

FERNANDO CÖRNER DA COSTA

**PERSPECTIVAS DA INCINERAÇÃO
DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE COM
O USO DE ATMOSFERAS RICAS EM OXIGÊNIO**

SÃO CAETANO DO SUL

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FERNANDO CÖRNER DA COSTA

**PERSPECTIVAS DA INCINERAÇÃO
DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE COM
O USO DE ATMOSFERAS RICAS EM OXIGÊNIO**

Dissertação apresentada ao Instituto Mauá de Tecnologia
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de
Processos Químicos e Bioquímicos.

Linha de pesquisa:

Impacto Ambiental de Processos Químicos

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Antônio Licco

SÃO CAETANO DO SUL

2007

Dedicatória:

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, criador do Universo, a meus pais que sempre incentivaram meus estudos, à minha querida esposa que sempre me apóia na busca de todos meus objetivos e a meus filhos para que lhes sirva como exemplo a ser seguido.

Agradecimentos:

Agradeço, em primeiro lugar, ao Prof. Dr. Eduardo Antônio Licco, meu dedicado professor e orientador, ao Prof. Dr. Roberto Peixoto, ao Prof. Dr. Gustavo Leonhardt e aos demais professores e funcionários do Instituto Mauá de Tecnologia que, após muita luta, tornaram possível a realização deste curso de Mestrado.

Agradeço, também, ao Prof. Francisco Javier Bovi Aules (*in memoriam*) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, pela oportunidade e incentivo para que eu me tornasse monitor durante a graduação, despertando em mim a vocação para lecionar.

Resumo

A incineração de resíduos em geral e, em particular, a de resíduos de serviços de saúde (RSS) têm sido alvo da comunidade científica e dos ambientalistas, principalmente pela formação de compostos persistentes no meio ambiente como dioxinas e furanos. Considerando-se o panorama existente no Brasil, onde a incineração dos RSS é uma realidade, este método de destruição deverá permanecer em evidência até que uma tecnologia mais adequada o substitua. O uso de atmosferas de combustão ricas em oxigênio é uma possibilidade que apresenta perspectivas para melhorar o estado-da-arte da incineração dos RSS. Este estudo compara técnicas de incineração, confrontando a queima convencional com ar de combustão fornecido pela atmosfera e novas tecnologias de queima com a utilização de oxigênio. O principal resultado obtido é a redução da massa de produtos da combustão a ser condicionada, permitindo um rápido resfriamento, o que colabora para a redução da formação de dioxinas e furanos. A economia de combustível e o aumento da produtividade dos incineradores são resultados paralelos.

Palavras-chave:

incineração, resíduos de serviços de saúde, combustão, dioxinas, furanos, oxigênio

Abstract

The incineration of residues in general and, particularly, hospital waste has been the focus of environmentalists, mainly due to the formation of the persistent compounds in the environment as dioxins and furans. Considering the existing panorama in Brazil, where the hospital waste incineration is usually been practiced, this destruction method must remain until a more suitable technology replace it. The use of oxygen enriched combustion atmospheres is a possibility that presents perspectives to improve the state-of-the-art of the hospital waste incineration. This study compares incineration techniques confronting the conventional burning with atmospheric air and the new burning technologies using oxygen. The main result is the reduction of the weight of combustion products to be conditioned, allowing a fast quenching, collaborating for the reduction of dioxins and furans formation. Nevertheless, further results can be achieved as fuel savings and increased productivity of incinerators.

Key-words:

incineration, hospital waste, combustion, dioxins, furans, oxygen.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	ORIENTAÇÃO GERAL DOS SUBSISTEMAS DA INCINERAÇÃO E OPÇÕES DE COMPONENTES DE PROCESSOS TÍPICOS	28
FIGURA 2	INCINERADOR DE CÂMARAS MÚLTIPLAS – TIPO RETORTA	30
FIGURA 3	INCINERADOR DE CÂMARAS MÚLTIPLAS – TIPO LINEAR	31
FIGURA 4	INCINERADOR DE AR CONTROLADO	32
FIGURA 5	FORMAS DE CHAMA EM QUEIMADORES INDUSTRIAIS	34
FIGURA 6	DISPOSITIVO PARA ENRIQUECIMENTO DO AR DE COMBUSTÃO TIPO FLAUTA	54
FIGURA 7	DISPOSITIVO PARA ENRIQUECIMENTO DO AR DE COMBUSTÃO TIPO RADIAL	54
FIGURA 8	INSTALAÇÃO TÍPICA DE LANÇA DE OXIGÊNIO	57
FIGURA 9	QUEIMADOR METÁLICO OXI-COMBUSTÍVEL REFRIGERADO A ÁGUA	59
FIGURA 10	QUEIMADOR CERÂMICO OXI-GÁS NATURAL INSTALADO EM FORNALHA	60
FIGURA 11	RELACIONAMENTO DOS PARÂMETROS DA COMBUSTÃO COM OXIGÊNIO	62
FIGURA 12	TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO	63
FIGURA 13	COMPRIMENTO DE CHAMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO	64
FIGURA 14	POTÊNCIA DISPONÍVEL POR RADIAÇÃO	65
FIGURA 15	RESULTADO DO BALANÇO DE ENERGIA NA CÂMARA	66
FIGURA 16	CURVAS DE MASSA DE PRODUTOS DA COMBUSTÃO DOS RSS VS. TEOR DE OXIGÊNIO	70
FIGURA 17	ESTRUTURA MOLECULAR DAS DIOXINAS E FURANOS	71
FIGURA 18	POSSÍVEIS CAMINHOS PARA FORMAÇÃO DE DIOXINAS E FURANOS	75
FIGURA 19	FORMAÇÃO DE DIOXINAS E FURANOS VS. CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO	79

FIGURA 20	EFEITO DO NÍVEL DE OXIGÊNIO NA FORMAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO	80
FIGURA 21	DESENHO ESQUEMÁTICO DO INCINERADOR DA LAM-CEF	81
FIGURA 22	INCINERADORES DE RSS INSTALADOS NA SILCON – MAUÁ	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	COMPOSIÇÃO DE RSS POR SETOR HOSPITALAR	20
TABELA 2	COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS RSS POR FONTE GERADORA	23
TABELA 3	QUANTIDADES DE RESÍDUOS PRODUZIDOS EM UM HOSPITAL	24
TABELA 4	COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS RSS INFECTANTES POR FONTE GERADORA, RECALCULADO PELO AUTOR	24
TABELA 5	DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO MÉDIA PONDERADA DOS RSS	25
TABELA 6	PESO ESPECÍFICO DE RSS POR TIPO	26
TABELA 7	ANÁLISES FÍSICAS DOS RSS POR SETORES NOS HOSPITAIS A E B	26
TABELA 8	VARIAÇÕES NA COMPOSIÇÃO DO AR	36
TABELA 9	TEMPERATURAS TEÓRICAS DE CHAMA DE GASES COMBUSTÍVEIS	47
TABELA 10	TEMPERATURAS MÍNIMAS DE AUTO-IGNIÇÃO	48
TABELA 11	CAMPOS DE INFLAMABILIDADE	49
TABELA 12	VELOCIDADES MÁXIMAS DE CHAMA DE GASES COMBUSTÍVEIS	50
TABELA 13	COMPARATIVO DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS COM AR E COM OXIGÊNIO PURO	69
TABELA 14	PARÂMETROS OBTIDOS EM EXPERIÊNCIA NA LAM-CEF	82
TABELA A1	COMBUSTÃO DO ETANOL COM AR ATMOSFÉRICO	97
TABELA A2	COMBUSTÃO DO ÓLEO DIESEL COM AR ATMOSFÉRICO	98
TABELA A3	COMBUSTÃO DO GLP COM AR ATMOSFÉRICO	98
TABELA A4	COMBUSTÃO DO GÁS NATURAL COM AR ATMOSFÉRICO	99
TABELA B1	COMBUSTÃO DO ETANOL COM OXIGÊNIO PURO (SECO)	102
TABELA B2	COMBUSTÃO DO ÓLEO DIESEL COM OXIGÊNIO PURO (SECO)	102
TABELA B3	COMBUSTÃO DO GLP COM OXIGÊNIO PURO (SECO)	103
TABELA B4	COMBUSTÃO DO GÁS NATURAL COM OXIGÊNIO PURO (SECO)	103

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
2 METODOLOGIA	15
3 DESENVOLVIMENTO	16
3.1 RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE	16
3.2 INCINERAÇÃO	27
3.2.1 Processos	27
3.2.2 Incineradores	28
3.3 COMBUSTÃO CONVENCIONAL COM AR	33
3.3.1 Queimadores	33
3.3.2 Suprimento de ar	35
3.3.3 Câmaras de combustão	37
3.3.4 Fator dos “três tês”	38
3.3.5 Cálculos de combustão com ar	42
3.4 COMBUSTÃO COM OXIGÊNIO	43
3.4.1 Generalidades	43
3.4.2 Suprimento de oxigênio	51
3.4.3 Queima com ar enriquecido por diluição	53
3.4.4 Queima com ar enriquecido por lança	56
3.4.5 Queima com oxigênio	58
3.4.6 Cálculos de combustão com oxigênio	67
3.5 DIOXINAS E FURANOS	71
3.5.1 Definições	71
3.5.2 Toxicidade	73
3.5.3 Formação	74
3.6 CONDICIONAMENTO DOS PRODUTOS DA INCINERAÇÃO	77
3.7 EXPERIÊNCIAS ENCONTRADAS	78
3.7.1 Subsidiária argentina da multinacional AGA AB	78

3.7.2 Linde Gases Ltda.	82
4 DISCUSSÃO	85
5 CONCLUSÕES	88
6 RECOMENDAÇÕES	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXO A: Cálculos de combustão com ar	95
ANEXO B: Cálculos de combustão com oxigênio	100
ANEXO C: Legislação Federal comentada	105
ANEXO D: Relação das Normas da ABNT	111
ANEXO E: Relação das Normas da CETESB	112
ANEXO F: Relação de Métodos do EPA	114

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos urbanos constituem um dos grandes problemas a serem equacionados pela sociedade moderna, tendo em conta os múltiplos envolvimento que apresenta com a saúde pública, o meio ambiente e a questão social.

No que diz respeito à saúde pública e ao meio ambiente, o principal problema que se apresenta diz respeito à transmissão de doenças, causada por inadequadas técnicas de acondicionamento, coleta e transporte, tratamento e disposição final. A contaminação pode ocorrer de uma forma direta ou indireta, envolvendo áreas comuns em residências, calçadas, ruas, cursos de água e lençóis freáticos. Estes problemas se agravam nas grandes cidades, em virtude das enormes quantidades, das grandes distâncias a serem vencidas entre coleta e destinação, além dos diferentes agentes de contaminação ambiental envolvidos. A falta de investimento nas soluções da problemática do lixo acarreta em crescentes despesas com a saúde pública, mormente no tratamento de inúmeras doenças oriundas por este vetor de contaminação.

No que tange à questão social, esta é sempre exacerbada pelas extremas desigualdades sociais existentes no país, onde a miséria recruta um crescente exército de catadores de lixo dispersados em todas as partes, desde as calçadas dos bairros mais abastados até os lixões nas periferias das cidades, não sendo dispensadas desta árdua e insalubre tarefa nem mesmo as crianças com apenas poucos anos de vida. Assim, o recorde detido pelo Brasil com a elevada taxa de reciclagem das latas de alumínio não deve ser comemorado de todo, pois não é devido à consciência ecológica do povo, mas sim a uma extrema miséria e falta de condições mínimas de sobrevivência de milhões de pessoas enquadradas abaixo da linha de pobreza.

A Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos é qualificada por Ovídio Antônio de Angelis, Ministro da Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República (MONTEIRO et alii, 2001), como “uma grave problemática a ser solucionada pelos municípios e pela sociedade como um todo, sendo considerado o equacionamento desses problemas um grande desafio”.

Ainda segundo MONTEIRO et alii, (2001), “a geração de resíduos sólidos domiciliares no Brasil é de cerca de 0,6 kg/hab./dia e mais 0,3 kg/hab./dia de resíduos de varrição, limpeza de

logradouros e entulhos.” Ainda segundo esta fonte, estes valores podem chegar a 1,3 kg/hab./dia em grandes cidades como São Paulo, Rio de Janeiro e Curitiba, considerados além dos resíduos domiciliares os demais resíduos, inclusive os oriundos das atividades comerciais, da varrição de logradouros, de serviços de saúde e entulhos. Estimando-se uma população de 11 milhões de habitantes para o município de São Paulo, a geração de resíduos sólidos seria da ordem de 14.000 ton/dia.

