causar queimaduras na pele. Os emissores  $\beta$  são facilmente interceptados por uma folha fina de alumínio.

**Poeira -**

Aerossol formado por dispersão, composto de partículas sólidas com  $\phi > 1\mu\text{m}$ .

**Proteção Radiológica -**

Aplicação de medidas associadas à proteção dos seres vivos contra os efeitos danosos da radiação ionizante como a limitação da exposição externa à radiação, limitação de incorporações de radionuclídeos no corpo humano e também profilaxia das lesões corporais resultantes de uma exposição acidental ou programada.

**Radionuclídeo -**

Nuclídeo radioativo.

**Raios  $\gamma$  -**

Radiação eletromagnética com comprimento de onda curto, de origem nuclear (intervalo de energia entre  $\sim 10$  keV e  $\sim 9$  keV) emitida pelo núcleo do átomo. A radiação  $\gamma$  freqüentemente acompanha as emissões  $\alpha$  e  $\beta$  e sempre acompanha a fissão. Os raios  $\gamma$  são muito penetrantes, são interceptados somente por materiais densos por exemplo o chumbo.

**Resíduos Perigosos -**

São aqueles que apresentam periculosidade, ou uma das características seguintes: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade /6/.

**Sistema de Incineração -**

Conjunto de recursos e instalações necessárias para a operação de um processo de incineração em um mesmo local. Um sistema pode conter um ou mais incineradores.

**Spray -**

Aerossol formado por dispersão, constituído por partículas líquidas atomizadas por um bocal.

**Taxa de Exposição ( $\dot{X}$ ) -**

É a grandeza que define a medida da exposição por unidade de tempo. A unidade de taxa de exposição no Sistema Internacional é Coulomb por quilograma por segundo (C/kg s). A unidade especial anteriormente usada é o Roentgem por segundo (R/s).

**Transmissor -**

Instrumento que transforma o sinal medido em um outro, padronizado e que pode ser transmitido a distância.

**Variável Controlada -**

É a quantidade, ou condição, que deve ser medida e controlada (temperatura, vazão e pressão).

**Variável Manipulada -**

É a quantidade, ou condição, que é afetada por um controlador automático, e que permite alterar o valor da variável controlada.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Com o advento da era nuclear, nasceu também a perspectiva da utilização da energia gerada em reações nucleares, como alternativa complementar às fontes existentes como petróleo, carvão, rios etc, visto à crescente demanda energética em todo o mundo e a possibilidade de esgotamento dos combustíveis fósseis.

Adicionalmente ao aproveitamento energético provindo das reações nucleares, outros setores ligados à área nuclear se desenvolveram em larga escala, dando novos rumos ao desenvolvimento científico e tecnológico do mundo. Estes setores estão associados à obtenção e à aplicação da radiação e dos radioisótopos para fins médicos, industriais, agrícolas, como exemplos de usos pacíficos da energia nuclear. Além destes, existem setores ligados às atividades militares de desenvolvimento e pesquisa, relacionados à propulsão de submarinos e porta-aviões, sem contar com as aplicações bélicas destrutivas como testes de bombas atômicas.

Todos os setores ligados ao desenvolvimento nuclear, similarmente a qualquer outra atividade humana, geram materiais indesejáveis cuja “reutilização é imprópria ou não prevista” /1/. Estes materiais são chamados de rejeitos radioativos.

Atualmente a preocupação crescente com o meio ambiente e a conscientização da sua preservação, faz com que o homem intensifique a busca do desenvolvimento de processos de reciclagem e tratamento adequado dos rejeitos radioativos gerados. O intuito é minimizar perdas e conseqüentemente o impacto ambiental.

O gerenciamento dos rejeitos radioativos tem custos elevados de manuseio, transporte, armazenagem e disposição final, tornando economicamente interessante a redução de

volume dos mesmos. Aqueles gerados pela indústria nuclear são, em sua maioria, de atividade baixa e combustíveis. A incineração tem sido mundialmente consagrada como técnica de redução de volume, por causa da eficiência alta e pelas características excelentes do produto final. As cinzas resultantes são quimicamente estáveis, fisicamente homogêneas e biologicamente inertes, e concentram a maior parte da atividade dos rejeitos.

O desenvolvimento do processo de incineração teve início há muitos anos, com o enfoque voltado à queima de resíduos domiciliares e patogênicos. Um dos primeiros incineradores registrados para este fim, foi projetado e construído por Alfred Fryer, em 1874, na cidade de Nottingham, Inglaterra. Tratava-se de um sistema rudimentar e de operação simples, onde os resíduos eram dispostos manualmente em um forno de carvão e incinerados. A exaustão dos gases era natural ou controlada manualmente por meio de registros dispostos na chaminé. As escórias e a cinza eram removidas após a extinção completa das chamas. Este sistema, apesar de rudimentar, atendia às necessidades locais /2/.

A aplicação deste processo se estendeu como forma de tratamento de resíduos perigosos, o qual passou a receber uma atenção maior, tendo em vista os problemas ambientais ocasionados pela deposição inadequada de materiais tóxicos não degradáveis, altamente persistentes, e até mesmo daqueles não passíveis de disposição no solo.

A incineração de rejeitos radioativos combustíveis é feita, basicamente, da mesma forma que na queima de resíduos domiciliares e/ou resíduos perigosos. A sofisticação do processo, está no cuidado com a manipulação dos materiais, antes e após a combustão e no sistema de tratamento de gases, por causa das características radiológicas apresentadas.

O Brasil não possui uma instalação para incineração de rejeitos radioativos. Este trabalho reúne os aspectos mais importantes para o desenvolvimento desse sistema e aborda os temas inerentes ao assunto.

Inicialmente, Capítulo 2, são identificadas as fontes geradoras de rejeitos radioativos combustíveis, a classificação e algumas considerações importantes sobre materiais impróprios à incineração. Neste capítulo é sugerida uma classificação para rejeitos combustíveis, considerada fundamental para o gerenciamento correto de uma unidade de incineração de rejeitos radioativos, de nível baixo de radiação, no Brasil.

Os aspectos relativos às responsabilidades institucionais sobre o gerenciamento desses rejeitos, no Brasil, fazem parte de um capítulo especial, Capítulo 3, onde são abordados os temas relacionados ao controle de instalações radiativas e nucleares, à partir da legislação vigente, aspectos normativos, licenciamento e fiscalização, voltados a um sistema de incineração. São incluídas, neste capítulo, algumas referências internacionais que tratam do assunto.

O gerenciamento da instalação, que envolve a forma de alimentação do incinerador e a coleta e condicionamento de cinzas, é igualmente evidenciado e complementado com os temas sobre a instrumentação e controle, os serviços de proteção radiológica, a segurança da instalação, no Capítulo 4.

Uma das etapas mais importantes do processo de incineração de rejeitos radioativos é o tratamento de gases da combustão, abordada neste trabalho de forma exaustiva, no Capítulo 4, onde são mostrados os diversos tipos de sistemas e componentes empregados, muitos oriundos da indústria convencional.

As técnicas de combustão e tipos principais de incineradores, também são temas abordados neste trabalho, Capítulo 5, para evidenciar a diversidade tecnológica do assunto. Adicionalmente, Capítulo 6, são feitas comparações importantes entre as principais técnicas de redução de volume empregadas no gerenciamento de rejeitos radioativos.

Um capítulo especial, Capítulo 7, é dedicado a um dos locais, no Brasil, onde o volume de rejeitos será apreciável, o Centro Experimental ARAMAR (CEA) onde estão sendo desenvolvidos reatores nucleares para propulsão e geração de potência, além de atividades ligadas

ao Ciclo do Combustível. Neste capítulo são evidenciados o gerenciamento de rejeitos radioativos ali gerados e as perspectivas da instalação de uma unidade de incineração desses rejeitos.

### Rejeitos radioativos e resíduos

**Rejeitos radioativos são gerados por todos os tipos de atividades ligadas a área nuclear e resíduos em todas as atividades humanas, indiscriminadamente.**

É importante diferenciar “rejeitos radioativos” de “resíduos” e apresentar, de forma sucinta, aspectos relativos às principais formas de classificação. As definições correntes no Brasil para rejeitos radioativos e resíduos sólidos são apresentadas a seguir:

**"Rejeito radioativo** é qualquer material resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção especificados na norma CNEN-NE-6.02 /3/, e para o qual a reutilização é imprópria ou não prevista" /1/. Esta definição compreende somente os rejeitos gerados em instalações radiativas, não abrangendo os gerados em instalações nucleares. Portanto, a definição mais genérica /4/, é: "Rejeito radiativo é qualquer produto não aproveitável proveniente de uma instalação nuclear ou radiativa cujos níveis de atividade estejam acima dos limites de isenção estabelecidos na norma CNEN - /5/ e /1/".

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define os resíduos como /6/: **"Resíduos**, nos estados sólidos ou semi-sólidos, são materiais resultantes de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou

corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível". Estes materiais não estão contaminados com elementos radioativos.

Com o intuito de facilitar o gerenciamento dos rejeitos radioativos, várias formas de classificação vem sendo adotadas pelas nações interessadas no desenvolvimento de técnicas apropriadas para a minimização dos volumes gerados e o impacto que esses rejeitos podem vir a causar no meio ambiente.

De uma forma geral os rejeitos radioativos são classificados de acordo com a fonte geradora, estado físico, natureza da radiação, concentração de radioatividade, meia vida dos radionuclídeos e taxa de exposição. De acordo com o gerenciamento a ser adotado podem ainda ser classificados de formas diferentes.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) faz uma classificação em categorias, segundo o estado físico, natureza da radiação, concentração e taxa de exposição, conforme mostra a Tabela I abaixo.

**Tabela I.** Classificação de rejeitos radioativos conforme norma CNEN NE-6.05 /1/.

Categoria <sup>3</sup>	Emissores $\beta/\gamma$ <sup>1</sup>			Emissores $\alpha$ <sup>2</sup>	
	Taxa Exposição ( $\dot{X}$ ) R/h	Concentração (c) Bq/m <sup>3</sup>		Concentração (c) Bq/m <sup>3</sup>	
	Sólido	Líquido	Gasoso	Sólido	Líquido
NBR	$\dot{X} \leq 0,2$	$c \leq 3,7 \cdot 10^{10}$	$c \leq 3,7$	$3,7 \cdot 10^8 < c \leq 3,7 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^8 < c \leq 3,7 \cdot 10^{11}$
NMR	$0,2 < \dot{X} \leq 2$	$3,7 \cdot 10^{10} < c \leq 3,7 \cdot 10^{13}$	$3,7 < c \leq 3,7 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^{10} < c \leq 3,7 \cdot 10^{13}$	$3,7 \cdot 10^{11} < c \leq 3,7 \cdot 10^{13}$
NAR	$\dot{X} > 2$	$c > 3,7 \cdot 10^{13}$	$c > 3,7 \cdot 10^4$	$c > 3,7 \cdot 10^{13}$	$c > 3,7 \cdot 10^{13}$

1- emissores  $\beta/\gamma$  onde eventuais emissores  $\alpha$  tenham concentração inferior a  $3,7 \times 10^8$  Bq/m<sup>3</sup>

2- emissores  $\alpha$  em concentrações superiores a  $3,7 \times 10^8$  Bq/m<sup>3</sup>.

3- NBR- Nível Baixo de Radiação; NMR- Nível Médio de Radiação; NAR- Nível Alto de Radiação

## Gerenciamento de rejeitos radioativos

Quando se aborda o tema "gerenciamento de rejeitos radioativos", deve-se ter em mente uma gama bastante abrangente de atividades capazes de atuar sobre eventuais impactos que os rejeitos gerados, em todas as instalações que lidam com material nuclear ou radioativo, possam causar sobre o meio ambiente, o ser humano ou a própria instalação. Neste contexto estão incluídas as eventuais perdas de insumos e incidentes físicos e financeiros que podem ser acarretadas por falta de um gerenciamento adequado.

O gerenciamento de rejeitos radioativos é feito à partir do ponto de geração do material e engloba as etapas de coleta, classificação, segregação, triagem final, pré-tratamento, tratamento, condicionamento, armazenagem inicial, transporte, armazenagem intermediária ou provisória e disposição final. A Figura 1 mostra um diagrama esquemático das etapas que compõem um gerenciamento de rejeitos.

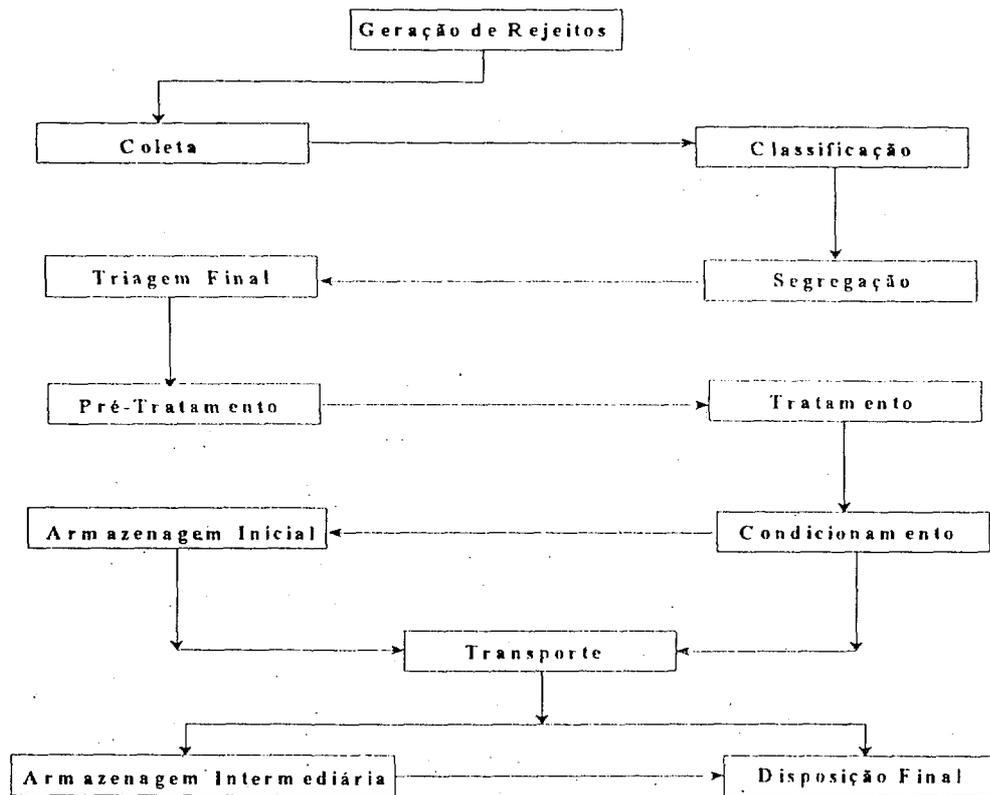


Figura 1. Diagrama esquemático de algumas etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos.

## OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo de viabilidade para implantação de uma unidade de incineração para rejeitos radioativos de nível baixo como meio de redução de volume dos mesmos. Para tanto, algumas metas principais foram envolvidas:

- Caracterizar somente o material referente aos rejeitos radioativos classificados como combustíveis de nível baixo de atividade;
- Fazer um levantamento das responsabilidades institucionais, em seus aspectos normativos e legislativos, que deverão ser seguidos no desenvolvimento de uma instalação de incineração;
- Enfocar os aspectos principais relacionados à todas as etapas constituintes e inerentes a um sistema de incineração;
- Apresentar os principais tipos de incineradores associados às diversas técnicas de combustão existentes no mundo; e
- Promover uma análise comparativa entre as técnicas e procedimentos operacionais principais, relacionadas à redução de volume dos rejeitos radioativos de nível baixo de atividade.

Com base nestes levantamentos, este trabalho visa analisar o Centro Experimental ARAMAR, para proporcionar um exemplo real e prático da viabilidade de se implantar uma instalação de incineração de rejeitos radioativos no Brasil.

Além destas perspectivas, espera-se que, sendo o primeiro trabalho a abordar a incineração de rejeitos radioativos, seja aproveitado para margear novas pesquisas sobre o tema.

# CAPÍTULO 2

## REJEITOS COMBUSTÍVEIS

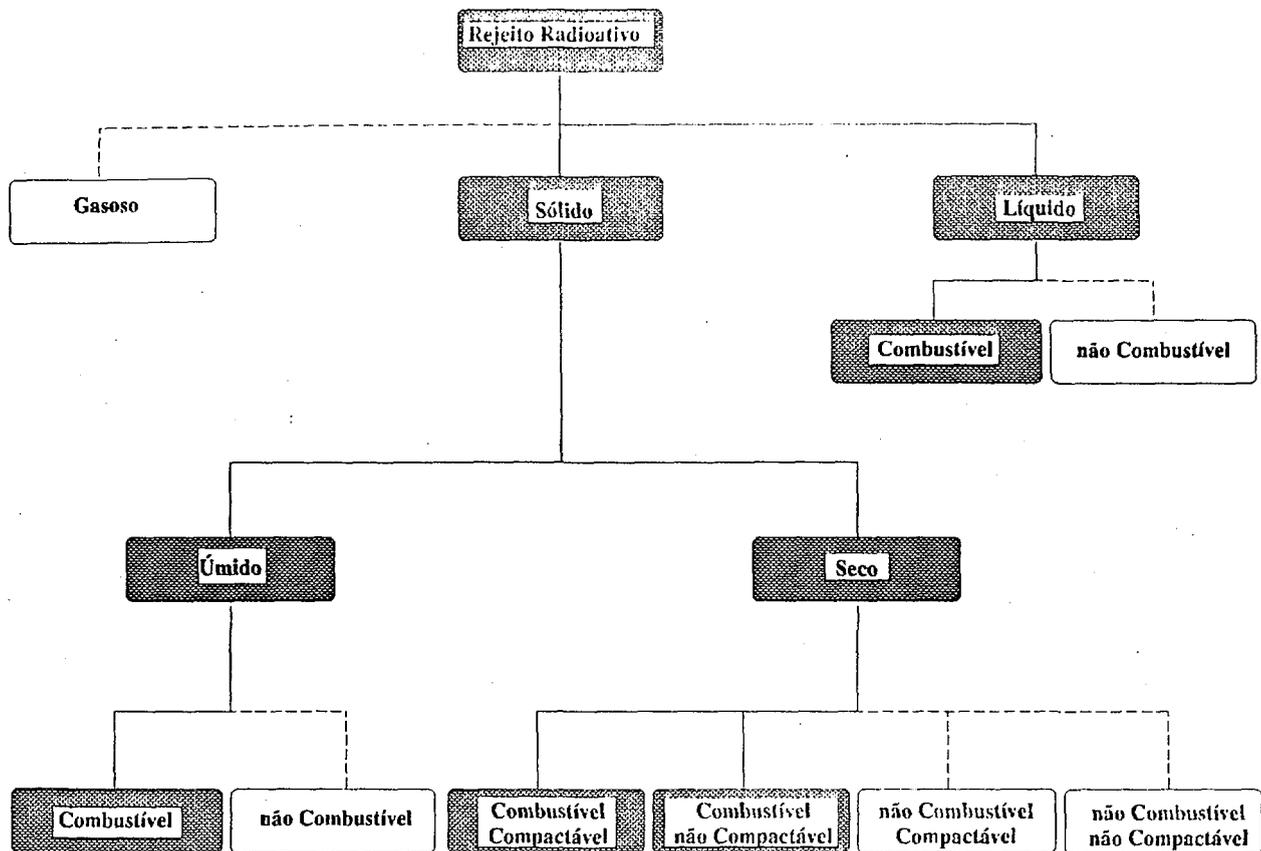
As instalações nucleares e radiativas normalmente geram rejeitos de composição bastante variada. Dentro desta variedade observa-se rejeitos com características bem distintas.

Este trabalho contempla somente o assunto referente aos rejeitos radioativos classificados como combustíveis, traçando, quando se julgar conveniente, paralelos com os resíduos combustíveis convencionais, fornecendo assim, subsídios importantes para o estudo de viabilidade para implantação de uma unidade de incineração para rejeitos radioativos de nível baixo de atividade.

A Figura 2 apresenta um diagrama simplificado que discrimina as categorias principais de rejeitos radioativos, destacando aquelas consideradas neste trabalho, de acordo com o estado físico.

Estima-se que entre 50% e 80%, em volume, de todo rejeito sólido de nível baixo, gerado em uma planta nuclear, podem ser classificados como combustíveis (7). Os rejeitos radioativos secos são suscetíveis à redução de volume por incineração. Embora outros como líquidos orgânicos e resinas de troca iônica exauridas, também possam ser incinerados.

A escolha do processo de incineração assim como de seu sistema de tratamento de gases, dependem inteiramente das características dos rejeitos gerados na instalação e que se queira incinerar. Cabe colocar a importância da coleta, com posterior segregação e triagem, para o levantamento da composição dos rejeitos radioativos existentes, suscetíveis à combustão.



**Figura 2.** Classificação discriminada de rejeitos radioativos combustíveis

Do ponto de vista de um processo de incineração, os rejeitos combustíveis podem ser subdivididos em cinco grupos:

- Materiais celulósicos e materiais a base de fibras naturais;
- Plásticos e borrachas;
- Resinas de troca iônica;
- Líquidos combustíveis; e
- Carcaças de animais.

As características principais dos rejeitos combustíveis, consideradas para a especificação correta de um sistema de incineração são as propriedades físicas e químicas como

capacidade calorífica, densidade média, umidade, entre outras, além da natureza da radiação ( $\alpha$  ou  $\beta/\gamma$ ), concentração e identificação dos radionuclídeos e taxa de exposição.

A caracterização permite a previsão de situações anômalas na operação de queima, e facilitará a intervenção antes que o problema venha a existir. Por exemplo, taxa de combustão deficiente porque o estado físico do rejeito não é conveniente; grau de corrosão do sistema porque a queima de rejeitos pode gerar gases de combustão corrosivos; temperatura do forno inadequada, por causa do poder calorífico de alguns rejeitos. Estes assuntos serão discutidos nos capítulos posteriores.

## **2.1. Fontes de Rejeitos Combustíveis**

Os rejeitos radioativos combustíveis podem ser gerados nas instalações seguintes:

*Instalações do ciclo do combustível nuclear:*

- Plantas da conversão;
- Enriquecimento;
- Laboratórios e plantas de fabricação de combustível;
- Plantas nucleares de potência;
- Plantas de reprocessamento;
- etc.

*Instalações fora do Ciclo do combustível nuclear:*

- Laboratórios e centros de pesquisa;

- Hospitais;
- Universidades;
- Instalações de produção de radioisótopos;
- Plantas industriais convencionais.
- etc.

As Tabelas II e III apresentam as fontes principais de rejeitos radioativos, discriminados por categoria /8/.

**Tabela II.** Identificação da geração de rejeitos radioativos em diferentes etapas do ciclo do combustível nuclear.

Tipos de Rejeitos			Fontes de Rejeitos			
			Produção de UF <sub>6</sub> /Conversão	Enriquecimento	Fabricação do Combustível	Planta de Potência
Rejeitos Sólidos Secos	Combustíveis	Compactáveis	•	•	•	•
		Não-Compactáveis	•	•	•	•
	Não Combustíveis	Compactáveis	•	•	•	•
		Não-Compactáveis	•	•	•	•
Rejeitos Sólidos Úmidos	Resinas					•
	Membranas <sup>1</sup>					•
	Carcaça animal					
	Filtros					•
	Lodos e lamas		•	•	•	•
	Concentrados					•
Rejeitos Líquidos	Óleos			•	•	•
	Soluções aquosas <sup>2</sup>					•
	Líquidos orgânicos <sup>3</sup>			•		

1- Membranas de processos como a osmose reversa e ultrafiltração

2- Soluções de descontaminação, decapagem, ataque químico, eletrodeposição etc.

3- TBP/dodecano, líquidos de sintilação, outros solventes sem TBP

**Tabela III.** Identificação da geração de rejeitos radioativos em diferentes locais pertencentes ou não ao ciclo do combustível nuclear.

Tipos de Rejeitos			Fontes de Rejeitos			
			Estocagem Combustível Queimado	D & D <sup>1</sup>	Mineração	Uso Militar (defesa)
<b>Rejeitos Sólidos Secos</b>	Combustíveis	Compactáveis	•	•	•	•
		Não-Compactáveis	•	•	•	•
	Não Combustíveis	Compactáveis	•	•	•	•
		Não-Compactáveis	•	•	•	•
<b>Rejeitos Sólidos úmidos</b>	Resinas		•	•		•
	Membranas					•
	Carcaça animal					
	Filtros					•
	Lodos e Lamas		•		•	•
	Concentrados				•	•
<b>Rejeitos Líquidos</b>	Óleos					•
	Soluções aquosas			•		•
	Líquidos orgânicos					•
Tipos de Rejeitos			Fontes de Rejeitos			
			Hospitais e Clínicas	Universidades	Inst. de Pesquisa e Desenvolvi/o	Outras aplicações (Indústrias...)
<b>Rejeitos Sólidos Secos</b>	Combustíveis	Compactáveis	•	•	•	•
		Não-Compactáveis			•	
	Não Combustíveis	Compactáveis	•	•	•	
		Não-Compactáveis	•	•	•	•
<b>Rejeitos Sólidos úmidos</b>	Resinas			•	•	•
	Membranas				•	
	Carcaça animal		•	•	•	
	Filtros				•	
	Lodos e Lamas				•	
	Concentrados				•	
<b>Rejeitos Líquidos</b>	Óleos				•	
	Soluções aquosas				•	
	Líquidos orgânicos		•	•	•	

1- D&D- Operações de descontaminação e descomissionamento

## 2.2. Tipos de Rejeitos Combustíveis

Os tipos principais de rejeitos radioativos combustíveis, geralmente encontrados em instalações nucleares, são apresentados a seguir /53/:

- Objetos plásticos na forma de sacos, lâminas, luvas, botas, macacões, equipamentos de laboratório, recipientes, garrafas etc. Os objetos plásticos podem ser tipicamente: polietileno (PE), polipropileno (PP), polimetilmetacrilato (PMMA), cloreto de polivinila (PVC), politetrafluoretileno (PTFE), nylon e etilvinilacetato (EVA);
- Borracha como luvas, botas e mangueiras;
- Fibras de poliéster na forma de vestimentas e trapos;
- Papel por exemplo de sacos, folhas, cartolina, envelopes, pacotes, caixas, etc;
- Carvão ativado;
- Madeira na forma de embalagens, estruturas, compensados e serragem;
- Algodão e outros materiais de textura celulósica (material têxtil);
- Resinas de troca iônica;
- Material biológico, carcaças de animais usados em experiências ou controle de qualidade de radiofármacos;
- Líquidos orgânicos como óleos, solventes, por exemplo tributilfosfato (TBP), líquidos de cintilação; e
- Rejeitos contendo elementos transurânicos (TRU).

É importante lembrar que outros tipos de rejeitos sólidos são gerados nas instalações nucleares adicionalmente aos citados acima por exemplo, metais como de componentes, equipamentos de laboratório, ferramentas, roscas, placas, tubulações etc, feitos de aço carbono, aço inox, cobre, alumínio e outros metais e ligas, asbesto (amianto), fibra de vidro, materiais isolantes térmicos, vidros em geral, lamas e lodos etc. Porém estes rejeitos, por não serem classificados como combustíveis, não serão abordados neste trabalho.

### **2.3. Classificação de Rejeitos Combustíveis**

Com o intuito de fornecer subsídios para o estudo de viabilidade para implantação de uma unidade de incineração de rejeitos radioativos de nível baixo de atividade, fez-se necessário desenvolver uma classificação específica voltada exclusivamente para os rejeitos considerados combustíveis.

A classificação proposta é baseada em características como, tipo de rejeito, capacidade calorífica, teor de umidade, nuclídeos presentes e natureza da radiação, relacionados a um sistema de incineração de rejeitos radioativos combustíveis em paralelo com um sistema de incineração de resíduos convencionais.

Neste trabalho a classificação aqui proposta será considerada como base para o estudo de viabilidade para implantação de uma unidade de incineração de rejeitos radioativos de nível baixo de atividade.

Tabela IV. Classificação de rejeitos radioativos combustíveis

Classe	Sólido seco			Sólido úmido		Líquido
	1	2	3	4	5	6
Tipo de Rejeito	Materiais celulósicos materiais a base de fibras naturais plásticos borracha madeira etc			Resinas de troca iônica, plásticos, papel, borracha, madeira, membranas filtro, carvão ativado etc	Carcaças de animais	Liq. orgânicos óleos Liq. cintilação solventes TBP
Umidade (%)	≤ 10	10 < x ≤ 25	Depende do tipo de rejeito predominante	25 < x ≤ 50	50 < x ≤ 85	Depende do tipo de rejeito predominante
Cinzas (%)	5	10	Variável de acordo com o rejeito analisado	7	5	Variável de acordo com o rejeito analisado
Cp (MJ/kg)	20	15	Variável de acordo com o rejeito analisado	10	2 a 6	Variável de acordo com o rejeito analisado
Radionuclídeos Principais	<sup>3</sup> H, <sup>14</sup> C, <sup>32</sup> P, <sup>35</sup> S, <sup>54</sup> Mn, <sup>58</sup> Co, <sup>60</sup> Co, <sup>65</sup> Zn, <sup>90</sup> Sr, <sup>90</sup> Y, <sup>95</sup> Zr, <sup>95</sup> Nb, <sup>106</sup> Ru, <sup>125</sup> Sb, <sup>125</sup> I, <sup>131</sup> I, <sup>137</sup> Cs, <sup>134</sup> Cs, <sup>144</sup> Ce, <sup>144</sup> Pr  <sup>235</sup> U, <sup>238</sup> U, <sup>238</sup> Pu, <sup>239</sup> Pu, <sup>240</sup> Pu, <sup>241</sup> Pu, <sup>241</sup> Am, <sup>243</sup> Am, <sup>244</sup> Cm			<sup>54</sup> Mn, <sup>58</sup> Co, <sup>60</sup> Co, <sup>95</sup> Zr, <sup>106</sup> Ru, <sup>124</sup> Sb, <sup>125</sup> Sb, <sup>134</sup> Cs, <sup>137</sup> Cs	idem as classes 0,1 e 2	<sup>3</sup> H, <sup>14</sup> C, <sup>90</sup> Sr, <sup>90</sup> Y, <sup>95</sup> Zr, <sup>95</sup> Nb, <sup>106</sup> Ru, <sup>125</sup> Sb, <sup>137</sup> Cs, <sup>134</sup> Cs, <sup>144</sup> Ce, <sup>144</sup> Pr
Tipo de emissão	β/γ	e/ou	α	β/γ e/ou α	β/γ e/ou α	β/γ e/ou α

1-Foram consideradas como exemplos as resinas catiônica IR-120 e aniônica IRA-420, tipo Amberlite "gel" da Rhom & Haas em forma de esferas com diâmetro variando de 0,1 e 1,0mm. Sua composição química básica é estireno e divinil benzeno com massa específica igual a 1,26 e 1,12 g/cm<sup>3</sup> respectivamente /9/.

#### 2.4. Considerações Específicas

O desempenho adequado de um sistema de incineração de rejeitos radioativos depende da segregação dos mesmos e da sua caracterização físico-química.

As características incluem aspectos físicos, químicos e radiológicos. Algumas das mais importantes e que devem ser avaliadas antes da execução do processo de incineração são apresentadas na Tabela V.

**Tabela V.** Características dos rejeitos combustíveis que tem influência sobre algumas etapas do processo de incineração

Propriedades	Importância
Morfologia, densidade, reologia	Alimentação dos fornos
Poder calorífico	Balanço de energia na câmara de combustão (necessidade de combustível auxiliar)
Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Água	Poder calorífico, combustibilidade
Haleto orgânicos	Exigência de temperaturas altas para a destruição do rejeito: ocorrem emissões de produtos halogenados (HCl)
Enxofre, Nitrogênio, Fósforo (orgânicos)	Os respectivos óxidos atingem o sistema de tratamento de gases
Características das cinzas	Quantidade e periculosidade dos resíduos não queimados e características do condicionamento
Existência de elementos perigosos, inclusive metais pesados	Periculosidade na liberação dos metais pesados e outros elementos tóxicos durante a incineração e nas cinzas
Sais	Características das cinzas, danos ao revestimento refratário do incinerador (Na)
Radioatividade e tipo de emissão	Necessidade de operação remota, características da alimentação, blindagem e monitoração

Algumas características podem tornar-se inconvenientes durante o processo de incineração:

- *Nível de atividade:* O nível de radioatividade dos rejeitos alimentados no incinerador é limitado de acordo com o projeto da instalação e procedimento de manuseio dos rejeitos e cinzas. O controle deve ser efetuado de acordo com as normas de proteção radiológica vigentes /10/.
- *Rejeitos que contenham altos teores de cloreto de polivinila (PVC):* A combustão de plásticos halogenados forma gases ácidos que representam um risco severo de corrosão do incinerador, particularmente no sistema de tratamento de gases. Portanto o grau de tolerância de um sistema de incineração para a queima de materiais halogenados (PVC) depende do sistema de tratamento de gases de combustão e do material utilizado na sua construção.

- *Rejeitos com grandes quantidade de borracha:* Menos críticos do que os materiais de PVC, as borrachas, por serem compostos de enxofre, também formam gases ácidos no processo de queima. Portanto os mesmos cuidados tomados com os compostos halogenados devem ser tomados ao se incinerar borrachas.
- *Alto poder calorífico:* É importante que o poder calorífico dos rejeitos a serem incinerados seja adequado. Isto torna-se importante quando se espera bateladas com composições variadas de rejeitos. Itens possuindo um poder calorífico muito alto devem ser segregados, ou o processo de alimentação dos rejeitos deverá ter a taxa de alimentação ajustada, reduzindo deste modo a produtividade do incinerador. Ao contrário, para poder calorífico baixo, deve ser adicionado um combustível auxiliar na alimentação dos rejeitos. A Tabela VI apresenta valores típicos do poder calorífico de alguns materiais combustíveis que são considerados neste trabalho.
- Grande quantidade de rejeitos metálicos e outros materiais incombustíveis;
- Rejeitos que ofereçam risco de explosão.

**Tabela VI. Poder calorífico de materiais combustíveis típicos**

Material	Poder Calorífico (Btu/lb)	Poder Calorífico (MJ/kg)
Piche	15300	36
Couro	7240	17
Papel	7530	18
Papelão	6000	14
Polietileno	19950	46
Poliestireno	17830	41
Resina <sup>1</sup>	10748	25
PVC	9750	23
Borracha (vulcanizada)	15180	35
Trapos, algodão	7200	17
Madeira	8500	20

1- Considerou-se uma resina mista de troca iônica conforme Ref. /11/. Nesta referência também são apresentados, o poder calorífico de uma resina catiônica (20 MJ/kg) e de uma resina aniônica (~ 30 MJ/kg).

# CAPÍTULO 3

## ASPECTOS NORMATIVOS E LEGISLATIVOS

A utilização de fontes radioativas bem como a operação de instalações radiativas ou nucleares e o gerenciamento dos rejeitos radioativos, em qualquer país do mundo, são regidas por leis específicas e normas que são criadas para este fim.

As responsabilidades institucionais nos diversos países, são muito semelhantes:

- Responsabilidades do Poder Público: estabelecer e implementar normas, criar instituições regulamentadoras, definir responsabilidades do gerador de rejeitos radioativos e do operador das instalações radiativas e nucleares, além de prover recursos financeiros na área.
- Responsabilidades dos órgãos, entidades e fundações instituídas pelo Poder Público são: estabelecer, deliberar, assessorar, executar e aplicar as normas legais exigindo seu cumprimento, implementar processos de licenciamento e alertar o estado de eventuais modificações.
- Responsabilidades dos operadores são: cumprir as exigências legais, trabalhar com segurança e definir, no caso de rejeitos radioativos, as formas de tratamento e deposição definitiva.

Para enforçar este tema são apresentados os aspectos principais relativos às responsabilidades institucionais sobre o gerenciamento de rejeitos radioativos no Brasil, através de uma abordagem sucinta no que tange ao controle de instalações radiativas e nucleares, a partir da legislação vigente, abrangendo normalização, licenciamento e fiscalização direcionados a um sistema de incineração.

Adicionalmente, é apresentada uma relação dos principais dispositivos normativos e legislativos que envolvem sistemas de incineração, além de incluir, a título informativo, algumas referências internacionais que tratam do assunto.

### **3.1. Competências e Políticas**

#### **3.1.1. Constituição Federal**

De acordo com a Carta Magna (Constituição Federal) de 1988 /12/, tem-se:

Título III - "Da Organização do Estado"; Capítulo II - "Da União":

- Art.21 - "Compete à União: XXIII - explorar os serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e exercer monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados, atendidos os seguintes princípios e condições: a) toda atividade nuclear em território nacional somente será admitida para fins pacíficos e mediante aprovação do Congresso Nacional; b) Sob o regime de concessão ou permissão, é autorizada a utilização de radioisótopos para a pesquisa e usos medicinais, agrícolas, industriais e atividades análogas; c) a responsabilidade civil por danos nucleares independe da existência de culpa";
- Art. 22 - "Compete privativamente à União legislar sobre": XXVI - "atividades nucleares de qualquer natureza".

Título IV - "Da Organização dos Poderes"; Capítulo I - "Do poder legislativo": Seção II - "Das atribuições do Congresso Nacional":

- Art. 48, caput - "Cabe ao Congresso Nacional, com a sanção do Presidente da República, não exigida esta para o especificado nos arts. 49, 51 e 52, dispor sobre todas matérias de competência da União...".
- Art. 49 - "É da competência exclusiva do Congresso Nacional": XIV - "aprovar iniciativas do Poder Executivo referentes a atividades nucleares".

Título VIII - "Da Ordem Social"; Capítulo VI - "Do meio ambiente":

- Art. 225 parágrafo 6º - "As Usinas que operem com reator nuclear deverão ter sua localização definida em lei federal, sem o que não poderão ser instaladas".

Ainda na Constituição Federal /12/, pode-se encontrar que:

Título III - "Da Organização do Estado"; Capítulo II - "Da União":

- Art. 23 - "É competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios": VI - "proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas"; e
- Art. 24 - "Compete à União, aos Estados e ao Distrito Federal legislar concorrentemente sobre": VI - "florestas, caça, pesca, fauna, conservação da natureza, defesa do solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e controle da poluição".

De acordo com as definições apresentadas na Lei nº 6938 de 31 de agosto de 1981 que "dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências", no Art. 3º, I, II e III, podemos concluir que a poluição nuclear entra na categoria de "qualquer das suas formas" (Art. 23, VI) /IV10,11/.

Com relação às medidas ou iniciativas que o poder executivo possa tomar, referentes ao gerenciamento de rejeitos radioativos, estas deverão ser examinadas "a posteriori" pelo Congresso Nacional e deverão sujeitar-se à Lei a ser votada conforme citado abaixo:

Título VII - "Da Ordem Econômica e Financeira"; Capítulo I - "Dos princípios gerais da atividade econômica":

- Art. 177 - "Constituem monopólio da União": parágrafo 2º - "A Lei disporá sobre o transporte e a utilização de materiais radioativos no território nacional".

Isto mostra uma abrangência mínima no que tange a definição de gerência de rejeitos radioativos.

### ***3.1.2. Competência da CNEN***

A Lei 4118, de 27 de agosto de 1962, que dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, criou a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN e dá outras providências.

O Decreto nº 51726, de 19 de fevereiro de 1963, que aprova o regulamento para a execução da citada Lei, estabelece que é competência da CNEN estabelecer regulamentos e normas de segurança relativas ao uso das radiações e dos materiais nucleares, à instalação e operação dos estabelecimentos destinados a produzir materiais nucleares ou a utilizar a energia nuclear e suas aplicações. O mesmo Decreto também estabelece que é competência da CNEN fiscalizar o cumprimento dos referidos regulamentos e normas, além de formular resoluções fixando as normas referentes aos radioisótopos, substâncias radioativas das três séries naturais (U, Th e Pu), subprodutos nucleares e outras substâncias de interesse para a energia nuclear.

Como se verifica, a Lei 4118/62 faz menção expressa ao uso generalizado das radiações ionizantes, o que significa que o uso de qualquer fonte de radiação fica sujeito ao cumprimento das normas estabelecidas pela CNEN, mediante fiscalização desta.

Entretanto, a Lei 6189, de 16 de dezembro de 1974, alterou a Lei 4118/62,

modificando assim a competência da CNEN.

No seu Art. 2º, a Lei 6189/74 dispõe sobre a matéria, conforme descritos nos incisos III e IV.

O inciso III estabelece que compete à CNEN expedir normas, licenças e autorizações relativas a instalações nucleares; posse, uso, armazenagem e transporte de material nuclear; comercialização de material nuclear, minérios nucleares e concentrados que contenham elementos nucleares.

O inciso IV, alíneas a, b e c, estabelecem que é também competência da CNEN expedir regulamentos e normas de segurança e proteção relativas ao uso de instalações e de materiais nucleares; ao transporte de materiais nucleares; e ao manuseio de materiais nucleares.

Logo, estes dispositivos tem aplicação, tão só e exclusivamente quando se trata de material nuclear e instalação nuclear.

Contudo compete a CNEN expedir regulamentos e normas de segurança e proteção radiológica relativas ao tratamento e à eliminação de rejeitos radioativos, bem como à construção e à operação de estabelecimentos destinados a utilizar energia nuclear (Lei 6189/74, artigo 2º, inciso IV, alíneas "c" e "d"). No exercício dessa competência, a CNEN baixou, entre outras, as resoluções seguintes :

- Resolução CNEN-09/84, publicado no Diário Oficial da União (D.O.U.), de 14 de dezembro de 1984, que aprova as "Normas para o Licenciamento de Instalações Radiativas" e
- Resolução CNEN-19/85, publicado no D.O.U., de 17 de dezembro de 1985, que dispõe sobre a "Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas".

Ainda com relação à competência da CNEN, o artigo 1º da Lei 6189/74 estabelece que "a União exercerá o monopólio do comércio dos radioisótopos artificiais e substâncias

radioativas das três séries naturais, por meio da CNEN, como órgão superior de orientação, planejamento, supervisão, fiscalização e de pesquisa científica".

O inciso VIII do Art.2º do mesmo dispositivo legal estabelece a competência da CNEN quanto à fiscalização relativa ao reconhecimento e levantamento geológico relacionados com minérios nucleares; a produção e o comércio de materiais nucleares; a indústria de produção de materiais e equipamentos destinados ao desenvolvimento nuclear.