Neste panorama de geração de resíduos sólidos encontra-se o dos resíduos de serviços de saúde (RSS), que aflige as comunidades por suas características patogênicas, ou seja, por sua capacidade de produzir e espalhar doenças quando indevidamente coletado, manuseado, transportado, tratado e disposto.

Segundo publicado em 06 de março de 2003 em Notícias da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2003), a produção de RSS no Brasil é da ordem de 1% a 3% das 120.000 toneladas de lixo urbano por dia, quer dizer, de 1.200 a 3.600 toneladas por dia. Destes valores, o RSS contaminado representa de 10% a 25%, o que significa quantidades na faixa de 120 a 900 toneladas por dia de lixo contaminado, ou seja, uma expectativa média da ordem de 500 toneladas por dia.

Embora este problema venha sendo paulatinamente equacionado, segundo dados do IBGE, em 2002 eram 1.193 os municípios sem tratamento para RSS, no universo de 3.466 municípios pesquisados (IBGE, 2002 apud CALDERONI, 2003).

Atualmente existem várias formas para tratamento dos resíduos de serviços de saúde, como a incineração, auto-clavagem e irradiação com micro-ondas, sempre com o objetivo principal da eliminação do perigo infectante.

Todavia não existe método perfeito para o tratamento dos RSS. A incineração é uma solução viável, que apresenta os pontos fortes da eliminação da patogenicidade, da descaracterização e da redução do volume. Seu principal ponto fraco é poder proporcionar as condições necessárias à formação de outras substâncias ainda mais prejudiciais ao meio ambiente, notadamente as dioxinas e os furanos.

A informação do IBGE citada pela ANVISA (ANVISA, 2006) mostra que a incineração ainda é a forma de tratamento mais utilizada para os RSS, aplicada por 589 do total dos 3.466 municípios brasileiros, desconsiderando a não recomendável queima a céu aberto praticada por 1.086 municípios. Assim, a incineração deverá ainda permanecer como o método tradicional até que uma tecnologia mais avançada, eficaz e economicamente viável a substitua. Este contexto faz então refletir se haveria possibilidade de utilizar a incineração e todos os seus pontos positivos, mas evitando seus aspectos negativos.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é:

- Apresentar as perspectivas da incineração de RSS com emprego de atmosferas ricas em oxigênio, visando controlar as condições propícias à formação de poluentes e reduzir os volumes dos produtos de combustão a serem tratados.

São objetivos específicos do estudo:

- Levantar os métodos possíveis do uso de oxigênio em incineradores de RSS.
- Analisar as diversas fontes de oxigênio possíveis de serem empregadas.
- Desenvolver os cálculos de combustão para comparar resultados.
- Pesquisar a formação de dioxinas e furanos visando sua mitigação.
- Colher informações reais do uso de oxigênio em processos de incineração.

1.2 JUSTIFICATIVA

No panorama brasileiro, onde o método da incineração predomina no tratamento dos resíduos de saúde, é plenamente justificável a busca pelas melhores tecnologias disponíveis.

A introdução do uso de oxigênio na operação dos incineradores existentes, melhorando a queima e reduzindo o volume dos gases de combustão, é fácil e barata, sendo que o custo adicional do oxigênio apresenta grande possibilidade de ser absorvido pelo aumento da produtividade, economia de combustível e, sobretudo, benefícios ao meio ambiente.

2. METODOLOGIA

Trata-se de estudo exploratório, de caráter analítico, fundamentado em pesquisa bibliográfica complementada por entrevistas não estruturadas realizadas junto a profissionais das áreas relacionadas à incineração.

Os dados secundários pesquisados visaram basicamente a:

- a caracterização dos resíduos de serviços de saúde;
- o conhecimento dos processos de incineração e seus equipamentos;
- a revisão dos conceitos de combustão convencional com ar atmosférico e de combustão com oxigênio;
- a geração de dioxinas e furanos durante os processos de queima;
- o condicionamento dos produtos da incineração, e;
- a legislação pertinente ao assunto.

A pesquisa bibliográfica, realizada junto à rede mundial, revistas e livros especializados disponíveis nas bibliotecas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas da USP, Instituto Mauá de Tecnologia, CETESB, empresas prestadoras de serviços e fornecedoras de equipamentos para incineração, permitiram levantar as características dos RSS; elaborar um panorama dos processos convencionais de incineração com ar atmosférico e processos não convencionais com atmosferas ricas em oxigênio e; entender o comportamento dos RSS durante o processo de queima.

Os dados primários, obtidos por meio de entrevistas não estruturadas realizadas durante visitas a empresas prestadoras de serviços de incineração de RSS permitiram reforçar ou negar as hipóteses da discussão preliminar a respeito do uso de atmosferas fortemente oxidantes na incineração de RSS.

Com os resultados dos levantamentos de dados primários e secundários foi realizada uma análise comparativa entre pontos positivos e negativos dos processos de incineração dos RSS com e sem a adição de oxigênio, possibilitando concluir, ainda que preliminarmente, a respeito de perspectivas positivas para redução das condições propícias à formação de dioxinas e furanos com a prática do emprego de atmosferas ricas em oxigênio.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE

De acordo com a Resolução RDC nº358 de 29/04/2005 do CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, os RSS são classificados nos seguintes grupos e sub-grupos:

GRUPO A: resíduos com a possível presença de agentes biológicos, os quais podem apresentar risco de infecção devido às suas características de maior virulência ou concentração:

Sub-grupo A1:

Culturas e estoques de microorganismos; resíduos de fabricação de produtos biológicos, exceto os hemoderivados; descartes de vacinas de microorganismos vivos ou atenuados; meios de cultura e instrumentais utilizados para transferência, inoculação ou mistura de culturas; resíduos de laboratórios de manipulação genética.

Resíduos resultantes da atenção à saúde de indivíduos e animais, com suspeita ou certeza de contaminação biológica por agentes classe de risco 4, microorganismos com relevância epidemiológica e risco de disseminação ou causador de doença emergente que se torne epidemiologicamente importante ou cujo mecanismo de transmissão seja desconhecido.

Bolsas transfusionais contendo sangue ou hemocomponentes, rejeitadas por contaminação ou por má conservação, ou com prazo de validade vencido, e aquelas oriundas de coleta incompleta.

Sobras de amostras de laboratório contendo sangue ou líquidos corpóreos, recipientes e materiais resultantes do processo de assistência à saúde, contendo sangue ou líquidos corpóreos na forma livre.

Sub-grupo A2:

Carcaças, peças anatômicas, vísceras e outros resíduos provenientes de animais submetidos a processos de experimentação com inoculação de microorganismos, bem como suas forrações, e os cadáveres de animais suspeitos de serem portadores de microorganismos de relevância epidemiológica e com risco de disseminação, que foram submetidos ou não a estudo anátomo-patológico ou confirmação diagnóstica.

Sub-grupo A3:

Peças anatômicas (membros) do ser humano; produto de fecundação sem sinais vitais, com peso menor que 500 gramas ou estatura menor que 25 centímetros ou idade gestacional menor que 20 semanas, que não tenham valor científico ou legal e não tenha havido requisição pelos pacientes ou familiares.

Sub-grupo A4 :

Kits de linhas arteriais, endovenosas e dialisadores, quando descartados.

Filtros de ar e gases aspirados de área contaminada; membrana filtrante de equipamento médico-hospitalar e de pesquisa, entre outros similares.

Sobras de amostras de laboratório e seus recipientes contendo fezes, urina e secreções, provenientes de pacientes que não contenham e nem sejam suspeitos de conter agentes Classe de Risco 4, e nem apresentem relevância epidemiológica e risco de disseminação, ou microorganismo causador de doença emergente que se torne epidemiologicamente importante ou cujo mecanismo de transmissão seja desconhecido ou com suspeita de contaminação com príons.

Resíduos de tecido adiposo proveniente de lipoaspiração, lipoescultura ou outro procedimento de cirurgia plástica que gere este tipo de resíduo.

Recipientes e materiais resultantes do processo de assistência à saúde, que não contenha sangue ou líquidos corpóreos na forma livre.

Peças anatômicas (órgãos e tecidos) e outros resíduos provenientes de procedimentos cirúrgicos ou de estudos anátomo-patológicos ou de confirmação diagnóstica.

Carcaças, peças anatômicas, vísceras e outros resíduos provenientes de animais não submetidos a processos de experimentação com inoculação de microorganismos, bem como suas forrações.

Bolsas transfusionais vazias ou com volume residual pós-transfusão.

Sub-grupo A5:

Órgãos, tecidos, fluidos orgânicos, materiais perfurocortantes ou escarificantes e demais materiais resultantes da atenção à saúde de indivíduos ou animais, com suspeita ou certeza de contaminação com príons.

GRUPO B: Resíduos contendo substâncias químicas que podem apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente, dependendo de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade.

Produtos hormonais e produtos antimicrobianos; citostáticos; antineoplásicos; imunossupressores; digitálicos; imunomoduladores; anti-retrovirais, quando descartados por serviços de saúde, farmácias, drogarias e distribuidores de medicamentos ou apreendidos e os resíduos e insumos farmacêuticos dos medicamentos controlados pela Portaria MS 344/98 e suas atualizações.

Resíduos de saneantes, desinfetantes, desinfestantes; resíduos contendo metais pesados; reagentes para laboratório, inclusive os recipientes contaminados por estes.

Efluentes de processadores de imagem (reveladores e fixadores).

Efluentes dos equipamentos automatizados utilizados em análises clínicas.

Demais produtos considerados perigosos, conforme classificação da NBR 10.004 da ABNT (tóxicos, corrosivos, inflamáveis e reativos)

GRUPO C: Quaisquer materiais resultantes de atividades humanas que contenham radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção especificados nas normas do CNEN e para os quais a reutilização é imprópria ou não prevista.

Enquadram-se neste grupo quaisquer materiais resultantes de laboratórios de pesquisa e ensino na área de saúde, laboratórios de análises clínicas e serviços de medicina nuclear e radioterapia que contenham radionuclídeos em quantidade superior aos limites de eliminação.

GRUPO D: Resíduos que não apresentam risco biológico, químico ou radiológico à saúde ou ao meio ambiente, podendo ser equiparados aos resíduos domiciliares.

Papel de uso sanitário e fralda, absorventes higiênicos, peças descartáveis de vestuário, resto alimentar de paciente, material utilizado em anti-sepsia e hemostasia de venóclises, equipo de soro e outro similares não classificados como A1;

Sobras de alimentos e do preparo de alimentos;

Resto alimentar de refeitório;

Resíduos provenientes das áreas administrativas;

Resíduos de varrição, flores, podas e jardins;

Resíduos de gesso provenientes de assistência à saúde.

GRUPO E: Materiais perfurocortantes ou escarificantes como: lâminas de barbear, agulhas, escalpes, ampolas de vidro, brocas, limas endodônticas, pontas diamantadas, lâminas de bisturi, lancetas; tubos capilares; micropipetas; lâminas e lamínulas; espátulas; e todos os utensílios de vidro quebrado no laboratório (pipetas, tubos de coleta sanguínea e placas de Petri) e outros similares.

Nesta dissertação serão consideradas apenas as fontes de produção de resíduos sólidos, pois são estes os resíduos mais frequentemente destinados à incineração. É evidente que tais resíduos sólidos estão sempre acompanhados de umidade e de resíduos líquidos como sangue, placentas e secreções. Não serão considerados os resíduos líquidos que são lançados na rede de esgotos, nem tampouco os efluentes gasosos oriundos do manuseio de materiais voláteis, durante as operações dos hospitais e serviços de saúde.

As principais fontes de resíduos sólidos em hospitais podem ser divididas em sete grupos principais: cozinha, enfermaria, maternidade e centro obstétrico, centro cirúrgico, escritório, ortopedia e outros (pronto-socorro, pátios, lavanderia, banco de sangue, velório, hemodinâmica etc.).

A caracterização físico-química dos resíduos hospitalares citada a seguir foi considerada a partir do trabalho realizado pela Superintendência de Estudos de Resíduos Sólidos, da Diretoria de Engenharia e Ação Regional da CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1981). Para a avaliação dessas características, foi considerada a amostragem colhida em cinco hospitais, a qual foi separada em cinco grupos:

- Grupo 1 - Maternidade e Centro Obstétrico
Conteúdo: copos de plástico, caixas de papelão, curativos, papéis, cascas de frutas, gaze, cânulas de plástico, máscaras cirúrgicas descartáveis, algodão e material pós-parto (placenta).
- Grupo 2 - Enfermarias (incluindo pediatria)
Conteúdo: toalhas de papel absorvente, flores, papel higiênico, embalagens de medicamentos, ampolas de vidro, seringas e agulhas descartáveis, mamadeira de plástico, bicos de borracha e latas de leite vazias.

- Grupo 3 - Centro Cirúrgico
Conteúdo: praticamente igual aos resíduos das enfermarias, porém com a presença adicional de tecidos humanos, material amputado e material cirúrgico descartável.
- Grupo 4 - Ortopedia
Conteúdo: Também praticamente o mesmo das enfermarias, porém com a presença adicional de gesso em grandes quantidades. Atualmente o uso de gesso está diminuindo, mas não há informação disponível para atualização do valor citado na TABELA 1.
- Grupo 5 - Outros (pronto-socorro, ambulatório, varrição de pátios etc.)
Conteúdo: equipamentos quebrados de laboratório, papel carbono, embalagens quebradas de soro fisiológico, vidros contaminados de laboratório, pipetas, placas de Petri, lâminas para exame microscópico, curativos, algodão e papéis.

A preparação das amostras foi efetuada tomando-se ao acaso alguns sacos de lixo provenientes dos grupos anteriormente descritos dos cinco hospitais gerais, misturados os sacos dos respectivos grupos e tomando-se uma porção representativa de cada grupo. Nos laboratórios da CETESB as amostras foram autoclavadas, trituradas, homogeneizadas e, então, analisadas.

Os resultados dos exames físico-químicos das amostras, que representam uma amostra média dos cinco hospitais citados, estão indicados na TABELA 1.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO DE RSS POR SETOR HOSPITALAR

Fonte \ Parâmetro	Maternidade	Enfermaria	Ortopedia	Centro cirúrgico	Outros
Umidade %	59,3	24,1	7,8	28,6	12,2
Carbono %	32,3	30,8	27,6	27,9	32,0
Hidrogênio %	4,7	3,6	2,9	3,9	3,6
Enxofre %	0,3	0	1,4	0,5	0,3
Sólidos voláteis %	94,3	95,8	-	89,5	95,9
PCI (kcal/kg)	1589,17	2857,71	-	2417,33	3462,73
PCS (kcal/kg)	4990	4236	3826	3893	4303
Cloro %	0	0	0	0	0
Cloretos %	0,05	0,08	0,14	0,09	0,09

FONTE: CETESB, 1981

Observações:

- Umidade:

O teor de umidade encontrado nos resíduos sólidos é devido, quase que totalmente, à matéria orgânica presente.

- Teor de carbono:

O teor de carbono está relacionado com o valor do poder calorífico, dos sólidos voláteis e da matéria orgânica presente nos resíduos.

- Teor de hidrogênio:

O teor de hidrogênio se relaciona também com a quantidade de matéria orgânica e pode indicar, parcialmente, a quantidade de material plástico presente nos resíduos.

- Teor de enxofre:

Na incineração dos resíduos, o enxofre presente se transforma em dióxido de enxofre, constituindo um grande problema para a poluição do ar. Sob a ótica ambiental, o teor de enxofre não deveria ultrapassar 2%, o que não ocorreu nas amostras analisadas.

- Sólidos voláteis:

Os elevados teores de sólidos voláteis indicam que ocorre uma grande redução da porcentagem em peso e em volume dos resíduos durante a incineração.

- Poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI):

Os poderes caloríficos dos resíduos sólidos, juntamente com os teores de umidade, são os parâmetros mais importantes para o projeto e a operação dos incineradores pois determinam as exigências dos combustíveis auxiliares.

Embora os valores de PCI das amostras se apresentaram muito variáveis de acordo com a fonte e devem ser considerados com reservas pois foram calculados a partir do PCS pelo método de De Bartolomeis considerando a umidade das amostras após sua permanência nas autoclaves de esterilização. Portanto, os valores do PCI indicados na TABELA 1 são ligeiramente superiores do que os esperados.

- Cloro e cloretos:

Os teores de cloro e de cloretos são importantes para se quantificar as emissões de ácido clorídrico efluentes dos incineradores, além da possibilidade da formação de dioxinas e furanos caso as condições sejam favoráveis. A TABELA 1 não indicou a presença de cloro livre, por tratar-se de um gás não presente na amostragem dos RSS, tendo sido indicado apenas o teor de cloretos, onde o cloro se apresenta sob a forma associada.

A amostragem, que serviu de base para a elaboração da TABELA 1, foi feita em 1981. Nos 26 anos que se seguiram à amostragem é possível que a composição dos RSS tenha se modificado, principalmente pelo grande desenvolvimento experimentado pela medicina como as novas técnicas cirúrgicas e de análises menos invasivas ao corpo humano. A procura por referências a outras amostragens mais recentes da composição dos RSS tem se mostrado infrutífera. A única referência encontrada que apresenta a composição química qualitativa e quantitativa dos RSS está na publicação “Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado” (IPT/CEMPRE, 2000), a qual apresenta na página 208 uma tabela igual à TABELA 1 (CETESB, 1981), com exatamente as mesmas informações, apresentando linhas, colunas e valores idênticos, inclusive na ordenação e na precisão das casas decimais. Apenas os poderes caloríficos inferiores estão citados na referência do IPT/CEMPRE na unidade MJ/kg ao invés de kcal/kg na citação dos poderes caloríficos inferiores e superiores na referência da CETESB, 1981. Porém os valores indicados para o PCI em MJ/kg são exatamente os mesmos indicados em kcal/kg, bastando apenas fazer a conversão das unidades.

A publicação do IPT/CEMPRE cita que a amostragem foi realizada em um hospital de Florianópolis. Analisando a probabilidade de resíduos oriundos de épocas e locais tão diferentes apresentarem resultados idênticos, pode-se concluir na impossibilidade de haver tal coincidência. Mesmo que as amostragens tivessem sido feitas em um mesmo hospital, em dias distintos, os resultados certamente seriam diferentes. Pela antiguidade, pode-se concluir que a informação original é a do trabalho da referência CETESB, 1981.

Embora a composição dos RSS informada na TABELA 1 possa não refletir exatamente a composição média encontrada atualmente, as diferenças porventura existentes não invalidariam o objetivo desta dissertação, mesmo porque os RSS apresentam variações significativas tanto no tempo (dia e hora da coleta) como no espaço (setor hospitalar).

A estimativa para estabelecer a composição típica para os cálculos de combustão dos RSS tomou por base a TABELA 1, juntamente com as percentagens em peso citadas no trabalho da CETESB (1981), no capítulo 3, onde foi tomada a média dos cinco hospitais amostrados, com a seguinte distribuição nos sete grupos principais, conforme indicado na TABELA 2.

TABELA 2 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS RSS POR FONTE GERADORA

FONTE GERADORA	PERCENTAGEM EM PESO	CONDIÇÃO
Cozinha	49	Não infectante
Escritório	3	Não infectante
Enfermaria	17	Infectante
Maternidade	8	Infectante
Ortopedia	7	Infectante
Centro cirúrgico	5	Infectante
Demais unidades	11	Infectante
TOTAL	100	Não infectante + infectante

FONTE: CETESB, 1981

As informações estão indicadas no trabalho referido apenas sob a forma gráfica, não havendo informação numérica, portanto carecem de precisão matemática.

Outra referência quanto à composição de resíduos gerados em um hospital consta da publicação referida IPT/CEMPRE (2000).

Curiosamente, mais uma vez, os resultados da publicação do IPT/CEMPRE estão muito próximos dos resultados da publicação Resíduos Hospitalares (CETESB, 1981), o que pode ter dupla interpretação:

- a fonte de consulta foi a mesma;
- as informações se confirmaram a partir de outra fonte.

Porém a imprecisão oriunda desta informação não é significativa para o propósito desta dissertação.

As percentagens em peso dos resíduos produzidos em um hospital, de acordo com a origem do setor onde os resíduos foram gerados, estão indicados na TABELA 3, conforme SCHALCH et alli (1995) apud IPT/CEMPRE (2000).

TABELA 3 – QUANTIDADES DE RESÍDUOS PRODUZIDOS EM UM HOSPITAL

MATERIAL	QUANTIDADE (% em peso)
Cozinha	50
Enfermaria	17
Maternidade	8
Ortopedia	7
Centro cirúrgico	4
Escritórios	2
Outros	12
TOTAL	100

FONTE: SCHALCH ET ALLI (1995) APUD IPT/CEMPRE (2000) PÁG. 239

Tomando-se por base a TABELA 3 e redistribuindo agora apenas os resíduos infectantes que seriam tratados através da incineração, chegamos ao resultado indicado na TABELA 4:

TABELA 4 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS RSS INFECTANTES POR FONTE GERADORA, RECALCULADO PELO AUTOR.

FONTE GERADORA	PERCENTAGEM EM PESO
Enfermaria	35,4
Maternidade	16,7
Ortopedia	14,6
Centro cirúrgico	10,4
Demais unidades (*)	22,9
TOTAL	100,0

FONTE: : SCHALCH ET ALLI (1995) APUD IPT/CEMPRE (2000) , RECALCULADO PELO AUTOR

Observações:

- Inclui pronto-socorro, ambulatório, varrição de pátios etc.
- A precisão do resultado calculado para as percentagens anteriores não abrange a primeira casa decimal como aparentemente indicado.

Aplicando os valores que indicam as participações percentuais das fontes geradoras da TABELA 4 nas respectivas fontes da TABELA 1 será possível estimar uma composição média para os RSS infectantes a ser considerada nos cálculos de combustão (TABELA 5).

TABELA 5 – DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO MÉDIA PONDERADA DOS RSS

Fonte Parâmetro	Maternidade x 0,167	Enfermaria x 0,354	Ortopedia x 0,146	Centro cirúrgico x 0,104	Outros x 0,229	MÉDIA PONDERADA
Umidade %	9,9	8,5	1,1	3,0	2,8	25,3
Carbono %	5,4	10,9	4,0	2,9	7,3	30,5
Hidrogênio %	0,8	1,3	0,4	0,4	0,8	3,7
Enxofre %	0,05	0	0,2	0,05	0,07	0,37
Sólidos voláteis %	15,7	33,9	-	9,3	22,0	80,9
PCI (kcal/kg)	265,4	1011,6	-	251,4	793,0	2321,4
PCS (kcal/kg)	833,3	1499,5	558,6	404,9	985,4	4281,7
Cloro %	0	0	0	0	0	0
Cloretos %	0,008	0,028	0,020	0,009	0,020	0,085

FONTE: CETESB (1981), RECALCULADO PELO AUTOR

Como a TABELA 5 foi oriunda da TABELA 1, o teor de cloro foi indicado apenas como cloretos.

Nos resultados da terceira etapa do citado trabalho CETESB (1981) que abrangeu uma amostra de trinta e três hospitais, foram obtidos muitos dados estatísticos, dos quais destacamos a produção diária de lixo (página 19): média = 1005 kg/dia/hospital; desvio padrão = 1047 kg/dia/hospital; coeficiente de variação = 1,04.

Os valores referentes à geração de lixo hospitalar são importantes para colaborar nas estimativas das quantidades geradas de RSS que necessitarão de tratamento e destinação, pois as informações neste particular na literatura disponível são desconhecidas e apresentam incertezas. A informação da ANVISA já citada no item 1.1 – Contexto - faz referência à ampla faixa de 120 a 900 toneladas por dia quanto à geração de RSS contaminados, com um desvio padrão inadmissivelmente elevado.

A determinação do peso específico dos resíduos sólidos hospitalares foi realizada a partir da pesagem e da medição em doze dos hospitais amostrados, permitindo sua determinação nas diferentes categorias, conforme a Tabela contida na página 26 do referido trabalho (CETESB, 1981).