Conclui-se, portanto, que a competência fiscalizadora da CNEN, contida na Lei 6189/74, referente aos radioisótopos artificiais e substâncias radioativas, estará restrita ao seu comércio.

O Decreto nº 75569, de 07 de abril de 1975, que dispõe sobre a estrutura básica da CNEN, quanto à competência fiscalizadora, além da já citada no artigo 2º, inciso VIII da Lei 6189/74, adiciona a fiscalização da construção e da operação de instalações nucleares (artigo 8º, inciso VIII, alínea "e" do Decreto 6189/74) e, ao especificar a competência dos órgãos estruturais da autarquia, em seu artigo 21, inciso I, atribui ao Departamento de Instalações e Materiais Nucleares a competência de "habilitar, controlar, registrar e fiscalizar as pessoas físicas e jurídicas no que se refere a qualquer atividade relacionada com radioisótopos, radiações ionizantes, elementos nucleares, materiais férteis e físséis".

À primeira vista, parece que o inciso I do artigo 21 do referido regulamento, extrapola os limites da competência atribuída à CNEN pela Lei 6189/74. Todavia, deve ser feita interpretação de que a competência da CNEN se restringe aos limites do dispositivo legal.

Se o Decreto teve por finalidade estabelecer a divisão estrutural da CNEN, através da qual ela exerce sua competência legal, a divisão de atribuições decorrentes dessa competência entre os órgãos estruturais só pode ficar contida nos limites da Lei que definiu essa competência.

As atribuições conferidas a um órgão não podem exercer-se fora do âmbito da sua

competência, consequência do princípio da Ordem Pública de que a competência resulta da Lei, e do qual decorre não haver nenhum ato sem competência, nenhuma competência sem Lei anterior que a defina.

Portanto, a fiscalização prevista neste dispositivo do Decreto 75569/75 só pode ser entendida como aquela inserida no texto legal outorgante da competência - Lei 6189/74.

### ***3.1.3. Normas concorrentes ou suplementares relativas às instalações radiativas***

A Lei 6189/74 não faz qualquer referência às instalações radiativas, como visto acima. Não se pode avaliar se foi um equívoco do legislador ao restringir a aplicação desta Lei às instalações e materiais nucleares, ou se esta restrição foi conscientemente disposta em Lei. O fato é que o controle das instalações radiativas é feito segundo outras Leis, de acordo com os aspectos tecnológicos da instalação. Os exemplos mais importantes são as instalações radiativas para fins médicos, em que o Código Nacional de Saúde remete aos Estados parte da competência para o controle dessas instalações. Portanto, neste caso aplica-se a legislação concorrente. O mesmo pode ser extrapolado para o controle das instalações radiativas para aplicações na indústria, agricultura, pesquisa científica, entre outras.

A Lei 6938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, dispõe em seu Artigo 9º, que "o licenciamento e a revisão de atividades efetivas ou potencialmente poluidoras são instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente".

Estabelece o Art. 10 que "a construção, instalação, ampliação e funcionamento dos estabelecimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, considerados efetivo ou potencialmente poluidores, bem como os capazes, sob qualquer forma, de causar degradação

ambiental, dependerão de prévio licenciamento por órgão estadual competente, integrante do Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA, sem prejuízo de outras licenças exigíveis".

Entretanto, de acordo com o parágrafo 4º deste mesmo artigo, "caberá exclusivamente ao Poder Executivo Federal, ouvidos os governos Estadual e Municipal interessados, o licenciamento previsto no "caput" do art. 10, quando relativo a pólos petroquímicos e cloroquímicos, bem como a instalações nucleares e outras definidas em Lei".

O Decreto 88351, de 1º de junho de 1983, que regulamenta a Lei nº6938, de 31 de agosto de 1981 e a Lei nº6902, de 27 de abril de 1981, que dispõem, respectivamente, sobre a Política Nacional do Meio Ambiente e sobre a criação de Estações Ecológicas e áreas de Proteção Ambiental, quando dispõe, em seu Art. 20, sobre as licenças que devem ser expedidas pelo Poder Público, no exercício de sua competência de controle, estabelece no parágrafo 4º deste artigo, que:

- Art.20, parágrafo 4º - "o licenciamento dos estabelecimentos destinados a produzir materiais nucleares, ou a utilizar a energia nuclear e suas aplicações, competirá à Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, mediante parecer do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, ouvidos os órgãos de controle ambiental estaduais e municipais."

Logo, esta competência abrange tanto as instalações nucleares como as instalações radiativas.

Entretanto, de acordo com a Lei 6938/81, o que cabe ao Poder Executivo Federal é "o licenciamento da construção, instalação, ampliação e funcionamento das instalações nucleares", mostrando que esta regra não se aplica às instalações radiativas pois apesar do Art. 10, parágrafo 4º estabelecer que o mesmo será aplicado a outras instalações previstas em Lei, não há ainda Lei que estenda a sua aplicação às instalações radiativas.

O licenciamento neste caso deverá ser feito por órgão estadual competente,

integrante do SISNAMA, sem prejuízo de outras licenças exigíveis.

Em termos gerais, a Legislação vigente sobre instalações radiativas está dispersa em diversos diplomas legais, regulamentos e atos administrativos de competência federal e estadual, que devem ser amplamente difundidos de modo a não causar divergências de interpretação.

Os conceitos que informam essas normas legais e regulamentares, merecem integrar uma terminologia uniforme da qual derivam todas as consequências jurídicas.

No Brasil não existe nada, especificamente escrito, na forma de constituição e legislação, sobre o gerenciamento de rejeitos radioativos, tanto a nível Federal, quanto a nível Estadual e Municipal como é visto em países como França, Estados Unidos da América, Bélgica etc.

O gerenciamento de rejeitos radioativos é regido apenas pela norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN-NE-6.05 intitulada "Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas" /1/.

Para instalações de tratamento de rejeitos radioativos a CNEN não possui nenhuma norma ou exigências relacionadas ao seu projeto, instalação, montagem e operação.

Objetivando fornecer subsídios para a concepção e construção de uma instalação de incineração, considera-se necessário e oportuno sugerir, para alicerçar a execução do sistema proposto, que sejam seguidas, no mínimo, as exigências aplicadas para incineradores convencionais para resíduos perigosos /14/. Além destas as recomendações de segurança quanto a proteção radiológica, de acordo com as diretrizes básicas de radioproteção /10/.

### **3.2. Disposições legais**

#### **3.2.1. Disposições nacionais**

As principais disposições legais vigentes no Brasil, e que podem ser aplicadas a um processo de incineração, são:

- **Normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN:**

CNEN-NE-6.05 - Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas /1/

CNEN-NE-6.02 - Licenciamento de instalações radiativas /3/

CNEN-NE-1.04 - Licenciamento de instalações nucleares /5/

CNEN-NE-3.01 - Diretrizes básicas de radioproteção /10/

- **Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT:**

NB-1265 - Incineração de resíduos sólidos perigosos - Padrões de desempenho /15/

NBR-10004 - Resíduos sólidos /16/

NBR-10005 - Lixiviação de resíduos /17/

NBR-10006 - Solubilização de resíduos /18/

NBR-10007 - Amostragem de resíduos /19/

- **Normas da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB:**

Apresentação de projeto de incineradores de resíduos perigosos /14/

Apresentação de projeto de incineradores para queima de resíduos hospitalares /20/

Sistema para incineração de resíduos de serviços de saúde, portos e aeroportos /21/

- Legislação vigente:

Constituição de República Federativa do Brasil /12/

Legislação Federal - Controle da poluição ambiental /13/

Portaria nº 53, de 1º de março de 1979 - Ministério do Interior

Resolução nº 01, de 23 de janeiro de 1986 - CONAMA

Legislação Estadual - Controle da poluição ambiental - Estado de São Paulo /22/

Decreto nº 8468, de 08 de setembro de 1976

Legislação Municipal específica (quando existir)

### ***3.2.2. Disposições internacionais***

A nível internacional, uma instalação para a redução de volume de rejeitos radioativos através da combustão, juntamente com um sistema de tratamento dos gases gerados, deve cumprir as exigências e condições legislativas, normativas e das autoridades competentes vigentes no país, para que seja licenciada. As diretrizes encontram-se freqüentemente embutidas nas regulamentações relacionadas ao gerenciamento de rejeitos como um todo, existindo, esporadicamente, citações exclusivas ao processo de incineração.

Como fonte de consulta toma-se como exemplo as regulamentações vigentes nos

Estados Unidos da América pela sua abrangência e facilidade de acesso.

As Leis básicas, aplicadas a área nuclear nos EUA, são as Leis públicas 83-703 - "The Atomic Energy Act (AEA)" de 1954 e 93-438 - "The Energy Reorganization Act" de 1975. O órgão federal que regulamenta a incineração de rejeitos radioativos de nível baixo, nos EUA, é a Nuclear Regulatory Commission - Comissão de Regulamentação Nuclear (NRC), governada pelas leis públicas citadas. A NRC aplica o regulamento, para o gerenciamento de rejeitos radioativos quanto à incineração, através das normas prescritas no Code of Federal Regulations - Código de Regulamentos Federais (CFR) em seu Título 10, partes 20 (seções 20.305 e 20.106 (b)), 30, 40, 50 (50.59 e 50.92) e 70 /23, 24/.

Além das normas da NRC apresentadas, são aplicadas normas da United States Environmental Protection Agency - Agência de Proteção ao Meio Ambiente (EPA), relacionadas às descargas radioativas e limites de exposição à radiação através do título 40 da CFR, partes 61 e 190 à 193 e às descargas convencionais conforme a Clean Air Standards /23, 25, 24/.

# CAPÍTULO 4

## ASPECTOS DE PROCESSO DO SISTEMA DE INCINERAÇÃO

Para projetar uma instalação de incineração de rejeitos radioativos, de forma adequada, deve-se levar em conta uma série de aspectos de ordem técnica, entre eles: engenharia de processo, segurança de operações, avaliação de riscos, proteção do meio ambiente quanto a poluentes, normas técnicas, legislação vigente no país e recursos financeiros.

Dessa análise fazem parte os princípios de proteção radiológica, conquanto o material a ser incinerado é radioativo. Nesta análise está inserida a sistemática de alimentação, queima, tratamento de gases etc, que deve ser guiada por um dos princípios fundamentais da proteção radiológica, o "princípio A.L.A.R.A." (As Low As Reasonably Achievable). Dentro deste princípio, as operações da instalação radiativa caracterizam-se por doses tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, dentro de todos os padrões de segurança física e radiológica.

Outro ponto a ser avaliado na concepção de um processo de incineração é a sua relação com outras etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos, como a redução de custos dos processos de condicionamento das cinzas, armazenagem intermediária ou temporária, transporte e disposição final.

Um sistema de incineração genérico é mostrado na Figura 3.

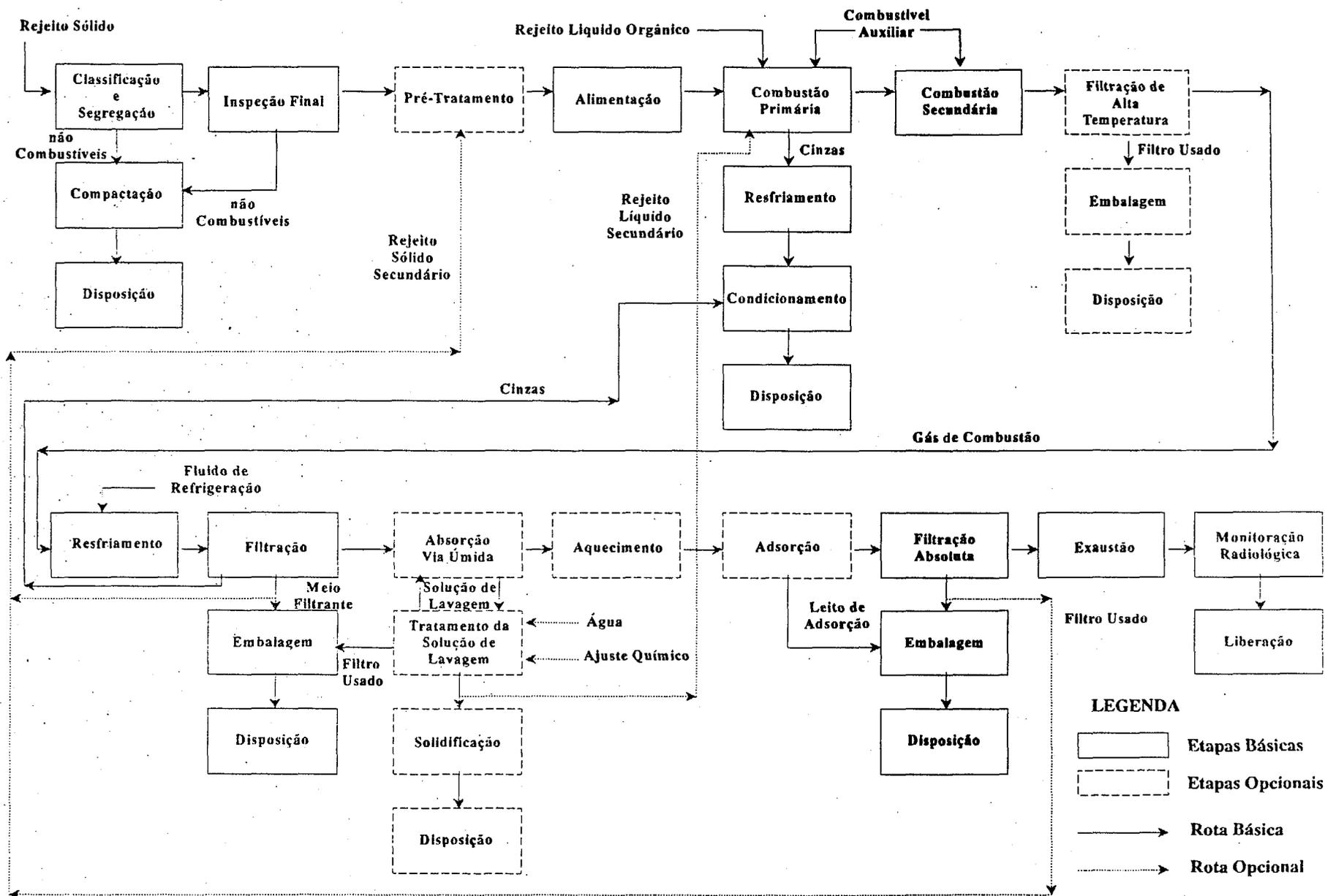


Figura 3 - Diagrama de blocos que mostra o sistema para a incineração de rejeitos radioativos /26/.

As etapas principais de um sistema de incineração de rejeitos são descritas a seguir:

#### **4.1. Segregação e Pré-Tratamento**

As atividades de segregação são desenvolvidas com linhas definidas do tratamento de rejeitos radioativos, de acordo com as instalações existentes. A segregação feita de maneira correta, favorece o desempenho do equipamento e cumpre com o objetivo principal que é concentrar e reduzir o volume dos rejeitos radioativos. Além destes aspectos permite manter a instalação íntegra e em bom estado de operação por períodos de tempo mais longos. Por isso, materiais compostos por substâncias indesejáveis ao processo de incineração são evitados.

Para ilustrar o fato pode-se citar aqueles rejeitos radioativos compostos por PVC que durante a combustão formam ácidos (clorídrico) que são danosos ao sistema de tratamento de gases pois corroem as tubulações e equipamentos. Neste caso, se for inevitável a incineração deste tipo de rejeito, deve-se adotar materiais de construção resistentes à corrosão (p.ex.: ligas de níquel, cromo e cobalto).

O pré-tratamento, por sua vez, tem como objetivo principal preparar os rejeitos para o tratamento, seja por redução parcial de volumes, modificações nas características físico-químicas do rejeito ou outras mais específicas. Basicamente o pré-tratamento permite condicionar o rejeito às características ou parâmetros da instalação. Peças muito volumosas precisam ser desmontadas ou trituradas, carcaças de animais precisam ser embaladas permitindo uma dosagem adequada de material a ser queimado. Isto evita a sub-utilização da unidade ou a saturação.

Nas atividades de pré-tratamento enquadram-se o aquecimento, a moagem, o peneiramento etc.

## 4.2. Alimentação dos Rejeitos

Durante o projeto conceitual de um sistema de incineração é necessário estabelecer quais as categorias/tipos de rejeitos, sua classificação e o volume relativo que será processado no sistema. Esta definição afetará a seleção da técnica de combustão e do sistema de tratamento de gases mais adequado, a ser empregado.

O sistema de alimentação de rejeitos também é definido de acordo com o tipo de rejeito que será incinerado.

São várias as formas como se pode alimentar os rejeitos no incinerador (forno) por exemplo, via caixa de alimentação ("charging boxes"), transportador, conjunto talha/monovia, bicos injetores para atomização (rejeitos líquidos), sistema com êmbolo e manualmente, entre outras.

Para assegurar um carregamento eficaz e seguro, evitando o espalhamento da contaminação, quando em processamento, assim como minimizar o ingresso de ar no sistema de incineração, limitar a transferência de calor da câmara de combustão para o ambiente (área de operação) e prevenir a liberação de gases de incineração durante a alimentação, alguns fatores importantes devem ser considerados quando do desenvolvimento de um sistema de alimentação de rejeitos em um incinerador.

Os fatores a serem considerados são:

### *Rejeitos sólidos*

O rejeito pode ser introduzido no incinerador em bateladas porque este sistema é menos complexo do que o de alimentação contínua. A alimentação em batelada poderá ser feita

através de um duto tipo caixa, em condições sub-atmosféricas em relação à área de operação e com pressão positiva, em relação à câmara de combustão. O rejeito radioativo deve estar envolto com invólucro adequado para evitar a contaminação radioativa dos operadores e do ambiente.

A alimentação de rejeitos fragmentados, pode ser feita de modo contínuo com sistemas compatíveis, por exemplo um transportador de rosca ou um sistema pneumático de transferência.

Quanto às formas descritas acima deve-se atentar para os aspectos seguintes: a existência de uma vedação de ar entre o sistema de alimentação e a câmara de combustão; sistema de resfriamento e ambiente com atmosfera inerte, evitando-se a combustão do rejeito neste sistema; utilização de material apropriado, com resistência mecânica adequada e equipamento de proteção contra incêndio.

### *Rejeitos líquidos*

Dependendo do grau de volatilidade dos radionuclídeos presentes nos rejeitos líquidos que serão queimados, a interface de alimentação deve ter um ambiente com atmosfera inerte e temperatura adequada.

Para evitar o derramamento do rejeito líquido durante a alimentação devem ser usadas contenções apropriadas.

A separação de fases, ou precipitação de sólidos, durante a alimentação podem ser evitadas utilizando-se emulsificantes ou complexantes.

Alguns parâmetros físico-químicos dos rejeitos radioativos devem ser determinados antes da incineração por exemplo, poder calorífico, teor de umidade, viscosidade, densidade, ponto de fulgor, conteúdo de halogêneos e enxofre e teor de sólidos.

Para a combustão adequada dos líquidos, deve-se usar queimadores de eficiência alta. A queima de rejeitos líquidos com baixo poder calorífico, pode ser efetuada promovendo a alimentação no fundo da câmara de combustão, isto é, mais próximo da fonte de calor.

O desenvolvimento de um sistema de alimentação de rejeitos radioativos vem se aprimorando continuamente face as dificuldades e experiências adquiridas tanto em processos com rejeitos radioativos como com resíduos convencionais. Através deste desenvolvimento vem se observando que a otimização de um sistema de alimentação encontra-se interligada com a otimização do processo de segregação e pré-tratamento dos rejeitos a serem incinerados /27/, tornando-os pontos de muita importância na avaliação, concepção, projeto e desenvolvimento de um sistema de incineração, como forma de tratamento de rejeitos.

#### **4.3. Combustão de Rejeitos e Dispositivos de Queima**

Dos sistemas que compõem uma unidade de incineração, o mais importante é o de combustão que proporciona a destruição dos rejeitos através da oxidação térmica. O oxidante é o ar atmosférico e o processo de combustão é controlado por meio de três variáveis principais que são a temperatura, a turbulência e o tempo de residência. A temperatura representa a quantidade de energia fornecida ao rejeito para que ocorra a quebra e a recombinação das moléculas do material. A turbulência define o grau de mistura e a homogeneização do rejeito com o oxigênio do ar. O tempo de residência é o tempo no qual as substâncias permanecem na temperatura adequada, tempo este disponível para a ocorrência das reações de oxidação.

O processo de combustão dos rejeitos radioativos ocorre com o auxílio de dispositivos de queima que podem ser agrupados em: câmara de combustão primária; câmara de combustão secundária; queimadores, grelha e injetores de ar. Estes dispositivos são discutidos a

seguir, enfocando os critérios principais que devem ser observados durante a fase de projeto e avaliação na etapa de concepção de um processo de incineração.

#### ***4.3.1. Câmara de combustão primária***

É o local onde se processa a incineração propriamente dita, podendo ser projetada nas mais diversas formas, características e tamanhos. No presente trabalho são evidenciados os critérios mais importantes para a escolha de uma câmara de combustão adequada para a queima de materiais combustíveis /28/, que são:

- Tipo e natureza do processo de incineração (ar em excesso, ar controlado, leito fluidizado etc);
- Sistema de alimentação escolhido;
- Taxa de alimentação dos rejeitos;
- Influências mecânicas durante a alimentação da câmara com os rejeitos radioativos;
- Influências químicas do processo de combustão (formação de gases corrosivos, misturas explosivas etc);
- Carga térmica da câmara de combustão (forno);
- Geometria do interior da câmara de combustão;
- Tempo de residência desejado para sólidos e frações gasosas;
- Flutuações de temperatura durante o processo de combustão;
- Suprimento e distribuição do ar de combustão na câmara;

- Características de turbulência e velocidade de saída dos gases da câmara;
- Influências mecânicas durante a remoção de cinzas; e
- Sistema de coleta de cinzas;

O revestimento interno da câmara de combustão deve apresentar certas características como: resistência mecânica adequada, resistência térmica, que permita suportar temperaturas de operação, resistência química contra os efeitos de vapores ácidos que eventualmente possam ser formados durante a combustão e superfície lisa sem cantos vivos para impedir a retenção de cinzas.

Existem compromissos entre alguns parâmetros técnicos da câmara de combustão, entre eles a escolha do sistema refratário. Deve-se considerar as limitações de alguns materiais refratários para a temperatura de operação do incinerador, a espessura deste refratário e sua resistência ao longo do tempo que se traduz na avaliação da durabilidade mecânica, química etc.

Um projeto inadequado expõem a câmara de combustão a falhas estruturais por causa do desprendimento do revestimento refratário, explosões de aerossóis ou ataque corrosivo entre outras, que podem ocasionar o escape de cinzas e gases quentes da câmara, para outras zonas do edifício que comporta a instalação, podendo deflagrar um incêndio e riscos de contaminação /29/.

No corpo da câmara de combustão devem ser instaladas aberturas apropriadas para reparo e/ou substituição do refratário, contaminado ou danificado, assim como visores adequados, pontos para conexões de medidores de pressão, temperatura e outros instrumentos. Além destes, deve haver um queimador para iniciar a combustão, auxiliar na queima de rejeitos com baixo poder calorífico, ou ainda servir como ponto de alimentação e queima de rejeitos líquidos (óleos contaminados).

Desenhos exemplificando uma câmara de combustão primária com sistema de alimentação e coleta de cinzas acoplados e uma câmara de combustão típica são apresentados nas Figura 4.

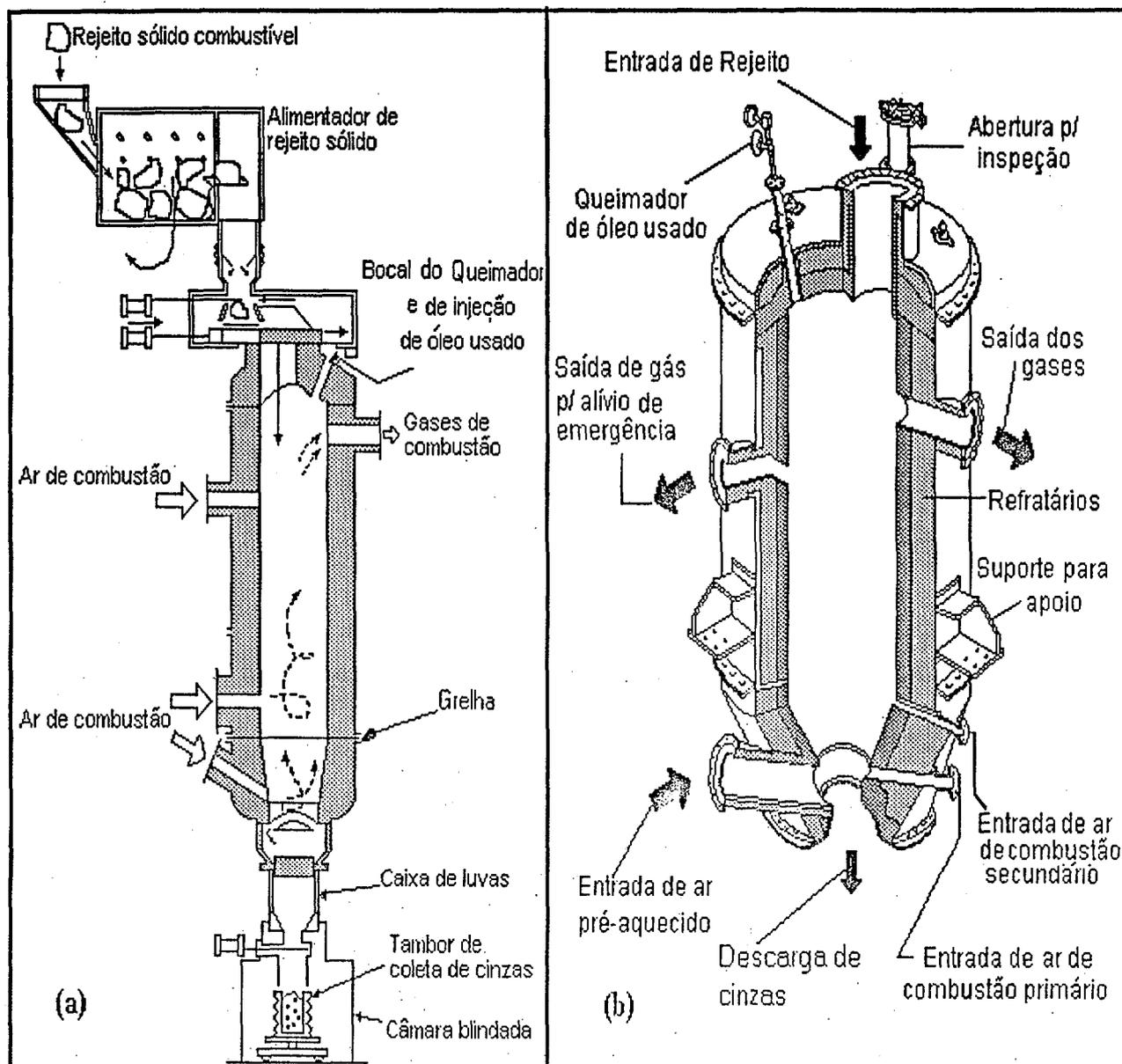


Figura 4. - (a) Câmara de combustão com os sistemas de alimentação de rejeitos e coleta de cinzas genérica; (b) Câmara de combustão típica, do tipo coluna vertical, com capacidade para 750.000 kcal/h e temperatura de 1100 °C /30/.

#### 4.3.2. Câmara de combustão secundária

A câmara de combustão secundária, também denominada câmara de pós-queima ou pós-combustão, é um dispositivo importante e que deve ser avaliado durante o projeto de um incinerador.

A câmara secundária tem como função principal, assegurar a combustão completa do material que está sendo incinerado. Portanto, deve haver um controle adequado da temperatura, turbulência, tempo de residência e volume de oxigênio em excesso para garantir a queima.

Os tipos principais de câmaras de combustão secundárias são: de chama direta, térmicos e catalíticos /31/. Os dois primeiros são similares, diferem, porém, quanto à forma de destruição de vapores orgânicos. No caso de câmaras de combustão secundária de chama direta os vapores passam diretamente através da chama. Na unidade térmica, os vapores permanecem no meio oxidante, a altas temperaturas, por um período de tempo suficiente para completar a reação de oxidação. Os equipamentos catalíticos por sua vez são providos de superfície catalítica para acelerar a oxidação. As câmaras de combustão secundária do tipo térmica são as mais comumente usadas para a incineração de resíduos perigosos. Os do tipo catalítico são usados para a destruição de materiais combustíveis em baixa concentração, não sendo recomendável sua utilização na presença de hidrocarbonetos clorados devido à formação de ácido clorídrico (HCl).

A interface entre as câmaras de combustão primária e secundária deve ser adequada ao fluxo de gás, assegurando uma homogeneização apropriada com o ar de combustão secundário, para um melhor rendimento na queima. Se forem necessárias temperaturas elevadas, deve-se prever o uso de um bico queimador auxiliar.

O material a ser utilizado, na construção da câmara secundária, deve ser resistente às condições ambientais do local (temperatura alta e presença de gases corrosivos), por exemplo,

aço soldável, possuindo ainda linhas refratárias internas, visores adequados, possibilidade de abertura para eventuais procedimentos de manutenção, pontos para conexão de instrumentos de medição e controle e ponto de descarte de cinzas.

Muitos autores incluem as câmaras secundárias como parte integrante do sistema de tratamento de gases. Neste trabalho elas são consideradas como um dispositivo de queima.

#### *4.3.3. Queimadores, grelhas e injetores de ar*

Os queimadores são dispositivos de partida do processo de combustão, que promovem o pré-aquecimento das câmaras de combustão e conseqüente ignição dos rejeitos. Os queimadores são utilizados, ainda, como agentes auxiliares durante o processo, mantendo a temperatura de operação, principalmente na queima de rejeitos com baixo poder calorífico.

A utilização de bicos queimadores não é obrigatória, havendo câmaras que utilizam o aquecimento elétrico do forno até atingir a temperatura de ignição dos rejeitos. Esta prática, porém, não é muito frequente, sendo mais aplicada a utilização dos queimadores ou uma combinação destes procedimentos.

Queimadores especiais são utilizados para a queima de rejeitos líquidos, por exemplo óleos contaminados, solventes e soluções aquosas, funcionando como ponto de alimentação destes rejeitos.

Uma quantidade suficiente de queimadores deve ser instalada nas câmaras de combustão primária e secundária de acordo com as necessidades e características do processo.

Durante a escolha de um queimador, precisam ser analisados alguns pontos como os referentes à temperatura que o item deve suportar; deve conter uma via de acesso para permitir

a entrada de ar que pode refrigerar e minimizar entupimentos ou incrustações por causa de cinzas arrastadas até o seu interior; deve ter um controle automático; capacidade de oferecer uma mistura ar/combustível apropriada; possibilidade de manutenção do lado externo do forno; e condições para se utilizar, como combustível, óleos ou gases que sejam adequados ao processo de combustão. Estes cuidados deverão ser avaliados junto aos diversos fabricantes de equipamentos de combustão existentes, por serem procedimentos padrões no mercado que lida com o projeto e fabricação destes dispositivos.

A grelha é um dispositivo importante no processo de incineração, pois dela depende o rendimento do sistema. Ela serve para atirar e revolver os rejeitos, facilitando seu contato com o comburente, além de propiciar a remoção das cinzas e escórias geradas. São diversos os tipos de grelhas existentes que são desenvolvidas, de acordo com o processo de combustão empregado, proporcionando uma incineração cada vez mais eficiente.

As grelhas podem ser projetadas de diversas formas e tamanhos de acordo com as dimensões e características da câmara de combustão, e geralmente são fabricadas em ferro fundido que suporta até 1400 °C /32/.

Nos últimos anos, diversos tipos de grelha foram estudados destacando-se os sistemas móveis que propiciam maior contato do resíduo com o ar de combustão. As grelhas móveis são utilizadas na queima de resíduos domésticos face ao grande volume de materiais. As grelhas fixas são as mais utilizadas, principalmente para o processamento de volumes menores de rejeitos ou materiais considerados perigosos, porque a sua manutenção é mais fácil, seu custo é menor e minimizam eventuais contaminações radiológicas.

Existem alguns tipos de incineradores que não exigem a utilização de grelhas por exemplo, incineradores com forno rotativo (muito utilizado na queima de resíduos perigosos), com leito fluidizado e os de digestão ácida, entre outros.

Outro dispositivo indispensável aos sistemas de incineração são os injetores de ar, que fornecem o ar necessário à combustão. Este dispositivo é composto por um conjunto de tubulações, válvulas, ventiladores e o próprio bico injetor.

Os injetores devem ser, preferencialmente, cilíndricos e providos com defletores do ar (chicanas) para intensificar a agitação de seu fluxo, melhorando a combustão e a homogeneização dos gases de combustão. Os injetores são confeccionados com materiais como aço soldado e possuem linhas refratárias ou resistentes a temperaturas altas de até 1200 °C.

Os injetores de ar, instalados na câmara de combustão, podem ser divididos em duas categorias: injetores de ar primário, localizados na lateral das grelhas, quando existentes, ou sob estas grelhas, para intensificar a agitação e conseqüentemente melhorar o contato dos rejeitos ainda não queimados com o ar de combustão; injetores de ar secundário, que se destinam a fornecer o ar necessário à queima dos gases resultantes da combustão, são instalados em pontos estratégicos e freqüentemente na parte superior da câmara de combustão. Outra função que se pode atribuir aos injetores de ar é a sua utilização como meio de recirculação dos gases de combustão, misturando-os com o ar de diluição, no sistema de tratamento de gases de incineração, a fim de reduzir sua temperatura.

Estudos recentes vem mostrando que a utilização de oxigênio puro, em substituição ao ar secundário ou de combustão auxiliar, em processos de queima, pode minimizar a presença de elementos que causam o aumento da formação de óxidos de nitrogênio, entre outros poluentes /33/.

#### 4.4. Tratamento de Gases de Combustão

A decomposição térmica de rejeitos radioativos durante o processo de combustão gera efluentes gasosos a temperaturas que podem variar de 300 a 1300 °C, dependendo do processo empregado /27/. No decorrer deste trabalho, estes efluentes serão chamados de *gases de combustão* ou simplesmente *gases* para fins de padronização.

Os gases de combustão tem uma constituição química variada, dependendo fundamentalmente do tipo de rejeito incinerado, suas características e comportamento que também são diferentes. Durante um processo de combustão os rejeitos após a oxidação, se transformam basicamente em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O). É freqüente, contudo, a formação de produtos de constituição insalubre e/ou corrosiva, por exemplo, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), compostos sulfurados (SO<sub>x</sub>), compostos halogenados (HCl, HF), hidrocarbonetos, partículas orgânicas ou minerais, entre outros /53/.

Para o caso particular da incineração de rejeitos radioativos, além das emissões químicas deve-se considerar a radioatividade dos materiais. O processo de incineração não elimina a natureza radiológica dos materiais radioativos queimados mas reduz seu volume concentrando, nas cinzas, grande parte da atividade inicial. A atividade remanescente pode estar distribuída entre o aerossol sólido, particulados não queimados arrastados para as câmaras de combustão secundárias, nos aerossóis líquidos ou vapores e nos gases que passam por tratamento específico antes de serem liberados ao meio ambiente.

Alguns radionuclídeos, por causa de sua natureza química, são elementos semivoláteis, por exemplo iodo (I) e reutênio (Ru) e desprendem-se com facilidade dos materiais incinerados em temperaturas moderadas, até 1000 °C. Outros como o césio (Cs) formam

constituintes voláteis. Existem elementos que formam gases radioativos e que freqüentemente são encontrados em sistemas de combustão, por exemplo dióxido de carbono ( $^{14}\text{CO}_2$ ), vapor d'água de ( $^3\text{H}_2\text{O}$ ), dióxido de enxofre ( $^{35}\text{SO}_2$ ), entre outros.

A título ilustrativo, as composições dos gases resultantes da combustão de rejeitos radioativos são apresentadas na Tabela VII.

**Tabela VII. Características dos gases resultantes da combustão de rejeitos radioativos /27/.**

		TÉCNICA DE COMBUSTÃO			
		ar controlado	ar em excesso	ar em excesso	pirólise
Tipo de rejeito		RCS(1)	RCS	RCL(2)	RCS
Temperatura de combustão (°C)		800 - 1100	800 - 1100	900 - 1300	850 - 950
Compostos presentes nos fluxos de gases (% em massa)	CO <sub>2</sub>	10 - 11	6 - 10	10 - 11	10 - 11
	O <sub>2</sub>	10 - 12	10 - 14	10 - 12	10 - 12
	H <sub>2</sub> O	5	3 - 4	3 - 4	5
	HCl	0,2 - 0,3	0 - 500 ppm normal (3)	-	0,2 0,3
	SO <sub>x</sub>	0,03 - 0,04	0 - 200 ppm normal (4)	-	0,03 - 0,04
	CO	(5)	35 - 60 ppm	(5)	(5)
	NO <sub>x</sub>	-	65 - 180 ppm	-	-
	Hidrocarboneto	(6)	(6)	(6)	(6)
Particulado carregado (mg/m <sup>3</sup> )		< 150	< 1500	< 150	< 150

(1) RCS - Rejeitos Combustíveis Sólidos

(2) RCL - Rejeitos Combustíveis Líquidos

(3) Quando o teor de PVC é alto gera no máximo 0,45 de H<sub>2</sub>O

(4) Quando a quantidade de borracha é alta gera no máximo 0,09% de SO<sub>x</sub>

(5) < 100 mg/m<sup>3</sup> (11% O<sub>2</sub>)

(6) < 50 mg/m<sup>3</sup> (11% O<sub>2</sub>)

TÉCNICA DE COMBUSTÃO					
Tipo de rejeito		pirólise sem adição de O <sub>2</sub>	pirólise sem adição de O <sub>2</sub>	pirohidrólise	escorificação
		RCL(1)	resina(2)	RCS contendo Pu	RCS e RCL
Temperatura de combustão (°C)		300 - 500	300 - 500	600 - 800	1000
Compostos presentes nos fluxos de gases (% em massa)	CO <sub>2</sub>	-	-	-	-
	O <sub>2</sub>	-	-	-	-
	H <sub>2</sub> O	10 - 15	40 - 50	40 - 50	-
	HCl	-	-	1 - 10(3)	-
	SO <sub>x</sub>	-	7 - 14	1 - 2	-
	CO	-	-	5 - 10	-
	NO <sub>x</sub>	-	1 - 1,5	-	-
	Hidrocarboneto	50 - 60	15 - 25	2 - 6	-
Particulado carregado (mg/m <sup>3</sup> )		< 5	< 5	< 5	< 25

TÉCNICA DE COMBUSTÃO					
Tipo de rejeito		leito fluidizado	digestão ácida	fusão em sais(6)	fusão em vidros
		RCS contendo Pu(4)	RCS contendo Pu(5)	RCS	RCS
Temperatura de combustão (°C)		550	250	800	1200 - 1300
Compostos presentes nos fluxos de gases (% em massa)	CO <sub>2</sub>	5 - 10	10	-	-
	O <sub>2</sub>	8 - 10	< 2	-	-
	H <sub>2</sub> O	-	20	-	-
	HCl	-	(5)	-	-
	SO <sub>x</sub>	-	30	-	-
	CO	75 - 500 ppm	2	-	-
	NO <sub>x</sub>	-	30	-	-
	Hidrocarboneto	50 - 500 ppm	-	-	-
Particulado carregado (mg/m <sup>3</sup> )		< 10 ppm	-	-	-

(1) TBP/dodecano

(2) contém água na alimentação

(3) Quando o teor de PVC é alto (> 70%)

(4) Quando o teor de PVC é alto

(5) Quando o teor de PVC é alto (> 70%)

(6) No sal fundido ficam contidos partículas de NaCl e gases ácidos

Como pode ser visto na Tabela VII, os processos de combustão, exceto o de fusão em sais e o de fusão em vidros, devem ter um sistema de tratamento de gases cujo objetivo principal é assegurar que as liberações radiológicas e químicas obedçam os limites estabelecidos por normas e regulamentações vigentes, a fim de assegurar a proteção do meio ambiente contra os riscos que o processo apresenta.

Existe uma grande variedade de componentes e etapas do processo que podem ser combinadas de diversas formas visando o tratamento adequado dos gases de combustão. Conforme já sugerido, em todo o projeto, a complexidade e as características de um determinado sistema de tratamento de gases depende das características dos rejeitos, da técnica de combustão empregada e das normas e legislação envolvidas abrangendo ainda aspectos químicos e radiológicos como nível e tipo de radioatividade.

O sistema de tratamento de gases pode incluir: esfriamento, aquecimento, remoção de particulados, remoção de gases ácidos, tratamento dos hidrocarbonetos etc. combinados de acordo com o projeto.

Geralmente cada sistema de incineração possui um único arranjo dos equipamentos pertencentes ao sistema de tratamento de gases. Porém, a busca de sistemas cada vez mais eficientes, fazem com que alguns países adotem sistemas experimentais contendo vários arranjos possíveis em uma mesma instalação, como é o caso da Coreia do Sul /34/.

Antes da liberação dos gases na atmosfera, o processo de tratamento inclui baterias de filtros com capacidades de retenção específica a cada caso. Do sistema participam unidades para a remoção de partículas arrastadas, remoção de gases ácidos corrosivos (HCl, HF e SO<sub>2</sub>) e unidades para adsorção de elementos radioativos mais voláteis (I). As etapas de esfriamento atuam na redução de temperatura dos gases de combustão para faixas exequíveis à operação dos demais componentes, pertencentes ao sistema de tratamento. Antes da etapa final de filtração, através de filtros de eficiência alta ("High Efficiency Particulate Air - HEPA), é feito um aquecimento a fim

de se aumentar a temperatura do gás, acima do seu ponto de orvalho, evitando a condensação do vapor sobre o filtro.

Para que o sistema de tratamento de gases opere de forma adequada, uma diversidade grande de equipamentos e componentes são empregados. Os componentes principais utilizados são:

- Componentes de filtração para limpeza de gases:

- Filtros para temperaturas altas;

- Filtro de fibra cerâmica;

- Filtro cerâmico (vela cerâmica);

- Filtro pré-revestido ("precoat filter");

- Filtros de metal sinterizado;

- Filtros manga ou saco;

- Filtro a tecido;

- Filtro a feltro;

- Filtros de leito granulado;

- Filtros tipo HEPA.