TABELA 6 – PESO ESPECÍFICO DE RSS POR TIPO

Tipo de resíduo	Média da amostra (kg/m ³)	Desvio padrão da amostra (kg/m ³)	Intervalos de com 90% de confiança (kg/m ³)	Intervalos de com 95% de confiança (kg/m ³)
Contaminado	144,5	30,3	144,5 ± 17,5	144,5 ± 21,6
Restos de cozinha	595,3	158,3	595,3 ± 82,1	595,3 ± 100,6
Demais resíduos	111,1	33,5	111,1 ± 17,4	111,1 ± 21,3
Total	245,4	75,1	245,4 ± 38,9	245,4 ± 47,7

FONTE: CETESB, 1981

Observações

- o resíduo sólido total de um hospital tem peso específico entre 200 e 300 kg/m³;
- o peso específico dos resíduos de cozinha varia entre 500 e 700 kg/m³;
- o peso específico dos demais resíduos varia entre 90 e 130 kg/m³.

Em outro trabalho intitulado Resíduos de Serviços de Saúde (CETESB, 1997) é apresentada no Anexo I uma tabela com a análise física dos resíduos sólidos por setores em dois hospitais do município de São Paulo, realizado em 1990, conforme a TABELA 7 a seguir.

TABELA 7 – ANÁLISES FÍSICAS DOS RSS POR SETORES NOS HOSPITAIS A E B

ANÁLISES FÍSICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS POR SETORES NOS HOSPITAIS A e B												
MATERIAIS	SETORES (UNIDADES)											
	C.CIRURGIA		COPA/COZ.		ENF./INT.		LABORAT.		PS/AMB		UTI	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Papel	36,8	40,4	9,25	5,20	43,70	56,85	33,30	38,35	62,10	40	37,2	32,2
Vidro	-	2,8	-	-	5,25	-	37,30	15,50	-	9,4	5,8	8,5
Plástico	35,1	22,6	3,00	4,8	32,05	5,40	10,70	24,4	19,25	38,8	39	44,1
Metal	2,8	1	-	16,25	0,80	-	4	-	2,05	-	0,2	-
Tecido	15,8	22,7	0,20	-	5,85	22,20	-	14	5	11,8	2,8	6,8
M.O.	-	1,7	83	70	11,00	2,80	-	-	7,2	-	-	2,7
Borracha	8,1	3,3	-	-	1	4,35	-	-	0,4	-	14,2	1,7
Madeira	-	-	-	-	0,35	0,80	-	-	0,6	-	-	-
Outros	1,4	6,5	4,50	3,70	-	7,60	14,70	7,7	3,4	-	0,8	4
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

FONTE: CETESB, 1997

Observação:

Valores dados em % de peso do resíduo; (-) Ausência de material

Da TABELA 7 vemos que os principais resíduos sólidos hospitalares são: papel, plástico, tecido e borracha.

De acordo com o website "www.prodam.sp.gov.br/limpurb/probsol/inci_rss.htm", página 5, as quantidades geradas são da ordem de 1 ton / dia para cada 100.000 habitantes.

Por outro lado, o relatório EPA-450/3-88-017 (USEPA, 1988) , na página 1-3, faz referência à geração de resíduos sólidos obtidos numa amostragem em 17 hospitais na Flórida - EUA, variando na faixa de 8 a 45 libras (3,6 a 20,4 kg) / leito / dia, perfazendo uma média de 23 libras (10,4 kg) / leito / dia. Embora possa refletir um panorama hospitalar diferente da realidade brasileira, estes valores também podem servir para comparações com os valores obtidos no Brasil.

3.2 INCINERAÇÃO

3.2.1 Processos

Incineração é o termo geral que se refere ao processo de destruição térmica (combustão) de produtos. Muitos processos de incineração têm sido desenvolvidos ao longo das últimas décadas com objetivo de tratar diferentes tipos de resíduos perigosos e, entre eles, os resíduos de serviços de saúde.

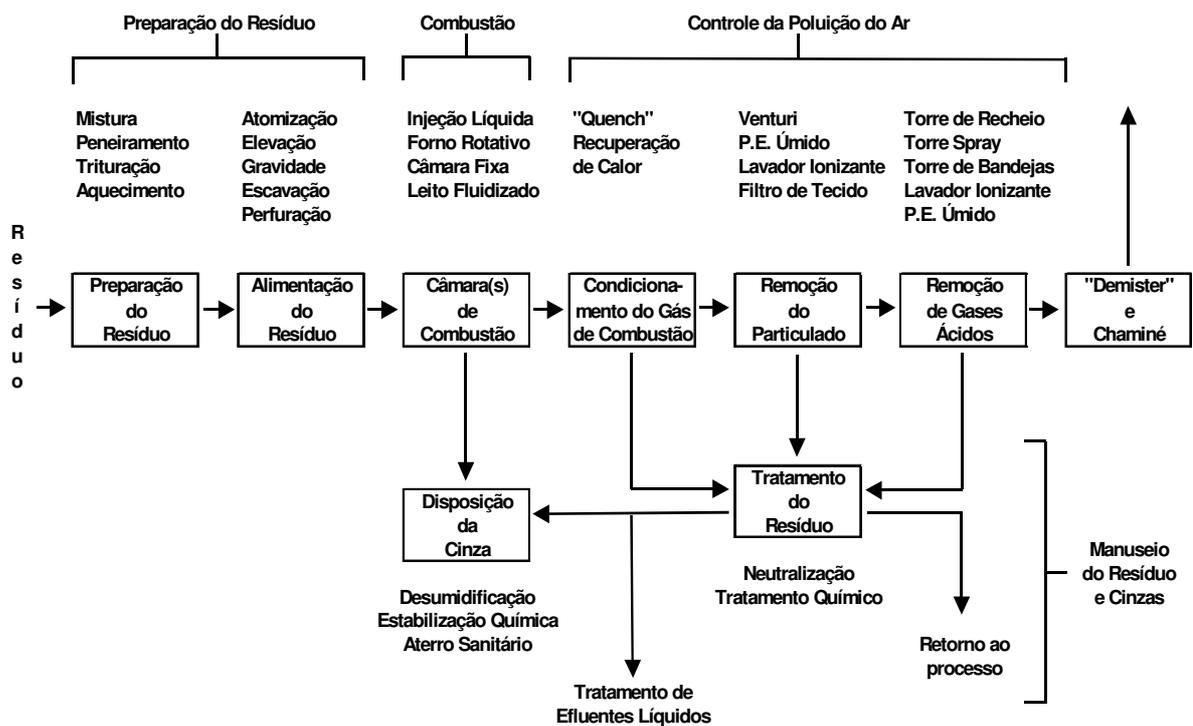
Segundo DEMPSEY (1999), os quatro maiores subsistemas que podem estar presentes em um sistema de incineração de resíduos perigosos e, em particular, os RSS, são os seguintes:

- Preparação e alimentação do resíduo;
- Câmara(s) de combustão;
- Controle dos poluentes atmosféricos;
- Manuseio da cinza/resíduo.

A FIGURA 1 mostra os subsistemas da incineração anteriormente relacionados, com diversas opções de componentes típicos para cada subsistema. Porém, nesta figura são citados muitos componentes que se aplicam apenas no caso geral de incineração de resíduos perigosos. No caso particular de RSS, alguns desses componentes de processo não são típicos. Por exemplo, na preparação dos RSS geralmente não existe nenhuma operação prévia, já que os resíduos estão disponíveis em sacos plásticos ou caixas de papelão.

Na combustão, o componente habitualmente usado é o forno de câmaras fixas, que utilizam processos de combustão em dois ou mais estágios, de acordo com o número de câmaras disponíveis. Apesar dos RSS possuírem frações combustíveis em sua composição, é necessário o uso de queimadores para iniciar o processo através do preaquecimento das câmaras do incinerador e complementar a demanda energética do processo, de modo a garantir as temperaturas mínimas necessárias em cada câmara.

E, no controle da poluição do ar, a etapa do resfriamento rápido (*quenching*) é muito importante para minimizar a formação das dioxinas e furanos, reduzindo o volume dos gases no tratamento posterior de remoção de particulados, remoção de gases ácidos e eliminação de névoa (*demister*) antes do lançamento na atmosfera.



FONTE: DEMPSEY (1999)

FIGURA 1 - ORIENTAÇÃO GERAL DOS SUBSISTEMAS DA INCINERAÇÃO E OPÇÕES DE COMPONENTES DE PROCESSOS TÍPICOS.

3.2.2 Incineradores

A definição genérica para incineradores afirma que são equipamentos destinados à destruição térmica, através de uma queima controlada, de resíduos indesejáveis e que não devam ser dispostos sem um determinado tratamento, sendo este processo o único ou uma das opções.

Para atingir as temperaturas necessárias aos processos de destruição térmica, os incineradores são estruturas que apresentam espaços confinados e isolados termicamente com materiais que resistam às temperaturas de operação, com aberturas destinadas à alimentação da carga e descarga das cinzas, e dotados de queimadores para aquecimento das câmaras, suporte da queima e pós-combustão. Neste conceito se inclui também a pirólise, que é uma variante da incineração.

Segundo IPT/SEMPRE (2000), existem basicamente três tipos de processos de incineração de resíduos sólidos municipais (RSM) e RSS em escala comercial:

- Combustão em grelha
- Combustão em câmaras múltiplas
- Combustão em leito fluidizado

O tipo de incinerador mais utilizado para RSS é o de câmaras múltiplas.

Ainda existem outros tipos de incineradores, como os verticais, mas não são utilizados para a incineração de resíduos de serviços de saúde.

INCINERADOR DE CÂMARAS MÚLTIPLAS

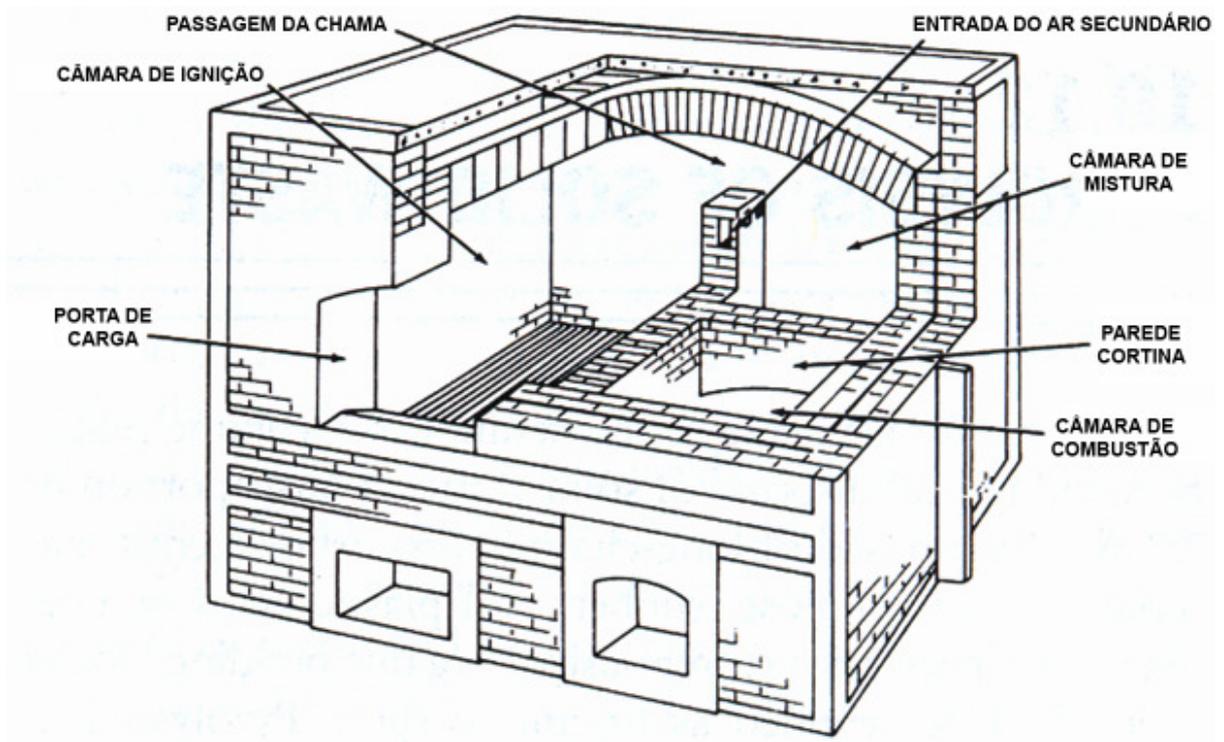
A literatura internacional se refere a este tipo de incineradores utilizando os termos em inglês: "multiple chamber incinerators; retort incinerators; excess air incinerators".

Estes incineradores se apresentam como uma grande caixa com a forma externa de um paralelepípedo. Internamente o equipamento é dividido em duas, três ou quatro câmaras, cuja disposição faz com que a passagem de uma câmara para a outra obrigue o fluxo a mudanças radicais de direção, tanto nos planos horizontal como no vertical.

As mudanças de direção, assim como a expansão e a contração dos gases liberados pela carga como os gases oriundos da combustão e do excesso de ar, proporcionam a turbulência necessária visando garantir a queima completa das frações combustíveis e a destruição térmica dos componentes nocivos ao meio ambiente. Além disso, essas mudanças de velocidade e de direção facilitam a deposição do material particulado no piso das câmaras, devido à propriedade da inércia, ou seja, a dificuldade da mudança de direção das partículas.

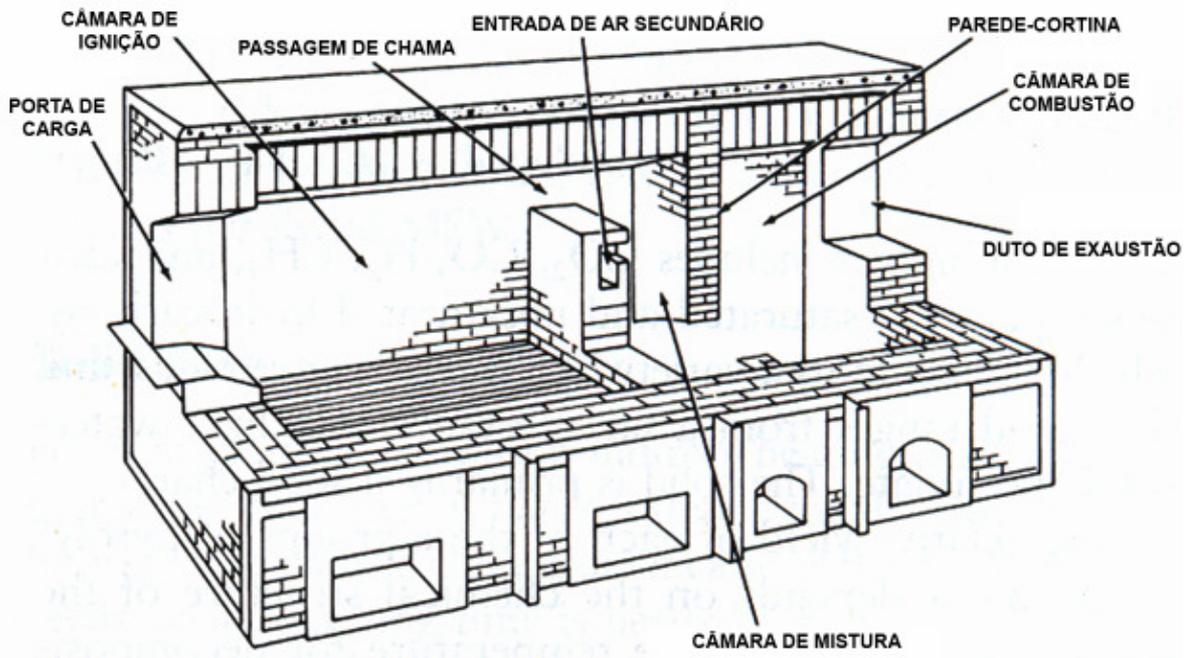
A saída da última câmara conduz os gases oriundos da combustão ao sistema de condicionamento (resfriamento, lavagem e filtragem) sendo, posteriormente, lançados na atmosfera através da chaminé.

Exemplos destes incineradores podem ser vistos nas Figuras 2 e 3.



FONTE: LIPTÁK, 1997

FIGURA 2. INCINERADOR DE CÂMARAS MÚLTIPLAS – TIPO RETORTA



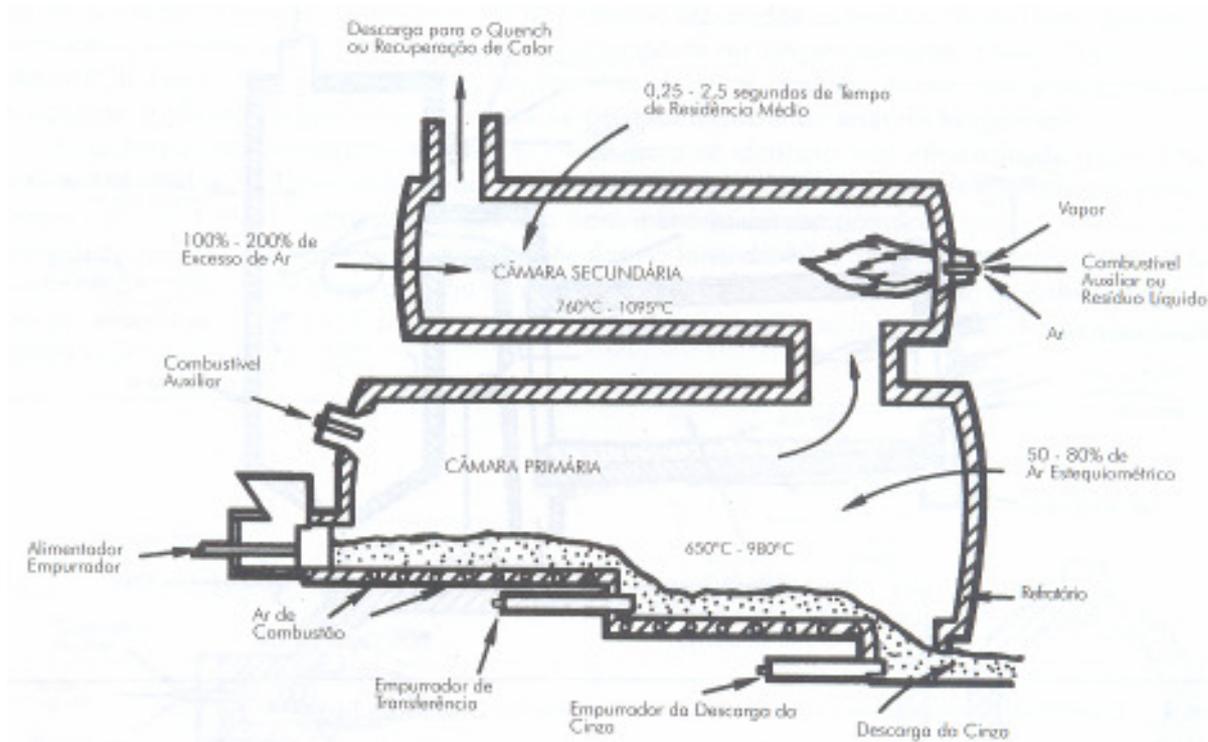
FONTE: LIPTÁK, 1997

FIGURA 3. INCINERADOR DE CÂMARAS MÚLTIPLAS – TIPO LINEAR

INCINERADORES DE AR CONTROLADO

O termo que define este tipo de incinerador como de ar controlado, incinerador pirolítico e, também, chamado de incinerador de duplo estágio, se refere à forma como a combustão é processada, ou seja, em dois estágios distintos como mostra a FIGURA 4. Esta tecnologia é conhecida na língua inglesa como: "controlled air incineration; two stage incineration; modular combustion; starved air incineration".

Os princípios de operação entre os incineradores de câmaras múltiplas e de ar controlado apresentam algumas similaridades, como a queima se iniciando na primeira câmara e se completando na(s) câmara(s) subsequente(s). Mas a grande diferença é que, nos incineradores de ar controlado, o ar de combustão é alimentado na primeira câmara em condições sub-estequiométricas, usualmente na faixa de 50 a 80% das necessidades estequiométricas, segundo DEMPSEY (1999). Desta forma, os níveis de velocidade e de turbulência na primeira câmara são baixos, minimizando o arraste de material particulado sólido para a segunda câmara.



FONTE: DEMPSEY (1999)

FIGURA 4 – INCINERADOR DE AR CONTROLADO

Na primeira câmara os resíduos passam pelas etapas de secagem (liberando água no estado de vapor), preaquecimento (liberando compostos voláteis) e queima. As frações combustíveis não voláteis são queimadas, liberando calor para o processo, enquanto que as frações voláteis passam para a segunda câmara. E as frações não combustíveis permanecem na primeira câmara como cinzas.

Ainda segundo DEMPSEY (1999), a queima das frações voláteis na segunda câmara se processa com a injeção de ar secundário, de forma tal que o excesso de ar total deste tipo de incinerador situa-se na faixa de 100 a 200%.

A energia auxiliar que complementar o suprimento de calor para o processo, em ambas as câmaras, dependerá do poder calorífico dos resíduos e do seu teor de umidade. Essa energia é fornecida através de queimadores alimentados geralmente por GLP – gás liquefeito de petróleo ou gás natural, podendo também utilizar combustíveis líquidos, geralmente derivados claros e com baixo teor de enxofre como o óleo diesel.

INCINERADOR DE FORNO ROTATIVO

Estes incineradores são muito mais versáteis que os tipos anteriormente descritos, sendo empregados na queima de resíduos diversos como sólidos, lamas e resíduos em contêineres.

Não costumam ser utilizados como incineradores exclusivos, não sendo equipamentos típicos para tratamento de resíduos de serviços de saúde.

3.3 COMBUSTÃO CONVENCIONAL COM AR

3.3.1 Queimadores

Queimadores são equipamentos que têm por finalidade gerar calor através da reação exotérmica de um combustível com um comburente, normalmente oxigênio presente no ar atmosférico. Na maioria dos casos a liberação desse calor é feita através de uma chama visível. Em alguns raros equipamentos a combustão pode ser catalítica, em temperatura relativamente baixa, não liberando assim radiação com comprimento de onda na faixa da luz visível ao olho humano.

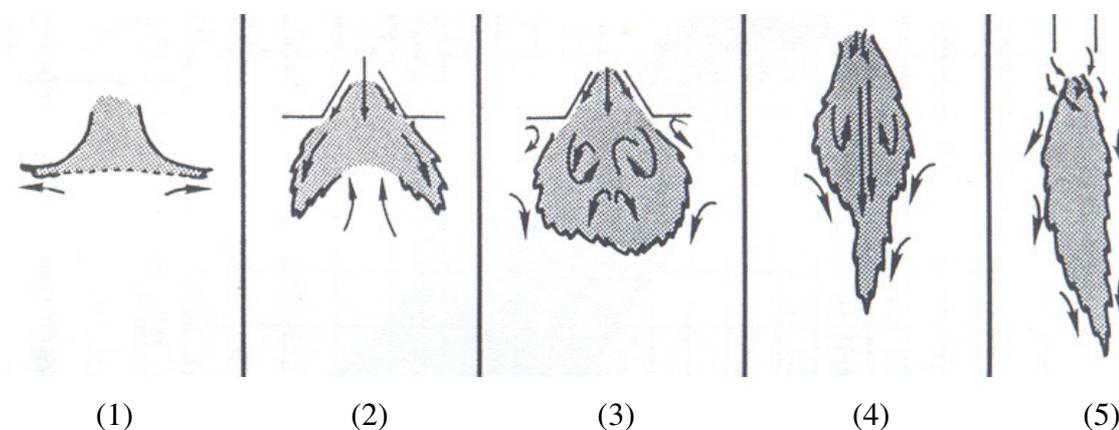
Os queimadores convencionais para uso em processos industriais encontrados no Brasil são, em sua maioria, importados ou fabricados segundo tecnologia estrangeira.

As principais características de um queimador são:

- Tipo de combustível utilizado, que pode ser: gasoso como gás natural, gás liquefeito de petróleo, gás manufacturado reformado, gás de refinaria, gás de coqueria, gás de alto forno e gás de biodigestão anaeróbica; líquido nas condições apresentadas na entrada dos queimadores, como óleo diesel, querosene, óleo de xisto, álcool e óleos residuais do petróleo com baixo e alto teores de enxofre; sólido como carvão vegetal e mineral pulverizados; coloidais como as misturas de óleos com carvão pulverizado. Existem outros combustíveis como a lenha, onde a fornalha não é propriamente definida como um queimador.
- Potência do queimador, que é a taxa de liberação de calor, no Brasil habitualmente expressa de quilocalorias por hora (kcal/h), embora o correto fosse usar o sistema internacional (quilojoules por hora ou quilowatt). Normalmente a potência dos queimadores é expressa por seu valor nominal, que é um valor um pouco inferior à potência máxima, sendo mais importante conhecer a sua faixa de potências indicada

pelas potências mínima e máxima. A relação entre estas duas potências é conhecida na literatura inglesa como “turn down ratio”, que é muito importante na seleção dos queimadores de forma que possam atender adequadamente às necessidades dos equipamentos onde serão instalados.