- Componentes para limpeza de gases, por separação:

- Ciclone;

- Separador gravimétrico (câmaras de sedimentação gravitacional);

- Precipitador eletrostático;

- Coletor de névoa (“demister”);
- Separador centrífugo mecânico.
- Componentes para limpeza de gases por lavagem (“scrubbing”):
  - Torre de lavagem (“scrubbing tower”);
  - Lavador tipo jato de água (“jet scrubbers”);
  - Lavador tipo Venturi;
  - Subsistema de lavagem.
- Componentes para limpeza por absorção ou adsorção:
  - Absorção de líquidos;
  - Adsorção de sólidos.
- Componentes para esfriamento/aquecimento de gases:
  - Injetores de ar;
  - Injetores de água (“Quenchers”);
  - Trocadores de calor.
- Componentes de tiragem de gases:
  - Ventiladores;
  - Chaminé.
- Tubulações e válvulas

A adequação do equipamento ao sistema e a sua eficiência dependem da característica principal do dispersóide, em fase gasosa, que é a dimensão da partícula ou ainda, a faixa em que ela se encontra. A Tabela VIII mostra a eficiência de alguns equipamentos para a limpeza dos gases de combustão associada ao tamanho das partículas.

**Tabela VIII.** Eficiência de limpeza de alguns equipamentos pertencentes ao sistema de tratamento de gases de combustão /27/.

Equipamento	Tamanho/Faixa da Partícula	Eficiência de Limpeza
Filtro HEPA $\Delta P = 250 \text{ Pa}$	$0,3 \mu\text{m}$	99,97% teste do DOP(1)
Lavadores via úmida		
Lavador Venturi $\Delta P = 25 \text{ kPa}$	$0,5 - 1 \mu\text{m}$	90 - 99,9%
Lavador Venturi $\Delta P = 5 \text{ kPa}$	$0,5 - 1 \mu\text{m}$	70 - 95%
Lavador Venturi $\Delta P = 2,5 \text{ kPa}$	$0,5 - 1 \mu\text{m}$	15 - 90%
Torre de lavagem $\Delta P = 0,2-2 \text{ kPa}$	$0,7 - 1,5 \mu\text{m}$	15 - 90%
Filtro cerâmico	$> 5 \mu\text{m}$	99%
Filtro manga	$2 - 10 \mu\text{m}$	85 - 99%
Filtros de leito granulado	$0,2 - 0,7 \mu\text{m}$	99,75
Filtro de metal sinterizado	$> 3 \mu\text{m}$	$> 99,9\%$
Ciclones	$0,5 - 1 \mu\text{m}$	10 - 20%
	$1 - 10 \mu\text{m}$	20 - 85%
	$> 10 \mu\text{m}$	$> 85\%$
Filtro de fibra de vidro	$2 - 10 \mu\text{m}$	85 - 99%
Precipitador eletrostático	$0,5 - 1 \mu\text{m}$	91 - 95%
	$1 - 10 \mu\text{m}$	95 - 99%

(1) DOP - Dioctilftalato, plastificante utilizado na fabricação do PVC tornando-o menos duro. Quando queimado pode apresentar-se como um aerossol líquido.

O processo de tratamento de gases pode ser feito através de dois sistemas básicos: sistema de tratamento via seca e sistema de tratamento via úmida.

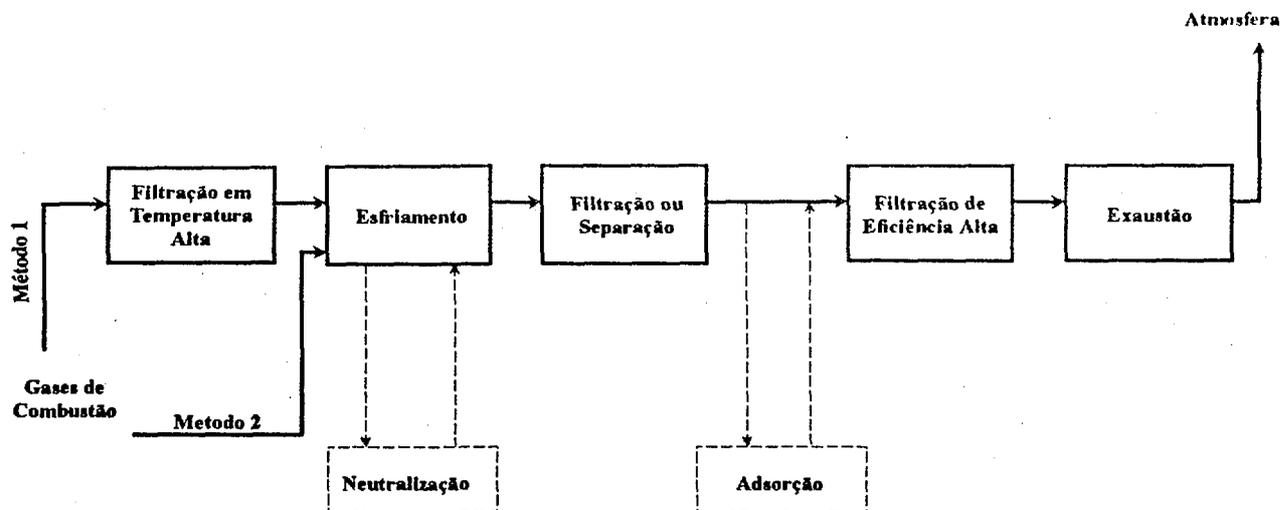
#### *4.4.1. Sistema de tratamento de gases por via seca*

Um sistema de tratamento de gases é definido como por "via seca", quando as etapas de tratamento propriamente ditas e as de esfriamento não são realizadas usando o meio aquoso, ao contrário do processo "via úmida". Quando se emprega sistemas de injeção de água, ou vapor, visando apenas uma redução parcial da temperatura, em conjunto com outras etapas de tratamento a seco, sem, no entanto, ter como objetivo a lavagem dos gases, considera-se o sistema como um tratamento de gases via seca.

O sistema por via seca é mais simples e mais econômico para se operar. Este sistema é aplicado, preferencialmente quando os gases de combustão gerados não exigem a utilização de processos de lavagem com solução aquosa, característico de um sistema via úmida.

O tratamento via seca pode ser empregado quando, nos rejeitos houver baixa quantidade de PVC, ou se a presença de PVC ocasionar a formação de ácido clorídrico (HCl), em níveis superiores aos estabelecidos por norma, desde que seja empregada no sistema uma etapa para a neutralização do ácido pela adição de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Outra situação onde é possível utilizar este sistema de tratamento é quando são incinerados rejeitos contaminados com trítio ( $^3\text{H}$ ), desde que o mesmo seja diluído e liberado juntamente com os gases de combustão tratados. Esta prática apresenta um risco radiológico menor que no sistema via úmida o qual gera uma solução tritiada e que, deverá ser convenientemente gerenciada.

A Figura 5 apresenta um diagrama de blocos típico para um sistema de tratamento de gases por via seca.



**Figura 5.** Diagrama de blocos de um sistema de tratamento de gases por via seca /27/.

As etapas que compõem o sistema de tratamento por via seca são:

#### 4.4.1.1. Filtração em condições de temperatura alta

Nesta etapa a filtração ocorre em uma faixa de temperatura que varia de 800 a 1000°C. Os gases de combustão são filtrados através de elementos filtrantes resistentes à alta temperatura arranjados adequadamente. Os elementos filtrantes podem ser feitos por exemplo de material cerâmico, como o carbeto de silício (SiC) usado nas velas cerâmicas (“ceramic candle”), ou preenchidos com fibra de asbesto e fibra de vidro de sílica-alumina dando origem aos filtros de fibra cerâmica. O elemento filtrante deve estar firmemente sustentado em uma chapa de aço. O corpo do filtro é confeccionado com aço carbono com revestimento refratário ou aço inox para resistir às temperaturas elevadas.

Nas operações contínuas, os elementos filtrantes, podem ser retro-lavados periodicamente com ar pressurizado ou pulsos de ar, durante o uso ou parada.

Os gases com temperatura alta, contêm grande quantidade de partículas sólidas, não queimadas, na forma de hidrocarbonetos, alcatrão e fuligem, passam por filtros com resistência térmica adequada. A remoção do material particulado ocorre sem a sua condensação. Nesta etapa, pode ser feita a combustão completa do material não queimado que se depositou sobre o elemento filtrante mantendo-se a temperatura e os níveis de oxigênio do filtro em faixas adequadas. Desta maneira proporciona-se ao filtro as características de um pós-queimador.

Outros fatores devem ser considerados quando os filtros para temperaturas altas são usados: a existência de um equipamento de descarga e coleta de cinzas acoplado ao filtro e adequado às condições de temperatura e nível de radioatividade, como também as facilidades relacionadas à inspeção e manutenção como visores e acessos secundários.

As Figuras 6 (a) e (b) mostram os esquemas dos filtros para operação em condições de temperatura alta comumente utilizados.

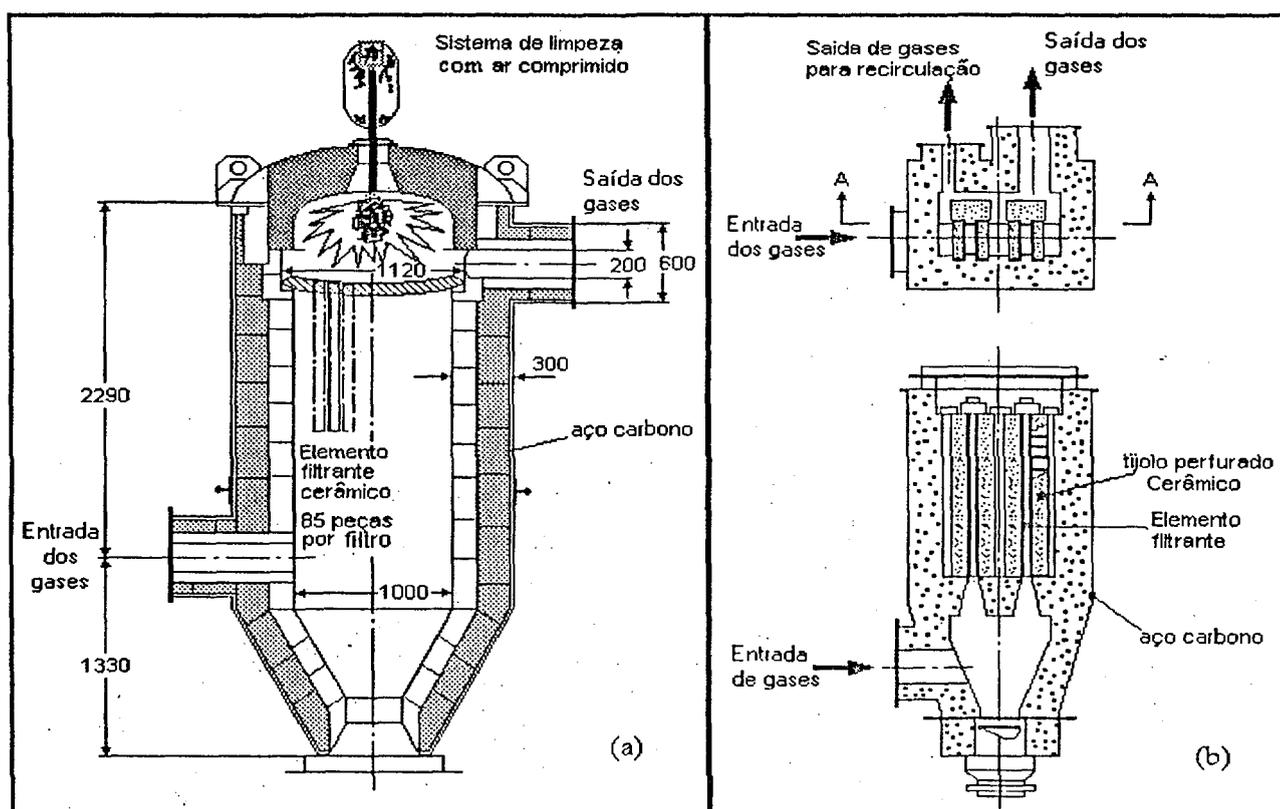


Figura 6. (a) filtro de vela cerâmica com dimensões típicas em mm; (b) filtro de fibra cerâmica /27/

#### 4.4.1.2. Esfriamento

Quando, em um processo de tratamento de gases por via seca, existir uma quantidade muito baixa de material particulado, formado durante a etapa de combustão, não é necessário utilizar filtros para temperatura alta. O esfriamento pode ser a primeira etapa do tratamento, conforme sugere o método 2 da Figura 5.

Pelo método 1 da Figura 5, a unidade de esfriamento recebe os gases da combustão com temperaturas que variam de 700 a 900°C. Pelo método 2, quando não são utilizados os filtros para temperatura alta, os gases chegam, na unidade de esfriamento com temperaturas de 800 a 1300°C.

Para executar a operação de esfriamento, podem ser usados três métodos distintos ou uma combinação destes:

- Injeção de ar;
- Trocadores de calor;
- Injeção de água (“quenching”).

#### - Injeção de ar

Das formas citadas, a injeção de ar é o modo mais simples de se esfriar os gases da combustão. Esta técnica permite um esfriamento dos gases para 600°C ou menos /2/. O sistema de injeção de ar deve possuir, preferencialmente, injetores cilíndricos providos com defletores de gás (chicanas) para intensificar a agitação do fluxo dos gases e melhorar a eficiência do esfriamento.

Os injetores devem ser fabricados com materiais adequados ao ambiente, por exemplo, aço soldado com linhas refratárias, resistentes a temperaturas altas. Apesar deste sistema exigir uma quantidade mínima de equipamentos, sua utilização acarreta o aumento das dimensões dos componentes posteriores a ele por causa do acréscimo significativo do volume de gases a serem tratados (gases diluídos no ar injetado).

#### - Trocador de calor

Outra forma muito utilizada para se esfriar gases da combustão é com equipamentos denominados trocadores de calor ou permutadores de calor. Trocadores ar/gás do tipo casco e tubo onde os gases da combustão, potencialmente contaminados, passam através dos tubos. Estes equipamentos são os mais empregados por causa do custo operacional baixo.

Os gases que passam através dos tubos do trocador possuem contaminantes como particulados, cloretos e óxidos metálicos voláteis, além de metais halogenados e aerossóis de ácidos minerais provenientes da incineração de materiais halogenados como o PVC. Estes contaminantes podem provocar incrustações, corrosão ou erosão dos tubos, causando um aumento no diferencial de pressão e conseqüente diminuição das propriedades de troca térmica. Pode ocorrer ainda o tamponamento total dos tubos. Por causa destes inconvenientes, a limpeza e a manutenção devem ser rotineiras, levando em conta as características radiológicas do meio.

Os materiais utilizados na construção de trocadores de calor devem ser compatíveis com o fluido usado na refrigeração (ar, água etc), e com o fluxo de gases considerando a composição química e a temperatura de operação. Os materiais mais usados para a fabricação de trocadores de calor são o aço inoxidável e as ligas de incoloy, embora outros tipos de metais ou não metais (vidro, grafita impermeabilizada, teflon) podem ser aplicados.

Um fator que pode melhorar o rendimento da refrigeração e a manutenção é a utilização do trocador junto com a diluição prévia do ar de refrigeração. Neste caso pode ser aplicada, como primeira etapa de esfriamento, a injeção de ar, já descrita, seguida do trocador de calor.

A Figura 7 mostra um esquema simplificado de um trocador de calor utilizado no esfriamento dos gases da combustão.

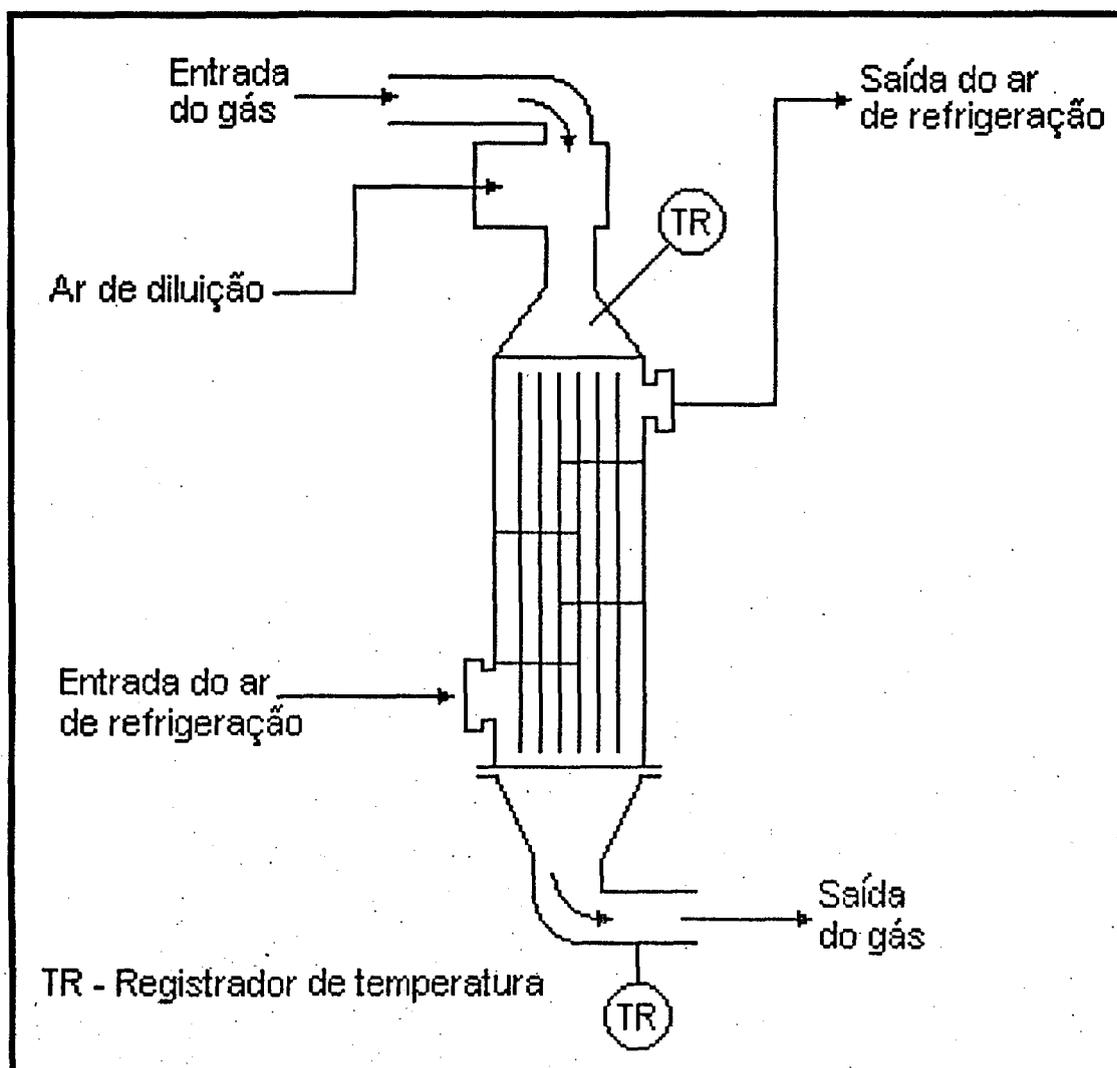


Figura 7. Trocador de calor para o esfriamento dos gases da combustão /27/.

### - Injeção de água (“quenching”)

Os gases da combustão também podem ser esfriados em equipamentos, geralmente confeccionados em formato cilíndrico, onde se injeta água que entra em contacto com o gás em um sistema de fluxo paralelo ou em contra corrente, proporcionando um esfriamento brusco dos mesmos.

Este processo de esfriamento tem como vantagem principal, quando comparado aos dos injetores de ar, a diminuição brusca da temperatura dos gases sem o aumento significativo do seu volume.

A água deve ser desmineralizada a fim de se evitar a formação de produtos indesejáveis durante o processo. A água é injetada em uma torre cilíndrica de esfriamento através de bocais borrifadores, que podem estar instalados no topo da torre. Esta instalação é feita quando os gases são esfriados a menos de 100°C e a quantidade de água em excesso não é considerada um fator limitante. Os bocais borrifadores também podem ser instalados na base da torre, não havendo possibilidade de ocorrer a condensação, da água, borrifada ao longo das paredes da torre, mesmo durante um tempo de contato longo.

Neste processo, o tempo de residência leva em conta a velocidade dos gases da combustão e o diferencial de temperatura desejado. Para as condições de temperatura desejadas o balanço água-vapor é muito importante.

O material usado para a construção deste tipo de equipamento deve ser de ligas ou aço de alta qualidade, resistente à corrosão e temperaturas, possuindo ainda linhas refratárias de aço carbono. Na ausência das linhas refratárias, as paredes da torre devem ser protegidas por um filme de água. O equipamento deve possuir um volume de refrigerante adicional além de um sistema de drenagem adequado.

Esta forma de esfriamento muitas vezes é acompanhada de um sistema de neutralização dos ácidos inorgânicos presentes e é feita com a adição de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) na água injetada. Para este tipo de processo a eficiência de neutralização é da ordem de 50% /2/. A solução é continuamente recirculada com o auxílio de bombas e mantida em uma faixa de temperatura de 40 a 45°C por meio de um trocador de calor externo. O controle da temperatura dos gases da combustão é feito através de ajustes na quantidade de água a ser injetada.

A Figura 8 apresenta um esquema simplificado de um esfriador por injeção de água, se os bocais de injeção estiverem instalados na base do equipamento.

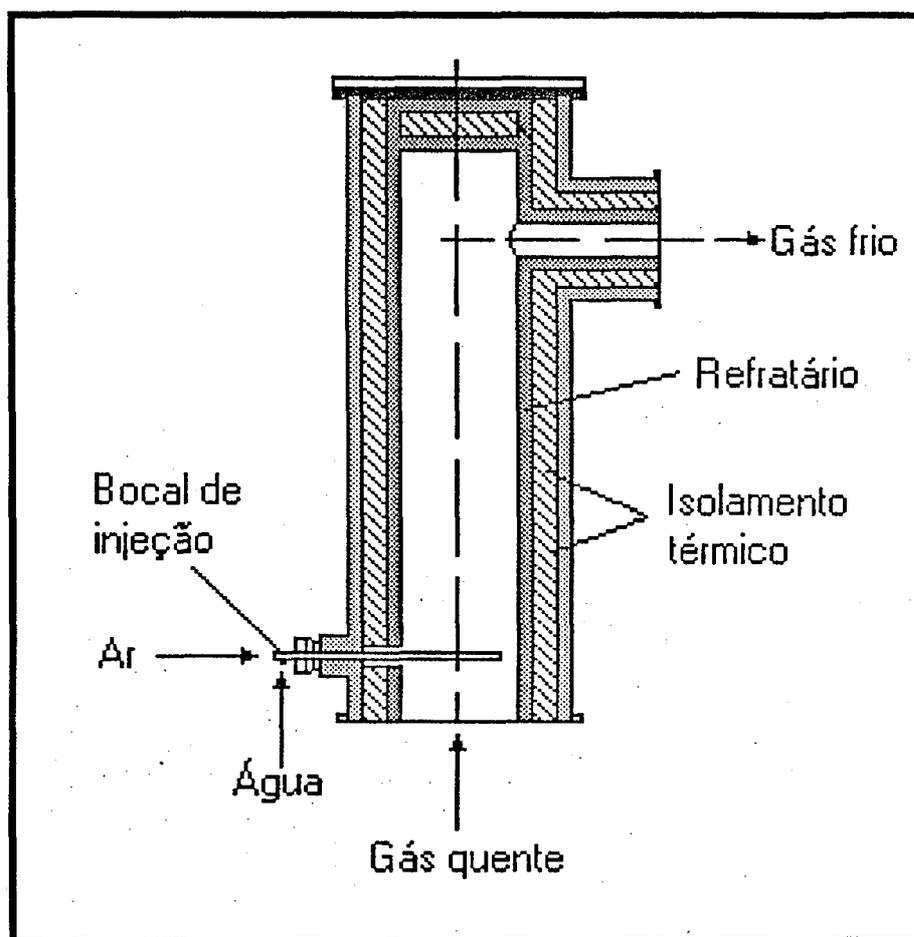


Figura 8. Esfriador de gases por injeção de água ("quencher") /27/

#### *4.4.1.3. Filtração ou Separação*

Os gases da combustão esfriados ou filtrados e esfriados ainda contêm partículas sólidas e pequenas quantidades de radionuclídeos na forma de aerossóis. Para que estes contaminantes sejam ainda mais eliminados, é efetuada uma etapa de filtração ou separação que tem como objetivos principais desempenhar as funções seguintes:

- aumentar a eficiência global de filtração;
- capturar as cinzas volantes que passaram pelo filtro primário; e,
- capturar os radionuclídeos voláteis considerados como material particulado e aerossóis, após a etapa de esfriamento.

Nesta etapa os gases se encontram a temperaturas de 200 ou 220 °C, onde a eficiência de filtração ou separação é normalmente maior do que 99% para partículas maiores que 3 µm como mostra a Tabela VIII /27, 54/. Os componentes mais utilizados nesta etapa são, filtros manga, ciclones, precipitadores eletrostáticos e outros equipamentos capazes de executar a função de separação ou filtração dos gases da combustão.

#### *- Filtros manga ou saco*

A utilização dos filtros manga, considerados como um pré-filtro do filtro HEPA, objetiva reter as cinzas volantes ainda existentes no fluxo de gás. Este gás sofre uma expansão em

uma câmara e passa através dos elementos filtrantes. As cinzas volantes são coletadas sobre a superfície destes elementos.

Existem dois tipos de filtros manga, ambos com eficiência de coleta na faixa de 85 a 99% para partículas de 2 a 10  $\mu\text{m}$  /27/, convenientes para uma operação completamente automática. O primeiro, mais antigo, usa um tecido relativamente fino como meio filtrante (teflon, algodão, lã, nylon etc), e o segundo utiliza o feltro.

No caso específico da filtração de gases da combustão, como etapa prévia a dos filtros de eficiência alta, utiliza-se freqüentemente o teflon como material para confecção, tanto do filtro a tecido como do a feltro.

O filtro manga suporta temperaturas que variam de 200 a 280°C /54/. A temperatura no filtro deve ser controlada através da abertura automática de uma válvula que desvia o fluxo do gás quente dos elementos filtrantes ("bypass"), evitando-se um sobre aquecimento com conseqüente perda de eficiência e danos ao filtro. Outros fatores que devem ser controlados e monitorados respectivamente são, a vazão e pressão do gás, limitando a ocorrência de falhas.

A carcaça do filtro deve ser feita de aço inoxidável resistente a ambientes corrosivos porque pode haver HCl e SO<sub>2</sub> no meio gasoso e deve ser resistente à pressão absoluta de projeto (90000 Pa) e temperaturas superiores à 400°C. /27/.

A unidade de filtragem em questão deve ter:

- uma câmara, adequada às condições de temperatura e nível de radiação, para coleta das cinzas;
- um sistema para a limpeza dos elementos filtrantes (bocais para injeção de ar comprimido);
- um sistema de detecção e combate a incêndio.

Quando se verificar a necessidade de substituição dos elementos filtrantes por causa de tamponamento (perda de carga alta) ou, mais raramente, do nível de atividade do material, os mesmos serão substituídos e considerados como rejeitos radioativos secundários.

A Figura 9 apresenta um tipo de filtro manga, equipado com sistema de ar comprimido para realizar a limpeza e o coletor de cinzas.

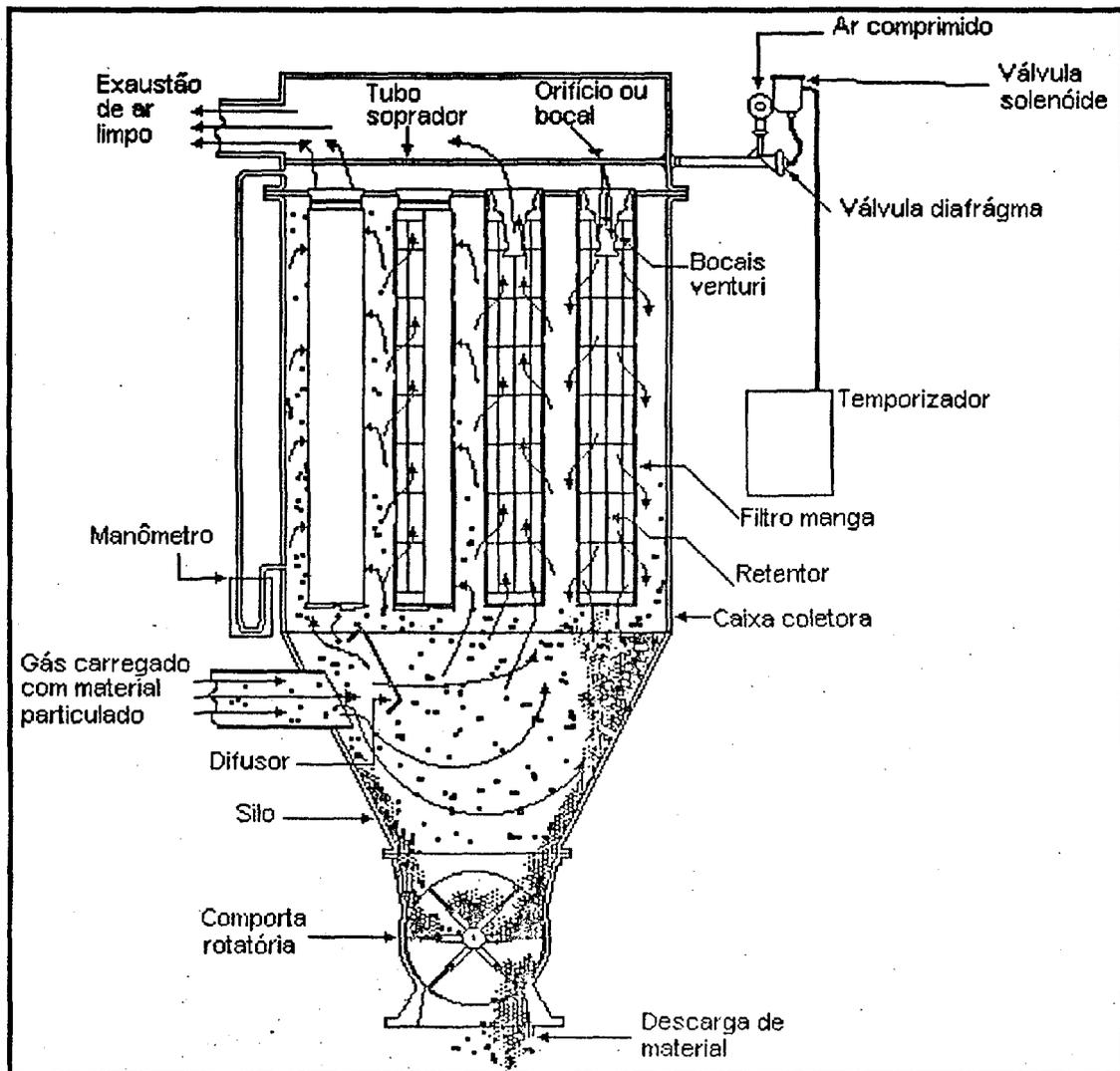


Figura 9. Filtro manga equipado com sistema de ar comprimido e o sistema de coleta de cinzas /27/.

#### - Filtro de leito granulado

Comumente os leitos formados por sólidos granulados são utilizados para a remoção de cinzas volantes e  $\text{SO}_2$  dos gases da combustão com temperaturas superiores a  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , em usinas termoelétricas. A aplicação, como componente de um sistema de tratamento de gases em uma unidade de incineração de rejeitos radioativos, é menos freqüente.

Estes tipos de filtros, constituídos por camadas de areia com granulações sucessivamente mais finas, são utilizados para a remoção de partículas radioativas submicrométricas. A eficiência de coleta típica é de 99,7% para partículas com diâmetro médio na faixa de 0,2 a  $0,7\text{ }\mu\text{m}$  /54/.

#### - Filtros de metal sinterizado

Os filtros de metal sinterizado são utilizados como pré-filtros e/ou para filtração fina antes dos filtros de eficiência alta (HEPA) com o intuito de evitar o tamponamento precoce deste último, bem como para aumentar sua eficiência e tempo de vida útil.

A eficiência de filtração, dos filtros de metal sinterizado para partículas sólidas com diâmetros maiores do que  $3\text{ }\mu\text{m}$ , é maior do que 99,9%. Este filtro é comumente fabricado com aço inoxidável ou um liga de Inconel 600. A temperatura de operação encontra-se na faixa de  $400$  a  $500^\circ\text{C}$  /27/. O equipamento deve possuir também um sistema de limpeza com ar comprimido ou nitrogênio, para casos particulares como os de gases provenientes de um processo de pirólise.

O filtro de metal sinterizado, pode, em determinadas situações, ser utilizado como um filtro para temperaturas altas, quando os gases, ao entrar no sistema de tratamento, estiverem em faixas de temperatura equivalentes aquelas suportadas pelo filtro, isto é, de 400 a 500 °C /27/.

### *- Ciclones*

Os ciclones são dispositivos simples fundamentados na ação gravitacional, na força inercial, na força centrífuga e na viscosidade dos gases. Neles, o gás carregado de material particulado entra tangencialmente numa câmara cilíndrica ou cônica, por um ou mais pontos, saindo por uma abertura central, conforme mostra a Figura 10. As partículas de poeira, em virtude da inércia, tendem a se movimentar para a parede externa do separador de onde são conduzidas para um coletor.

Os ciclones são empregados para remover sólidos e líquidos de gases, e líquidos dispersos em gases. São usualmente adotados para remover os sólidos, no tratamento de gases da combustão, quando estão presentes partículas com diâmetros maiores que 5  $\mu$  /54/. A Tabela VIII mostra que a eficiência de limpeza de gases com partículas com diâmetros menores que 1  $\mu$ m é aproximadamente 20%, enquanto para partículas com diâmetros maiores que 10  $\mu$ m é maior que 85%. É importante notar que a eficiência de limpeza deste tipo de separador é bastante variável e difícil de ser medida por causa de interferências como flutuações do gás, causadas por mudanças na demanda de ar, no processo de combustão, em virtude da composição dos rejeitos radioativos incinerados.

Este dispositivo pode ser encontrado com uma grande variedade de modelos e tamanhos, e normalmente é de grande porte. Para reduzir a possibilidade de corrosão, por causa de gases ácidos (HCl, SO<sub>x</sub>, HF), e erosão (particulados sólidos muito abrasivos), o ciclone deve ser confeccionado com materiais resistentes. Normalmente é empregado o aço carbono e são

usadas linhas refratárias permitindo que o dispositivo seja usado para gases cujas temperaturas estejam entre 200 e 800 °C.

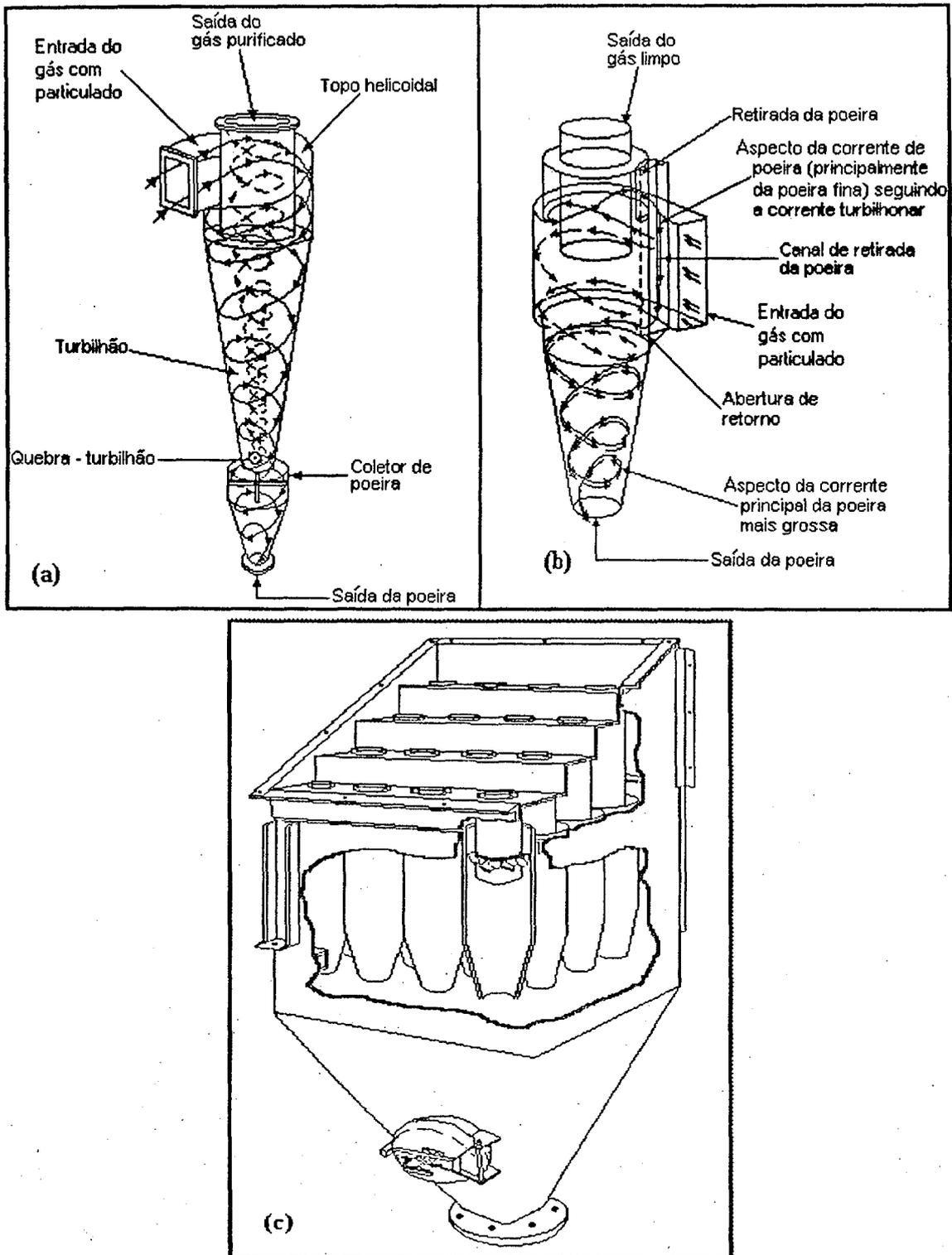


Figura 10. Ciclones comerciais típicos. (a) coletor Duclone; (b) ciclone Van Tongeren; (c) coletor Multi ciclone /54/

*- Precipitador eletrostático*

A coleta de partículas suspensas no gás pode ser feita por precipitação. Uma das formas de se precipitar essas partículas é tornando-as eletricamente carregadas pelo efeito de um campo elétrico. Este processo é aplicado nos precipitadores eletrostáticos onde os mecanismos funcionais envolvem a ionização do a gás e a coleta das partículas.

As etapas que envolvem o processo de coleta são:

- Produção do campo eletrostático para provocar a carga e a migração do material particulado;
- Retenção do gás para permitir a migração da partícula até a superfície coletora;
- Impedimento do re-arraste das partículas recolhidas;
- Remoção das partículas coletadas.

De uma forma geral o precipitador eletrostático não depende das condições dos gases da combustão. A sua utilização é limitada quando existir um excesso de material condutor ou de gotículas de água e temperaturas superiores às suportadas pelo equipamento.

Os precipitadores eletrostáticos podem ser aplicados no tratamento de gases resultantes da incineração de resíduos domésticos em faixas de temperatura entre 250 - 300°C. A faixa mais conveniente, no entanto, é de 150 a 170°C [27].

A Figura 11 mostra um precipitador eletrostático típico.

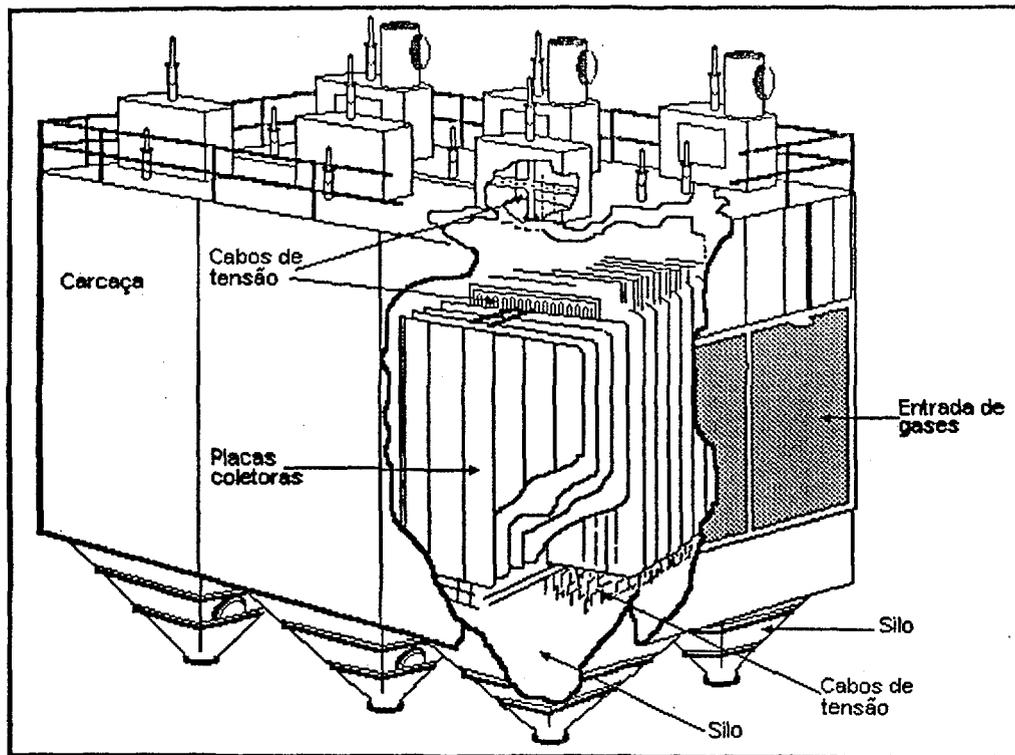


Figura 11. Precipitador eletrostático típico /31/.

Este tipo de equipamento é constituído basicamente de:

- Entrada e saída de gases;
- Seções condutoras;
- Células compostas por uma série de seções condutoras dispostas longitudinalmente;
- Campos compostos por uma série de seções condutoras dispostas lateralmente;
- Isolantes para alta voltagem;
- Placas coletoras (eletrodos);
- Eletrodos de descarga;
- Transformador;

- Batedores a impacto ou vibradores para remoção das partículas coletadas;
- Cabos de tensão;
- Carcaça do equipamento;
- Silos coletores de cinzas.