- Características da chama, como: velocidade, que pode ser baixa, média e alta; forma (FIGURA 5), como plana (1), cônica (2), sino (3), cabeça com pino (4) e cilíndrica ou convencional (5); e composição da atmosfera gerada, oxidante, neutra ou redutora.
- Material construtivo do bocal de queima: metálico ou cerâmico.



FONTE: REED (1997)

FIGURA 5 – FORMAS DE CHAMA EM QUEIMADORES INDUSTRIAIS

De acordo com a concepção do projeto, os queimadores podem ser classificados como:

- Queimadores tipo ar aspirado, onde o fluxo de gás combustível, geralmente GLP ou gás natural, insuflado em um venturi promove uma depressão ou zona de pressão negativa que admite o ar de combustão por sucção. Este tipo de queimador foi muito utilizado no passado em incineradores instalados em edifícios, destinados à queima de lixo doméstico. A desvantagem deste tipo de queimador é a impossibilidade do controle da vazão do ar de combustão devido às variações de pressão na câmara de combustão. Qualquer aumento da pressão interna na câmara de combustão irá prejudicar, ainda que momentaneamente, o fluxo de ar de combustão, as condições de estabilidade da chama e a composição dos produtos da combustão.
- Queimadores tipo monobloco, assim chamados pois seus componentes principais como o ventilador, o bocal de queima, as válvulas de bloqueio, os pressostatos e o painel de comando se encontram dispostos em um mesmo conjunto. Apesar de serem compactos e de fácil instalação, estes queimadores não costumam ser instalados em

incineradores por serem inadequados às temperaturas do processo, que podem sujeitar os componentes eletro-eletrônicos a temperaturas elevadas, danificando-os ou diminuindo sua vida útil. Geralmente este tipo de queimador costuma ser instalado em processos onde a temperatura não ultrapassa muito o valor de 400°C.

- Queimadores do tipo duobloco, onde seus dois principais componentes – ventilador e bocal de queima – se encontram separados em dois blocos, interligados pelo duto de ar de combustão. Assim, toda a parte eletro-eletrônica pode ficar posicionada em um local onde não esteja sujeita a temperaturas excessivas. Este é o tipo de queimador mais comumente encontrado em incineradores de RSS. Pois pode ser instalado em processos de alta temperatura, como ocorre nos incineradores.
- Existem outros tipos de queimadores, como leito fluidizado, infravermelho e combustão catalítica, mas que não são habitualmente utilizados em incineradores de RSS no Brasil.

3.3.2 Suprimento de ar

O oxigênio existente no ar é o comburente mais utilizado nos processos de combustão desde os primórdios da humanidade, por estar disponível em todos os locais. Existem algumas pequenas variações na composição do ar, no que se refere à concentração de dióxido de carbono em atmosferas urbanas.

As variações mais significativas do comburente ocorrem com a presença de umidade e com as variações da pressão atmosférica. A composição do ar atmosférico, em função das referidas variações, conforme REED (1986), está indicada na TABELA 8.

A composição média do ar atmosférico poderia ser considerada como:

Principais componentes	% massa	% volume
• Nitrogênio	74,9	76,9
• Oxigênio	23,0	20,7
• Outros	2,1	2,4

Porém, para fins práticos, a composição mássica do ar será considerada como:

Principais componentes	% massa	% volume
• Nitrogênio	77	79
• Oxigênio	23	21

TABELA 8. VARIAÇÕES NA COMPOSIÇÃO DO AR

Componentes do ar atmosférico	Temperatura de bulbo seco (°C) e umidade relativa (%)					
	15,6°C 0 %	15,6°C 80 %	15,6°C 100 %	32,2°C 20 %	32,2°C 80 %	32,2°C 100 %
Oxigênio	20,99 % v 23,20 % m	20,70 % v 23,00 % m	20,62 % v 22,94 % m	20,79 % v 23,06 % m	20,19 % v 22,63 % m	19,99 % v 22,50 % m
Nitrogênio	78,03 % v 75,46 % m	76,94 % v 74,86 % m	76,67 % v 74,63 % m	77,29 % v 75,01 % m	75,06 % v 73,61 % m	74,32 % v 73,18 % m
Argônio	0,94 % v 1,30 % m	0,93 % v 1,29 % m	0,92 % v 1,29 % m	0,93 % v 1,29 % m	0,90 % v 1,27 % m	0,90 % v 1,26 % m
Outros	0,04 % v 0,04 % m	0,04 % v 0,04 % m	0,04 % v 0,04 % m	0,04 % v 0,04 % m	0,04 % v 0,04 % m	0,04 % v 0,04 % m
Água	0,00 % v 0,00 % m	1,40 % v 0,87 % m	1,75 % v 1,10 % m	0,95 % v 0,50 % m	3,81 % v 2,45 % m	4,76 % v 3,02 % m
Peso molecular equivalente	28,96	28,81	28,77	28,86	28,55	28,45
Densidade (kg/m ³)	1,222	1,216	1,214	1,152	1,139	1,135

FONTE: REED, 1986

Os processos convencionais de combustão em incineradores de resíduos de serviços de saúde utilizam o oxigênio do ar como comburente.

Então, para utilizar o oxigênio presente no ar atmosférico, 23% (m/m), são obrigatoriamente introduzidos no processo 77% (m/m) de gases praticamente inertes à queima da matéria combustível. A presença de nitrogênio pode proporcionar a ocorrência das reações de formação dos compostos conhecidos como NO_x, com seu efeito nocivo.

Mas, em geral, os gases referidos como praticamente inertes à combustão devem ser considerados como uma carga térmica que trafega nos incineradores, carregando uma parcela significativa de calor para fora do equipamento térmico. Na medida em que o processo de incineração exija um maior excesso de ar de combustão para garantir uma atmosfera oxidante, maiores serão as perdas de calor para a atmosfera. Isso significa maior consumo de combustível e também maior consumo de energia para resfriar os efluentes do processo de

incineração. Além disso, as temperaturas de chama baixam significativamente na medida em que o excesso de ar de combustão aumenta. O relatório No. 192/62M da Shell International Petroleum Company Ltd. intitulado "The Properties of Liquefied Petroleum Gases" (JENKIN, 1962), em sua Fig. 14, indica uma queda na temperatura adiabática de chama do GLP da ordem de 450° quando o excesso de ar de combustão de eleva de zero (combustão estequiométrica) a 50%.

3.3.3 Câmaras de combustão

Chamam-se câmaras de combustão ou fornalha de um incinerador as estruturas que confinam e limitam os espaços onde ocorrem as reações de decomposição térmica, queima e requeima dos RSS e subprodutos por eles gerados.

De acordo com VLASSOV (2001), nas câmaras de combustão ocorrem uma série de complexos fenômenos físicos e químicos. Os fenômenos físicos são aqueles relacionados à preparação do combustível e do ar, sua mistura eficiente e condições para combustão. Os fenômenos químicos dizem respeito às reações que ocorrem entre as frações combustíveis e os componentes do comburente, caracterizados pelas temperaturas e concentrações das substâncias. Assim, a câmara de combustão é um volume onde ocorrem fenômenos complexos com campos de distribuição de velocidade, de temperaturas e de concentrações de frações combustíveis, produtos intermediários da combustão e comburente.

Ainda segundo VLASSOV (2001), reações que ocorrem nas câmaras de combustão apresentam saldo amplamente exotérmico, onde são citados os efeitos positivos da liberação de calor promovido pela oxidação do carbono, do hidrogênio e do enxofre e os efeitos negativos das reações endotérmicas que podem ocorrer no núcleo da chama, gerados pela oxidação do nitrogênio ($N_2 + O_2 = 2 NO - \text{calor}$), pela deficiência ainda que momentânea de oxigênio em presença de carbono ($C + CO_2 = 2 CO - \text{calor}$) e em presença de carbono e hidrogênio ($C + 2H_2 = CH_4 - \text{calor}$).

Apesar da intenção do autor VLASSOV (2001), em seu livro Combustíveis, Combustão e Câmaras de Combustão ter sido a queima de combustíveis, os conceitos são válidos também para a incineração de RSS quando observamos que as principais frações combustíveis dos referidos resíduos são também carbono, hidrogênio e enxofre.

O dimensionamento das câmaras de combustão de um incinerador de RSS deve levar em conta uma série de fatores, como relatados a seguir:

1. a função da câmara de combustão, ou seja:
 - evaporar os componentes líquidos e voláteis dos RSS e converter os componentes sólidos em gases, possibilitando que as cinzas sejam retiradas pela parte inferior desta câmara, minimizando seu arraste para a(s) câmara(s) subsequente(s);
 - complementar a queima dos gases e vapores gerados, atendendo às exigências de temperatura, turbulência e tempo de residência da mistura frações combustíveis e comburente, conhecido como fator dos 3 T (MINISTRY OF POWER, 1958, pág. 129).

2. o tipo da câmara de combustão, que pode ser:
 - câmara rotativa com câmara de pós-queima;
 - múltiplas câmaras fixas;
 - câmara de leito fluidizado.

3. a capacidade de incineração, dependente das:
 - características dos RSS;
 - geração local dos RSS.

3.3.4 Fator dos “três tês”

Segundo MINISTRY OF POWER (1958), para se obter uma boa combustão é necessário atender ao fator conhecido como “três tês”, ou seja, tempo, turbulência e temperatura, desde que as corretas proporções de combustível e comburente tenham sido fornecidas ao processo. O fator tempo justifica-se pelo fato de que todas as reações químicas, como as reações de combustão em particular, requerem um determinado tempo para que se completem. O fator turbulência é importante pois proporciona a mistura das frações combustíveis com o comburente. E o fator temperatura garante a condição necessária para que a ignição ocorra.

Nos processos de incineração, a temperatura e o tempo de residência dos componentes gasosos liberados pela pirólise ou pela combustão dos resíduos durante o processo são parâmetros interdependentes. Quanto maior for a temperatura da câmara, menor será o

tempo de residência necessário para que todos os componentes sejam considerados convenientemente incinerados em uma atmosfera com determinadas características.

As temperaturas desejadas nas câmaras de combustão são atingidas e mantidas de acordo com o balanço térmico de cada câmara. Para a realização do balanço térmico é necessário estabelecer um volume de controle, que é delimitado por uma superfície imaginária, nos limites geométricos da câmara em estudo, sendo considerados todos os fluxos de massa e de calor que a atravessam. Os combustíveis que alimentam as câmaras de combustão de um incinerador são: o resíduo a ser incinerado, no caso RSS e o combustível utilizado no(s) queimador(es) para complementar a demanda térmica, controlar e garantir a temperatura exigida. O comburente neste caso é o oxigênio presente no ar atmosférico, geralmente fornecido através de ventiladores centrífugos.

A determinação do tempo de residência das frações gasosas nas condições reais em um incinerador de RSS de câmaras fixas não é uma tarefa fácil de ser realizada. Este processo de incineração não é um processo absolutamente contínuo, nem um processo de batelada, podendo ser considerado um processo onde a alimentação se faz a intervalos de tempo discretos.

O cálculo do tempo de residência deve ser feito na câmara de pós queima, onde praticamente só circulam produtos gasosos, portanto havendo as variações da seção transversal como ocorre na câmara de alimentação devido ao carregamento dos resíduos. Segundo BRUNNER (1993), o tempo médio de residência pode ser calculado considerando-se o fluxo ideal, chamado “plug flow”, ou seja “fluxo tampão”, onde os gases atravessam a câmara de combustão considerada de uma forma ideal, com velocidade constante em todas as seções transversais da câmara e sem ocorrer variação de temperatura e composição, nem misturas no eixo longitudinal. Assim:

$$t = (V / Q) \times 60 \tag{1}$$

Na referência BRUNNER (1993), as equações foram desenvolvidas a partir da Equação 1 nas unidades norte-americanas. Mas nesta dissertação as fórmulas serão desenvolvidas nas unidades do Sistema Internacional. Desta forma:

$$t = \text{tempo de residência em segundos}$$

- V = volume da câmara de combustão em m³
 Q = vazão volumétrica em Nm³/min

Geralmente os cálculos das vazões dos produtos da combustão, em base volumétrica, são feitos tomando-se por base as CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão (273K e 760 mm Hg). Porém, o cálculo do tempo de residência deve levar em conta a vazão dos produtos da combustão na temperatura efetiva que atravessam a câmara de combustão, a qual está muito acima dos valores considerados nas CNTP. Para a correção da vazão em função da temperatura efetiva dos produtos da combustão foi levado em conta que todas as frações gasosas se comportam como gases ideais. Assim:

$$(P \times V) / T = (P' \times V') / T',$$

Onde: P = P' = pressão interna da câmara de combustão, considerada constante

- V = volume dos produtos da combustão nas CNTP (Nm³)
 V' = volume dos produtos da combustão na temperatura T' (m³)
 T = 273,15K
 T' = temperatura efetiva dos gases na câmara de combustão (K)

Assim podemos reescrever que: $V / T = V' / T'$ (processo isobárico)

Dividindo ambos os termos pelo tempo, a equação pode ser reescrita como:

$$Q / T = Q' / T', \text{ onde } T = 273,15K$$

Assim:

$$Q' = Q \times (T' / 273,15) \tag{2}$$

Onde: Q = vazão volumétrica nas CNTP (Nm³/min)

Q' = vazão volumétrica na temperatura T' (m³/min)

Para se obter o tempo de residência nas condições de trabalho da câmara de combustão, a Equação 1 deve ser reescrita como:

$$t' = (V / Q') \times 60$$

Substituindo Q' pelo seu valor indicado na Equação 2, encontra-se:

$$t' = [V / (Q \times T')] \times 273,15 \times 60$$

$$t' = 16389 \times V / (Q \times T') \quad (3)$$

Como as condições de trabalho na câmara de combustão de um incinerador não são contínuas em função do tempo, os parâmetros considerados devem ser calculados observando as premissas conservativas, para que os tempos de residência não sejam inferiores aos mínimos exigidos:

- O volume da câmara de combustão deve ser calculado com os refratários novos, pois refratários desgastados conduzem a tempos de residências mais elevados. Caso haja a possibilidade da formação de depósitos na câmara de combustão, seu volume deverá ser calculado levando-se em conta a redução causada pelos referidos depósitos na condição que conduza ao menor volume, ou seja, a hipótese mais desfavorável.
- A vazão dos produtos da combustão deverá ser considerada com o incinerador operando em sua capacidade máxima e com o maior índice de excesso de ar de combustão.
- A temperatura a ser considerada, em princípio, seria a temperatura máxima de operação na câmara de combustão. Porém, valores inferiores à temperatura máxima devem ser calculados para verificar se as condições impostas pela legislação, com respeito a tempo de residência em função da temperatura, estão sendo atendidas.

Ainda segundo BRUNNER (1993), como na prática não existem as condições ideais denominadas como a hipótese do “fluxo tampão”, pois ocorre alguma mistura longitudinal e parte do gás encontra um percurso mais rápido que a velocidade média, o tempo de residência mínimo tem sido encontrado como aproximadamente a metade do tempo calculado ($0,5 t'$). Assim, a única forma de garantir o tempo mínimo de residência em todas as partes que constituem o volume dos produtos da combustão seria estabelecer, como parâmetro, o dobro do valor do tempo calculado pela Equação 3. Desta forma, as partes do volume que percorressem o trajeto mais curto e, portanto, mais rápido na câmara de combustão teriam garantido o tempo mínimo de residência. Já as partes que percorressem o trajeto mais longo e mais lento na câmara de combustão apresentariam um tempo de residência superior ao tempo mínimo exigido, significando uma operação em condições que excederiam às exigências mínimas para garantir a combustão completa das frações combustíveis envolvidas.

3.3.5 Cálculos de combustão com ar

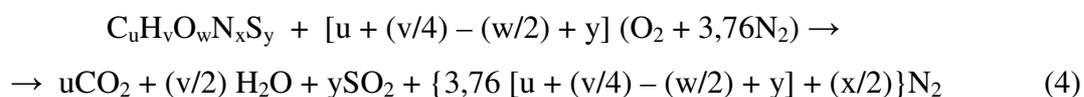
O objetivo de realizar os cálculos de combustão com ar é possibilitar a comparação dos volumes de produtos da combustão gerados pela incineração convencional dos RSS com os respectivos volumes gerados na nova situação, ou seja, a incineração através de atmosferas ricas em oxigênio.

Como a composição dos RSS está expressa em sua composição elementar, serão apresentados os cálculos de combustão para os principais elementos combustíveis, ou seja, carbono, hidrogênio e enxofre.

Além disso, serão apresentados também os cálculos de combustão dos principais combustíveis utilizados no preaquecimento dos incineradores e na chama de suporte, como o etanol, o óleo diesel, o gás liquefeito do petróleo e o gás natural. Os processos de incineração acabam por exigir a utilização de combustíveis ambientalmente amigáveis, principalmente quanto à presença de enxofre, para reduzir os problemas de acidez e corrosão nos sistemas periféricos localizados após o incinerador.

Os cálculos da combustão estequiométrica e da combustão com excesso de ar para o carbono, o hidrogênio e o enxofre foram realizados da forma convencional, através das reações químicas e suas relações molares, conforme apresentado no ANEXO A.

O comburente (oxigênio) e os produtos da combustão estequiométrica de substâncias também podem ser facilmente determinados a partir das reações químicas de oxidação, sintetizadas pela fórmula genérica citada por STREHLOW (1985):



Outra referência é o software denominado VULCANO 1.1 (2006), disponibilizado livremente para download através da Internet pela empresa Dynamis. Este software proporciona os cálculos de combustão de combustíveis tradicionais ou não, com comburentes obtidos do ar ambiente até atmosferas com oxigênio, com teores de excesso de comburente variáveis. O software VULCANO 1.1 (2006) também dá outras informações como temperatura de chama para cada situação analisada, sendo de utilidade prática. No ANEXO A, nas TABELAS A1, A2, A3 e A4, são fornecidos alguns parâmetros da combustão teórica dos principais

combustíveis possíveis de serem utilizados na incineração de RSS com ar atmosférico, como etanol, diesel, GLP e gás natural. O referido software considera também a umidade presente no ar atmosférico de combustão, sendo expressa em "kg de H₂O por kg de ar seco".

As principais características que podem ser observadas a partir dos cálculos de combustão com ar ambiente são as seguintes:

- O principal gás constituinte dos produtos da combustão é o nitrogênio oriundo do ar de combustão, estando presente em percentagens elevadas, da ordem de 80%.
- Por tratar-se de cálculos da combustão teórica, não estão indicados produtos da combustão incompleta como o monóxido de carbono nem aparecem produtos da reação de oxidação do nitrogênio (NO_x), como ocorrem na combustão real.
- Para se obter atmosferas oxidantes é necessário praticar excessos de ar de combustão elevados; se o objetivo fosse obter, após a queima do combustível, um teor de oxigênio acima de 7% em volume (D'ALMEIDA, 2000), seria necessário operar com um excesso de ar de combustão acima de 50%, introduzindo uma enorme quantidade de nitrogênio na câmara de combustão.
- Esta elevada quantidade de nitrogênio introduzida na câmara de combustão apresenta como principais conseqüências:
 - a redução do tempo de residência dos produtos da combustão nos incineradores;
 - a redução da eficiência de combustão devido à quantidade de calor transportada pelo nitrogênio para fora do incinerador;
 - e a possibilidade de formação de óxidos de nitrogênio (NO_x).

3.4 COMBUSTÃO COM OXIGÊNIO

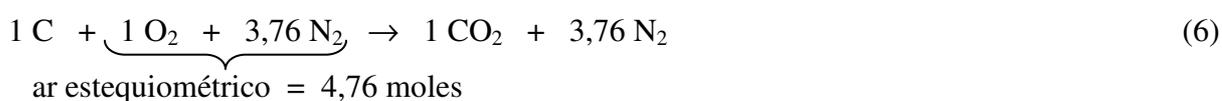
3.4.1 Generalidades

Como já visto anteriormente no item 3.3.2 (Suprimento de ar), o ar atmosférico apresenta uma composição molar aproximada de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio.

A Equação 4 em 3.3.5 – Cálculos de combustão com ar – indica que a queima estequiométrica de 1 mol de carbono necessita 1 mol de oxigênio para gerar 1 mol de CO₂.

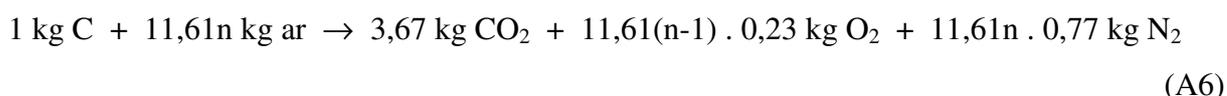


Como a relação molar entre o oxigênio e o nitrogênio no ar atmosférico é aproximadamente igual à razão $0,79 / 0,21 = 3,76$, ou seja, a cada mol de oxigênio corresponderá 3,76 moles de nitrogênio. Assim, a Equação 5 pode ser reescrita da seguinte forma:

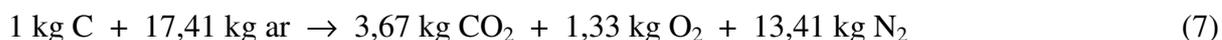


Assim, quando se introduz oxigênio nos processos de combustão, cada volume de oxigênio permite a substituição de 4,76 volumes de ar atmosférico, evitando o tráfego de 3,76 volumes de nitrogênio e outros gases inertes do ar. Na prática a redução do volume dos gases inertes é ainda mais elevada na medida em que a necessidade do excesso de ar de combustão seja mais significativa, para garantir uma atmosfera oxidante, como pode ser visto no ANEXO A nas Equações A6, A12 e A18.

A Equação A6 refere-se à queima do carbono com excesso de ar de combustão, onde “n” é o fator que representa o índice de excesso de ar:

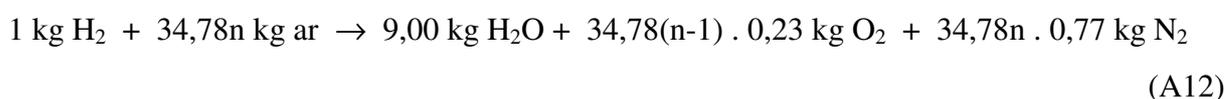


Considerando-se o excesso de ar de combustão típico de 50% ($n = 1,5$) nos processos de queima de resíduos sólidos, a Equação (A6) se transforma em:



Ou seja, para cada quilograma de carbono queimado são introduzidos na combustão 13,41 kg de nitrogênio.

A Equação A12 refere-se à queima do hidrogênio com excesso de ar de combustão, onde “n” é o fator que representa o índice de excesso de ar:

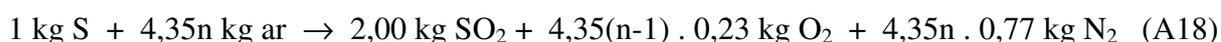


Considerando-se o excesso de ar de combustão típico de 50% ($n = 1,5$) nos processos de queima de resíduos sólidos, a Equação (A12) se transforma em:

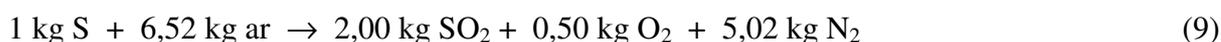


Ou seja, para cada quilograma de hidrogênio queimado são introduzidos na combustão 40,17 kg de nitrogênio.

A Equação A18 refere-se à queima do enxofre com excesso de ar de combustão, onde “n” é o fator que representa o índice de excesso de ar:



Considerando-se o excesso de ar de combustão típico de 50% ($n = 1,5$) nos processos de queima de resíduos sólidos, a Equação (A18) se transforma em:



Ou seja, para cada quilograma de enxofre queimado são introduzidos na combustão 5,02 kg de nitrogênio.

Portanto, como consequência direta dos resultados obtidos a partir das Equações (7), (8) e (9), a eliminação do nitrogênio através da substituição do ar de combustão por oxigênio puro promove um aumento da eficiência do processo que acarreta na redução no consumo de combustível, na redução do volume de produtos da combustão e no aumento do tempo de residência dos produtos da combustão no interior do incinerador e seus periféricos.