#### *4.4.1.4. Adsorção*

A adsorção envolve o contato de uma fase fluida livre com uma fase rígida e permanente, granulada, e que possui a propriedade de reter seletivamente uma ou mais espécies contidas inicialmente no fluido.

Podem ocorrer casos particulares em que seja necessário reter algum elemento radioativo do fluxo de gás resultante da incineração de rejeitos radioativos. Por exemplo o iôdo radioativo é normalmente coletado, por adsorção, em filtros de carvão granulado cuja eficiência de coleta é aumentada com a ativação do carvão com iodeto de potássio ou com compostos orgânicos amínicos.

O carvão ativado pode ser usado para gases com temperaturas entre 70 a 200°C. Devem haver cuidados na manutenção destes filtros como evitar a presença de umidade sobre o leito de carvão e a elevação excessiva da temperatura operacional, para que o carvão não perca suas características adsorventes. Outro fator que deve ser levado em conta é a possibilidade de ocorrer ignição espontânea do leito em temperaturas não convenientes ou a presença, no fluxo de gás, de substâncias oxidantes, NOx, em concentrações significativas. Os fatores como tempo de residência e fator de descontaminação também devem ser considerados nas etapas do projeto.

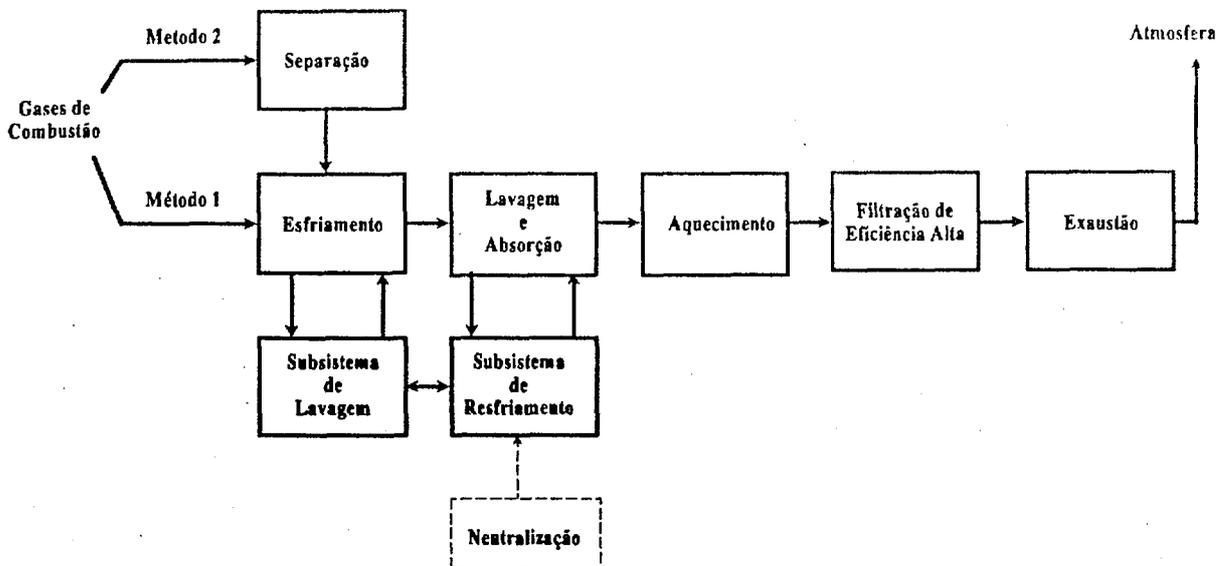
A carcaça do leito de carvão deve ser feita de materiais resistentes à corrosão como o aço inoxidável com juntas de neoprene, ou similar. Muitas vezes este componente é precedido por um filtro HEPA, que evita a passagem de particulados danosos ao leito de carvão.

#### ***4.4.2. Sistema de tratamento de gases por via úmida***

É recomendável usar um sistema de tratamento por via úmida quando o fluxo de gases da combustão apresentar uma quantidade substancial de gases corrosivos, por causa da característica dos rejeitos radioativos.

O sistema contém uma etapa de lavagem dos gases que o caracteriza como tratamento por via úmida. Emprega a recirculação de soluções de lavagem e subsistemas de condicionamento contendo filtros, resfriadores, ajuste químico e componentes de monitoração da radiação. Os gases principais que este sistema procura tratar quimicamente são o HCl, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> ou HF, promovendo, de uma forma global, um fator de descontaminação bem melhor do que o sistema de tratamento por via seca. O sistema por via úmida também pode ser usado para saturar com água, o fluxo de gás nas etapas iniciais ou intermediárias do tratamento.

A Figura 12 apresenta um diagrama de blocos de um sistema para tratamento de gases por via úmida.



**Figura 12.** Diagrama de blocos de um sistema de tratamento de gases por via úmida /27/.

As etapas que constituem um sistema de tratamento por via úmida são descritos abaixo com o objetivo de apresentar, para cada uma delas, os critérios principais a serem vistos, alguns aspectos de projeto, características e desempenho.

#### 4.4.2.1. Separação

Se o fluxo de gás, ao sair das câmaras de combustão, contiver uma quantidade alta de material particulado, é interessante a incluir uma etapa de separação como ocorre no sistema de tratamento por via seca, conforme sugere o método 2 da Figura 12.

Os componentes, comumente utilizados para a execução desta etapa, estão descritos no item 4.4.1.4. Ressalta-se que o equipamento a ser utilizado para a separação deve garantir uma funcionalidade adequada e estar de acordo com as características dos gases, por exemplo temperaturas superiores a 900°C. O ciclone é o equipamento mais adequados para os sistemas de tratamento de gases por via úmida.

#### 4.4.2.2. Esfriamento

A etapa de esfriamento, conforme já descrito, objetiva reduzir a temperatura dos gases provenientes das câmaras de combustão até valores compatíveis e menos agressivos aos equipamentos subsequentes que compõem o sistema de tratamento de gases.

A temperatura em que os gases se encontram a montante do sistema de tratamento, está na faixa de 800 à 1300°C /27/. A etapa de esfriamento, no sistema via úmida, consiste normalmente de um injetor de água ("quencher"), que promove um esfriamento brusco dos gases cuja temperatura cai para valores menores que 100°C. Este equipamento é igual ao empregado em sistemas de tratamento por via seca.

No sistema por via úmida, o processo de esfriamento funciona também como um processo de pré-lavagem dos gases corrosivos considerando-se o líquido de esfriamento, normalmente água desmineralizada, como solução de lavagem. Os ácidos podem ser neutralizados por adição de hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH) na água de lavagem. A solução utilizada neste sistema pode ser reaproveitada na etapa de lavagem dos gases.

#### 4.4.2.3. Lavagem de gases

A função principal da etapa de lavagem é remover contaminantes químicos como  $\text{SO}_x$ , HCl, HF e  $\text{NO}_x$  dos gases da combustão. A lavagem dos gases também permite esfriá-los e remover os radionuclídeos que se encontram na forma de aerossóis e vapores.

Os lavadores são equipamentos em que um líquido, usualmente água desmineralizada ou uma solução cáustica, é utilizado para auxiliar no processo de lavagem dos

gases. O líquido de lavagem novo é adicionado continuamente ao lavador o que proporciona uma eficiência boa de limpeza dos gases. Isto é possível porque, na mesma proporção em que é adicionado uma solução nova, líquidos exauridos deixam o lavador. O líquido exaurido pode ser enviado para a etapa de esfriamento ou ainda retornado ao lavador após sofrer um processo de regeneração, utilizando-se a neutralização e/ou a filtração como meios regenerativos.

Os lavadores de gases são formados por um conjunto de equipamentos que envolvem, bombas, válvulas, tubulações, trocadores de calor e filtros, e muitas vezes podem necessitar de subsistemas para o ajuste químico do líquido de lavagem. O diagrama de um subsistema de lavagem é apresentado na Figura 13.

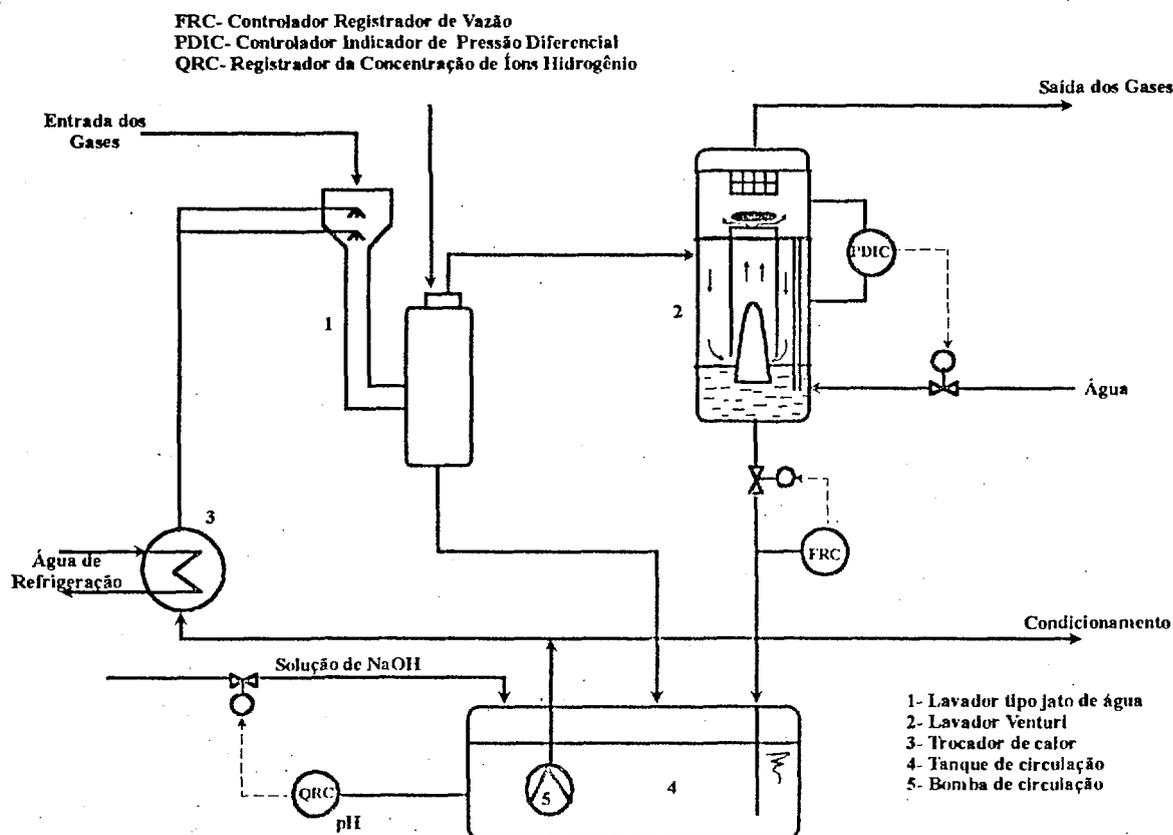


Figura 13. Diagrama simplificado de um subsistema de lavagem /27/

Uma ampla variedade de unidades encontra-se disponível no mercado nacional e internacional; entretanto muitos modelos não foram testados e qualificados para uso em sistemas que envolvam rejeitos radioativos. Este trabalho contempla, portanto, apenas três componentes para limpeza de gases, mundialmente aceitos, além dos subsistemas de lavagem que os compõem.

### - Torre de lavagem

As torres de lavagem são o tipo mais simples de lavadores. A eficiência de limpeza, para partículas com diâmetros menores que  $1\ \mu\text{m}$ , é muito baixa assim como é discutível a eficiência para a remoção HCl e HF, presentes nos gases quando o teor de PVC, no rejeito alimentado, é maior do que 3%

Se em um sistema de tratamento de gases existir mais de uma etapa de lavagem, a torre de lavagem é comumente utilizada em primeiro lugar.

O processo de lavagem de gases em torres pode ser feito quando a temperatura do fluxo de gases estiver na faixa de 50 a 250°C. Desta forma não é causada uma perda de carga superior a 2500 Pa. A razão entre os volumes do gás e o líquido de lavagem deve ser mantida entre 200:1 e 1000:1 /27/. O pH desse líquido é mantido em uma faixa neutra ou ligeiramente alcalina pela adição de NaOH ou KOH.

A carcaça do lavador pode ser fabricada em aço carbono onde internamente são empregados materiais resistentes à corrosão, como ligas com alto teor de níquel (Hastelloy).

### - Lavadores tipo jato de água ("jet scrubbers")

Na maioria dos lavadores de gases há uma queda de pressão porque a água ou a solução de lavagem, constituem uma resistência ao escoamento do gás. No lavador tipo jato de água, contudo, ocorre o inverso. A força motriz do gás é fornecida pela água de lavagem.

Os lavadores tipo jato de água são usados para gases com temperaturas na faixa de 50 a 1000°C, podendo esfriar o gás até aproximadamente 70°C. A razão volumétrica entre o gás e o líquido de lavagem deve ser mantida entre 50:1 a 200:1.

Neste tipo de equipamento a renovação da água de lavagem é semanal, gerando volumes consideráveis de rejeitos secundários por semana de acordo com a capacidade do equipamento.

O projeto deste componente é simples, e a eficiência de limpeza é da mesma ordem que a de uma torre de lavagem. Como material para construção utilizam-se os mesmos descritos para as torres de lavagem, guardadas as suas formas. A Figura 14 mostra um lavador do tipo jato de água.

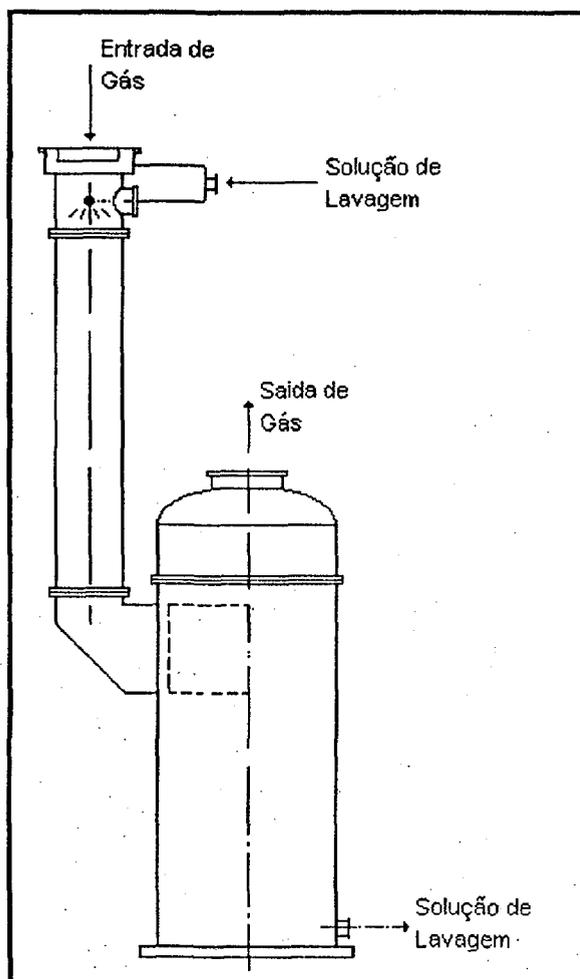


Figura 14. Lavador tipo jato de água típico /27/.

- Lavadores de gases Venturi

A vantagem principal deste tipo de lavador é a circulação interna do líquido sem que seja necessária a utilização de uma bomba de circulação adicional. Outro fator importante deste equipamento é sua capacidade de promover a limpeza dos gases com alto grau de eficiência, em função da perda de carga, conforme mostra a Tabela VIII. Por causa de sua eficiência alta os lavadores Venturi costumam ser utilizados como uma segunda etapa no processo de lavagem com etapas múltiplas.

A razão entre os volumes do gás e do líquido de lavagem deve estar entre 200:1 e 1000:1. A Figura 15 apresenta um modelo de lavador Venturi entre muitos existentes no mercado. Este equipamento pode ser fabricado com aço carbono e linhas de borracha ou plástico apropriados.

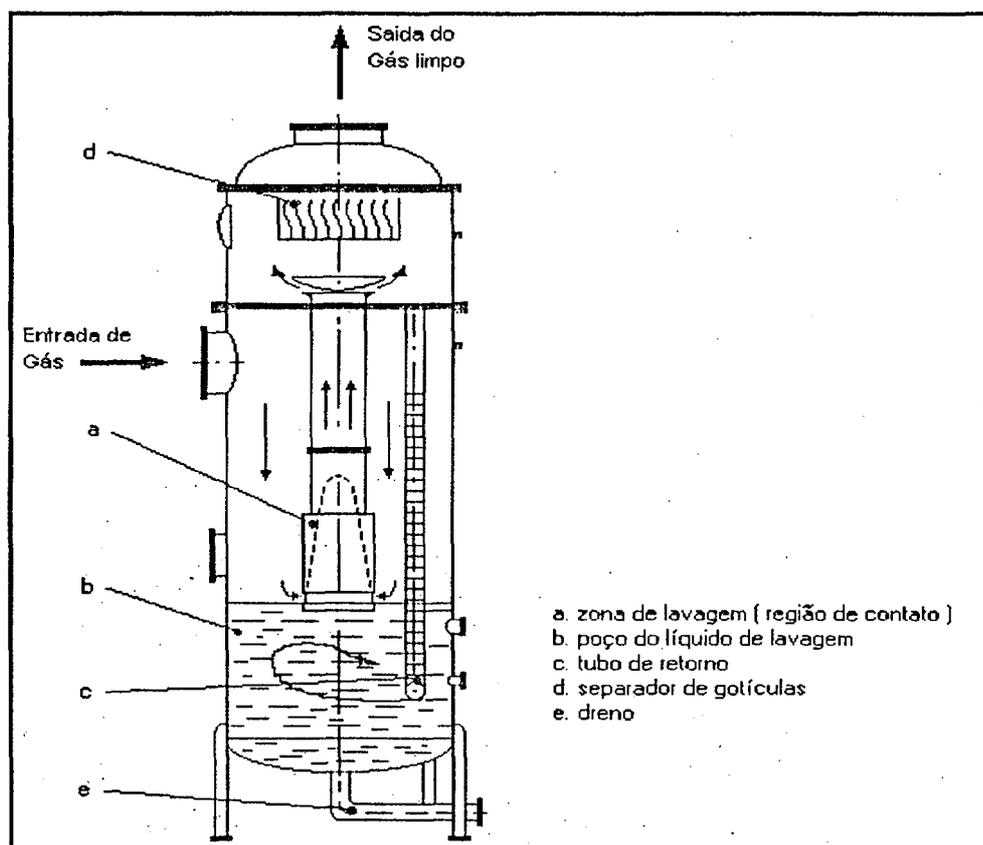


Figura 15. Lavador Venturi tipo Leisegang /27/

O princípio básico do lavador apresentado na Figura 15 é a aceleração brusca do fluxo de gás que proporciona o arraste de gotículas, arrancadas da superfície do líquido de lavagem, para um orifício anular. Ao sair deste orifício as gotas, com velocidade igual à do fluxo de gases, são separadas em um separador de gotículas localizado no topo do equipamento, antes da saída dos gases do lavador. O líquido separado retorna ao poço de coleta via um tubo de coleta. Se for verificado que o líquido de lavagem já está exaurido o mesmo é drenado e considerado como rejeito radioativo secundário.

#### *4.4.2.4. Aquecimento dos gases*

O aquecimento dos gases tem como objetivo elevar a sua temperatura de 30 a 40°C acima do ponto de orvalho, para que não ocorra a condensação nos filtros HEPA, última etapa do tratamento antes da liberação para a atmosfera

Nesta etapa do processo de tratamento costuma-se empregar um trocador de calor com a finalidade de aquecer os gases provenientes das etapas de esfriamento e lavagem.

O aquecimento pode ser feito também com aquecedores elétricos instalados diretamente no fluxo de gases. Neste caso as barras de aquecimento devem ser feitas de material resistente a corrosão.

Outra maneira a ser considerada é o pré-aquecimento dos gases pela adição de ar pré-aquecido. Esta última forma aumenta o volume final a ser filtrado, antes da eliminação para a atmosfera.

#### *4.4.3. Componentes comuns aos sistemas de tratamento por via seca e via úmida*

Algumas etapas apresentadas nos sistema de tratamento de gases via seca e via úmida são iguais, cabendo uma explanação única sobre as mesmas para evitar repetições desnecessárias no transcorrer do trabalho. As etapas são a filtração de eficiência alta e o sistema de compressão/ventilação.

##### *4.4.3.1. Filtros de eficiência alta*

Os elementos filtrantes nos filtros eficiência alta, ou HEPA, são compostos por estrutura fibrosa, papel ou vidro que proporciona uma eficiência de remoção de no mínimo 99,97% para partículas com diâmetros de 0,3  $\mu\text{m}$ . Por causa da característica relacionada à retenção de partículas muito pequenas, é comumente aplicado no último estágio do sistema de tratamento de gases da combustão.

A faixa de temperatura em que estes filtros podem operar, depende do material filtrante e pode variar de 120°C até um máximo de 540°C. Quando é necessário filtrar gases com temperaturas altas é recomendável utilizar uma armação de aço com selante de vidro. Toda a estrutura dos filtros HEPA deve possuir selantes apropriados para evitar vazamentos.

Muitas instalações para incineração de rejeitos radioativos possuem, por segurança e melhor rendimento, um arranjo com dois filtros HEPA que trabalham em série, e como redundância um outro arranjo igual.

O filtro HEPA, como qualquer outro filtro, tem como parâmetros limitantes de operação, a perda de carga do fluxo de gás e a taxa de dose superficial.

Um fator importante para assegurar a durabilidade do elemento filtrante é a manutenção da temperatura dos gases em valores superiores a 120°C, ou no mínimo, 20°C acima do ponto de orvalho dos mesmos. Deve-se, muitas vezes, aquecer os gases antes que entrem no filtro, principalmente nos processos de tratamento de gases por via úmida.

#### *4.4.3.2. Eliminação dos gases*

O lançamento de gases tratados para a atmosfera, em um processo de incineração de rejeitos radioativos é feito por aspiração com um sistema de exaustão composto por ventiladores e uma chaminé.

##### *- Ventiladores*

Ventiladores são utilizados para manter uma pressão negativa em todo o sistema de incineração, em relação ao ambiente do local e ambientes circunvizinhos ao incinerador.

Os ventiladores freqüentemente utilizados possuem pás radiais, e são controlados por um dispositivo que muda a freqüência de um motor elétrico ou uma comporta reguladora de tiragem (“damper”). Devem possuir drenos, acoplados em sua base, para coletar eventuais líquidos que ali sejam formados por condensação.

Os ventiladores, em um sistema de tratamento por via seca, podem ser usados quando a temperatura dos gases estiver entre 200 a 250°C e a pressão diferencial entre 6 e 18 kPa. Em sistemas por via úmida, a temperatura de operação limita-se ao intervalo de 80 a 110°C e uma pressão diferencial de 10 a 30 kPa /27/.

É importante que haja um sistema redundante de ventilação, para garantir a depressão necessária na operação e parada do sistema de incineração.

### - Chaminés

As chaminés devem ser utilizadas visando a remoção rápida dos gases da combustão, com velocidades suficientes para que ocorra uma dispersão adequada na atmosfera. Um dos tipos de chaminé mais empregados consiste de um duto principal, envolvido por uma carcaça contendo em seu interior outros dutos menores que servem para aumentar a velocidade do fluxo.

O projeto de uma chaminé deve estar de acordo com as regulamentações para controle da poluição do ar /14/. Devem ser considerados fatores como a possibilidade de existência de umidade no fluxo gasoso contendo constituintes ácidos que possam ser condensados nos dutos. Para tanto, os dutos são construídos com materiais resistentes à corrosão como o aço inoxidável ou aço carbono. Nas chaminés feitas de concreto reforçado, a superfície interna deve ser revestida com pinturas resistentes à substâncias ácidas.

A chaminé deve ser equipada com drenos, onde se possa coletar líquidos que eventualmente se tenham condensado e contaminado, com poços de inspeção, com pontos para amostragem dos gases, escadas e plataforma de amostragem.

#### 4.5. Gerenciamento de Cinzas

Este item aborda os aspectos principais relacionados ao gerenciamento das cinzas geradas e os métodos que vem sendo empregados nos últimos anos por alguns países que adotam esta tecnologia.

O que torna a incineração uma técnica de tratamento de rejeitos radioativos combustíveis de nível baixo deveras atrativa, é a capacidade de reduzir o volume destes rejeitos a fatores que podem chegar até 100 vezes /35/. Estes fatores tornam-se ainda mais significativos quando o sistema está associado a processos eficientes de tratamento dos gases, gerenciamento de cinzas, a minimização e o processamento adequado dos rejeitos secundários gerados (líquidos de lavagem, filtros usados etc).

O gerenciamento compõem-se, entre outros, de coleta e condicionamento das cinzas permitindo aumentar a capacidade de armazenagem e disposição final dos rejeitos radioativos sólidos, a custos reduzidos e padrões de segurança e qualidade melhores.

Independente da procedência, as cinzas geradas pelo processo de combustão são compostas geralmente por uma mistura de alumina ( $Al_2O_3$ ), sílica ( $SiO_2$ ), carvão não queimado e vários outros óxidos metálicos. Estas diferem entre si somente do ponto de vista radiológico, isto é, seu nível de atividade e tipo de emissão. Embora as instalações de incineração possam ser distintas, as técnicas de condicionamento são similares /36/. A Tabela IX apresenta os compostos freqüentemente encontrados nas cinzas de incineração /36/.

**Tabela IX.** Composição mais comum das cinzas de incineração /23, 36, 40/.

COMPOSIÇÃO	MASSA (%)
SiO <sub>2</sub>	12 - 40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12 - 40
CaO	0 - 30
MgO	0 - 30
TiO <sub>2</sub>	0 - 25
Na <sub>2</sub> O	1 - 16
Cl	0 - 10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 8
ZnO	0 - 5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0 - 5
SO <sub>9</sub>	0 - 2
BaO	0 - 1
ZrO <sub>2</sub>	0 - 1
K <sub>2</sub> O	0 - 1
C	< 5

Do ponto de vista radiológico, as cinzas possuem propriedades que dependem fundamentalmente da radioatividade inicial presente nos rejeitos. A concentração desta radioatividade aumenta por causa da redução de volume. Alguns radionuclídeos podem estar com níveis de concentração insignificantes e outros muito altos, exigindo procedimentos de manuseio e proteção radiológica adequados.

#### *4.5.1. Coleta de cinzas*

Os pontos de coleta principais das cinzas geradas no processo de incineração estão localizados nas câmara de combustão primária, câmara de combustão secundária (pós-queima) e sistema de tratamento de gases (filtros de alta temperatura, ciclone, precipitador eletrostático etc, quando empregados).

A remoção das cinzas, nos pontos de coleta, deve ser feita preferencialmente por gravidade, seja através de regime contínuo ou por batelada. Porém, é necessário que nos pontos

de coleta seja possível o esfriamento das cinzas antes da transferência para a etapa de condicionamento. Toda operação de coleta deve ser executada sob condição de pressão negativa em relação à pressão ambiente a fim de minimizar possíveis fugas.

As cinzas podem ser coletadas em tambores metálicos, acoplados diretamente ao incinerador através de conectores com fecho hermético, ou dispostos dentro de uma câmara que deve permitir o manuseio indireto do tambor por operação remota ou manualmente com a proteção de luvas, dependendo do nível de atividade das cinzas. Essa câmara deve ser blindada, ter sistema de tampa dupla na interface entre os pontos de coleta e a câmara, conexão com um sistema de ventilação especial equipado com componentes de filtração apropriados, além de outros itens que sejam necessários, de acordo com as características do projeto.

A Figura 16 exemplifica um coletor de cinzas onde é possível observar a embalagem acoplada a caixa de coleta, a caixa propriamente dita, visores, manipuladores e luvas



Figura 16. Coleta de cinzas

#### *4.5.2. Condicionamento de cinzas*

As cinzas, após a coleta, são transferidas para áreas de armazenagem temporária de rejeitos. Porém recomenda-se que as cinzas sejam tratadas através de processos adequados que favoreçam a obtenção de um produto final de qualidade melhor, garantindo maior segurança e custos de armazenagem reduzidos.

Os processos de condicionamento de cinzas comumente empregados em vários países são a solidificação com agentes imobilizadores específicos, a supercompactação e a vitrificação. Esta última é considerada uma técnica especial de imobilização por causa das características peculiares e excelentes resultados /38, 39, 40, 41/.

Os processos de imobilização consistem basicamente da fixação das cinzas de incineração dentro de embalagens apropriadas (tambores metálicos) pela adição de agentes imobilizadores. O produto final é uma mistura homogênea, sólida e monolítica, que reduz a mobilidade dos radionuclídeos presentes e conseqüentemente diminui o potencial de liberação destes para o meio ambiente, durante as etapas de manuseio, transporte, armazenagem e disposição final. Existem vários materiais que podem ser empregados como agentes imobilizadores, entre os quais destacam-se o cimento, polímeros, betume, misturas cimento/polímero e outros.

A supercompactação é um processo no qual promove-se a prensagem de embalagens metálicas com capacidade de 100 litros preenchidas com cinzas a uma pressão que pode alcançar até 150 MPa. Os produtos obtidos (pastilhas) são colocados em embalagens maiores, tambores metálicos com 200 litros de capacidade e fixados com pasta de cimento. Este procedimento permite uma redução maior do volume das cinzas e reduz riscos de acidentes durante as etapas de armazenagem, transporte e disposição final.

O processo de vitrificação é uma técnica comumente empregada na imobilização de rejeitos de nível alto de atividade. O emprego desta técnica no condicionamento de cinzas vem sendo estudado principalmente na França pela "Commissariat à l'Energie Atomique" (CEA) - Comissão de Energia Atômica, associada à Comissão da Comunidade Europeia. O processo consiste na mistura das cinzas de incineração, um agente de fundição (areia, clinker de cimento etc) e aditivos, em um cadinho metálico. Testes preliminares mostraram que as cinzas podem ser fundidas, com ou sem o auxílio de aditivos, em temperaturas próximas a 1400°C. Esta técnica possibilita a fundição de cinzas com qualquer composição, obtendo-se um aglomerado vítreo com características excelentes, a custos menores /36/.

Com o intuito de ilustrar a importância de se realizar um gerenciamento das cinzas de incineração, para obtenção de uma redução máxima de volume e conseqüente minimização nos custos de processamento e disposição final, apresenta-se nas Figuras 17 e 18, uma comparação entre os fatores de redução de volume obtidos pelos processos de condicionamento descritos e o volume inicial das cinzas brutas e uma estimativa de custos destes processos, respectivamente /40/.

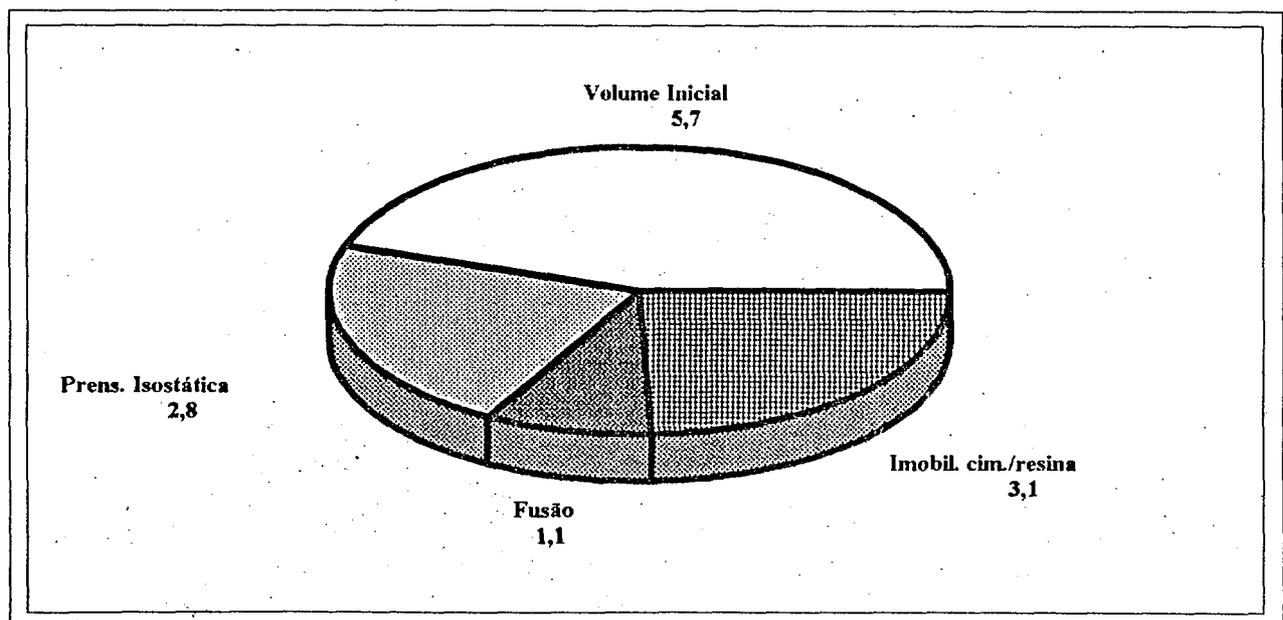


Figura 17. Comparação entre o volume inicial e o final das cinzas após seu condicionamento em estudos desenvolvidos pelo CEA, na França, com rejeitos simulados contendo Pu /40/.

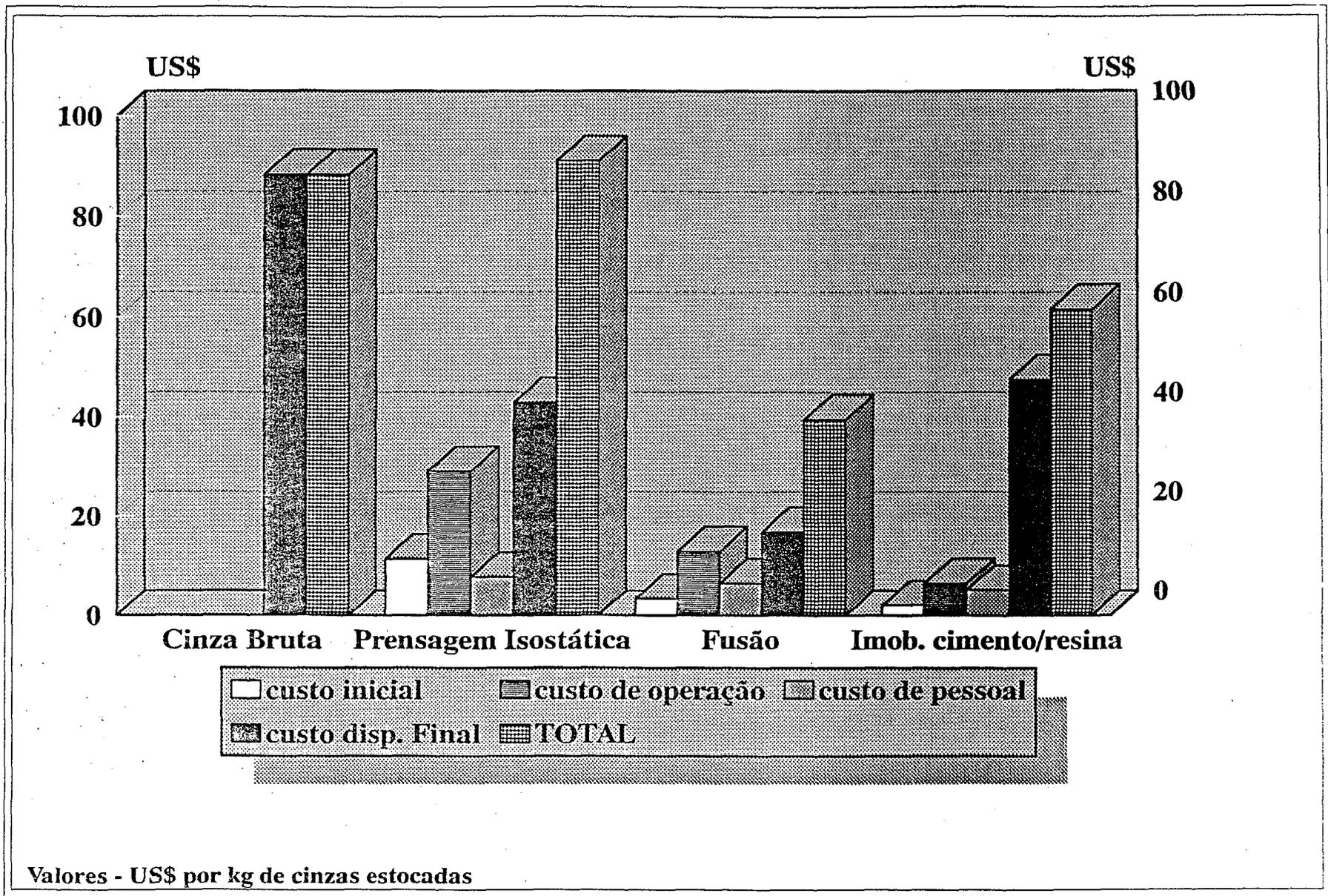


Figura 18. Estimativa de custo dos processos de condicionamento de cinzas realizado pela Comissão da Comunidade Europeia /40/.

#### 4.6. Instrumentação e Controle do Processo de Incineração

A instrumentação e os controles do processo de incineração incluem sensores, chaves de controle e indicadores de posição para componentes e válvulas, assim como outros instrumentos de processo e equipamentos de controle automático necessários para garantir uma operação segura e confiável.

Um sistema de incineração de rejeitos radioativos de nível baixo é composto essencialmente por malhas de controle que medem parâmetros como: temperatura e pressão nas câmaras de combustão e perda de carga nos filtros. Adicionalmente, alguns parâmetros típicos podem ser medidos dependendo do sistema de incineração projetado, por exemplo: temperaturas em diferentes pontos dentro do sistema de tratamento dos gases; fluxos de ar e gases de combustão e ar de refrigeração; níveis nos tanques de solução de lavagem; taxa de alimentação de rejeitos para o incinerador; fluxo do gás ou líquido necessários para os queimadores; posições mecânicas de válvulas, portinholas e outros dispositivos mecânicos importantes; pH da solução de lavagem; hidrocarbonetos que saem das câmaras de combustão via gases; concentração de material particulado nos gases de combustão; temperatura de entrada do filtro HEPA etc.

Todos estes parâmetros descritos são praticamente os mesmos encontrados em um sistema de incineração de resíduos convencionais.

As chaves de controle remoto são empregadas para minimizar ao máximo a exposição dos operadores à radiação. Estes sistemas de controle possuem intertravamentos de segurança para prevenir condições de operação indesejáveis e inseguras e diminuir a possibilidade de erros do operador. Todo o sistema de controle, mesmo totalmente automatizado, deve permitir intervenções manuais durante ocorrências anormais.

Toda a monitoração e controle do processo de incineração devem ser feitas em uma sala de controle. Pontos específicos do processo podem exigir um painel de controle local,

por exemplo: carregamento de rejeitos para o sistema de alimentação; descarga de cinzas; e componentes pertencentes ao queimador. Esses painéis devem estar interligados com a sala de controle central do incinerador.

As características principais relacionadas às tecnologias de controle e monitoração de processos, são abordados a seguir.

#### ***4.6.1. Tecnologia de controle de processos***

A tecnologia de controle de processo tem como função manter um sistema qualquer dentro de limites pré-determinados que possibilitem uma operação segura. Para tanto, a manipulação das variáveis de processo são feitas por uma série de malhas de controle que utilizam controles com retroalimentação ("feedback"), controles antecipatórios ("feedforward") ou uma combinação destes, capazes de executar operações seguras e sem grandes oscilações.

Uma malha de controle fechada opera através da realimentação de informações referentes a uma variável controlada que atua sobre uma variável manipulada. Tipicamente esta malha de controle requer um sensor associado a um conversor ou transmissor (elemento primário) para medir e transmitir o sinal da variável, e um controlador para comparar o valor medido com o ponto de ajuste ("setpoint"), enviando um sinal para o elemento final de controle. Em um sistema automático, pode-se fazer o controle através de uma ou mais das formas seguintes /42/:

- Proporcional: o sinal para o elemento de controle e a resposta resultante, são proporcionais ao desvio medido da variável controlada, pelo ponto de ajuste ("setpoint");
- Liga/desliga ("on/off"): o sinal de saída do controlador assume apenas dois valores, 0 ou 100%, ou seja, o elemento final de controle se desloca instantaneamente entre as posições de mínima e de máxima, de acordo com o sentido do desvio;

- Proporcional e Integral: usado para eliminar o desvio permanente ou erro de regime ("offset") do controlador proporcional puro. O modo integral adapta um sinal para o elemento de controle que é proporcional a integral do desvio da variável controlada;
- Ação Derivativa é quando o controlador antecipa o caminho a ser seguido pelo processo, pela medição da taxa de mudança do desvio da variável controlada via ponto de ajuste e adapta uma ação de controle proporcional à derivada do desvio para finalizar a mudança, restabelecendo o equilíbrio.

A Figura 19 apresenta a resposta de um sistema de controle, mostrando o efeito das várias ações de controle.

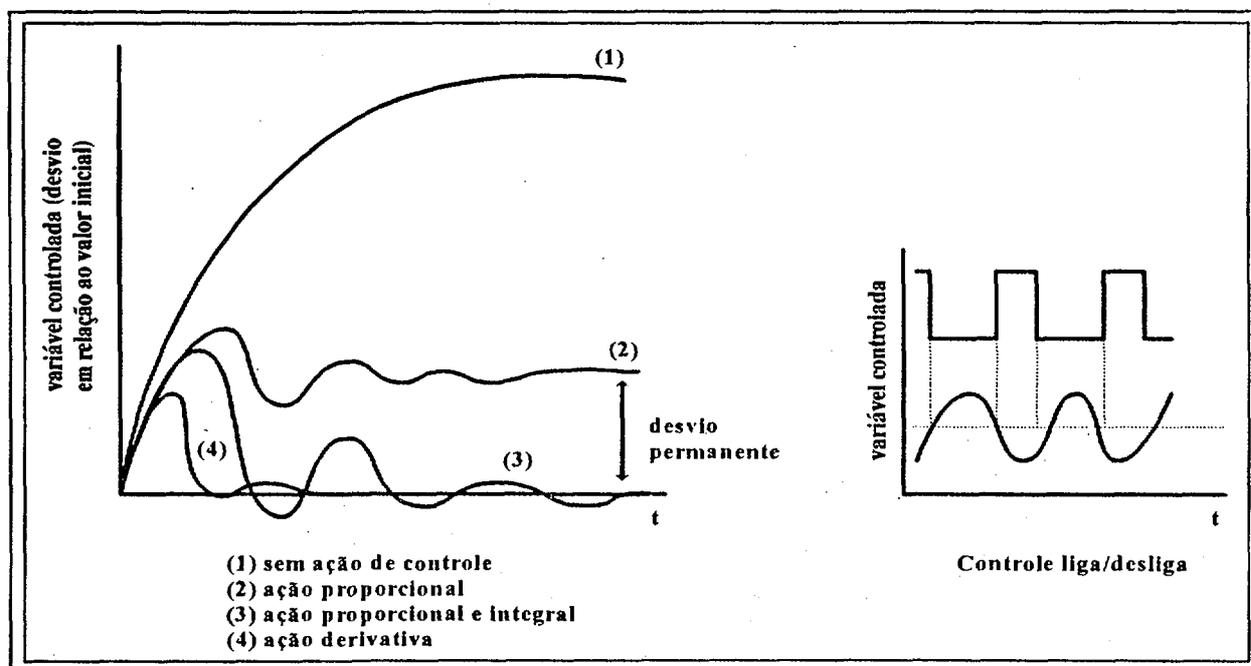


Figura 19. Resposta de um sistema de controle mostrando o efeito das várias ações de controle /42/.

Portanto, para um controle com retroalimentação, a ação de controle existe independentemente da ação causadora do desvio. Por outro lado a ação só ocorrerá após a detecção de um desvio, isto é, se o valor medido é diferente daquele ponto de ajuste, havendo sempre um atraso na atuação sobre a variável manipulada e subseqüente efeito sobre a variável

controlada. Além disso o valor da variável manipulada necessário para restabelecer o equilíbrio é encontrado pelo método das tentativas e erros. A Figura 20 mostra um diagrama esquemático de uma malha de controle por retroalimentação.

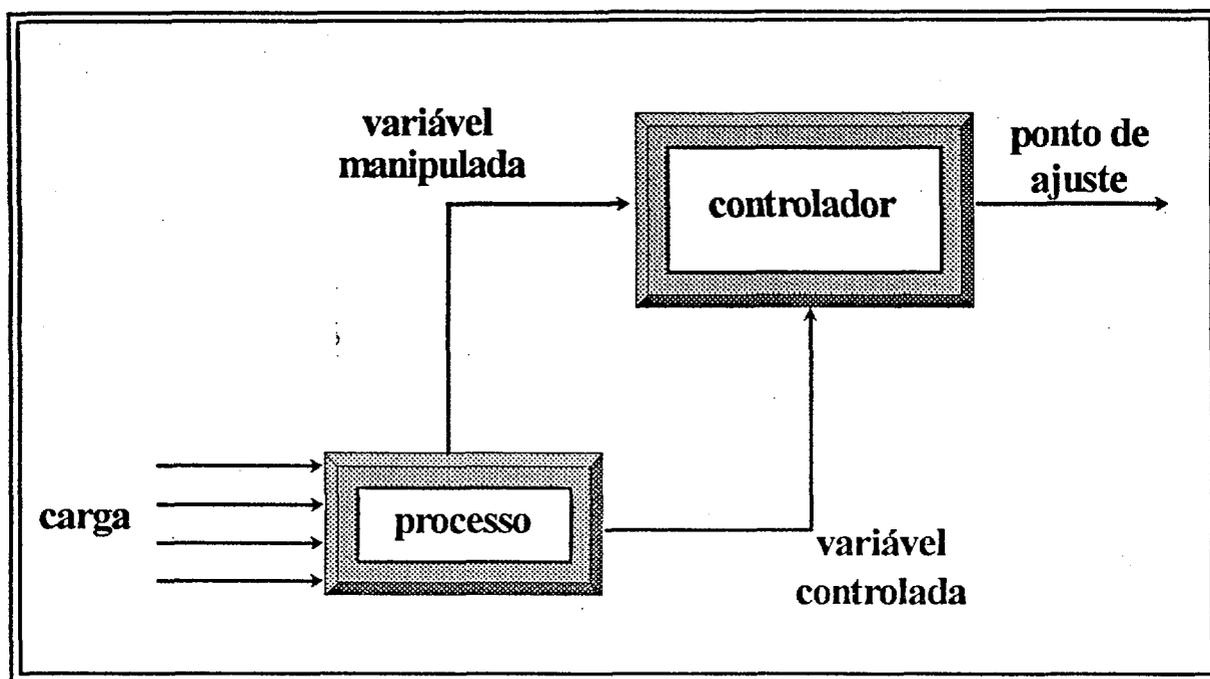
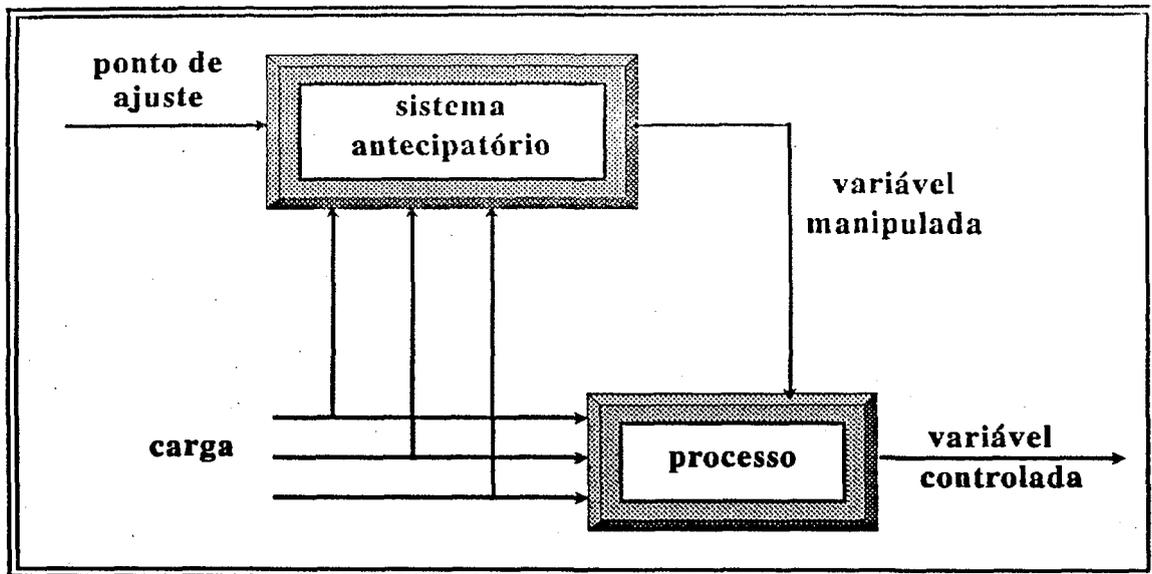


Figura 20. Diagrama esquemático de um malha de controle por retroalimentação.

A malha de controle antecipatório é aplicável quando a principal fonte de perturbação pode ser medida e seu efeito pode ser quantificado, antes que provoque desvios na variável primária controlada. Neste sistema as funções requeridas representam um modelo matemático do processo que permite antever qual será o novo valor da variável controlada, decorrente das perturbações num dado instante, incluindo as características em regime estacionário e dinâmico. A Figura 21 mostra um diagrama esquemático de uma malha de controle antecipatório.



**Figura 21.** Diagrama esquemático de uma malha de controle antecipatório.

O controle antecipatório melhora a capacidade de resposta para alterações sucessivas no processo, tornando-os muito rápidos, mas de baixa precisão. Neste sistema não há necessidade de existir qualquer diferença entre o valor desejado e o real para que a ação corretiva exista, enquanto no sistema de retroalimentação, esta ação só se processa quando existir essa diferença. Esta consideração permite afirmar que apenas o sistema antecipatório é capaz de promover o controle perfeito, enquanto o de retroalimentação não.

Mesmo sabendo-se das qualidades técnicas de um sistema antecipatório, a impraticabilidade econômica e/ou técnica de prever com exatidão a intensidade da ação corretiva, para atingir resultados satisfatórios, tornam o sistema de retroalimentação comumente mais empregado.

Para suprir estas dificuldades recomenda-se uma avaliação da razão custo/benefício, visando o emprego de um sistema misto com um controle antecipatório e de retroalimentação.

As funções de controle, de algumas etapas típicas de um incinerador, são descritas resumidamente a seguir:

#### *4.6.1.1. Sistema de alimentação*

Em um sistema para o controle da alimentação de rejeitos, fixa-se o valor desejado (ponto de ajuste) de uma variável do processo em um controlador. O valor fixado pode ser uma taxa de alimentação, comumente empregada em sistemas que operam continuamente, ou o massa da carga em sistemas de alimentação que trabalham por bateladas. No sistema de alimentação contínua, podem ser utilizadas esteiras ou roscas transportadoras que determinam a massa do rejeito transportado à câmara de combustão, via um medidor de massa (p.ex. células de carga), que transmite o valor medido ao controlador, comparando-o com o valor previamente fixado. Este dado atua sobre a velocidade do transportador e indica um desvio, se ocorrer. No sistema por batelada o controle é feito através de uma balança onde se determina a massa da batelada comparando-a com o valor estipulado para o processo. Em se tratando de rejeitos líquidos, a taxa de alimentação é controlada via vazão de alimentação, utilizando-se um medidor de vazão interligado a uma válvula de controle.

#### *4.6.1.2. Controle da combustão*

O sistema de controle do processo de combustão visa, principalmente, manter seguros os padrões de temperatura da câmara de combustão primária e se houver, câmara secundária de pós queima. Para tanto exige-se uma interação das malhas de controle relacionadas à temperatura das câmaras, taxas de vazão de combustível auxiliar, taxas de vazão de fluido refrigerante, quando existir, e fluxo de ar para a combustão. Como alternativa, também é viável a inter relação entre as malhas de controle do processo de combustão e sistema de alimentação. É importante ressaltar que o sistema de controle de combustão varia com o tipo de incinerador e técnica de combustão empregada.

Como exemplos são apresentados os sistemas de controle da combustão comumente empregados em incineradores de ar controlado e de leito fluidizado.

#### *Incinerador de ar controlado*

As temperaturas das câmaras de combustão primária e secundária são as variáveis que devem ser controladas neste tipo de incinerador. A temperatura na câmara primária é controlada pela variação no fluxo de ar de combustão ( $O_2$ ). Se a temperatura medida é maior do que o valor pré-fixado no controlador, ocorre um aumento no fluxo de ar pelo ponto de injeção de ar. Como consequência a taxa de combustão é diminuída, com posterior queda da temperatura. Ocorre o inverso quando são detectados valores de temperaturas menores que o valor pré-fixado /23/.

#### *Incinerador de leito fluidizado /23/*

A temperatura, a quantia de ar em excesso e a taxa de injeção de calcáreo são as variáveis de controle mais importantes em incineradores do tipo leito fluidizado. Nestes incineradores a temperatura é associada às condições transientes porque a capacidade de retenção do calor no leito é alta. Por isso é usado combustível adicional, complementar, da mesma forma como na injeção de água e controle do ar para que o controle da temperatura seja adequado. É importante manter um fluxo de ar mínimo, para garantir a fluidização do leito. Para o ajuste de  $O_2$  são usados analisadores de  $O_2$  como forma de controlar o ar em excesso. Outro ponto importante é o controle do fluxo de injeção de calcáreo no leito que permite a remoção dos gases ácidos formados e auxilia o sistema de tratamento dos gases de combustão.

#### *4.6.1.3. Controle do sistema de tratamento de gases de combustão*

Os diversos equipamentos que compõem um sistema de tratamento de gases provenientes das câmaras de combustão do incinerador, também devem ser controlados em vários aspectos. O sistema de controle é adaptado ao arranjo dos equipamentos empregados e suas características. Entre os sistema de tratamento por via úmida ou por via seca, o primeiro exige um controle mais severo.

Em termos gerais, as variáveis principais a serem controladas são: pH, através de sensores próprios acoplados às válvulas de controle de adição de líquidos de neutralização; nível de água drenada para os tanques coletores através de válvulas de controle; teor de sólidos totais dissolvidos via medição da condutividade elétrica de amostras da água de processo; razão gás/líquido controlado por válvulas de controle de água via medidor de vazão; temperatura de saída de alguns componentes para garantir a integridade de outros componentes, perdas de carga etc.

#### *4.6.2. Tecnologia de monitoração de processos*

Para complementar o sistema de controle de processos, é usado um subsistema de monitoração para garantir a operação segura e prevenir a emissão descontrolada de materiais radioativos e tóxicos para o meio ambiente. Os sistemas de controle são projetados para manter as variáveis de processo dentro de limites seguros de operação. Existem sistemas de monitoração que alertam o operador sempre que as variáveis de processo aproximam-se dos limites de operação, mantendo-as dentro de limites seguros.

O funcionamento deste subsistema de monitoração ocorre automaticamente e compõem-se de alarmes, cortes no sistema de alimentação ("feed cutoffs") e desligamento do equipamento ("equipment shutdown") em condições atípicas da operação.

O alarme alerta o operador sobre uma situação de desvio de uma variável monitorada pelo sistema, proporcionando, em tempo hábil, possibilidade para uma intervenção do operador.

Quando ocorre um desvio no sistema que possa causar emissões de material radioativo ou tóxico ao meio ambiente, fora dos padrões exigidos por normas, realiza-se o corte no sistema de alimentação de rejeitos, sem afetar outro equipamento envolvido no processo.

O desligamento geral de um equipamento que compõem o sistema de incineração é feito quando surge uma situação que possa criar condições de operação perigosas ou danos ao equipamento monitorado.

A Tabela X apresenta as variáveis principais monitoradas por alguns componentes que fazem parte do processo de incineração e mostra alguns comentários sobre a monitoração destes componentes.

#### **4.7 Monitoração da Radiação**

Nesté item são abordados os pontos pertencentes às instalações de um incinerador, que exigem monitoração adequada do ponto de vista radiológico e, complementam o sistema de controle e monitoração do processo já descritos. Desta forma garante-se a operação segura do incinerador e mantém-se a proteção radiológica adequada de modo a não haver riscos de contaminação dos operadores, equipamentos, da instalação, do público e do meio ambiente.

**Tabela X. Monitoração em um processo de incineração /23/**

Sistema	Variável Monitorada	Desligamento	Corte na Alimentação	Alarme	Registro	Tipo de Incinerador	Comentários
Alimentação de sólidos	triturador		•	•		todos	o triturador deve estar operando para que o sistema de alimentação receba os rejeitos adequadamente preparados
	taxa de alimentação				•	todos	deve ser monitorada para satisfazer as exigências do processo
Alimentação de líquidos	taxa de alimentação				•	todos	deve ser monitorada para satisfazer as exigências do processo
	pressão baixa		•	•		todos	é necessária uma pressão suficiente para uma atomização adequada
	pressão alta		•	•		todos	a pressão alta pode causar excesso de chama
	temperatura baixa		•	•		todos	é necessário para adequar a atomização dos rejeitos que necessitam de pré-aquecimento
Meios de atomização	pressão baixa		•	•		todos	é necessária uma pressão suficiente para que seja feita uma atomização adequada
Injeção de calcário	taxa de alimentação		•	•	•	leito fluidizado	é necessária para remover adequadamente os gases ácidos

Tabela X. (continuação)

Sistema	Variável Monitorada	Desligamento	Corte na Alimentação	Alarme	Registro	Tipo de Incinerador	Comentários
Câmara primária	temperatura alta	•	•	•		todos	promove o desligamento dos queimadores da câmara primária para proteção do equipamento
	temperatura baixa		•	•		todos	o corte na alimentação é exigido para assegurar a destruição adequada dos rejeitos
	perda da tiragem		•	•		todos	exige o corte na alimentação de rejeitos a fim de minimizar a fuga dos gases do incinerador
	concentração de O <sub>2</sub> baixa, ou falha, no analisador		•	•	•	leito fluidizado	é exigido corte na alimentação para garantir uma boa destruição dos rejeitos na queima
	concentração de CO alta, ou falha, no analisador		•	•	•	leito fluidizado	é exigido o corte na alimentação para garantir a destruição adequada dos rejeitos durante a queima
Queimador	pressão alta do combustível		•	•		todos	aplicada para prevenir a extinção da chama por causa da expulsão de ar
	pressão baixa do combustível		•	•		todos	aplicada sempre que o queimador está operando, para prevenir chamas instáveis

Tabela X. (continuação)

Sistema	Variável Monitorada	Desligamento	Corte na Alimentação	Alarme	Registro	Tipo de Incinerador	Comentários
Queimador	pressão baixa de atomização		•	•		todos	somente para óleo combustível para prevenção de chamas instáveis
	perda de chama		•	•		todos	o sistema de aquecimento é desligado para prevenir o acúmulo de misturas explosivas
	purga de ar insuficiente	•	•	•		todos	promove-se o desligamento na partida do processo e nos pós queimadores
	pressão do ar de combustão baixa	•	•	•		todos	ocorre o desligamento para prevenir a formação de chamas instáveis
Câmara secundária	temperatura alta	•	•	•		todos	são desligados os queimadores das câmaras de combustão para proteção do equipamento
	temperatura baixa		•	•		todos	é exigido o corte na alimentação para temperaturas baixas para garantir uma boa destruição dos rejeitos durante a queima

Tabela X. (continuação)

Sistema	Variável Monitorada	Desligamento	Corte na Alimentação	Alarme	Registro	Tipo de Incinerador	Comentários
Câmara secundária	concentração de O <sub>2</sub> baixa, ou falha, no analisador		•	•	•	todos	é exigido o corte na alimentação para garantir uma boa destruição dos rejeitos na queima
	concentração de CO alta, ou falha, no analisador		•	•		todos	é exigido o corte na alimentação para garantir uma boa destruição dos rejeitos na queima
	velocidade do gás alta		•	•		todos	assegurar um tempo de residência apropriado para a destruição dos rejeitos
Sistema de Tratamento de Gases de Combustão							
Injetores de água	temperatura de saída alta	•	•	•		todos	exige-se o desligamento e corte na alimentação para proteção do equipamento que se encontra a jusante do injetor
	temperatura de saída baixa		•	•		todos	é exigido o corte na alimentação de rejeitos para prevenir o tamponamento de filtros manga ou, em estado de curto circuito, no precipitador eletrostático

Tabela X. (continuação)

Sistema	Variável Monitorada	Desligamento	Corte na Alimentação	Alarme	Registro	Tipo de Incinerador	Comentários
Injetores de água	fluxo de refrigerante baixo	•	•	•		todos	exige-se o desligamento para proteção do equipamento
Lavador tipo Venturi	perda de carga dos gases de combustão baixa		•	•		todos	é exigido o corte na alimentação de rejeitos para prevenir a emissão excessiva de poluentes
	fluxo de água de lavagem baixa		•	•		todos	é exigido o corte na alimentação de rejeitos para prevenir a emissão excessiva de poluentes
	vácuo alto		•	•		todos	é exigido para proteção do equipamento
Filtro manga ou saco de pano	perda alta de carga			•			é alarmado
Precipitador eletrostático	voltagem em corrente direta baixa		•	•		todos	é exigido para prevenir a emissão excessiva de poluentes
Torre de lavagem	fluxo de água de lavagem baixo		•	•		todos	é exigido o corte na alimentação de rejeitos para prevenir a emissão excessiva de poluentes
Filtro HEPA	perda alta de carga			•		todos	é necessária a reposição
Leito de carvão	perda alta de carga			•		todos	é necessária a substituição do leito

Tabela X. (continuação)

Sistema	Variável Monitorada	Desligamento	Corte na Alimentação	Alarme	Registro	Tipo de Incinerador	Comentários
Subsistemas em geral							
Ventiladores de tiragem induzida	perda de vácuo	•	•	•		todos	a perda do vácuo desliga todos os queimadores e ativa os respiros de emergência
Suprimento de ar nos instrumentos	pressão de ar baixa no instrumento		•	•		todos	a perda do suprimento de ar nos instrumentos causa um desligamento geral do processo
Parte elétrica	perda da força	•	•	•		todos	a perda da força causa um desligamento geral do processo
Monitores do gás da combustão							
CO			•	•	•	todos	exigência das normas vigentes e usado para o cálculo da eficiência do processo de combustão
CO <sub>2</sub>					•	todos	usado para o cálculo da eficiência do processo de combustão
O <sub>2</sub>			•	•	•	todos	exigência das normas vigentes
Hidrocarbonetos totais					•	todos	
NO <sub>x</sub>					•	todos	
SO <sub>x</sub>					•	todos	

#### *4.7.1. Tecnologia de monitoração das emissões pela chaminé*

Adicionalmente aos sistemas de instrumentação, controle e monitoração do processo de incineração, é importante a existência de um sistema que monitore as emissões dos efluentes radioativos e químicos provenientes do sistema de incineração, via tratamento dos gases da combustão.

A existência deste sistema é necessária para comprovar a eficácia do incinerador como forma segura de tratamento de rejeitos radioativos de nível baixo. A monitoração das emissões para o meio ambiente, também é feita para registrar e avaliar, periodicamente, o comportamento radiológico da região circunvizinha ao incinerador. O histórico é registrado e utilizado para uma avaliação pelos órgãos de fiscalização, responsáveis pelo licenciamento da operação da instalação.

Conceitualmente, os métodos aplicados na amostragem e monitoração de emissões radioativas são similares às empregadas em processos de incineração de resíduos convencionais /14/.

Um sistema de amostragem é, na maioria das vezes, constituído de vários amostradores alinhados em série, cada qual destinado a analisar um tipo de elemento ou estado do efluente (gás ou particulado, por exemplo). Este sistema é composto basicamente por uma boquilha de amostragem, coletor de amostras ou equipamento de monitoração, medidor de vazão, bomba de amostragem, além de controles eletrônicos, monitores de acompanhamento, válvulas, linhas de amostragem, entre outros, que poderão ser adicionados, dependendo do grau de complexidade exigido.

O sistema de amostragem permite a coleta de amostras, representativas do fluxo de efluentes que passa pela chaminé, de forma a minimizar perdas e possibilitar a determinação das propriedades físicas e formas químicas dos radionuclídeos de interesse. Esta operação pode ser

realizada via controles manuais, automáticos ou uma combinação entre ambos. O sistema é disposto de acordo com o processo de incineração empregado e o tipo de rejeito a ser incinerado, podendo ser operado por métodos indiretos ou em tempo real.

Um sistema típico de amostragem e análise de radionuclídeos é exemplificado na Figura 22. Este sistema é bastante limitado, não podendo detectar nem medir a concentração de alguns radionuclídeos como  $^3\text{H}$  e  $^{14}\text{C}$ . Para suprir esta limitação, são empregados métodos indiretos como colunas de sílica gel ou impactadores, desde que se mostrem eficientes para a função.

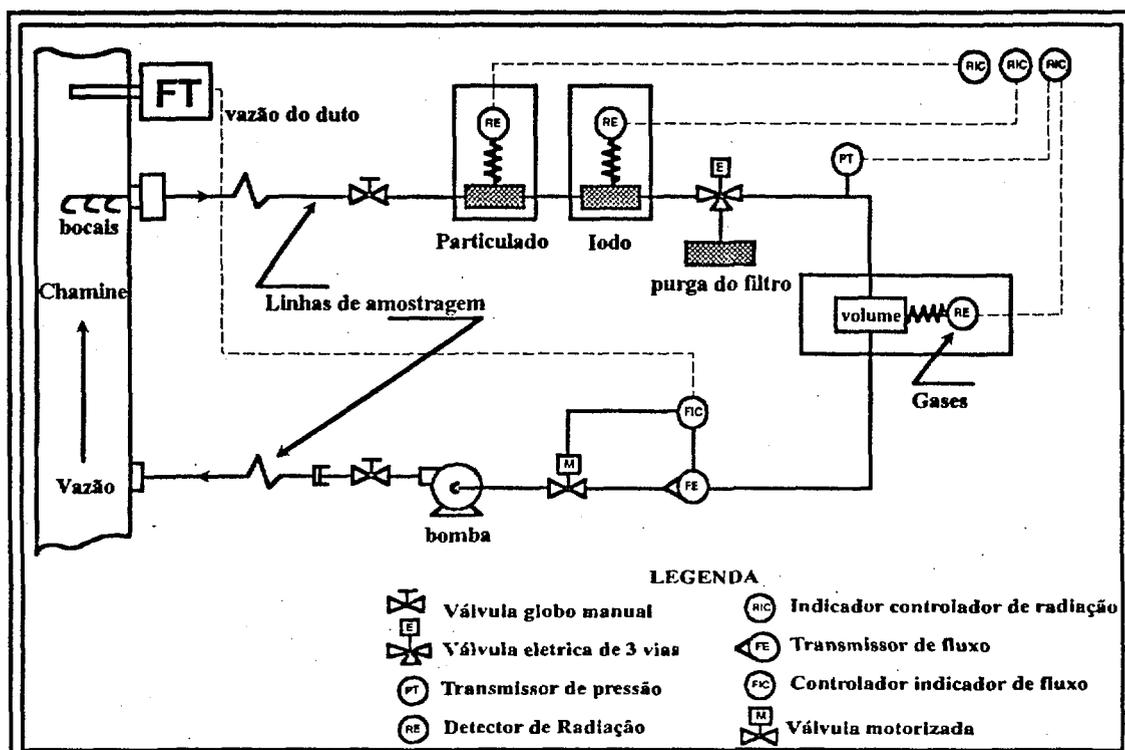


Figura 22. Sistema típico de amostragem de emissões em um incinerador /23/

O sistema apresentado incorpora uma seqüência de três detectores de radiação. O primeiro destinado para emissões na forma de particulados, utilizando-se filtros de papel ou de fibra de vidro. O segundo para detectar e medir a concentração de iodo como composto orgânico ou em sua forma elementar, utilizando-se filtros tipo leito de carvão ativado. O terceiro para medir

a concentração de gases radioativos, via detector que analisa um determinado volume destes gases.

A monitoração, que opera em tempo real, oferece vantagens maiores em comparação ao sistema que emprega métodos indiretos, porque permite a detecção de emissões radioativas ou tóxicas, fora dos padrões esperados, de forma imediata. Isto possibilita uma intervenção no sistema de incineração de forma mais rápida, evitando-se um estado de operação inseguro, em todo o processo. Por outro lado, este tipo de operação torna-se muito complexo à medida que exige a análise das partículas e espécies gasosas, com uma gama muito diferenciada de suas características, principalmente as relacionadas à natureza da radiação.

O desenvolvimento de uma técnica adequada para a monitoração das emissões provenientes de um sistema de incineração, deve ser muito bem avaliada, antes de sua implantação. Existem diversos arranjos e modelos de sistemas de amostragem no mercado, todos com o mesmo conceito básico apresentado neste item, porém com características técnicas diferenciadas, por exemplo, tipo de detector (cintilador, cintilador tipo NaI(Tl) etc) com sensibilidade para um determinado elemento ( $^{131}\text{I}$ , particulados,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$  etc). Os limites de detecção do instrumento e a resposta que este fornece, também diferenciam uns equipamentos dos outros.

#### *4.7.2. Monitoração de rejeitos líquidos secundários*

Durante a operação do incinerador, os rejeitos líquidos secundários são gerados por diversas etapas do processo onde a água ou uma solução adequada são usadas como meios de tratamento. Estas etapas atuam no processo como: meios de esfriamento ou aquecimento de gases e componentes via trocadores de calor e injeção de água; lavagem de gases através das torres de

lavagem, lavadores tipo Venturi etc; e controle químico das soluções de lavagem em tanques de estocagem pertencentes aos subsistemas de lavagem de gases.

Os líquidos empregados no processo devem ser constantemente monitorados e analisados, por amostragem. Os resultados obtidos definem qual será o destino desses líquidos, podendo ser encaminhados para a liberação direta ao meio ambiente, liberação para um sistema de tratamento de efluentes convencionais, descarga no sistema de processamento de rejeitos radioativos líquidos, armazenagem temporária ou reutilização. A definição dos limites de operação devem estar de acordo com as normas vigentes /1, 5, 13 e 22/.

A monitoração destes líquidos pode ser feita também com medição contínua da atividade específica total com um contador Geiger-Müller (GM) imerso no líquido. Se um limite é ultrapassado, bloqueia-se imediatamente o suprimento desses líquidos para o processo /43/.

#### *4.7.3 Monitoração da concentração de radionuclídeos nas cinzas*

Sabe-se que no processo de incineração, os rejeitos radioativos de nível baixo, ao sofrerem uma decomposição térmica tem seu volume reduzido em até 100 vezes, transformando-se principalmente em gases e cinzas. É nestas cinzas, onde há uma concentração maior da radioatividade inicialmente presente nos rejeitos, que se torna necessário fazer uma monitoração e análise adequadas.

Geralmente faz-se uma medição contínua do nível de atividade das cinzas coletadas, com detectores GM devidamente posicionados nos pontos de coleta. Outro procedimento bastante comum é uma monitoração nas proximidades dos pontos de coleta, visando detectar possíveis fugas de cinzas contaminadas para o ar, o que pode causar a contaminação, por inalação, dos trabalhadores.

Uma prática bastante comum e importante, é a análise das cinzas coletadas. As análises visam caracterizar as cinzas do ponto de vista químico, tóxico e radiológico, e o processo de análise envolve extrações químicas, pesagem e separação. As análises, de uma forma geral, caracterizam a presença de líquidos livres, agentes quelantes, explosivos, reativos, inflamáveis ou que gerem vapores tóxicos. Os procedimentos de análise envolvem diversos métodos por exemplo: contagens de  $\alpha$  e  $\beta$  totais, espectroscopia  $\gamma$ , difração de raio X, contagens com líquidos de cintilação, cromatografia gasosa, entre outras.

#### ***4.7.4. Monitoração do ambiente operacional /23/***

Outro fator que deve ser analisado no local onde está instalado o incinerador é relacionado também com a proteção radiológica, isto é, a monitoração dos níveis de atividade dentro das áreas de operação. É importante notar que a monitoração deve ser feita tanto durante a operação normal como em situações de atenção ou emergência.

Os procedimentos envolvem basicamente vistorias e monitorações periódicas em pontos pré-selecionados. Determina-se os depósitos de poeira sobre superfícies de equipamentos, distribuição de material radioativo ao longo da instalação, nível de radioatividade dentro da instalação e outros que são definidos caso a caso.

A determinação da atividade específica total do ar da área de operação interna às instalações do incinerador, pode ser feita com um contador GM através da medição instantânea ou acumulada de material particulado coletado em um equipamento de filtração convencional. A distribuição de material radioativo ao longo da instalação pode ser determinada por monitores portáteis convencionais.

O pessoal de operação deve usar dosímetros pessoais tipo anéis, pulseiras, ou de corpo inteiro (usados sobre o tórax), para avaliar as doses de radiação individualmente, conforme as exigências normativas de radioproteção /10/.

De um modo geral, estes são os meios principais de monitoração da radiação na área da proteção radiológica ocupacional. É importante notar que as citações feitas são exemplos genéricos que devem ser avaliados para cada situação, de acordo com o processo de incineração empregado, tipo de rejeito, localização da instalação, rotinas de operação etc. Todos estes aspectos devem ser analisados a fim de garantir níveis de segurança, confiabilidade e rendimento adequados para o processo de incineração.

#### **4.8. Aspectos Básicos de Segurança**

As instalações de um incinerador, como qualquer outra instalação, estão sujeitas à circunstâncias que podem sofrer situações anormais de incidente e de acidente durante a operação do sistema. Este item trata, de forma generalizada, destas situações, descrevendo suas conseqüências e procedimentos básicos de prevenção e extinção do risco.

Portanto, ao se estudar a viabilidade de um processo, é importante fazer uma análise de segurança em que se avalie as conseqüências de operações em condições anormais, as causas do incidente ou acidente e riscos associados. Esta análise envolve parâmetros de segurança importantes, por exemplo: condições exigidas para a operação normal; a natureza dos possíveis acidentes e respectivas probabilidades de ocorrência; medidas preventivas e de detecção de falhas; medidas técnicas necessárias para minimização dos riscos e suas conseqüências; definição do pior acidente possível e como este afetará o sistema em geral; integridade dos operadores, do público, meio ambiente e equipamentos (bens patrimoniais); etc.

Existem vários fatores que podem propiciar uma condição de acidente potencial, das quais destacam-se:

- incêndios e explosões;
- deficiência dos sistemas de segurança;
- manuseio de materiais inadequados ao sistema em conjunto com os rejeitos;
- perda no suprimento de utilitários essenciais por exemplo: energia elétrica, ar, combustível e água;
- falhas nos sistemas de controle de emissões;
- falha humana;
- fenômenos naturais como terremotos, inundações, furacões etc; e
- outros eventos externos.

Para minimizar, e principalmente evitar a ocorrência destes cenários é importante que, desde a etapa do projeto até a operação da instalação, sejam tomadas medidas preventivas com o intuito de garantir a segurança e integridade física da instalação, trabalhadores, público e meio ambiente, através de procedimentos de segurança convencionais e os recomendados pela Proteção Radiológica (princípio ALARA /10/) compatíveis com o processo empregado e exigências normativas. Algumas das medidas preventivas principais que devem ser avaliadas para implantação em um processo de incineração são descritas a seguir:

#### *4.8.1. Incêndios e explosões*

Todo sistema de incineração desde a coleta dos rejeitos até o tratamento dos gases de combustão está sujeito à ocorrência de um sinistro causado por incêndios ou explosões, causando conseqüências sérias à instalação. Com o intuito de mitigar e evitar estas ocorrências, a instalação deve ser projetada de tal forma a resistir aos efeitos destes sinistros com requisitos de construção e procedimentos de operação como os citados abaixo:

- Implantação de sistemas de detecção e combate a incêndios no edifício do incinerador, de acordo com as regulamentações /44, 29/, através do uso apropriado de detectores de incêndio, extintores, carretas, hidrantes etc.;
- Evitar misturas explosivas em pontos de fuga como respiros, purgas e equipamentos, através de uma instalação e montagem adequadas. Podem se formar misturas explosivas quando existir um nível de O<sub>2</sub> insuficiente, suspensão de partículas combustíveis como a poeira resultante da área do triturador, quando empregado, etc.;
- Manutenção periódica dos equipamentos e sistemas;
- Controle rigoroso dos materiais a serem incinerados para evitar a introdução inadvertida de materiais incompatíveis com o processo, por exemplo materiais com poder calorífico mais alto que o pré-determinado, ponto de fulgor baixo, garrafas de aerossol etc. Esta medida visa assegurar que a operação do incinerador esteja no intervalo de sua capacidade térmica;
- Controle adequado do sistema de tratamento de gases de combustão, para evitar obstruções e falhas nos dutos;
- Treinamento periódico dos operadores cuja formação técnica deve ser adequada;
- Existência de uma brigada de incêndio para as instalações;

- Monitoração de vazamentos de gases ou líquidos combustíveis no sistema de alimentação dos queimadores;
- Uso de equipamentos de proteção individual (EPI) apropriados para o combate a incêndios, considerando-se também o risco radiológico;
- O sistema de detecção deve possuir alarmes ligados à sala de controle central que comanda o processo; e
- Outros tipos de sistema de segurança conforme o projeto da instalação.

#### ***4.8.2. Contenção da radiação***

Além de todo sistema de monitoração à radiação existente nos equipamentos, componentes, ambiente e operadores, outras medidas devem ser tomadas para garantir a proteção radiológica da instalação de incineração.

Tais medidas exigem, entre outras, o treinamento adequado do pessoal de operação, envolvendo-os, em todas as fases do projeto do sistema e operação, com uma pessoa responsável pela proteção radiológica do local que coordena os trabalhos nesta área..

O escape de contaminantes radioativos pode ser evitado através da operação do sistema em pressões negativas em relação ao ambiente do edifício e o mesmo entre a área interna do edifício em relação ao meio ambiente externo.

Outra medida preventiva contra o risco de contaminação, está relacionada aos aspectos de construção dos componentes do incinerador. Por ser um processo que envolve material radioativo, algumas partes do incinerador onde o operador necessita estar em contato mais freqüente, deve haver blindagem à radiação, quando os rejeitos forem emissores  $\beta/\gamma$  e sistemas de selagem adequados quando forem emissores  $\alpha$ . Os pontos típicos que devem possuir

estes requisitos são: câmaras de alimentação dos rejeitos no incinerador; pontos de coleta de cinzas e comporta de recebimento de rejeitos no topo da câmara de combustão primária, entre outras. Todos estes parâmetros devem estar de acordo com o processo empregado e características dos rejeitos a serem tratados.

#### **4.8.3 Blindagem à radiação**

Alguns fatores devem ser levados em consideração quando for necessário usar blindagens em componentes do incinerador, conforme segue:

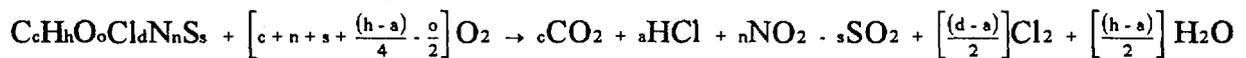
- O cálculo de blindagem dos componentes e estruturas que compõem o incinerador deve estar baseado em um nível de atividade pré-estabelecido para o projeto e quantidade de rejeitos a serem tratados;
- A blindagem e o arranjo/disposição dos componentes do processo devem ser definidos em função da necessidade de acesso para uma intervenção qualquer do operador em situações de operação, inspeção, teste, manutenção e em casos de incidentes ou acidentes;
- Quando necessário o acesso às tubulações e dutos será feito por orifícios nas paredes da blindagem para minimizar as exposições desnecessárias de operadores, independente de outras considerações do projeto como as barreiras de incêndio, sistema de ventilação etc;
- As blindagens e o arranjo dos componentes devem ser tais que propiciem um remanejamento e/ou remoção de forma prática e rápida, auxiliando na minimização da exposição à radiação dos operadores;
- Deve ser avaliada a possibilidade de sistemas que contenham fluidos não radioativos, ao ocorrer uma situação de operação anormal, não favoreçam o transporte de materiais contaminados;

# CAPÍTULO 5

## CARACTERÍSTICAS DAS DIFERENTES TÉCNICAS DE COMBUSTÃO

### 5.1 Técnicas de Combustão

Define-se combustão como um processo no qual ocorre uma reação química exotérmica rápida entre uma substância e o oxigênio. A correlação geral de um processo de combustão pode ser exemplificada por /45/:



onde:  $a = h$  se  $Cl > H$  ( $h < d$ ) e não é formada  $H_2O$

$a = d$  se  $H \geq Cl$  ( $h \geq d$ ) e não é formado  $Cl_2$

$h = d$  somente se é formado  $HCl$  e não são formados  $Cl_2$  e  $H_2O$

A combustão, geralmente, é um fenômeno que ocorre na fase gasosa, com exceção da combustão do carvão, em qualquer de suas formas (fuligem, carvão animal), que reage heterogeneamente (mistura sólido e gás). Portanto a incineração de rejeitos sólidos envolve, a princípio, a combustão de gases e vapores resultantes da decomposição térmica do rejeito alimentado no sistema e a combustão de carvão residual.

Os incineradores desenvolvidos para o processamento de rejeitos radioativos empregam uma grande variedade de técnicas de combustão com características bem distintas entre si. Por causa desta diversificação, verifica-se que a escolha e o projeto de um sistema de incineração que funcione adequadamente não é simples, exigindo uma avaliação criteriosa do processo de combustão a ser empregado. É desta avaliação que depende o sucesso de praticamente todo o projeto. Os fatores principais que devem ser previamente analisados são:

- Capacidade de processar rejeitos radioativos distintos, com composições químicas, dimensões físicas, densidades, teores de umidade e poder calorífico diferentes;
- Oxidação completa dos rejeitos introduzidos, inclusive dos produtos combustíveis formados pela decomposição térmica dos rejeitos nas áreas de combustão do sistema (câmara de combustão primária e secundária);
- Desempenho tal que minimize ao máximo o arraste de material particulado juntamente com o fluxo de gases de combustão;
- Parâmetros de processo consistentes, por exemplo temperatura e pressão;
- Composição dos gases, na saída das câmaras de combustão, consistentes e sem grandes flutuações; e
- Geração de cinzas com características físicas e químicas que proporcionem um gerenciamento adequado.

Embora hoje se deseje associar tecnologia com alto grau de garantia da qualidade com proteção ao meio ambiente, isto muitas vezes não é possível. Construir uma instalação de incineração ideal foge à realidade porque a quantidade de variáveis é muito grande.

É muito importante alcançar um alto grau de combustão dos rejeitos alimentados, bem como a manutenção de uma provisão adequada de ar na câmara, em pontos de injeção apropriados, temperatura de combustão ótima, turbulência das áreas de combustão propiciando

velocidades no fluxo de gases de acordo com as características das câmaras de combustão e tempo de residência suficiente para um grau de decomposição térmica alto.

Para executar suas funções os incineradores empregam, na maioria das vezes, duas câmaras de combustão, alinhadas em série. Neste arranjo, os rejeitos são introduzidos na câmara primária, onde sofrem uma decomposição térmica com um alto grau de combustão, inclusive com a queima completa do carvão residual. Os gases, produtos voláteis e material particulado remanescentes da câmara primária são conduzidos para uma câmara secundária, para que oxidem completamente sob condições de ar em excesso, a temperaturas mais elevadas do que na primeira etapa da combustão.

As técnicas principais de combustão, atualmente empregadas, e que vem sendo desenvolvidas com o intuito de operar com segurança e obter fatores de redução de volume cada vez maiores, são apresentados a seguir:

- Incineração com ar em excesso;
- Incineração com ar controlado;
- Pirólise;
- Pirohidrólise;
- Incineração em leito fluidizado;
- Incineração por escorificação a altas temperaturas;
- Incineração por fusão de sais;
- Incineração por fusão de vidros;
- Digestão ácida;

Essas técnicas diferem entre si em algumas características, de acordo com a quantidade de ar, como na combustão com ar controlado ou em excesso; de acordo com as características especiais das câmaras de combustão como nas câmaras rotativas ou não; e, de acordo com a forma com que o rejeito será incinerado, como na digestão ácida, pirólise, leito fluidizado etc. As características principais destas técnicas são descritas brevemente a seguir:

### ***5.1.1. Incineração com ar em excesso***

Esta é uma técnica comum e mais simples. A temperatura de incineração varia entre 800 e 1100 °C /46/, com uma quantidade de ar em excesso na faixa de 30 a 100%. Por apresentar uma velocidade do gás alta, propicia uma das menores taxas de queima, resultando numa quantidade razoável de cinzas e material particulado não queimado e um gás pobre e de composição bastante variada o que dificulta o sistema de tratamento, principalmente em instalações que trabalham em regime de bateladas. Neste caso recomenda-se a utilização de uma câmara de pós-queima, para obter um rendimento melhor no processo. A Figura 23 mostra de forma esquemática um incinerador instalado em Cadarache, França, que opera com ar em excesso.

### ***5.1.2. Incineração com ar controlado***

Este tipo de incinerador apresenta mais de uma câmara de combustão, onde a câmara primária opera em temperaturas de 500 a 800 °C e com quantidades subestequiométricas de oxigênio (ar). Os produtos gerados pela oxidação e volatilização parcial são encaminhados à câmara secundária, onde ocorre a combustão completa em um ambiente com excesso de ar (concentração de oxigênio maior do que 6%) e temperaturas entre 1000 e 1200 °C. Esta técnica

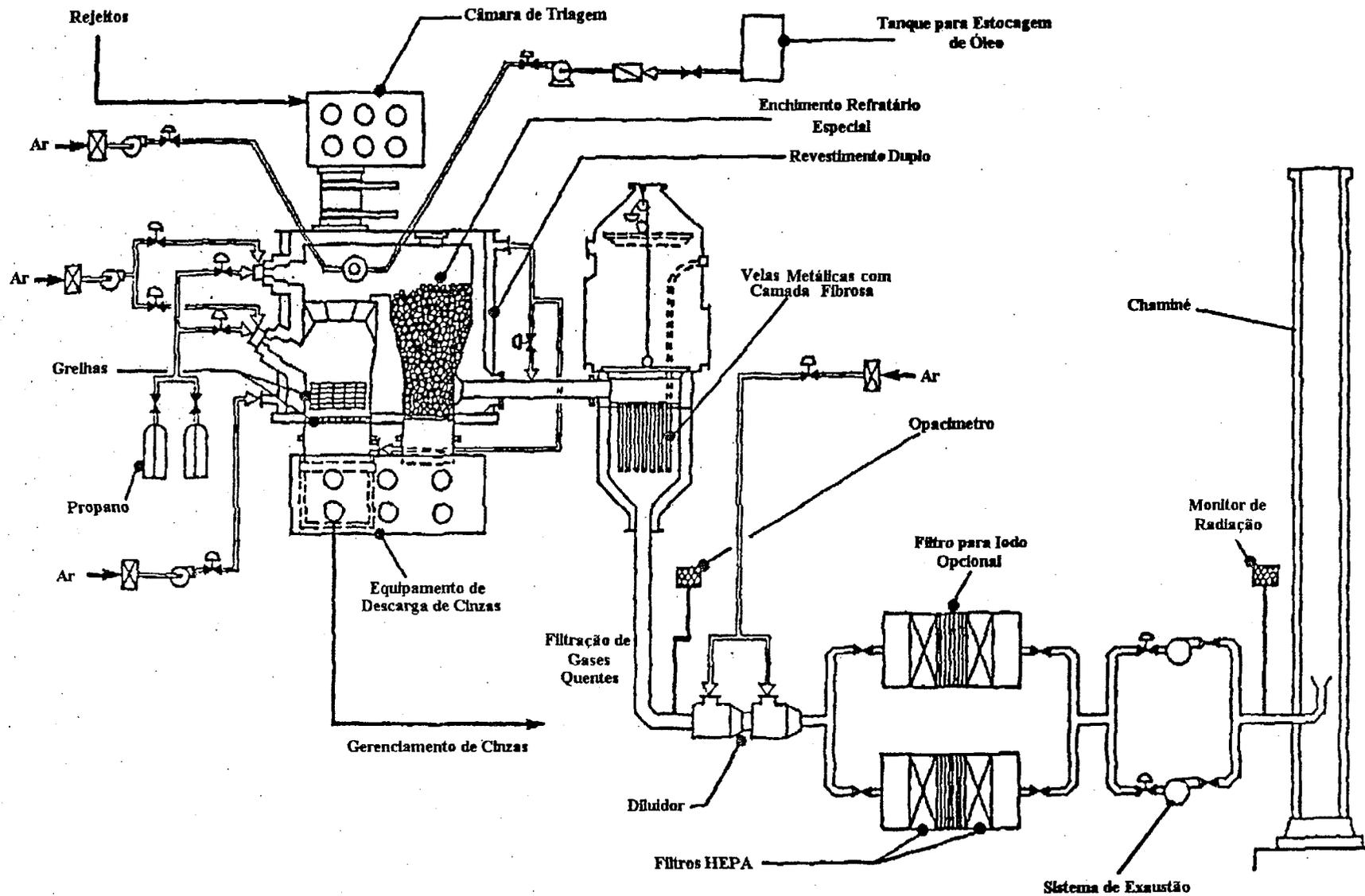


Figura 23. Incinerador francês que trabalha com ar em excesso /30/

possui algumas vantagens como: pouca formação de cinzas, combustão completa do material e fluxo de gases contínuo com flutuações dentro de faixas restritas. A Figura 24 apresenta um esquema da instalação de incineração de Karlsruhe, Alemanha, onde é utilizada a técnica de combustão com ar controlado.

### ***5.1.3. Incineração em leito fluidizado***

Uma coluna vertical de leito fluidizado, com material inerte à temperaturas entre 500 e 600 °C, é empregado também, como técnica de incineração. Neste processo os rejeitos sólidos, previamente triturados ou rejeitos líquidos, são depositados no leito para sofrer a queima em dois estádios /27, 26/.

O primeiro estágio consiste em uma decomposição primária sobre um leito de compostos químicos especiais, como o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e grânulos catalíticos adequados que são fluidizados com o auxílio de um fluxo de ar e nitrogênio. Os gases de combustão gerados neste estágio são conduzidos à um separador ciclônico para a pós-queima catalítica (segundo estágio), onde ocorre a combustão completa, em ambiente com excesso de ar, em um leito composto geralmente por óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) sobre uma base de alumina. Este processo possibilita a recuperação de plutônio (Pu) em uma forma não refratária, para rejeitos que contém este elemento, além de propiciar em seu primeiro estágio a neutralização dos ácidos eventualmente formados. Um esquema deste tipo de incinerador é apresentado na Figura 25

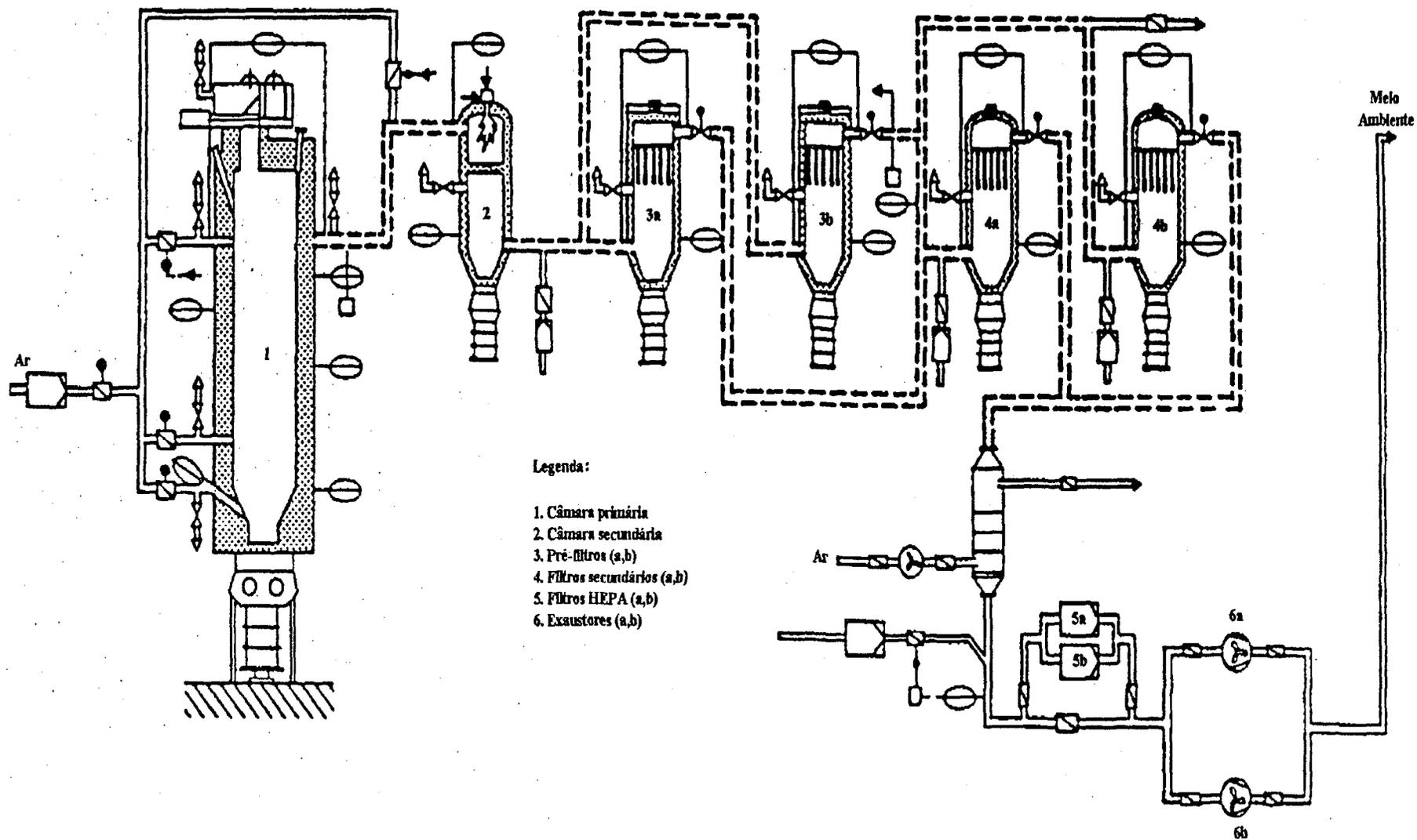


Figura 24. Incinerador com ar controlado para rejeitos radioativos sólidos em Karlsruhe, Alemanha /27/.

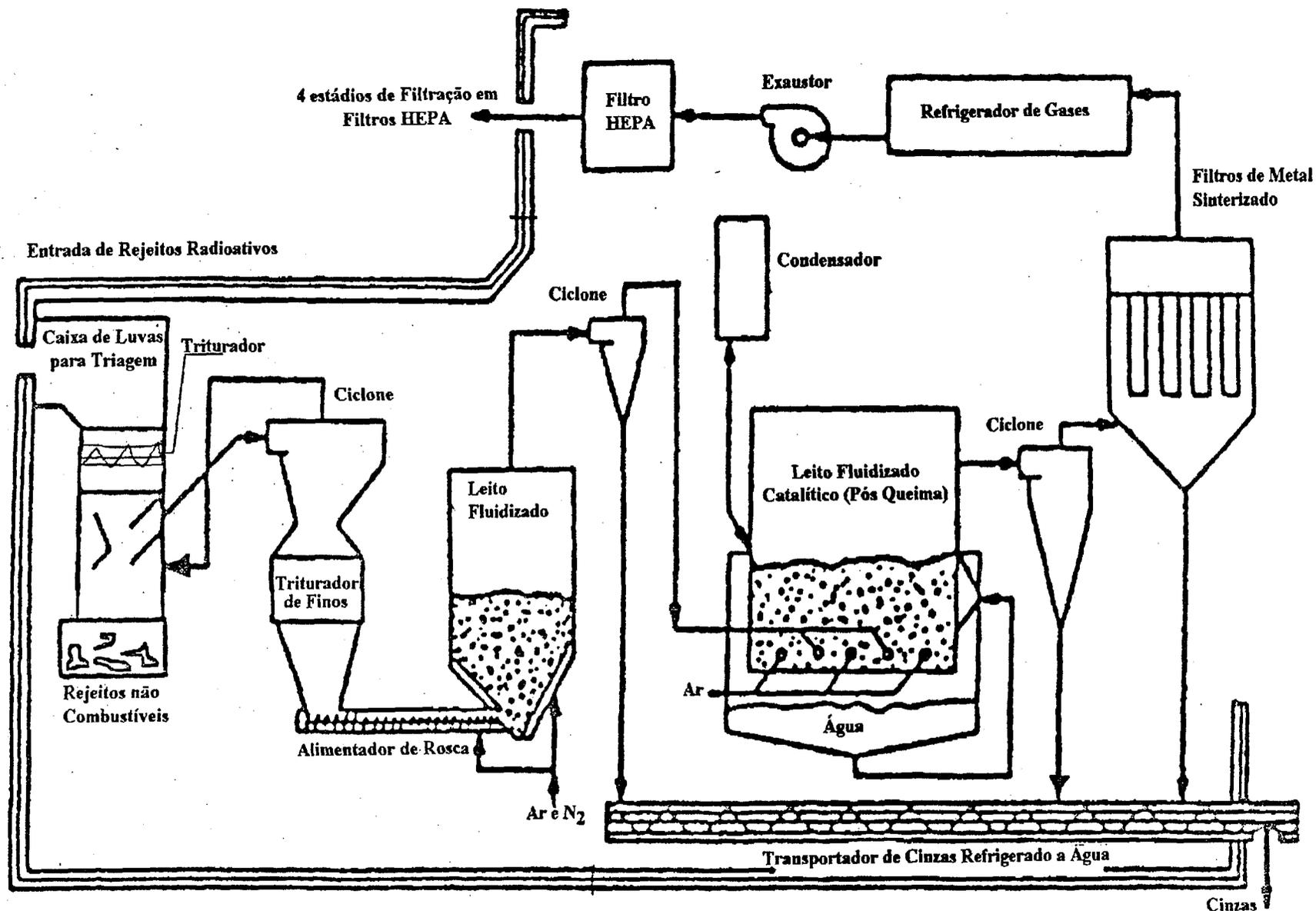


Figura 25. Sistema de incineração com leito fluidizado de Rocky Flats Plant, Estados Unidos da América /30/

#### *5.1.4. Pirólise*

Diferindo do processo de combustão realizado em condições exotérmicas, a pirólise é um processo de reação endotérmica, e esta condição de contorno se faz necessária, pois somente desta forma, são reduzidas as perdas de calor e é possível obter o fracionamento das substâncias sólidas presentes no rejeito.

O fracionamento ocorre gradualmente à medida que os rejeitos passam pelas zonas de calor no reator pirolítico ou seja: volatilização, oxidação e fusão.

Os rejeitos são introduzidos na câmara pirolítica, onde mantêm-se expostos a um aumento lento da temperatura, através do controle do nível de oxigênio. Conforme se aumenta a temperatura, os gases de combustão são enviados ao sistema de tratamento, face às suas características radiológicas, ou são reciclados para os trocadores de calor e caldeiras. Os materiais sólidos fundidos, juntamente com a escória, são resfriados e removidos para posterior gerenciamento.

Este processo apresenta vantagens como: quantidade baixa de particulados arrastados nos gases, fluxo constante destes gases e a combustão total dos rejeitos. As Figuras 26 e 27 mostram incineradores pirolíticos com sistema de operação em bateladas ou contínuo, respectivamente.

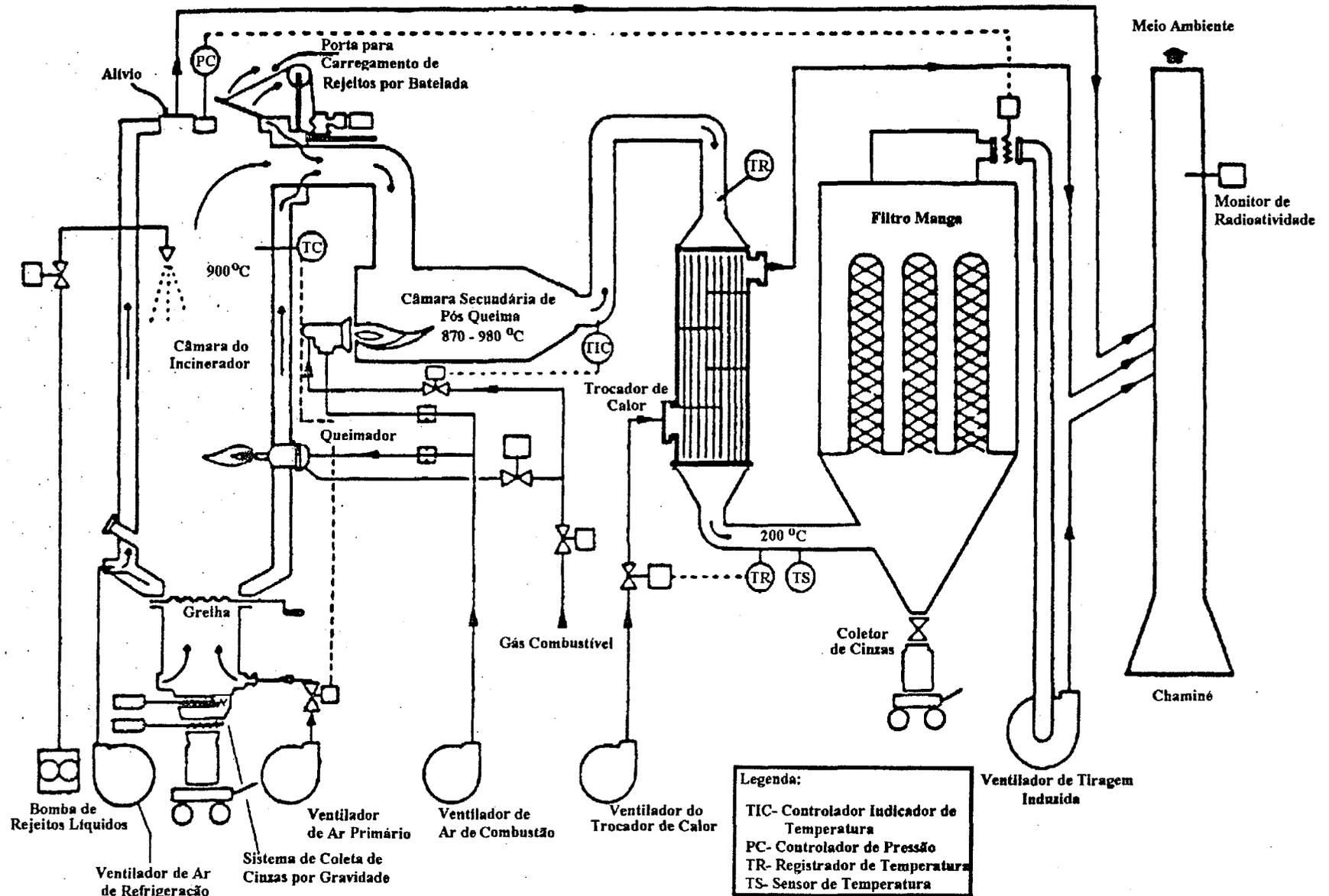


Figura 26. Incinerador pirolítico com ar controlado com alimentação por bateladas - Ontario Hydro, Canadá /30/

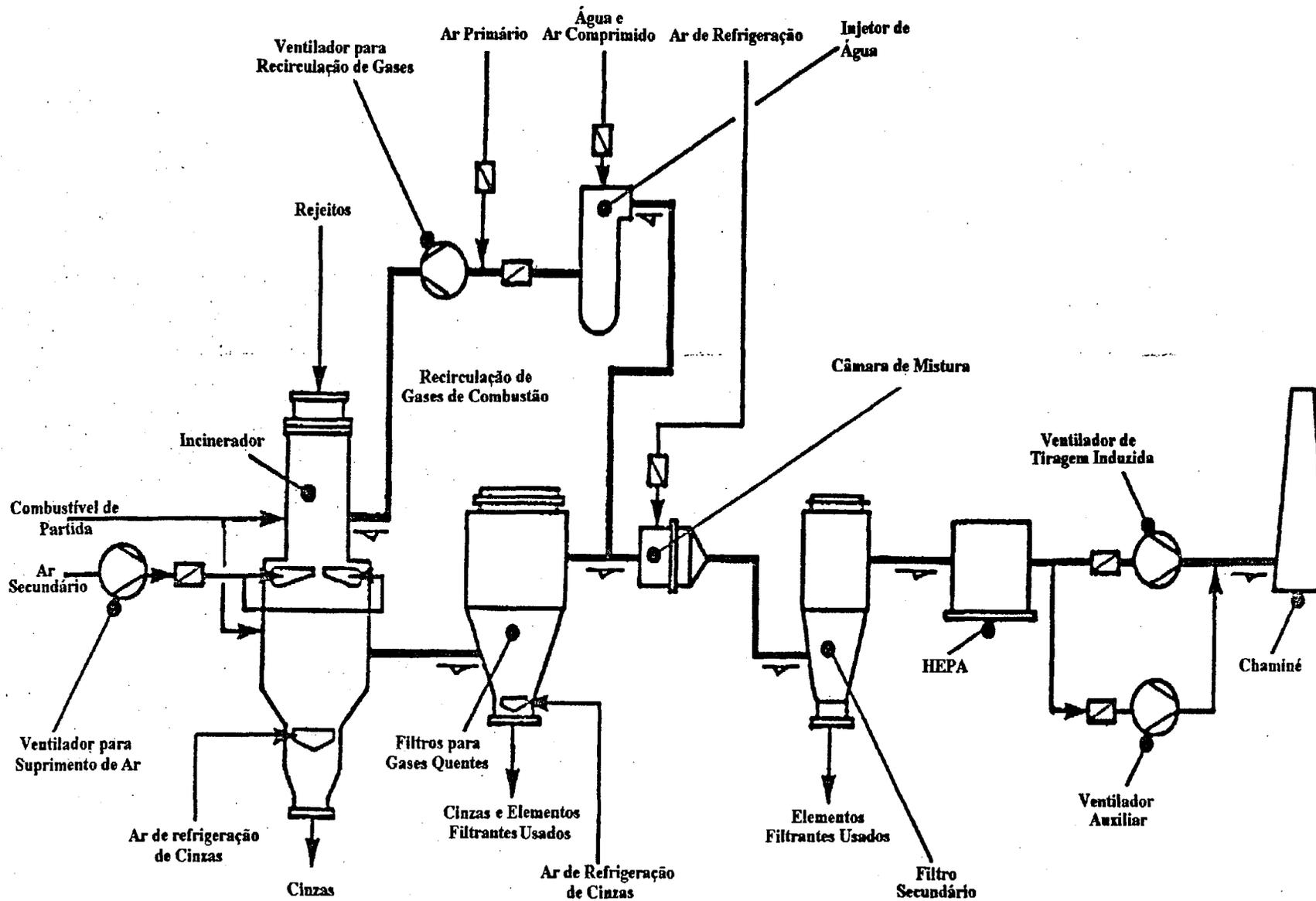


Figura 27. Incinerador pirolítico contínuo com ar controlado - Jülich, Alemanha /30/.

### 5.1.5. Pirohidrólise

A pirohidrólise é uma técnica de combustão não convencional, empregada somente a nível experimental em algumas unidades pilotos. Esta técnica é utilizada no tratamento de rejeitos radioativos com emissores  $\alpha$  e contaminados com Pu /47,48/, objetivando principalmente a redução de volume e a recuperação de Pu e U contidos nos rejeitos combustíveis sólidos e líquidos.

A técnica de pirohidrólise baseia-se em uma decomposição térmica controlada dos rejeitos sólidos que são alimentados em um reator pré-aquecido (pirohidrolizador). A decomposição ocorre porque um gás para induzir a reação, composto por uma mistura ar-vapor, é introduzido no reator. Este gás geralmente entra no reator a uma razão estequiométrica de ar de 0,6, em temperaturas em torno de 600°C. Como consequência, consegue-se a manutenção da temperatura do reator na faixa de 800 a 900 °C sem que haja necessidade do fornecimento adicional externo de energia por exemplo a utilização de um bico queimador usando-se gás ou óleo.

Este processo proporciona um fluxo de gases de pirohidrólise bastante pequeno, o que possibilita a filtração antes mesmo da etapa de pós-queima. Esta filtração promove a separação da maior parte da atividade carregada no fluxo de gases, resultando numa liberação mínima de partículas sólidas carregadas após a etapa de pós-queima. Um pirohidrolizador típico está esquematizado na Figura 28.

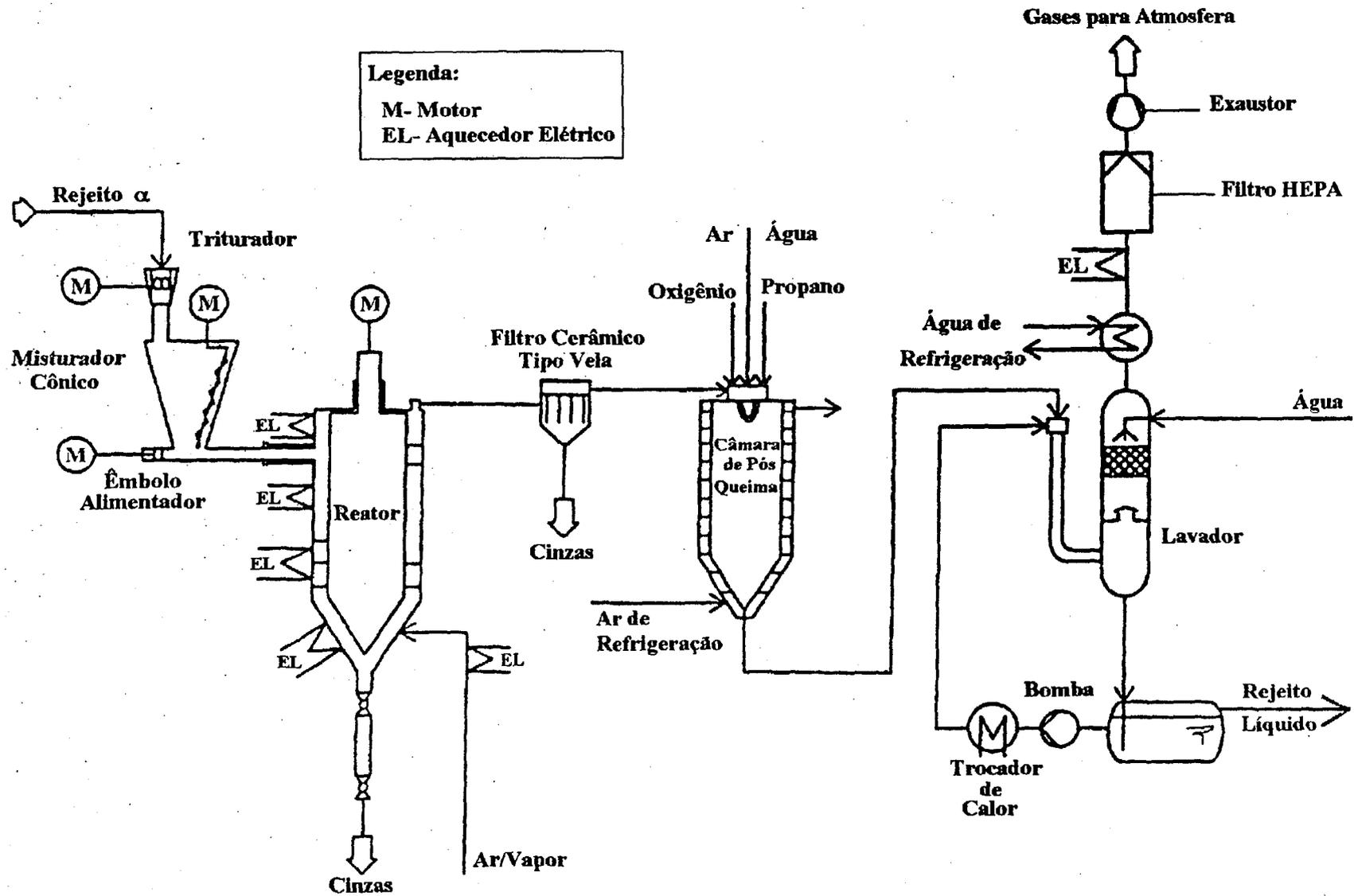


Figura 28. Instalação de pirohidrólise em Hanau, Alemanha /27/.

### ***5.1.6. Incineração por escorificação***

A incineração por escorificação é um processo que emprega temperaturas altas. Os rejeitos alimentados são fundidos em temperaturas entre 1500 e 1600 °C [7], propiciando a formação de escória de rejeitos não combustíveis, presentes no sistema. Face a esta característica é possível queimar misturas de rejeitos combustíveis e não combustíveis. Neste caso não são necessárias as etapas de segregação e triagem final, no processo de incineração como um todo.

Apesar destas características, é aconselhável que o processo se desenvolva com o controle da composição dos rejeitos, visando manter a eficiência da combustão e qualidade aceitável da escoria formada. A escória, geralmente obtida neste processo, é quimicamente inerte e fisicamente estável. Estas características permitem que o transporte e a disposição final sejam seguros, sem a necessidade de condicionamento prévio.

Nesta técnica, os gases de combustão possuem concentrações significantes de particulados e presença de gases ácidos (HCl e SO<sub>2</sub>), por causa da grande variedade de rejeitos envolvidos, e devem ser tratados. A Figura 29 mostra um esquema do incinerador desenvolvido e utilizado pelo Centro de Pesquisas de Mol, Bélgica, como exemplo clássico do emprego desta técnica.

### ***5.1.7. Combustão por fusão de sais***

Esta é uma técnica na qual os rejeitos são consumidos em temperaturas de 800 a 900 °C com presença de ar, em um ambiente de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> fundidos. Este processo é bastante flexível possibilitando a combustão de rejeitos radioativos sólidos combustíveis e rejeitos

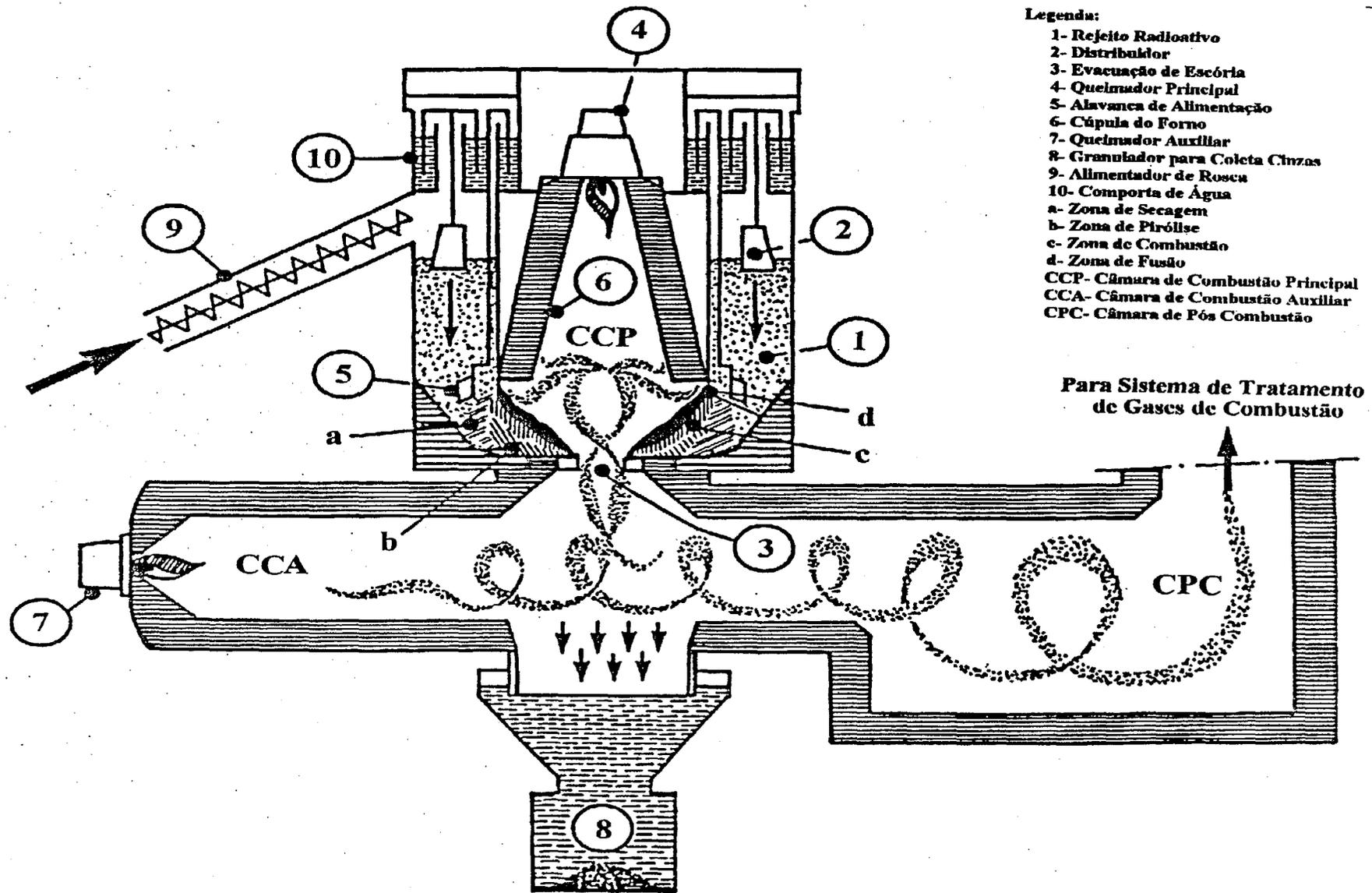


Figura 29. Incinerador por escorificação - Mol, Bélgica /30/.

secundários originados em outras etapas do gerenciamento de rejeitos como: filtros HEPA, tubulações metálicas, artigos de vidro etc.

A técnica de fusão de sais é razoavelmente nova, sendo indicada para a combustão de rejeitos contendo Pu e/ou emissores  $\beta/\gamma$  em escala de bancada, assim como para resíduos não contaminados em instalações pilotos /51/. Possibilita a recuperação de 90 a 98% do Pu retido no sal, através de processos de lixiviação com ácidos apropriados como HCl e HNO<sub>3</sub>.

Por causa das propriedades dos sais fundidos, os gases ácidos e o material particulado, resultantes da combustão dos rejeitos são capturados antes de deixarem a câmara, reduzindo substancialmente os problemas de manutenção causados por corrosão no sistema de tratamento de gases de combustão. O sal líquido atua como agente de transferência de calor para estabilizar a temperatura, agente de lavagem para remover os gases formados, ácidos oxidados e componentes da cinza e como matriz de imobilização dos radionuclídeos presentes. A Figura 30 mostra uma unidade típica de combustão por sais fundidos.

### *5.1.8 Combustão por fusão de vidros*

A fusão de vidros é também uma técnica de vitrificação, compatível com rejeitos sólidos e líquidos, sejam eles combustíveis ou não, por exemplo óleos, borracha, plásticos, madeira, resinas de troca iônica, artigos de vidro, concreto etc.

O processo consiste em introduzir o rejeito em um forno elétrico de linhas refratárias contendo vidro previamente moído e fundido. Ao se executar este procedimento os rejeitos sofrem um processo de combustão e misturam-se imediatamente ao vidro. A faixa de temperatura comumente empregada neste processo encontra-se entre 1200 a 1300 °C.

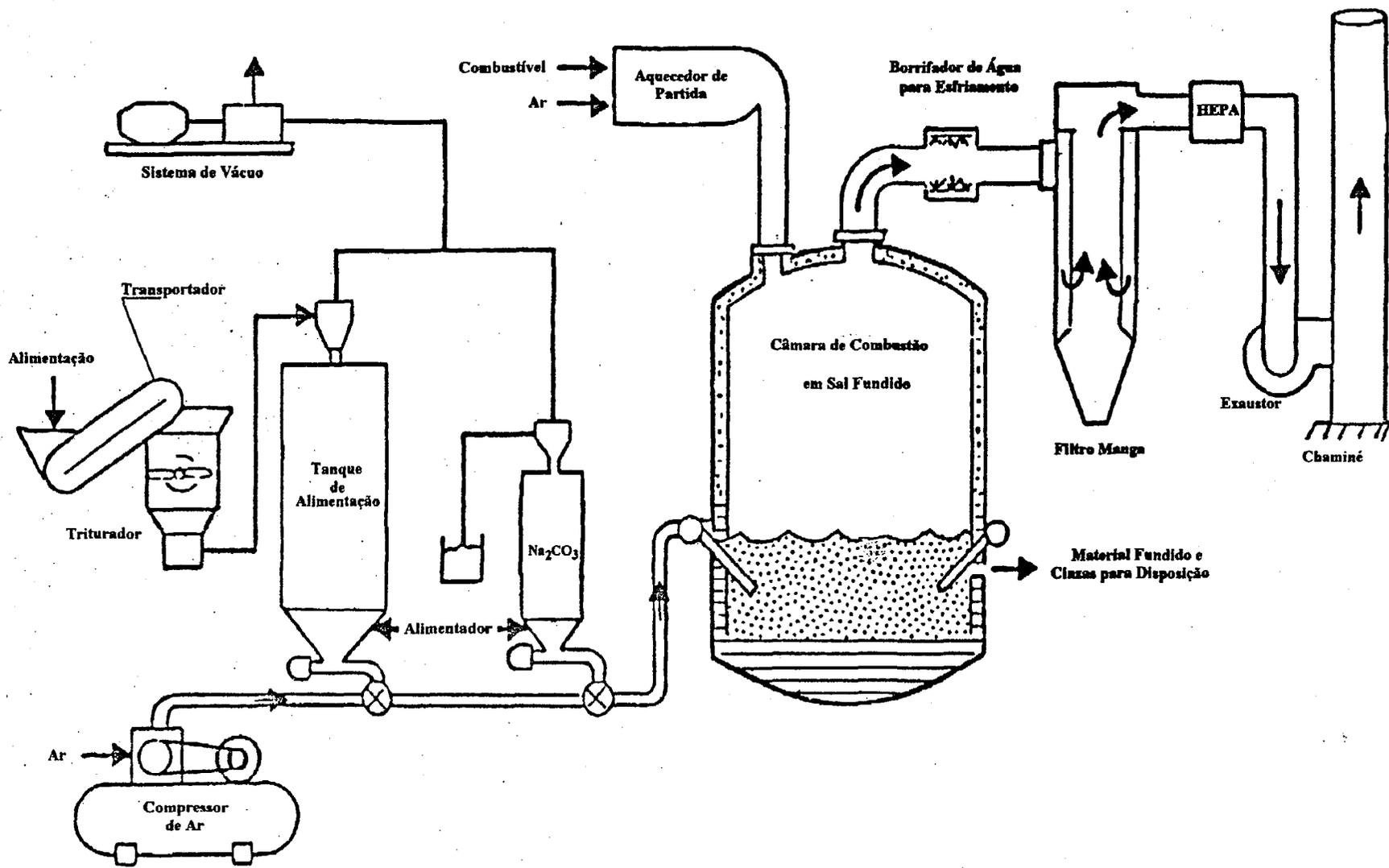


Figura 30. Desenho esquemático de uma instalação de combustão por fusão em sais /30/.

Os gases provenientes da vitrificação contém pouco material particulado, porém, poderá haver a formação de uma fumaça pesada quando o processo não proporcionar a combustão completa dos rejeitos, causada pelo dimensionamento incorreto da câmara de ar. O produto final formado, isto é, vitrificado, já possui características apropriadas para o transporte, armazenagem e disposição final.

Um exemplo de instalação que emprega esta técnica é apresentada esquematicamente na Figura 31.

#### ***5.1.9. Outras técnicas de combustão***

Além das técnicas já descritas, existem outras que se encontram em um estágio ainda bastante primário de desenvolvimento por exemplo, incineração por plasma, fermentação microbiológica e, com maior destaque, o processo por digestão ácida.

A digestão ácida se beneficia da ação desidratante do ácido sulfúrico concentrado para carbonizar materiais orgânicos e a ação oxidante do ácido nítrico para converter o carvão em  $\text{CO}_2$ . O processo opera a temperaturas de  $250^\circ\text{C}$ , podendo ser aplicado como pré-tratamento no processo de recuperação de Pu presente nos rejeitos. A digestão ácida pode ser empregado com boas vantagens no tratamento de rejeitos radioativos, porém as taxas de processamento relativamente baixas e restrições quanto ao material de construção a ser empregado na instalação, vêm dificultando sua aplicação em maior escala. A título ilustrativo é apresentado o desenho esquemático da unidade de digestão ácida, na Figura 32, desenvolvido em Mol, Bélgica.

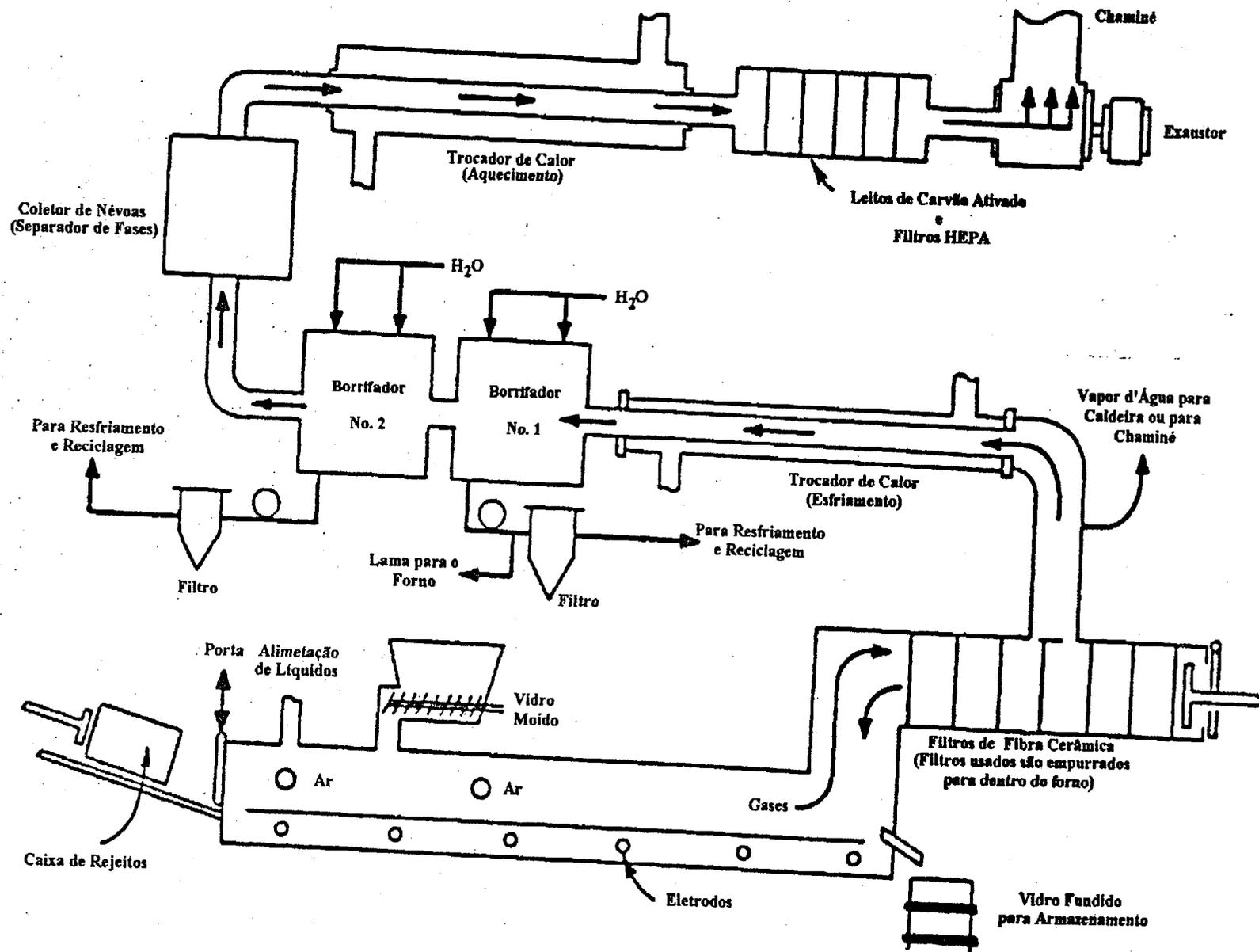


Figura 31. Sistema de combustão em vidros fundidos /26/.

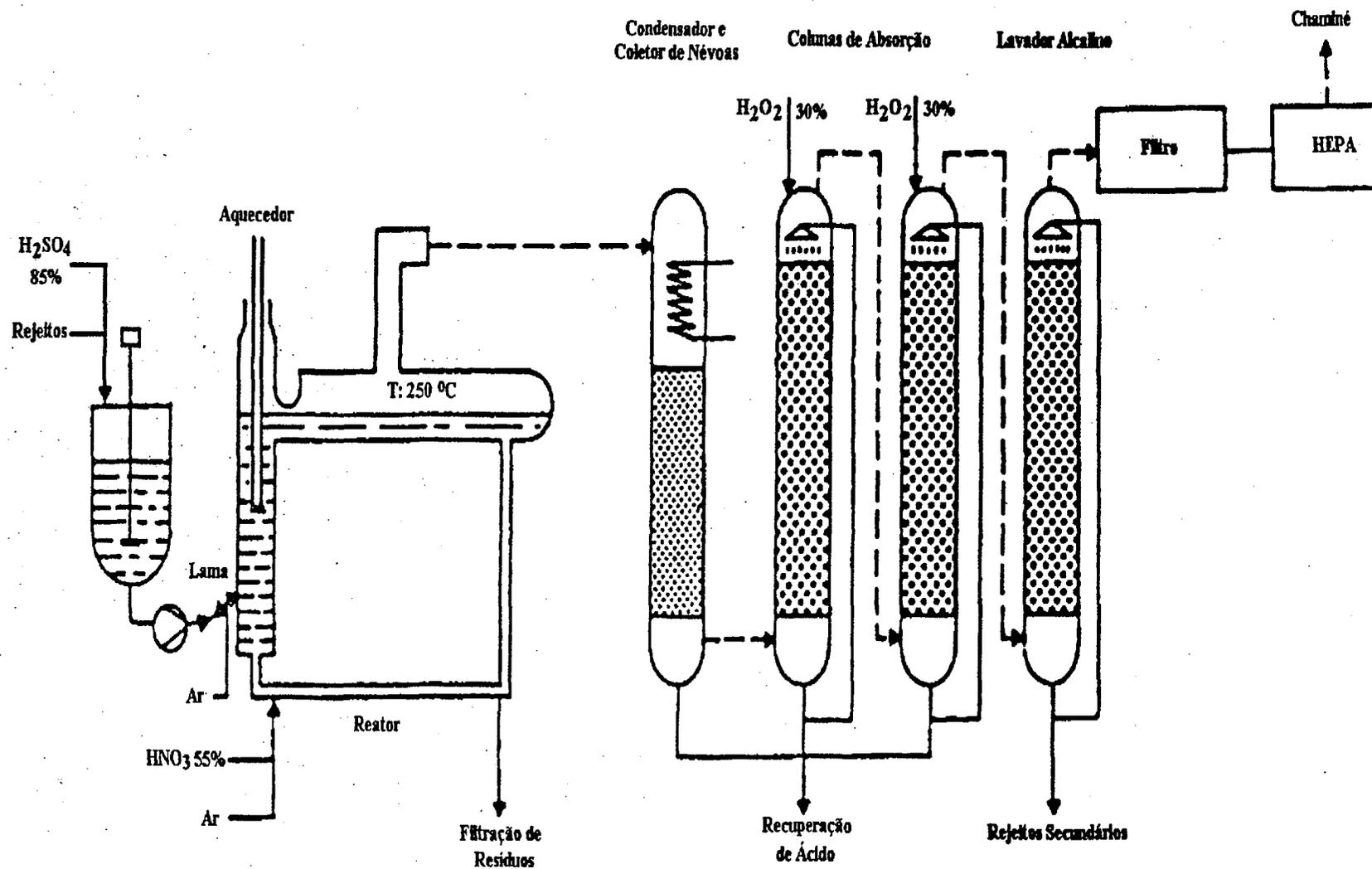


Figura 32. Instalação de digestão ácida em Mol, Bélgica /27/

Nos casos em que os rejeitos radioativos são compostos, principalmente, por materiais celulósicos, o processo de hidrólise enzimática pode ser bastante atrativo para a digestão do rejeito. Para obter-se uma taxa de digestão razoável é necessária a adição de água e fertilizantes contendo nitrogênio. Tanto a digestão aeróbia e como a anaeróbia podem ser aplicadas. Esta técnica é mais conhecida como fermentação biológica e é muito vantajosa no tratamento de rejeitos radioativos de atividade baixa.

## 5.2 Tipos de Incineradores

O panorama atual em que se encontram os países que possuem programas de gerenciamento de rejeitos radioativos próprios, com o emprego da incineração como forma de tratamento destes rejeitos, é apresentado na Tabela XI.

Tabela XI. Situação mundial sobre uso da incineração para tratamento de rejeitos radioativos /49/

País <sup>1</sup>	Estádio do Processo de Incineração no Mundo			
	Em operação	P & D <sup>2</sup>	Planejamento	Não aplicado
Africa do Sul				•
Alemanha	•			
Austrália				•
Austria	•			
Bélgica	•			
Brasil			•	
Bulgária			•	
Canadá	•			
Chile				•
China	•	•		
Coréia do Sul		•		
Cuba		•		

1- Países associados à Agência Internacional de Energia Atômica - IAEA

2- Pesquisa e Desenvolvimento

Estádio do Processo de Incineração no Mundo				
País <sup>1</sup>	Em operação	P & D <sup>2</sup>	Planejamento	Não aplicado
Egito				•
Espanha		•		
Estados Unidos	•			
Finlândia				•
Filipinas			•	
França	•			
Grécia				•
Holanda			•	
Hungria				•
Ilhas Maurício				•
Índia	•			
Indonésia	•			
Irlanda	•			
Itália	•			
Iugoslávia				•
Japão	•			
Jordânia				•
Kuwait	•			
Malásia			•	
México				•
Noruega	•			
Paquistão				•
Polônia		•	•	
Reino Unido	•			
Rep. Slovaca			•	
Rep. Tcheca		•		
Romênia	•			
Rússia	•			
Suécia	•			
Suíça	•			
Síria	•			
Tunísia			•	
Turquia		•		
Zâmbia				•
<b>TOTAL</b>	<b>20</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>13</b>

1- Países associados à Agência Internacional de Energia Atômica - IAEA

2- Pesquisa e Desenvolvimento

Nota-se que a maioria dos países empregam, ou estão em vias de desenvolver esta tecnologia, tornando clara sua importância. Portanto, a fim de caracterizar ainda mais a combustão como processo de tratamento, é necessário identificar as diversas formas com que ela é empregada e suas características principais, através de uma descrição sucinta dos tipos mais comuns de incineradores hoje existentes.

Estes incineradores empregam as técnicas de combustão descritas no item 5.1, e cada instalação possui características próprias, proporcionando uma grande variedade de incineradores.

As diferenças principais existentes entre uma instalação e outra, encontram-se basicamente no método de operação, arranjo dos equipamentos, capacidade de processamento, sistema de alimentação dos rejeitos (contínua ou batelada), sistema de tratamento de gases de combustão (via úmida, via seca ou mista), coleta de cinzas e características dos rejeitos a serem incinerados (sólidos ou líquidos), principalmente no que se relaciona ao tipo de emissão radioativa ( $\alpha$  ou  $\beta/\gamma$ ).

Com o intuito de auxiliar a seleção e projeto de sistemas futuros a Tabela XII fornece um sumário de algumas das principais instalações de incineração existentes, apresentando suas características básicas como: tipo de incinerador, capacidade, localização, tipo de rejeito e tratamento de gases aplicado.

**Tabela XII.** Experiência mundial de tratamento de rejeitos radioativos por combustão.

Localização	Tipo do Incinerador	Tipo de Rejeito	Capacidade	STG <sup>2</sup>	Referências
Centro de pesquisas em Seibersdorf, Áustria	Coluna vertical com ar controlado	RSC <sup>1</sup> podendo conter PVC	45 kg/h	Misto: Filtro cerâmico primário e secundário; injeção de água para esfriamento e lavagem; aquecedor elétrico e HEPA	7 26 27 37
Centro Eurochemic em Mol, Bélgica	Digestão ácida com recuperação de Pu	Combustíveis contaminados com Pu	1,5 kg de rejeitos em 4 L de ácidos (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> e HNO <sub>3</sub> )	Via úmida: condensador com coletor de névoa; 2 colunas de absorção; lavador de gases; filtro e HEPA	7 27
Centro de pesquisas nucleares em Mol, Bélgica	Pirólise com escorificação em temperaturas altas	Rejeitos combustíveis de nível baixo emissores β/γ e α contendo Pu e PVC	40 kg/h	Misto: injeção de ar para esfriamento; injeção de água; filtro manga; lavador Venturi; torre de lavagem com coletor de névoas; aquecedor elétrico e HEPA	7 26 27 37
Planta de desenvolvimento nuclear de Bruce, em Ontario, Canada	Câmara pirolítica vertical operando em batelada com pós queima	RSC <sup>1</sup> e pequenas quantidades de líquidos orgânicos	1000 a 1650 kg de sólidos e 60 L de líquidos por batelada (ciclo de 40 h)	Via seca: injeção de ar; trocador ar/ar; filtro manga de fibra de vidro	26 27 50

1- RSC - Rejeito sólido combustível

2- STG - Sistema de tratamento de gases de combustão

Tabela XII. Continuação

Localização	Tipo do Incinerador	Tipo de Rejeito	Capacidade	STG <sup>2</sup>	Referências
Centro de pesquisa nuclear de Jülich, Alemanha	Unidade vertical subdividida em duas câmaras, pirolítica e com ar controlado, seguido de pós queima	RSC <sup>1</sup> heterogêneos contendo PVC, óleos, solventes e rejeitos biológicos (carcaças de animais)	100 kg/h	Misto: trocador	7
				ar/ar; filtro a tecido;	26
				torre de lavagem;	27
				injeção de ar de diluição e HEPA	37
					50
Nukem em Hanau, Alemanha	Pirolisador ou pirohidrolisador com câmara de pós queima	Líquidos combustíveis e resinas de troca iônica	15 kg/h para líquidos 25 kg/h para resinas	Via úmida: Filtros de metal sinterizado; lavador de jato de água; lavador Venturi-Leisegang com coletor de névoas; aquecedor e filtro HEPA	27
Centro de pesquisa nuclear de Karlsruhe, Alemanha	Câmara de coluna vertical de ar controlado e câmara secundária	RSC <sup>1</sup> sem pré-tratamento	60 kg/h	Via seca: pré filtros cerâmicos; filtro	7
				cerâmico secundário;	26
				injeção de ar para esfriamento; HEPA	27
					37
					50, 51
CEN em Cadarache, França	Câmara vertical com duas zonas de queima com ar controlado	RSC <sup>1</sup> emissores $\alpha$ (contém Pu) e $\beta/\gamma$ com 30% de PVC	30 kg/h	Via úmida: injeção de ar para	7
				esfriamento; pré filtro; HEPA;	27
				diluição com ar e lavador de gases	37
					50

1- RSC - Rejeito sólido combustível

2- STG - Sistema de tratamento de gases de combustão

Tabela XII.Continuação

Localização	Tipo do Incinerador	Tipo de Rejeito	Capacidade	STG <sup>2</sup>	Referências
CEN em Grenoble, França	Câmara com forno fixo seguido de câmara secundária com ar em excesso	Rejeitos sólidos emissores $\beta/\gamma$ e solventes	15 kg/h operando em bateladas de 8 h/dia	Via seca: filtração em temperaturas altas; injeção de ar para esfriamento e HEPA	26 27
Marcoule, França	Câmara primária com aquecimento elétrico e Câmara secundária de pós queima	RSC <sup>1</sup> contaminados com Pu	1 kg/h	Via seca: injeção de ar para esfriamento; trocador de calor e 2 filtros de fibra mineral	7 27 35 37 51
Planta de Tokai-Mura em Tokai, Japão	Câmara de coluna vertical de ar controlado (desenvolvido pela KfK alemã)	RSC <sup>1</sup> sem pré-tratamento	60 kg/h	Via seca: pré filtros cerâmicos; filtro cerâmico secundário; trocador de calor ar/ar; HEPA; lavador de gases	7 27
KEMA em Arnhem, Holanda	Incinerador ciclônico com ar em excesso e câmara de pós queima	RSC <sup>1</sup> ; RLC <sup>3</sup> ; materiais de fibra de vidro não combustíveis; materiais triturados como papeis, roupas, luvas; óleos, filtros HEPA com poder calorífico entre e a 44 MJ/kg	20 kg/h	Via seca: injeção de ar; trocador de calor ar/ar; diluição dos gases com ar; ciclone; filtro manga; 2 filtros HEPA	27

1- RSC - Rejeito sólido combustível

2- STG - Sistema de tratamento de gases de combustão

3- RLC - Rejeito líquido combustível

Tabela XII. Continuação.

Localização	Tipo do Incinerador	Tipo de Rejeito	Capacidade	STG <sup>2</sup>	Referências
Centro de pesquisa energética em Studsvik, Suécia	Coluna vertical com ar em excesso seguido de uma câmara de pós queima	RCS <sup>1</sup> provenientes de plantas de potência, hospitais e fabricação de combustível	200 a 400 kg/h	Via seca: caldeira para recuperação de energia; filtro manga; leito de carvão ativado; injetor de calcáreo; lavador a seco	7 26 27 37
Instituto federal para pesquisa de reatores em Würenlingen, Suíça	Câmara única de coluna vertical com ar em excesso como as desenvolvidas na KfK alemã	Rejeitos combustíveis vindos de reatores, indústrias, hospitais e institutos de pesquisa sem PVC	25 kg/h	Via seca: 3 filtros para temperaturas altas; injeção de ar para esfriamento	7 26 27 37
CEGB Hinkley Point, Reino Unido	Câmara horizontal com ar em excesso seguido por uma câmara de pós queima	RSC <sup>1</sup> com quantias limitadas de PVC e borracha	70 Kg/h	Via úmida: câmara de expansão; trocador de calor; lavador de gases; retentor de fagulhas; pré filtros; filtro HEPA	7 26 27 37
Windscale, Reino Unido	Câmara de combustão com aquecimento elétrico e ar controlado	Rejeitos contendo Pu	5 kg/h	Via úmida: lavador de gases e filtro HEPA	7 37
Hanford, Estados Unidos da América	Incinerador de plasma e microondas	Rejeitos orgânicos e materiais inertes fundidos	5 kg/h	Via úmida: lavador de gases e filtro HEPA	7 37

1- RSC - Rejeito sólido combustível

2- STG - Sistema de tratamento de gases de combustão

Tabela XII. Continuação

Localização	Tipo do Incinerador	Tipo de Rejeito	Capacidade	STG <sup>2</sup>	Referências
Savannah River Plant, Carolina do Sul, Estados Unidos da América	Câmara horizontal com ar controlado e câmara secundária	RSC <sup>1</sup> e RLC <sup>3</sup> emissores $\beta/\gamma$ como algodão, papel, polietileno, solventes (TBP)	180 kg/h para sólidos, 100 kg/h para líquidos	Via seca: injetor de água, filtros manga,	26
				filtros HEPA	27
					50
Instalação experimental do Laboratório Nacional de Engenharia de Idaho (INEL), Estados Unidos da América	Câmara para oxidação através da fusão em sais	RSC <sup>1</sup> emissores $\beta/\gamma$ , metais (aço carbono) com contaminação baixa	180 kg/h	Via seca: esfriamento com diluição de ar ; filtro manga; filtro HEPA	27
Rocky Flats, Colorado, Estados Unidos da América	Forno rotativo com remoção automática de cinzas seguido de uma câmara secundária para pós queima	Rejeitos com atividade específica alta, combustíveis emissores $\alpha$	40 kg/h	Via úmida: 2 lavadores Venturi em série; lavador absorvedor e 4 estádios com filtros HEPA	7
					27
					35
					37
				estádios com filtros HEPA	51
Rocky Flats, Colorado, Estados Unidos da América	Leito fluidizado também usado para recuperação de Pu	Rejeitos contendo Pu e 45% de PVC como papel, roupas, madeira, plásticos solventes etc	80 kg/h	Via seca: ciclone, filtro de metal sinterizado, trocador de calor, injetor de ar e 5 estádios com filtros HEPA	7
					26
					27
					35
					37

1- RSC - Rejeito sólido combustível

2- STG - Sistema de tratamento de gases de combustão

3- RLC - Rejeito líquido combustível

Tabela XII. Continuação

Localização	Tipo do Incinerador	Tipo de Rejeito	Capacidade	STG <sup>1</sup>	Referências
Rocky Flats, Colorado, Estados Unidos da América	Forno com grelha móvel (agitada) com pós queima	Rejeitos com atividade específica alta, combustíveis emissores $\alpha$	68 kg/h	Via úmida: 2 lavadores Venturi em série; lavador absorvedor e 4 estádios com filtros HEPA	27 35 37
Laboratório Nacional de Los Alamos (LANL), New Mexico, Estados Unidos da América	Câmara dupla de ar controlado	Rejeitos transurânicos (TRU) contaminador como papel, sacos, borracha	45 kg/h	Via úmida: torre de lavagem; lavador Venturi; torre de absorção com recheio em contracorrente; condensador com coletor de névoas; aquecedor e 2 filtros HEPA	7 26 27 37

1- STG - Sistema de tratamento de gases de combustão

# CAPÍTULO 6

## ASPECTOS COMPARATIVOS DO PROCESSO DE INCINERAÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS

### 6.1. Técnicas de Redução de Volume

Dentro do contexto deste trabalho são enfatizadas somente algumas técnicas, consideradas como as mais significativas e condizentes com a proposta de um sistema de incineração como forma de redução de volume.

Estas técnicas podem ser agrupadas em três categorias: redução de volume dos rejeitos durante sua geração, após sua geração e através de procedimentos administrativos e de gerenciamento interno.

Procedimentos administrativos e gerenciais de uma instalação nuclear ou radiativa abrangem pontos cruciais a um desenvolvimento tecnológico de primeira grandeza como: existência de uma estrutura organizacional do empreendimento bem definida; objetivos e metas traçados seriamente dentro dos limites sócio-econômicos envolvidos no local; mão-de-obra especializada e treinada; integração dos setores afins; entre outras, de mesmo peso.

Sabe-se que a falta de planejamento em qualquer atividade torna, quase impossível a realização e cumprimento das metas estipuladas, sendo o contrário, fator de incentivo e força motriz para obtenção de sucesso. Como exemplo, relacionado à redução

de volume de rejeitos radioativos, destacam-se os procedimentos de controle de entrada de materiais desnecessários, em áreas com risco de contaminação radioativa.

A redução de volume dos rejeitos, enquanto gerados, envolvem conceitos contemporâneos de qualidade, otimização de processos industriais, segregação de materiais empregados, descontaminação e reciclagem. Aplicando-se esta linha de trabalho, seu aperfeiçoamento deve estar intrinsecamente ligado à busca do que pode ser designado como *descarga zero* ou *geração zero* de rejeitos ou resíduos em geral. Apesar deste vislumbramento ser uma verdadeira utopia no atual estágio de evolução tecnológica do homem, ela sempre deverá ser almejada como objetivo final de toda e qualquer atividade humana. Do contrário, o que seria da incineração se nos primórdios da existência humana, o homem não tivesse interesse pelo poder do fogo.

Na impossibilidade da *geração zero*, os rejeitos devem, finalmente, ser tratados através de processos adequados que reduzam ao máximo seu volume.

A Figura 33 apresenta um diagrama que mostra o procedimento para a redução de volume de rejeitos radioativos nos pontos de geração, usando o método da descontaminação como exemplo.

A seleção de um determinado processo de tratamento, depende da natureza dos rejeitos gerados, normas e legislações vigentes e o produto final que se deseja obter. A liberação, armazenagem e disposição final, além de aspectos financeiros relacionados ao custo da armazenagem, por unidade de volume, e custo do processo de tratamento, também são importantes.

As tecnologias principais envolvidas no processo de tratamento de rejeitos radioativos são apresentadas na Tabela XIII, onde é possível observar a abrangência de cada técnica.

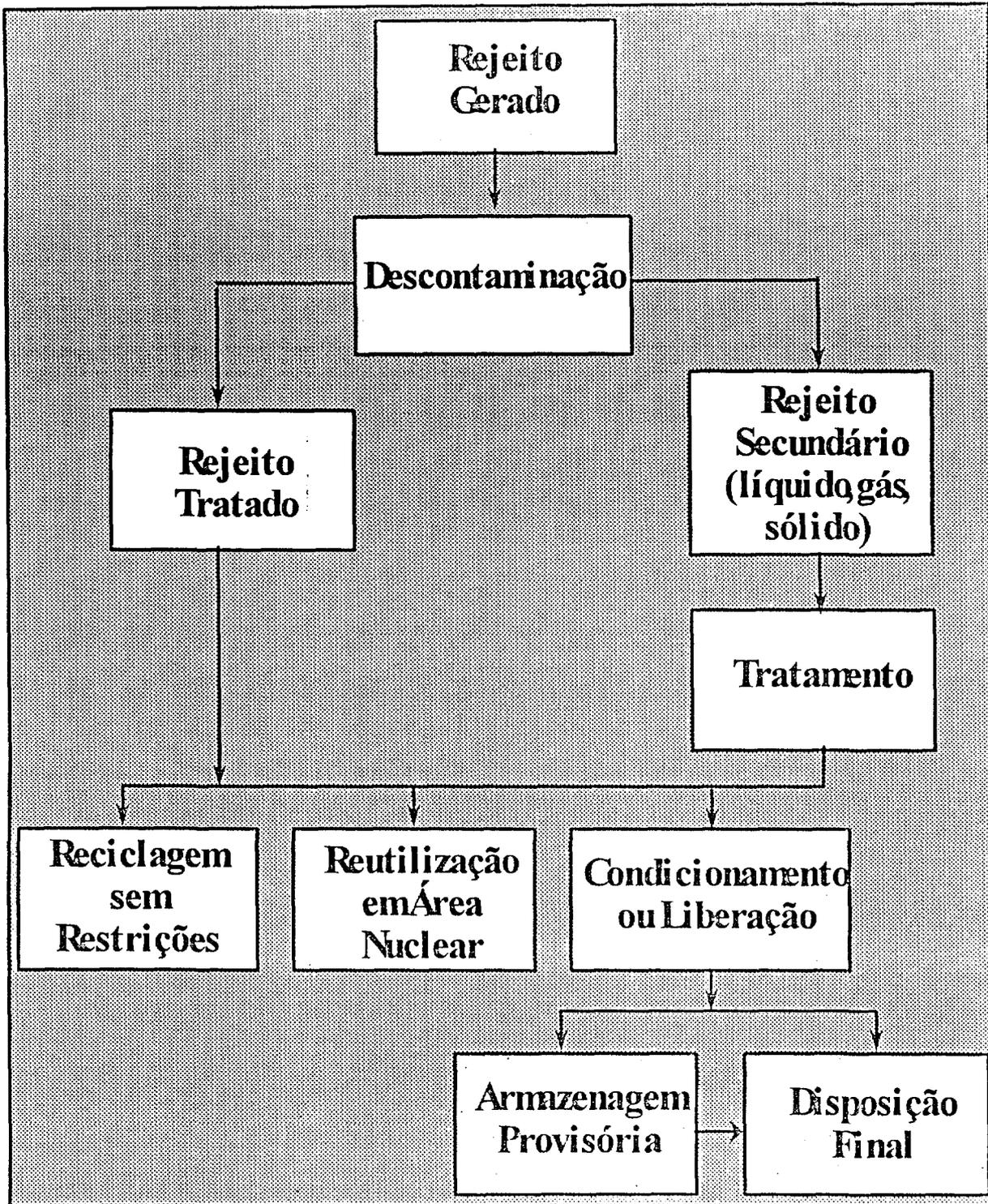


Figura 33. Diagrama esquemático da redução de volume por descontaminação do rejeito em seu ponto de geração /51/

Tabela XIII. Tecnologias empregadas no tratamento de rejeitos radioativos /52/

Tipo de tecnologia	Tipo de rejeito		
	Líquidos	Sólidos úmidos	Sólidos secos
<b>Transferência</b>			
Descontaminação	-	-	•
Filtração	•	•	-
Troca iônica	•	-	-
Regeneração química	-	•	-
Ultrafiltração	•	-	-
Osiose reversa	•	-	-
<b>Concentração</b>			
Evaporação	•	-	-
Destilação	•	-	-
Cristalização	•	-	-
Floculação	•	-	-
Precipitação	•	-	-
Sedimentação	•	•	-
Centrifugação	•	•	-
Secagem	-	•	-
Desidratação	-	•	-
Compactação	-	-	•
Enfardamento	-	-	•
Trituração	-	-	•
<b>Transformação</b>			
Incineração	•	•	•
<b>Condicionamento</b>			
Encapsulamento	-	•	•
Imobilização	•	•	•
Absorção	•	•	-

Com o intuito de comparar a abrangência destas técnicas em relação às categorias de rejeitos radioativos considerados neste trabalho, apresenta-se, também, as Tabelas XIV, XV e XVI onde estão discretizadas as tecnologias de tratamento que podem ser aplicadas em alguns tipos de rejeitos mais comuns.

Tabela XIV. Tecnologias empregadas no tratamento de alguns tipos de rejeitos líquidos de nível baixo de atividade /52/.

Tecnologia	Soluções regenerativas	Soluções de descontaminação	Líquidos orgânicos em geral (ex. óleos)	Rejeitos biológicos e de cintilação
<b>Transferência</b>				
Filtração	•	•	•	•
Troca Iônica	•	-	-	•
Ultrafiltração	•	-	-	•
Osmose Reversa	•	-	-	•
<b>Concentração</b>				
Evaporação	•	•	-	•
Destilação	•	•	-	•
Cristalização	•	•	-	•
Floculação	•	•	-	•
Precipitação	•	•	-	•
Sedimentação	•	•	-	•
Centrifugação	•	•	-	•
<b>Transformação</b>				
Incineração	-	-	•	-
<b>Condicionamento</b>				
Imobilização	-	-	•	•
Absorção	-	-	•	•

Tabela XV. Tecnologias empregadas no tratamento de alguns tipos de rejeitos sólidos úmidos de nível baixo de atividade /52/.

Tecnologia	Concentrado de evaporação e lamas	Resinas de troca iônica	Lamas de filtros	Cartuchos de filtros
<b>Transferência</b>				
Filtração	•	-	-	-
Regeneração Química	-	•	-	-
<b>Concentração</b>				
Sedimentação	•	-	-	-
Centrifugação	•	-	-	-
Secagem	•	-	•	-
Desidratação	•	•	•	-
<b>Transformação</b>				
Incineração	• <sup>1</sup>	•	•	-
<b>Condicionamento</b>				
Imobilização	•	•	•	•
Encapsulamento	-	•	•	•
Absorção	•	-	-	-

1- Aplicado somente para lamas

Tabela XVI. Tecnologias empregadas no tratamento de alguns tipos de rejeitos sólidos secos de nível baixo de atividade /52/.

Tecnologia	Papel, plástico, borracha etc	Equipamentos contaminados	Materiais irradiados
<b>Transferência</b>			
Descontaminação	-	•	-
<b>Concentração</b>			
Compactação	•	-	-
Trituração	•	•	•
Enfardamento	•	-	-
<b>Transformação</b>			
Incineração	•	-	-
<b>Condicionamento</b>			
Encapsulamento	-	-	•
Imobilização	•	•	-

Para ilustrar as diferenças existentes entre um processo de tratamento e outro, algumas técnicas de redução de volume relacionados aos rejeitos radioativos sólidos são brevemente descritas a seguir:

#### *Trituração*

É uma tecnologia de concentração que é usada para reduzir o tamanho do material ou preparar uma mistura homogênea de rejeitos radioativos sólidos de nível baixo. Esta técnica emprega trituradores capazes de rasgar, quebrar, moer, picotar e/ou fragmentar materiais sólidos, tornando-os menores. A trituração é muitas vezes utilizada junto com compactadores e incineradores, proporcionando um fator de redução de volume melhor.

### *Compactação e Supercompactação*

A compactação é um processo mecânico para a redução de volume no qual o material é comprimido nas embalagens de armazenamento e disposição final. Geralmente utilizam-se tambores metálicos de 100 ou 200 L. Em geral este processo alcança fatores de redução de volume entre 2 e 10 /23, 52/. Os compactadores compõem-se de um êmbolo mecânico ou hidráulico que aplica uma força de compressão em torno de 4,5 a 1500 toneladas e pressões de 2 a 770 atm /51, 52/ sobre o material a ser compactado. Nesta faixa encontram-se tanto os sistemas que operam a pressão baixa, que empregam forças de no máximo 100 toneladas, e compactadores que operam a pressão alta, ou supercompactadores, que utilizam forças maiores do que 100 toneladas. Os parâmetros que mais influenciam o fator de redução de volume deste sistema, durante a compactação, são: a força aplicada, a densidade dos rejeitos, o espaço livre dentro da embalagem e as características elásticas dos rejeitos.

O processo de compactação para fins de disposição final é relativamente barato em termos econômicos, porém o custo da disposição para o embalado gerado neste processo é de aproximadamente 57 a 81% do custo total do tratamento. A título comparativo, no processo de incineração este percentual varia em torno de 5 a 10% do custo total do tratamento /52/. A avaliação econômica destas técnicas é abordada no item 6.2.

A Figura 34 mostra um diagrama exemplificando o processo de redução de volume envolvendo a compactação.

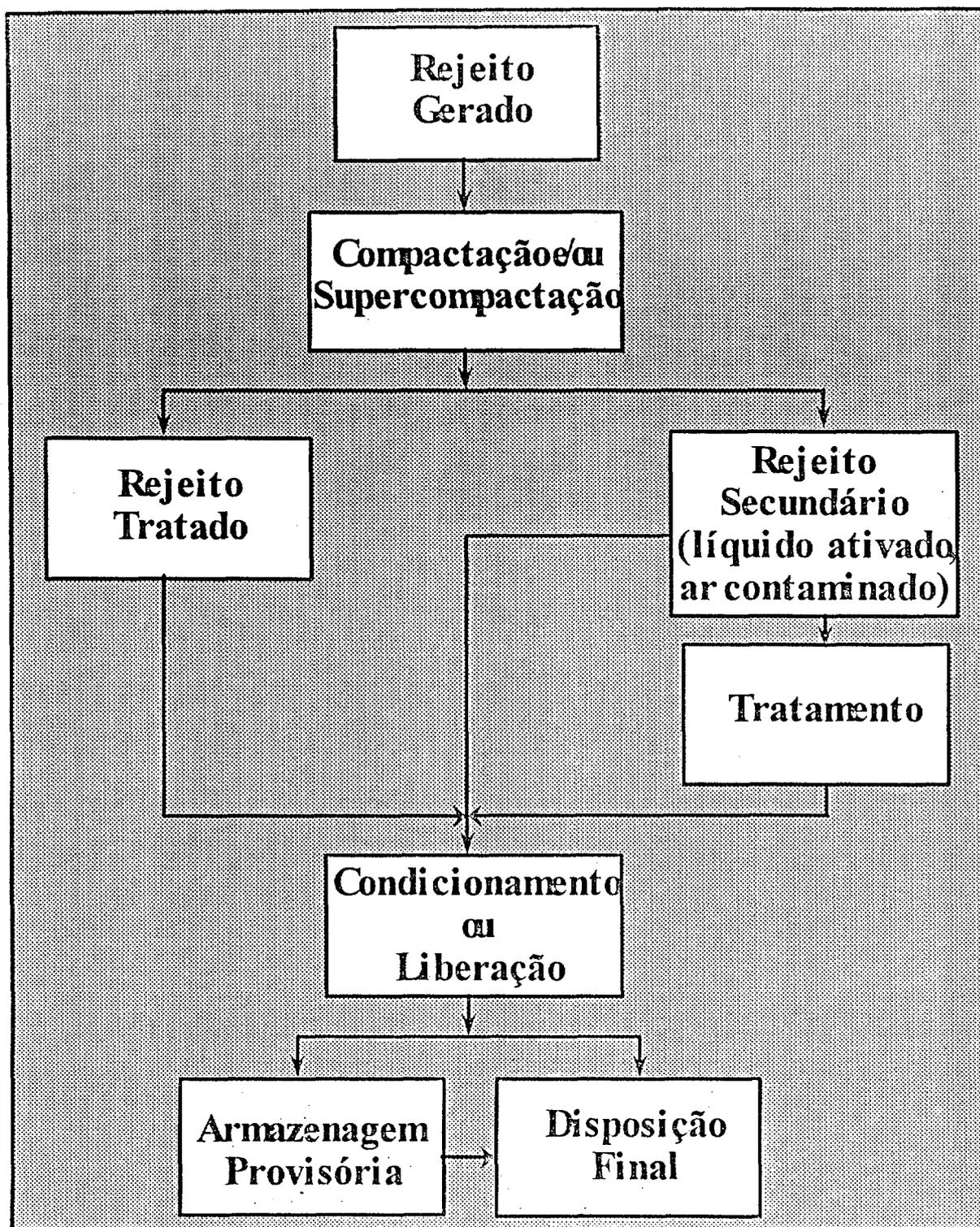


Figura 34. Diagrama esquemático de um processo de tratamento por compactação /51/

### Condicionamento

O condicionamento de rejeitos radioativos sólidos consiste na conversão dos rejeitos para uma forma física não dispersável e com qualidade apropriada para a armazenagem provisória e disposição final.

O condicionamento pode ser caracterizado pelo encapsulamento ou imobilização dos rejeitos radioativos. A imobilização emprega materiais com os quais se mistura os rejeitos e se obtém um produto sólido, monolítico, com propriedades mecânicas, térmicas e radiológicas adequadas. Os agentes imobilizadores mais adequados são o cimento, concreto, betume, polímeros orgânicos e raramente vidros, podendo ainda ser usada uma combinação destes materiais. O uso de uma determinada matriz de imobilização depende das características físico-químicas dos rejeitos que se deseja imobilizar.

As Figuras 35, 36 e 37, mostram gráficos comparativos relacionando às técnicas de tratamento, entre eles a incineração, com a redução de volume, para rejeitos radioativos sólidos de nível baixo de atividade em geral /23/, resinas de troca iônica /37/ e cinzas de incineração /40 /, respectivamente.

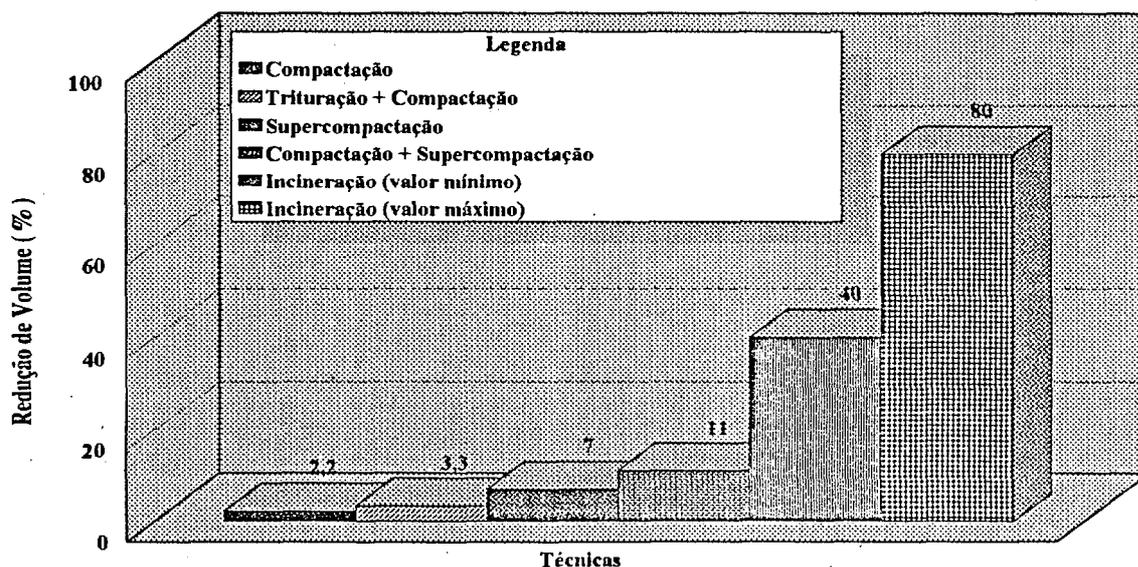


Figura 35. Redução de volume (%) aplicando-se algumas técnicas de tratamento de rejeitos radioativos sólidos de nível baixo de atividade /23/.

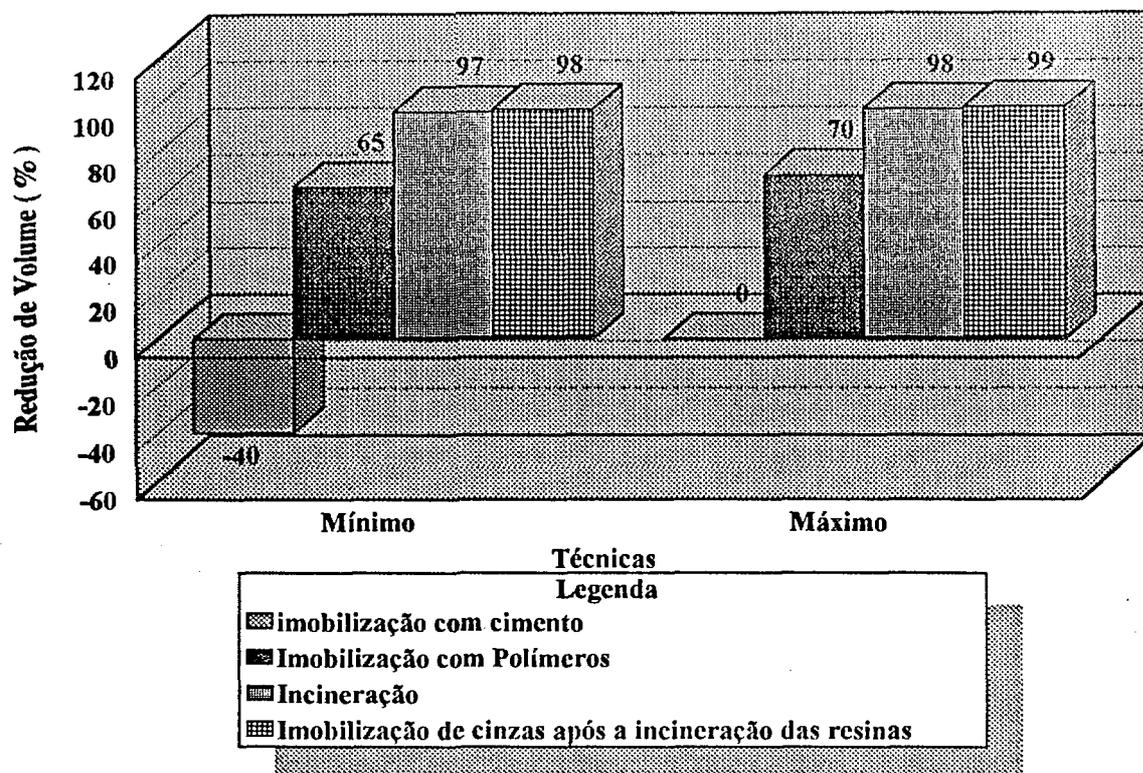


Figura 36. Redução de volume (%) de resinas de troca iônica utilizando-se técnicas diferentes /37/.

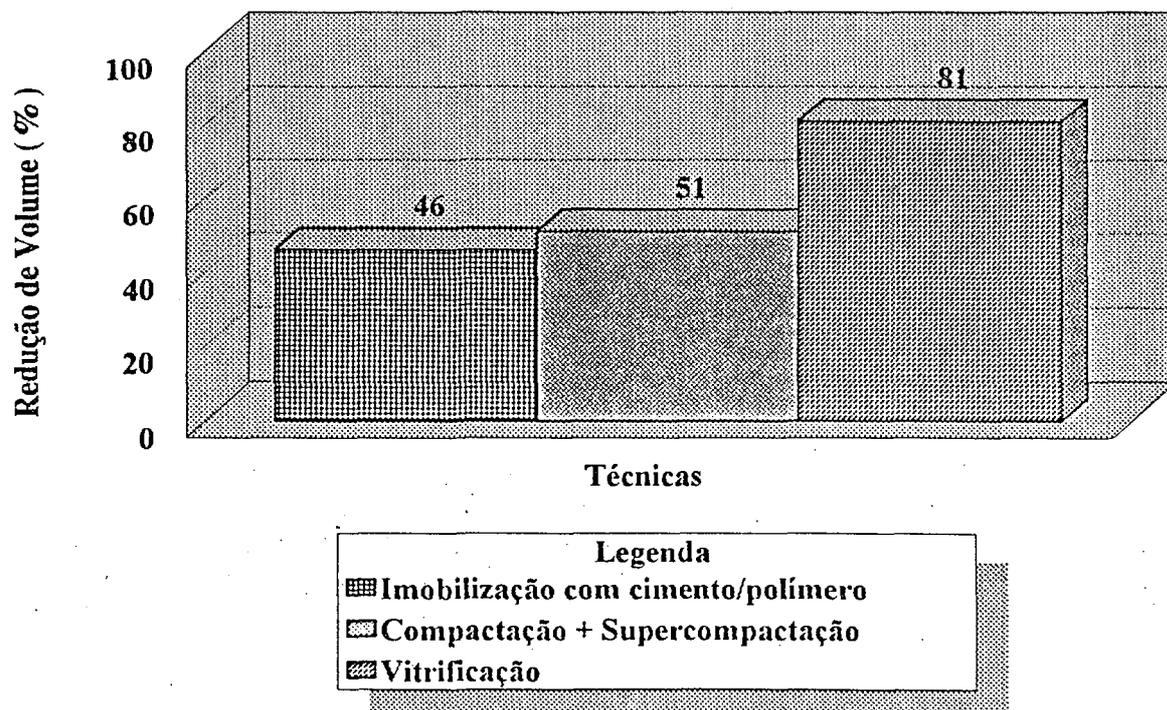


Figura 37. Redução de volume (%) de cinzas de incineração usando-se técnicas diferentes /40/.

## 6.2. Avaliação Econômica

A avaliação econômica das diversas tecnologias de tratamento deve ser feita para definir e escolher a alternativa mais econômica e viável. É importante ressaltar que somente esta avaliação não define a tecnologia a ser empregada, e sempre deverá estar acompanhada da avaliação dos benefícios de cada técnica. Portanto só após a análise criteriosa do custo/benefício poder-se-á fazer uma escolha segura do processo a ser empregado. Deve-se fazer ressalvas nesta escolha quanto às questões tecnológicas, geográficas, sociais e políticas envolvidas.

O custo do capital para investimento, o custo operacional e o custo de energia/sistemas auxiliares, são inteiramente dependentes do tipo de incinerador, sistemas empregados e quantidade e tipo de rejeitos a serem processados. O custo do capital abrange o terreno, projeto, instalação, montagem etc. Estes custos tendem a ser altos quando comparados com outros processos de tratamento. Tipicamente o custo de um processo de incineração encontra-se na faixa de 2 a 8 milhões de dólares e o custo do capital total pode variar de 2 a 3 vezes os custos dos equipamentos empregados /52/.

Porém, esta não deve ser uma avaliação isolada, conforme já referido. Os benefícios auferidos por cada técnica devem ser analisados em um contexto mais amplo. Isto significa que não necessariamente um processo será descartado porque tem um custo de investimento inicial muito alto, pois considerando-se os benefícios econômicos relacionados aos custos de transporte, armazenagem e disposição dos produtos finais gerados, em função do fator de redução de volume obtidos no processo, poder-se-á mudar o quadro de escolha de forma significativa.

Para ilustrar este fato são apresentadas avaliações econômicas hipotéticas de sistemas de redução de volume por compactação a baixa pressão, supercompactação e incineração, encontrados na literatura /52/ nas Figuras 38, 39, 40 e 41. Estas ilustrações fornecem o capital de investimento equivalente para os sistemas citados em relação à disposição final dos embalados gerados no processo. Estes valores foram obtidos através de algumas hipóteses relacionadas à composição dos rejeitos processados, conforme segue:

Tipo de Rejeito	Composição 1 (%)	Composição 2 (%)
Compactável	45	70
Combustível	70	85

Os resultados desta avaliação são apresentados na forma tabular e gráfica, para discernir melhor as diferenças encontradas entre um processo e outro.

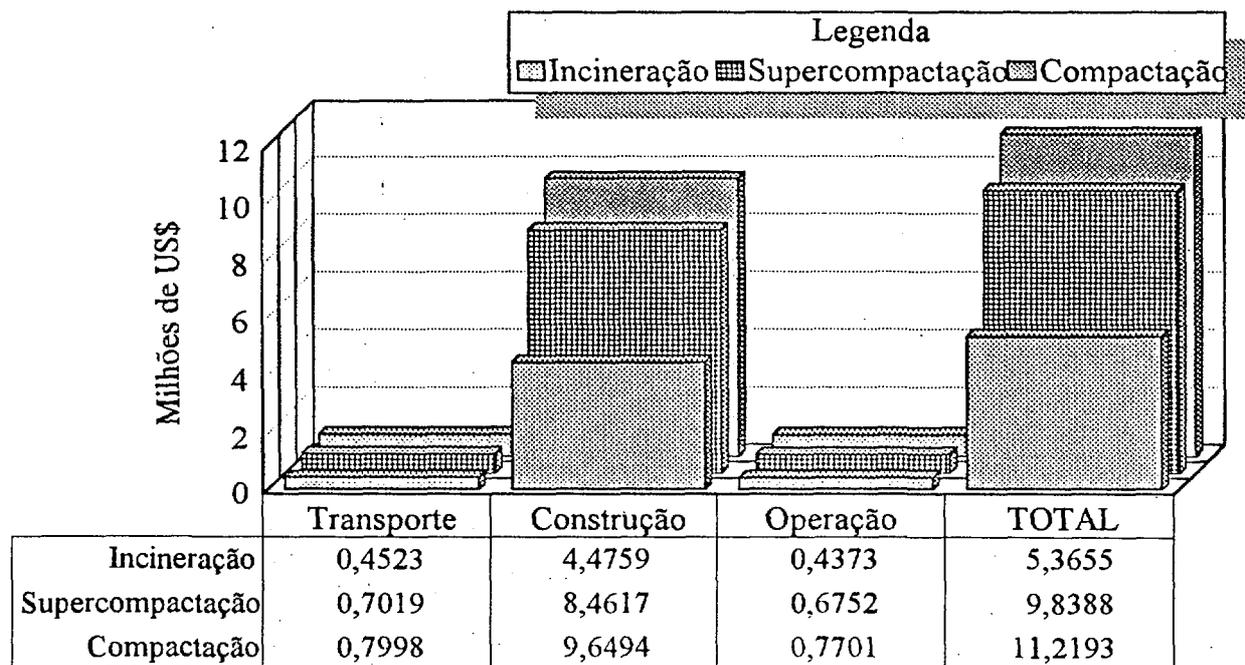


Figura 38. Capital de investimento equivalente ao transporte de embalados, construção e operação do repositório final para um volume de 500 m<sup>3</sup> de rejeitos radioativos tratados da Composição 1.

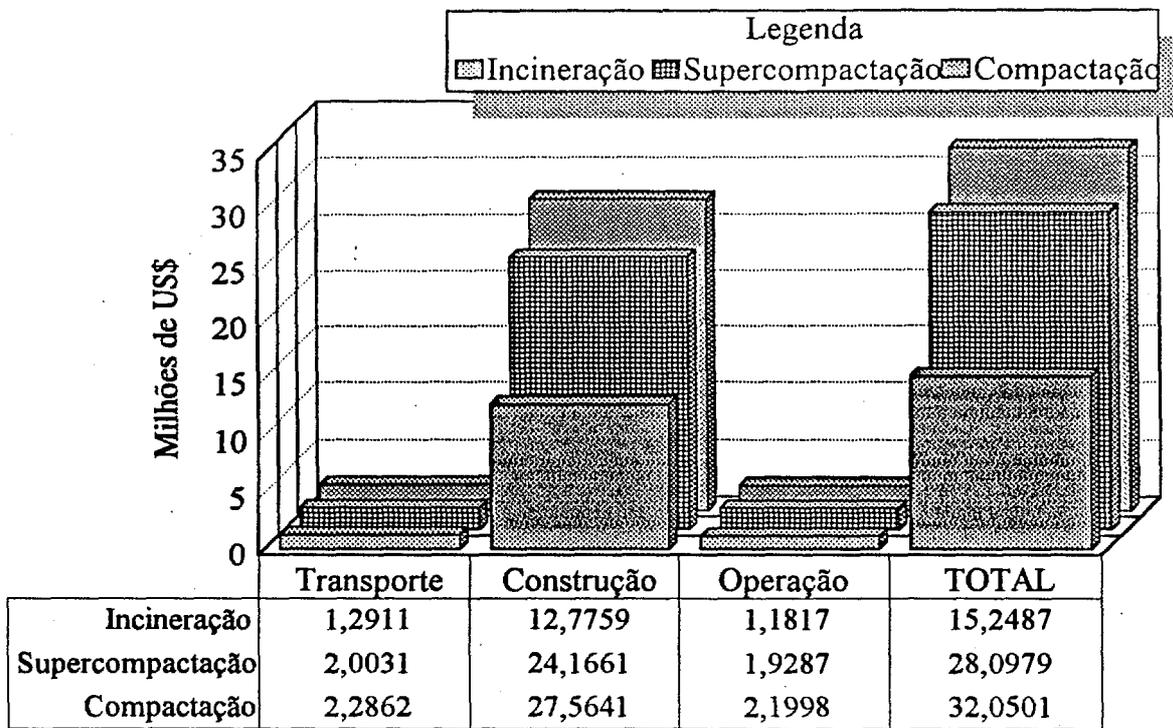


Figura 39. Capital de investimento equivalente ao transporte de embalados, construção e operação do repositório final para um volume de 1400 m<sup>3</sup> de rejeitos radioativos tratados da Composição 1.

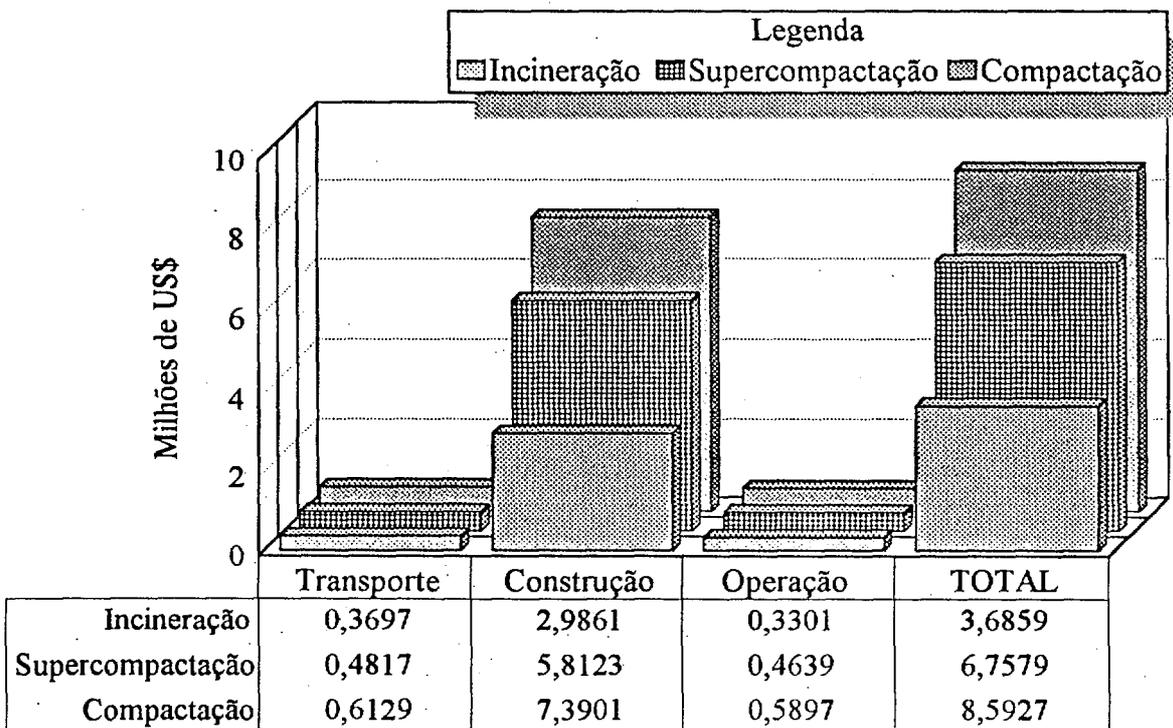
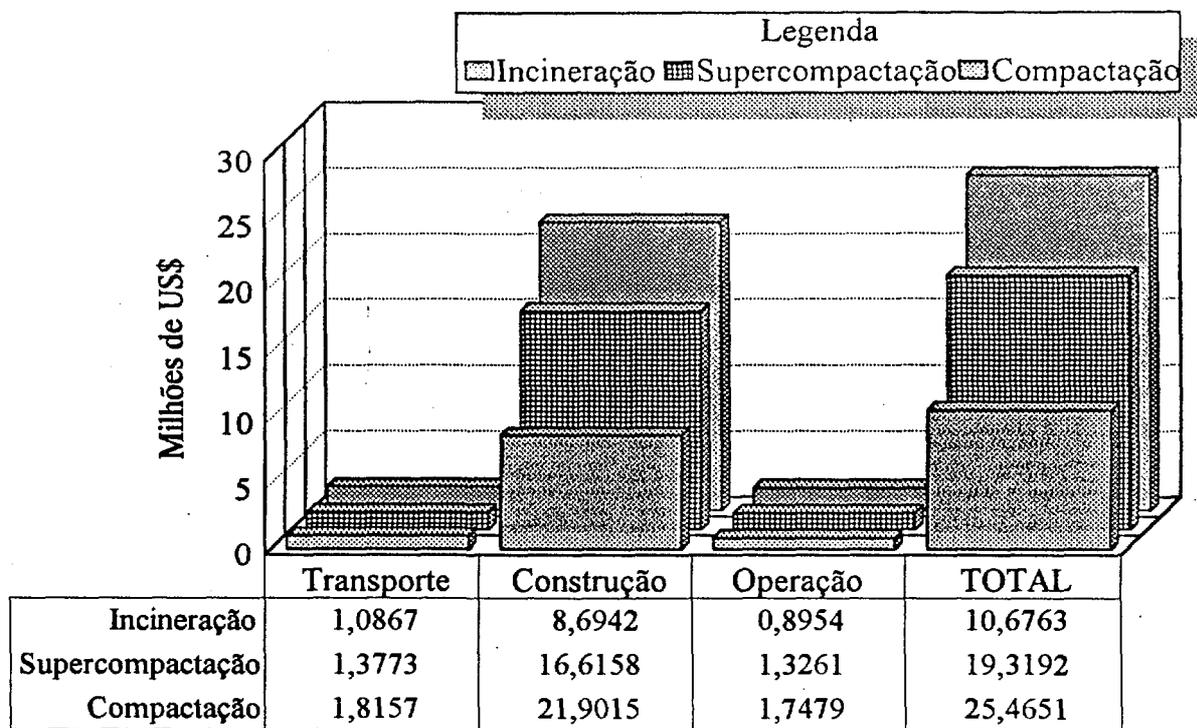


Figura 40. Capital de investimento equivalente ao transporte de embalados, construção e operação do repositório final para um volume de 500 m<sup>3</sup> de rejeitos radioativos tratados da Composição 2.



**Figura 41.** Capital de investimento equivalente ao transporte de embalados, construção e operação do repositório final para um volume de 1400 m<sup>3</sup> de rejeitos radioativos tratados da Composição 2.

Ao se observar as Figuras acima, conclui-se que a incineração é uma tecnologia de tratamento de rejeitos radioativos bastante atrativa do ponto de vista econômico.

### 6.3. Comparação entre incineração de rejeitos radioativos e incineração de resíduos convencionais

Já foram feitas propostas de utilização de um sistema que incinere rejeitos radioativos de nível baixo de atividade e resíduos convencionais ao mesmo tempo.

Existem basicamente três categorias de incineradores para resíduos convencionais: incineração de resíduos domésticos (lixo urbano); incineração de resíduos hospitalares e finalmente a incineração de resíduos industriais perigosos /14, 15, 16, 31/.

A intenção de usar a mesma instalação surge da idéia de que os processos de incineração possuem características comuns como: as técnicas de combustão empregadas; sistemas de instrumentação e controle; operação etc, além do que os materiais envolvidos possuem composições químicas, características de toxicidade, patogenicidade e propriedades físicas semelhantes.

Estes fatores tornam a proposta ainda mais atrativa, quando uma nação, que já possui uma certa experiência no ramo convencional, como é o caso do Brasil, se vê diante da possibilidade da obtenção de soluções a prazos curtos, dos problemas causados pelo aumento crescente da geração de rejeitos radioativos de nível baixo e indefinições políticas sobre o seu gerenciamento, pelos órgãos responsáveis.

Porém a realidade é outra, quando se faz uma observação mais atenta. Existem diversos pontos que distinguem um processo de incineração que opera com materiais radioativos dos não radioativos.

A diferença principal é o próprio material a ser incinerado. Baseando-se nisto, é possível resumir, alguns dos pontos principais que inibem a proposta feita:

- Manuseio do material a ser incinerado;
- Materiais de construção especiais que proporcionem características de blindagem em algumas etapas do processo por exemplo, alimentação, coleta de cinzas etc.;
- Sistema de proteção radiológica além dos sistemas de segurança da instalação;

- Procedimento de monitoração radiológica a fim de garantir as normas que limitam a exposição do público e pessoal de operação a níveis tão baixos quanto razoavelmente exequíveis, dentro de padrões de segurança física e radiológica - princípio ALARA;
- Gerenciamento das cinzas diferenciado por causa da contaminação radioativa, exigindo-se processos de condicionamento, armazenagem, transporte e disposição final específicos;
- Sistema de tratamento de gases mais sofisticado, visando, além do tratamento convencional relacionado aos compostos corrosivos e insalubres formados, a obtenção de fatores de descontaminação adequados a emissão para a atmosfera, minimizando riscos de contaminação do meio ambiente nas vizinhanças da instalação;
- Custos de implantação e operação maiores;
- Aspectos normativos e legislativos específicos etc.

Face ao exposto cabe afirmar que os rejeitos radioativos e os resíduos convencionais devem ser gerenciados separadamente. Entretanto, sob certas circunstâncias, um processamento conjunto destes materiais em uma unidade radioativa pode ser possível, tendo-se o aval dos órgãos normativos e legislativos vigentes do país, embora não seja recomendável. Isto é, uma instalação que incinere rejeitos radioativos não deve ser prestadora de serviços para outras instituições que gerem resíduos convencionais nem para a entidade que possui o incinerador.

# CAPÍTULO 7

## CENTRO EXPERIMENTAL ARAMAR

Um exemplo real da instalação de um incinerador se aplicada a um dos centros de desenvolvimento nuclear existentes no Brasil, o Centro Experimental ARAMAR - CEA.

O CEA é um empreendimento grandioso dirigido e coordenado pela Marinha Brasileira e está situado na região sorocabana, no município paulista de Iperó, a menos de 100 km da cidade de São Paulo. Este centro tem como maior responsabilidade, cumprir um programa de pesquisa e desenvolvimento importantes, voltados ao uso pacífico da energia nuclear, com objetivos bem definidos.

Em suas instalações são previstas atuações nas áreas seguintes:

- a) Sistemas propulsores e simuladores nucleares e convencionais. Estes sistemas serão pesquisados com a construção de um protótipo de reator compacto, motores, turbinas a gás e sistemas a vapor;
- b) Ciclo do combustível, em atividades relacionadas à conversão, enriquecimento isotópico e reconversão;
- c) Mecânica de precisão, sistemas elétricos e eletrônicos;
- d) Laboratório rádio ecológico, responsável por pesquisas do ecossistema local, monitoramento ambiental e individual;
- e) Homologação de equipamentos, via ensaios de desempenho e normas técnicas; e
- f) Atividades de apoio e atividades sociais necessárias.

O desenvolvimento e atuação nas áreas ligadas à pesquisa de reatores e ciclo do combustível nuclear, resultam na geração de materiais classificados como rejeitos radioativos.

A geração destes rejeitos resulta na adoção de procedimentos que permitem eliminá-los quando efluentes, reduzir seu volume e condicioná-los, visando garantir requisitos de segurança e padrões de qualidade condizentes com a proposta de desenvolvimento tecnológico do CEA, dentro das perspectivas legislativas e normativas vigentes a nível nacional e internacional. Estes procedimentos devem ser executados dentro de um plano de gerenciamento de rejeitos radioativos, organizado e abrangente.

O programa atual de gerenciamento de rejeitos radioativos previsto para o CEA, consiste de um plano descentralizado, isto é, cada unidade geradora deve tratar o seu próprio rejeito.

Enfocando apenas os rejeitos sólidos, razão deste trabalho, é importante notar que a maioria das técnicas descritas, encontram-se ainda na fase de pré-projeto, como é o caso do desmantelamento, triagem, compactação e imobilização, sendo as demais, coleta e encapsulamento, executadas de forma provisória.

Atualmente, apenas duas instalações existentes no CEA geram rejeitos radioativos, o Laboratório de Enriquecimento Isotópico - LEI, e o Laboratório de Materiais Nucleares e Cerâmicos - LABMAT.

Um levantamento da quantidade de rejeitos radioativos gerados nestas instalações foi efetuado junto aos responsáveis destas áreas, obtendo-se os dados seguintes:

---

Instalações geradoras de rejeitos radioativos:	LEI e LABMAT
Tipo de rejeito radioativo sólido combustível:	Papéis, Plásticos e Tecidos em geral
Classe do rejeito radioativo gerado (Tabela IV):	3
Geração anual média de rejeitos radioativos, no momento:	320 kg/ano
Massa Total Estocada desde 1988:	2217,5 kg
Tipo e quantidade de embalagens estocadas:	32 tambores metálicos de 200 L
Contaminantes principais:	Urânio e sua família
Nível de radiação na superfície do embalado:	em média 0,2 $\mu$ Sv/h
Nível de radiação a 1m da superfície do embalado:	em média 0,2 $\mu$ Sv/h

---

Estes rejeitos radioativos são gerados nos processos de descontaminação, limpeza, e manutenção de materiais e equipamentos em geral pertencentes às instalações. Esses rejeitos estão contaminados basicamente com urânio natural ( $U_{NAT}$ ),  $^{238}U$ ,  $^{235}U$  e família dos U.

O procedimento empregado no gerenciamento destes rejeitos abrangem, seqüencialmente, etapas de triagem, coleta, monitoração, compactação ou encapsulamento e armazenagem provisória.

A triagem é realizada diretamente no ponto de geração, onde o operador coleta seletivamente, em recipiente adequado, revestido internamente com saco plástico, os rejeitos a

serem compactados (papéis) dos que não serão compactados (plásticos). Resíduos não contaminados também são segregados no mesmo local e encaminhados para lixo comum.

Os rejeitos radioativos, ao serem coletados, são monitorados com detector monocanal de espectroscopia  $\gamma$  para o controle radiológico dos mesmos.

Os rejeitos radioativos plásticos são depositados diretamente em tambores metálicos de 200 L e transportados para armazenagem provisória, onde permanecem guardados.

Os papéis coletados têm seu volume reduzido através de um processo de compactação a baixa pressão. Estes rejeitos são compactados com auxílio de uma prensa de 15 toneladas dentro de tambores metálicos de 200 L. Ao se preencher o volume total do tambor, este é encaminhado para área de armazenagem provisória.

### **7.1. Avaliando a Aplicação do Processo de Incineração no CEA**

Ao observar o panorama apresentado para o CEA e sabendo-se que ARAMAR é um sítio industrial em fase de projeto e implantação, verifica-se que a geração de rejeitos radioativos em termos gerais, no momento, é muito baixa (320 kg/ano).

Embora, no momento, o volume de rejeitos gerados seja muito baixo, verifica-se que o gerenciamento aplicado, mesmo sendo provisório, é bem controlado e atende às exigências normativas.

Sabe-se ainda que, o desenvolvimento e/ou implantação de uma técnica de incineração adequada aos padrões de qualidade e segurança, esperados para o CEA, exigiria um capital e mão-de-obra razoáveis, isto é, em torno de US\$ 3.000.000,00 conforme dados de literatura e fabricantes /52/.

Esta situação, associada às dificuldades econômicas em que se encontram as instituições de pesquisas e desenvolvimento tecnológico no Brasil e conseqüente necessidade de definições de outras prioridades, formam um quadro desfavorável à novos investimentos no setor, tornando inoportuno, para o momento, tal investimento.

A perspectiva a médio e longo prazo, é de aumento significativo da geração de rejeitos radioativos combustíveis de nível baixo de atividade, face a implantação e operação de outras unidades previstas para o CEA, por exemplo; unidades da conversão, reconversão e reatores de potência e de pesquisa. Este quadro permite insistir fazer voltar à análise da possibilidade de ser instalado um incinerador.

Para exemplificar o aumento na geração de rejeitos radioativos combustíveis de nível baixo de atividade, o volume previsto para um reator nuclear tipo PWR com 11 MW de potência elétrica, que vem sendo projetado para implantação no CEA está à seguir.

Instalação	Classe de rejeitos	Volume total médio esperado
Reator tipo PWR	Classe 1, 2, 3 e 4	48 m <sup>3</sup> /ano

Adotando-se como hipótese que a densidade média destes rejeitos esteja em torno de 300 kg/m<sup>3</sup> o volume anual a ser gerado equivaleria a aproximadamente 14 toneladas de rejeitos por ano. Este valor, associado às outras instalações pertencentes ao CEA poderá resultar em volumes que variam de 10 a 20 toneladas de rejeitos sólidos combustíveis por ano.

Esta hipótese esta proporcionalmente condizente com os valores encontrados na literatura, para reatores nucleares de potência à semelhança do projeto do CEA /26, 52, 37/.

Esta nova perspectiva, traz à tona algumas observações importantes: investimentos altos causados pelo tratamento de rejeitos, separadamente em cada unidade geradora; gastos desnecessários com mão-de-obra, que executa serviços semelhantes em unidades distintas; fator de redução de volume baixo, o que resulta na geração de uma grande quantidade de embalados; custos altos de transporte, armazenagem provisória, controle e, futuramente disposição final; etc.

Avaliando-se este quadro para o futuro próximo, considera-se que a adoção de uma filosofia que centralize os sistemas de tratamento de rejeitos sólidos combustíveis de nível baixo de atividade, empregando-se como técnica de tratamento a incineração, tornaria o empreendimento menos dispendioso, mais seguro e controlável.

Neste contexto é necessário lembrar que as unidades geradoras de rejeitos continuariam a ter uma participação valiosa no processo de gerenciamento de rejeitos radioativos. Seguindo-se uma tendência mundial, cada unidade geradora seria incentivada a reduzir ao máximo a geração de rejeitos radioativos, através da otimização cada vez maior de seus processos produtivos, buscando níveis crescentes de qualidade e segurança.

É importante notar que esta filosofia vem sendo adotada em países como o Japão, Estados Unidos da América, França, Inglaterra etc., mostrando uma tendência mundial a este respeito.

Cabe ainda ressaltar, à favor do emprego de uma unidade de incineração no CEA, que a viabilização deste projeto é, em última análise, um ponto importante na concretização e sedimentação de competências, visando o domínio desta tecnologia de tratamento de rejeitos radioativos, cujos objetivos se ajustam às necessidades do CEA.

Em suma, ao se avaliar a utilização do processo de incineração observa-se que é **totalmente viável** observando-se pontos como:

- apesar do custo do capital inicial ser razoavelmente alto, para a atual conjuntura nacional, é atenuado quando visto sob perspectivas mais amplas, isto é, considerando-se os benefícios

técnicos quanto aos fatores de redução de volume; custo de operação, manutenção e principalmente os relacionados ao transporte, armazenagem provisória e disposição final;

- as perspectivas futuras relacionadas à concretização de todo o empreendimento proposto ao CEA, exigem medidas mais eficientes do que as atualmente adotadas para o tratamento dos rejeitos gerados, face ao aumento significativo que se espera na geração dos mesmos; e
- avanço tecnológico e qualificação de mão-de-obra proporcionado ao CEA, bem como ao Brasil, um patamar contemporâneo quanto à tendência mundial relacionada ao gerenciamento de rejeitos radioativos sólidos de nível baixo de atividade.

Outrossim, sabe-se que todo empreendimento, quando previsto e planejado com antecedência, contribui para que em futuro próximo, não se verifiquem perdas de tempo e haja gastos elevados com ações precipitadas.

## **7.2. Recomendações para a Implantação do Processo de Incineração no CEA**

Dentro dos objetivos aqui propostos, considera-se importante apresentar algumas recomendações quanto à implantação de um processo de incineração de rejeitos radioativos de nível baixo. Estas recomendações tomam como base todos os aspectos apresentados no transcorrer deste trabalho assim como as perspectivas mundiais observadas:

A incineração é uma técnica viável às perspectivas do CEA, e sugere-se a construção de uma unidade piloto para incineração de rejeitos radioativos de nível baixo que opere com ar em excesso e capacidade média entre 30 a 50 kg/h.

Esta sugestão é baseada no fato de que a maioria dos incineradores atualmente empregados no mundo, utilizam esta técnica, considerada como a mais simples e barata dentre as

existentes /26/. Países como Suécia, Áustria, Inglaterra, Estados Unidos e principalmente Japão e Alemanha empregam esta tecnologia. O Japão possui 12 unidades em operação e várias outras em fase de projeto e construção desenvolvidas em conjunto com a Alemanha, e são licenciadas pelos alemães também /26, 30, 52/.

Este tipo de incinerador permite a obtenção de dados técnicos, com maior facilidade e possibilita o intercâmbio com especialistas no assunto, rapidez na obtenção de resultados práticos e o que é mais importante, segurança ao se empregar uma técnica internacionalmente consagrada.

Tecnicamente, além dos parâmetros discutidos nos capítulos antecedentes, um incinerador, tipo ar em excesso, não exige nenhum pré-tratamento dos rejeitos à serem incinerados, está comercialmente disponível no mercado internacional, e entre os tipos existentes, é o que exige investimento menor /52/.

Frente a este quadro, a escolha de um incinerador com ar em excesso, nos moldes encontrados na Alemanha e Japão, é mais conveniente embora os outros tipos de incineradores não são menos eficientes, mas são menos acessíveis por causa de seus custos.

# CAPÍTULO 8

## CONCLUSÕES

### 8.1. Considerações Gerais

O sucesso da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico, em seus diversos ramos de atividade, exige um panorama harmônico que englobe aspectos como infra-estrutura, organização, planejamento, objetivos e metas bem definidas. Esta idéia deve ser empregada em todas as atividades e etapas envolvidas em um projeto. A ausência de qualquer um destes aspectos fomenta grandes desajustes no andamento do trabalho, perdas materiais, prejuízos financeiros, atrasos em cronogramas, entre outros. Na pesquisa e desenvolvimento do setor nuclear, esta afirmação, também é verdadeira.

Pôde-se observar que o gerenciamento de rejeitos radioativos é um conjunto de atividades que se encontram intrinsecamente ligadas a todos os setores pertencentes a área nuclear, isto é, todas as instalações pertencentes ou não ao ciclo do combustível nuclear.

Neste panorama e considerando-se que a preservação ambiental é uma realidade sempre presente, processos de tratamento de rejeitos radioativos tomam um lugar de destaque e de grande importância quanto à segurança e credibilidade na área nuclear, muitas vezes contestadas, no desenvolvimento das atividades nucleares.

A escolha de uma técnica adequada para o tratamento de rejeitos radioativos de nível baixo de atividade, deve ser realizada através de avaliações que englobem tanto fatores

técnicos de desempenho como fatores econômicos relacionados ao projeto, construção, operação e manutenção do sistema.

A avaliação técnica e econômica do sistema deve, ainda, considerar os aspectos associados às etapas de transporte, armazenagem e disposição final, por serem fatores decisivos nesta avaliação.

Com esta filosofia e dentro do contexto proposto para este trabalho, a incineração como técnica de redução de volume de rejeitos radioativos de nível baixo de atividade, mostra-se como um processo técnico e economicamente viável, enquadrando-se nos perfis observados às perspectivas nacionais e aquelas ligadas ao Centro Experimental ARAMAR.

Embora a incineração ofereça uma técnica de redução de volume ideal para rejeitos radioativos combustíveis de nível baixo de atividade, torna-se difícil obter um projeto de incineração universal que poderia ser capaz de tratar todos os tipos de rejeitos com igual eficiência e desempenho. Desta forma é impossível esperar que um mínimo de benefícios associados a redução de volume "versus" custo e geração de rejeitos secundários (cinzas, emissões gasosa etc), sejam atendidos.

Apesar disto e sabendo-se da existência de várias práticas e algumas experiências sendo realizadas no mundo por causa, principalmente, dos grandes benefícios proporcionados no tratamento e redução de volume de rejeitos radioativos, o desenvolvimento de um incinerador para aplicação em instituições como o CEA, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) etc, torna-se essencial. Esta afirmação deve ser analisada sob dois aspectos: a ação imediata e o desenvolvimento gradual e uniforme do ciclo do combustível nuclear.

## 8.2. Conclusões Finais

1. Dos incineradores descritos no presente trabalho conclui-se que o de "ar em excesso" é o mais adequado ao perfil dos rejeitos radioativos gerados no Brasil e em particular no Centro Experimental ARAMAR (CEA);
2. Os itens necessários à sua construção fazem parte dos produtos nacionais industrializados;
3. Este tipo de incinerador encontra-se comercialmente disponível, no mercado internacional (Alemanha, Japão etc), inclusive o sistema de tratamento de gases da combustão;
4. O sistema de coleta de cinzas pode ser o da coleta em bateladas, tendo em vista que a instalação de incineração, na atual conjuntura, não operará continuamente (24h/dia);
5. O sistema de tratamento de gases exigirá sofisticação adequada, de acordo com as características dos rejeitos a serem incinerados, tanto sob aspectos químicos e físicos como radiológicos;
6. O processo deve possuir instrumentação e sistemas de monitoração adequados, capazes de garantir a operação segura da instalação sob o ponto de vista convencional e radiológica;
7. O desempenho adequado de um sistema de incineração de rejeitos radioativos depende da composição dos mesmos e da sua caracterização fisico-química e radiológica;
8. A implantação e operação de um sistema de incineração de rejeitos radioativos devem estar embasadas em aspectos normativos e legislativos referentes a esta atividade no que tange às áreas convencional e nuclear.
9. A escolha e implantação de um sistema de incineração, deve estar embasada em uma análise de custo/benefício sólida que viabilize e englobe todas as etapas pertencentes ao gerenciamento de rejeitos radioativos e condizentes com o processo proposto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. "*Gerência de rejeitos radioativos em instalações radioativas*". CNEN-NE-6.05 de 17 de Dez de 1985;
- /2/ LIMA, L. M. Q.. "*Tratamento de lixo*". Hemuz editora Ltda;
- /3/ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. "*Licenciamento de instalações radiativas*". CNEN-NE-6.02 de Set de 1985;
- /4/ VICTOR, OLAVO B. S. Comunicação Pessoal;
- /5/ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. "*Licenciamento de instalações nucleares*". CNEN-NE-1.04 de Dez de 1984;
- /6/ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "*Resíduos Sólidos*". NBR-10004 de Set de 1987;
- /7/ HILD, W.. The role of incineration in the management of radwaste, In: "*Incineration of radioactive waste*". CEIA and A. J. Van Loon, by Graham & Trotman ltd, UK, 1985;
- /8/ KIBBEY, A. H.; GODBEE, H. W.. "*A state-of-the-art report on low-level radioactive waste treatment*". OAK Ridge National Laboratory - ORNL - Union Carbide, ORNL/TM - 7427, Sep, 1980;
- /9/ RHOM & HAAS S.A., Boletim Técnico;
- /10/ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. "*Diretrizes Básicas de Radioproteção*". CNEN-NE-3.01 de 19 de Jul de 1988;

- /11/ VALKIALNEN, M. AND NYKYRI, M.. Incineration of Ion-Exchange Resins, In: "*Incineration of radioactive waste*". CEIA and A. J. Van Loon, by Graham & Trotman Ltd, UK, 1985;
- /12/ BRASIL. CONSTITUIÇÃO. "*Constituição da República Federativa do Brasil*". Brasília, 1988;
- /13/ BRASIL. LEIS, DECRETOS ETC. Legislação Federal: "*Controle da Poluição Ambiental*". São Paulo, CETESB, 1991;
- /14/ COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. "*Apresentação de projeto de incineradores de resíduos perigosos*". Gerência de Resíduos Sólidos, GRS/SAP/DCON, Dez, 1987;
- /15/ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "*Incineração de resíduos sólidos perigosos - padrões de desempenho*". NB-1265 de Dez de 1989;
- /16/ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "*Resíduos sólidos*". NBR 10004 Set. 1987;
- /17/ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "*Lixiviação de resíduos*". NBR 10005 Set. 1987;
- /18/ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "*Solubilização de resíduos*". NBR 10007 Set. 1987;
- /19/ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "*Amostragem de resíduos*". NBR 10007 Set. 1987;

- /20/ COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. "*Apresentação de projeto de incinerador para queima de resíduos hospitalares*". Gerência de resíduos sólidos, GRS/SAP/DCON, Dez 1987;
- /21/ COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. "*Sistema para incineração de resíduos de serviços de saúde, portos e aeroportos*". especificação E15.011 de Dez de 1992;
- /22/ SÃO PAULO (EST.). LEIS, DECRETOS ETC. Legislação Estadual. "*Controle da Poluição Ambiental*". São Paulo, CETESB, 1991;
- /23/ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. "*Background Document on Radioactive and Mixed Waste Incineration - vol. 1 - Technology*". , May 1991 (EPA 520/1-91-010-1);
- /24/ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. "*Gerência de rejeitos radioativos*". CIN/AI/N.10, Vol. 1 e 2, Rio de Janeiro, 1987;
- /25/ MACHADO, P. A. L.. "*Direito Ambiental Brasileiro*". 4<sup>o</sup> edição, Malheiros Editores, 1992;
- /26/ MOGHISSI, A. A.; GODBEE, H. W.; HOBART, S. A.. "*Radioactive Waste Technology*". ASME, 1986;
- /27/ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "*Treatment of off-gas from radioactive waste incinerators*". Vienna, 1992, (Technical Reports Series, 302);
- /28/ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. "*Air Pollution Engineering Manual*". 2<sup>o</sup> ed. John A. Daniel Son, Air Pollution Control District County of Los Angeles, 1973;
- /29/ NATIONAL FIRES CODES SUBSCRIPTION SERVICE - National Fire Protection Association (NFPA). Atualizada até 1994;

- /30/ KARITA, Y.. *"Incineration of radioactive waste"*. Supplement, NGK Insulators, Ltd, Nagoya, Japan, Radioactive Waste Management for Nuclear Power Reactors and other Facilities, october 26-28, 1989 - Short course held during the 1989 joint International Waste Management Conference, Kyoto, Japan;
- /31/ ROCCA, ALFREDO C. C.; IACOVONE, ANGELA M. M. B.; et al. *"Resíduos Sólidos Industriais"*. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, CETESB, São Paulo, Brasil, 1993
- /32/ KING, R. C.; CROCKER, S.. *"Piping Handbook"*. Mcgraw-Hill, 5 Edição, 1973
- /33/ FOEKEL, CELSO. Comunicação Pessoal - Sessão Induzida 1 - Tecnologias Limpas - palestra apresentada no 10º COBEQ - Congresso Brasileiro de Engenharia Química, de 13 à 16 de setembro de 1994;
- /34/ YING-CHIL SEO; IN-TAE KIM; JOOM-HYUNG KIM; HUM-HWEE PARK. *"Assessment of a bench scale incineration process for treatment of radioactive waste"*. Waste Management, 10(3): 233-242, 1990;
- /35/ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *"The Volume Reduction of Low-Activity Solid Wastes"*. Vienna, 1970 (Technical Reports Series, 106);
- /36/ JOUAN, A.. *"New volume reduction conditioning options for solid alpha-bearing waste"*. CEA, EC Conference on Radioactive Waste Management and Disposal, Luxembourg (LU), 17-21 Sep. 1990, (CEA-CONF-10430);
- /37/ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY *"Treatment of low and intermediate level solid radioactive wastes"*. Vienna, 1993. (Technical Reports Series, 223);

- /38/ KERTESZ, C. J.; CHENAVAS, P. R.; AUFFRET, L.. "Conditioning of alpha and beta-gamma ashes of incinerator, obtained by radioactive wastes incinerating and encapsulation in several matrices". 1993, (EUR--14365);
- /39/ BLUM, T. W.. "Incineration and incinerator ash processing". International Waste management conference, Seoul, Republic of Korea, 21-26 Oct 1991, (LA-UR--91-162);
- /40/ JOUAN, A.; and others. "Conditionnement des cendres d'incineration par pressage isostatique ou fusion". CEA, Sciences et techniques nucléaires, 1990, (EUR-13033,);
- /41/ JOUAN, A. "Incineration ash conditioning processes". CEA, 1990 International Incineration Conference, San Diego, CA, USA, 14-18 may 1990, (CEA-CONF-10431);
- /42/ Apostila de curso "Introdução a instrumentação e controle". Escola de Engenharia Mauá, 1982;
- /43/ SANDRELLI, G.; AGRATTI, G.; TERRANI, S.; BERGAMASCHI, O.. "Application of process control system in a semi-industrial scale LLW incinerator". Waste Management, 10(3): 205-210, 1990;
- /44/ DECRETO Nº 38069/93. "Especificação para instalação de proteção contra incêndios". Corpo de Bombeiro do Estado de São Paulo;
- /45/ SUBRAMANIAM, T. K.; CANGELOSI, J. V.. "Predict safe oxygen in combustible gases". Chemical Engineering, December, 1989;
- /46/ WILSON, DAVID GORDON. "Handbook of solid waste management". Massachusetts Institute of technology, Van Nostrand Reinhold Company, VNR, 1977;

- /47/ MEYER, M. L.. "*Plutonium waste incineration using pyrohydrolysis*". Summer national meeting of the American Institute of Chemical Engineers (AIChE), Pittsburgh, PA, USA, 20-22 Aug 1991, (WSRC-MS--91-231);
- /48/ CHRUBASIK, A.; HOFMANN, J.; VIETZKE, H.. "*Volume reduction of organics alpha waste by pyrohydrolysis*". Nuclear Technology, 49, 1980;
- /49/ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "*Radioactive waste management profiles. Compilation of data from the waste management data base (WMDB)*". IAEA-TECDOC-629, Oct 1991;
- /50/ BLASEWITZ, A. G.; DAVIS, J. M.; SMITH, M. R.. "*The Treatment and Handling of Radioactive Wastes*". Battelle Press, 1983;
- /51/ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "*Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste*". Vienna, 1994 (Technical Reports Series, 360);
- /52/ TANG, Y. S.; SALING, JAMES H.. "*Radioactive Waste Management*". USA, 1990;
- /53/ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "*Design and Operation of Radioactive Waste Incineration Facilities*". Vienna, 1992. (Safety Series, 108);
- /54/ PERRY, R. H.; CHILTON, C. H.. "*Manual de Engenharia Química*". Guanabara Dois, 5ª edição, 1980;
- /55/ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. "*Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos*". CNEN NE-6.06 de 24 de Jan de 1990;
- /56/ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. "*Transporte de materiais radioativos*". CNEN NE-5.01 de 01 de Ago de 1988.