A substituição total ou parcial do ar atmosférico pelo oxigênio possibilita o aumento da produtividade dos incineradores existentes e o aumento da eficiência no resfriamento dos produtos da combustão. Em novos incineradores, caso desejável, a prática da combustão com o auxílio de oxigênio poderia possibilitar a redução do investimento e a energia consumida no sistema de condicionamento dos efluentes.

As características da combustão de todos os combustíveis com oxigênio puro ou com atmosferas enriquecidas com oxigênio se alteram e, na maioria delas, as diferenças se tornam mais significativas na medida em que o teor de oxigênio no ar de combustão se eleva. Vejamos algumas delas:

- Temperatura de chama:

As temperaturas de chama se elevam na medida em que o teor de oxigênio no ar de combustão também se eleva. A explicação é lógica, pois o teor de nitrogênio e demais inertes, presentes no ar de combustão e que constituem uma carga térmica, diminuem à medida que o teor de oxigênio se eleva.

Segundo MARTÍNEZ (1989), temperatura adiabática de chama é a máxima temperatura que os produtos da combustão podem atingir, considerando-se que todo o calor liberado pelo processo seria utilizado integralmente para aquecer os produtos da combustão.

Portanto trata-se apenas de um valor teórico calculado através de um balanço de energia baseado na Primeira Lei da Termodinâmica, considerando-se o processo adiabático, a pressão constante, sendo a energia cinética desprezível em relação à entalpia e não havendo trabalho em eixo, fazendo com que as entalpias antes e após a combustão sejam iguais, de acordo com BORMAN (1998).

As divergências entre os valores encontrados na literatura especializada para as temperaturas de chama dos binômios combustível-comburente dizem respeito às condições iniciais consideradas como o poder calorífico do combustível, as temperaturas iniciais do combustível e do comburente, a consideração ou não da energia consumida na dissociação dos produtos da combustão e as proporções combustível-comburente assumidas, geralmente estequiométricas.

Segundo BORMAN (1998), a temperatura máxima de um binômio combustível-comburente é obtida na proporção estequiométrica não ocorrendo dissociação, mas desloca-se ligeiramente para o lado da mistura rica (ou sub-estequiométrica) quando a dissociação ocorre. MARTÍNEZ (1989) afirma que o fenômeno da dissociação ocorre em temperaturas acima de 1.500°C.

A TABELA 9 mostra o comportamento das temperaturas adiabáticas (ou teóricas) de chama de gases combustíveis para ar e oxigênio, considerando-se a combustão estequiométrica e em condições adiabáticas (sem troca de calor com o meio), tendo sido considerado o fenômeno endotérmico da dissociação devido às elevadas temperaturas desenvolvidas.

TABELA 9. TEMPERATURAS TEÓRICAS DE CHAMA DE GASES COMBUSTÍVEIS.

TIPO DE GÁS COMBUSTÍVEL	TEMPERATURA TEÓRICA DE CHAMA (°C)	
	QUEIMA COM AR	QUEIMA COM OXIGÊNIO PURO
Acetileno	2.632	3.110
Gás natural	1.941	2.643
Hidrogênio	2.045	2.974
Propano	1.967	2.832

FONTE: REED (1986)

Na realidade, as temperaturas efetivas da chama apresentam sempre valores inferiores aos indicados pela TABELA 9, pois as condições adiabáticas não se encontram presentes nas situações reais. Na medida em que as reações químicas de combustão se processam, ocorrem as trocas de calor entre os produtos intermediários e finais da combustão com o ambiente do processo, no caso de incineradores são as câmaras de combustão, impedindo que as condições adiabáticas se estabeleçam.

Mas, assim mesmo, os valores indicados na TABELA 9 são válidos como parâmetros comparativos entre as duas situações, ou seja, com ar e com oxigênio puro.

De forma análoga, a TABELA 9 considera a combustão como sendo estequiométrica, outra hipótese teórica, pois a combustão real se processa com excesso de comburente, seja ar, ar enriquecido com oxigênio ou oxigênio com diversos graus de pureza. O excesso de comburente, assim como os gases inertes, também constitui uma carga térmica adicional ao processo e, portanto, quanto maior este excesso menor será a temperatura da chama.

- Temperatura mínima de auto-ignição

A temperatura mínima de auto-ignição é aquela a partir da qual uma mistura combustível-comburente, em proporções inflamáveis, entra em ignição sem a presença de chama ou faísca.

Segundo JENKIN (1962), os valores encontrados para a temperatura mínima de auto-ignição dependem das condições dos equipamentos utilizados nos testes, da proporção combustível - comburente e da pressão da mistura, havendo por esta razão algumas divergências na literatura.

A TABELA 10 mostra as faixas das temperaturas mínimas de auto-ignição de alguns gases combustíveis, na pressão atmosférica. Ainda de acordo com JENKINS (1962), os valores indicados na TABELA 10 não foram todos obtidos pelo mesmo método, razão pela qual alguns valores representativos estão indicados por suas faixas.

TABELA 10. TEMPERATURAS MÍNIMAS DE AUTO-IGNIÇÃO

GÁS COMBUSTÍVEL	TEMPERATURA MÍNIMA DE AUTO-IGNIÇÃO (°C)	
	COM AR	COM OXIGÊNIO PURO
Propano comercial	460 - 580	470 - 575
Butano comercial	410 - 550	280 - 550
Gás natural	630 - 750	555 - 700
Acetileno	305 - 500	295 - 440
Hidrogênio	550 - 590	cerca de 560

FONTE: JENKIN (1962)

Esta propriedade da temperatura mínima de auto-ignição dos gases combustíveis não é significativamente alterada quando se substitui o ar atmosférico por oxigênio puro em processos de queima, como ocorre com as demais propriedades. Os valores em atmosferas de oxigênio puro apresentam, na maioria dos gases combustíveis, apenas uma ligeira redução em relação aos valores indicados com ar atmosférico.

- Campo de inflamabilidade

Campo de inflamabilidade é a região onde as proporções combustível-comburente podem produzir uma chama estável. Segundo CORNFORTH (1992), todos os sistemas de queima devem ser capazes de fornecer uma confiável proporção combustível-comburente dentro dos limites do campo de inflamabilidade para se obter uma chama estável.

Os campos de inflamabilidade sofrem significativas alterações com o aumento do teor de oxigênio no comburente. Quanto mais elevado for o teor de oxigênio, mais amplo será o campo de inflamabilidade.

A TABELA 11 indica os campos de inflamabilidade dos principais gases combustíveis em misturas com ar atmosférico e com oxigênio puro, para pressões e temperaturas nas condições “standard” (760 mm Hg e 15,6°C). Segundo CORNFORTH (1992), os limites de inflamabilidade são apenas ligeiramente sensíveis às variações de pressão e temperaturas ambientes.

TABELA 11. CAMPOS DE INFLAMABILIDADE

GÁS COMBUSTÍVEL	CAMPO DE INFLAMABILIDADE (%)			
	EM AR		EM OXIGÊNIO PURO	
	lim. inferior	lim. superior	lim. inferior	lim. superior
Propano	2,1 ^(A)	10,1 ^(A)	2,3 ^(B)	55 ^(B)
n-Butano	1,86 ^(A)	8,41 ^(A)	1,8 ^(B)	49 ^(B)
Metano	5,0 ^(A)	15,0 ^(A)	5,1 ^(B)	61 ^(B)
Gás Natural	4,3 ^(A)	15,0 ^(A)	-	-
Acetileno	2 ^(A)	82 ^(A)	2 ^(C)	93 ^(C)
Hidrogênio	4,0 ^(A)	74,2 ^(A)	4 ^(D)	94 ^(D)

FONTES: ^(A) REED (1986)

^(C) AHLBERG (1985)

^(B) COWARD (1952)

^(D) GLASSMAN (1996)

- Velocidades de chama

REED (1986) define a velocidade de chama como sendo aquela na qual a chama trafega no interior de uma mistura combustível-comburente dentro do campo de inflamabilidade, velocidade essa considerada relativa à velocidade da mistura, sendo também chamada de velocidade de ignição e de taxa de propagação de chama.

A velocidade de chama é uma característica de muita importância na ocasião do projeto de bocais de queimadores. Segundo CARDOSO (1977), a estabilidade da chama depende fundamentalmente do equilíbrio entre os vetores que representam a velocidade de saída da mistura combustível-comburente e os vetores da velocidade da chama.

O sentido dos vetores da velocidade de saída da mistura é dos bocais dos queimadores para fora, enquanto o sentido dos vetores da velocidade de chama é da chama para os bocais dos queimadores. Portanto, deve-se tomar cuidado quando enriquecer o ar de combustão com oxigênio para que não venha ocorrer retrocesso da chama, fenômeno esse que, geralmente, pode ocorrer com maior frequência quando a velocidade da chama aumenta (CARDOSO, 1977). Gases com velocidades de chama elevadas, como o hidrogênio e o acetileno, apresentam tendência ao retrocesso de chama, conhecido em inglês por “flashback”, enquanto gases com baixas velocidades de chama tendem ao descolamento de chama (“lift”) (CARDOSO, 1977).

Usualmente os teores de oxigênio no ar enriquecido não ultrapassam 25% quando a queima se processa em queimadores convencionais ar-combustível. A maioria dos queimadores suporta teores de até 30% de oxigênio no comburente sem que ocorram retrocessos de chama ou superaquecimento no bocal (SALTIN, 1981).

As velocidades de chama sofrem um aumento significativo na medida em que o teor de oxigênio no comburente aumenta, o que faz com que o comprimento da chama diminua.

TABELA 12. VELOCIDADES MÁXIMAS DE CHAMA DE GASES COMBUSTÍVEIS

GÁS COMBUSTÍVEL	VELOCIDADE DE CHAMA (m/s)	
	COM AR	COM OXIGÊNIO PURO
Propano	0,46 ^(A)	3,72 ^(A)
n-Butano	0,40 ^(A)	3,55 ^(A)
Metano	0,45 ^(A)	4,50 ^(A)
Gás natural	0,30 ^(A)	4,63 ^(A)
Acetileno	2,67 ^(A)	11,3 ^(B)
Hidrogênio	2,83 ^(A)	11,7 ^(B)

FONTES: ^(A) REED (1986)

^(B) BOOKER (1981)

A TABELA 12 indica as velocidades máximas de chama para a queima com ar e com oxigênio puro, nas condições “standard” de temperatura e pressão.

Existem basicamente três modalidades para utilizar o oxigênio em combustão:

- Queima com ar de combustão enriquecido por diluição.
- Queima com ar enriquecido por lança
- Queima com oxigênio puro ou quase puro

3.4.2 Suprimento de oxigênio

A premissa básica para o uso de oxigênio em processos de combustão é que seu custo seja compatível com a viabilidade econômica da sua aplicação. Existem alguns processos para obtenção de oxigênio, onde os mais conhecidos são o fracionamento criogênico do ar, a filtragem do ar em peneiras moleculares e a eletrólise da água.

O fracionamento criogênico do ar é processado em plantas conhecidas como *ASU – Air Separation Units*. Segundo AHLBERG (1985), embora as plantas possam ser projetadas sob diversas formas, as etapas do processo podem ser consideradas a grosso modo similares: o ar é filtrado para remoção de material particulado; comprimido e resfriado para remover a umidade; filtrado em peneiras moleculares para adsorção de dióxido de carbono, hidrocarbonetos, água e outras impurezas gasosas; resfriamento por expansão e por ciclo de refrigeração até que o ar esteja no estado liquefeito, a partir do qual os gases do ar são separados devido aos seus diferentes pontos de ebulição (nitrogênio = - 195,8°C; oxigênio = - 182,96°C; argônio = - 185,87°C, todas estas temperaturas referidas à pressão atmosférica).

Este processo de obtenção de oxigênio, nitrogênio e argônio a partir do ar atmosférico proporciona a produção destes gases com elevados graus de pureza, disponibilizam os gases no estado de líquido criogênico, mas requerem elevados investimentos. Além disso, trata-se de plantas com elevada capacidade de produção, onde as plantas mais eficientes possuem atualmente um consumo específico típico da ordem de 0,7 – 0,8 kWh/Nm³ de oxigênio produzido. Portanto, a instalação de plantas *ASU* como fonte de oxigênio para empresas de incineração pode ser na prática descartada devido ao porte e aos elevados investimentos.

Outro processo para produção de oxigênio é o da filtragem do ar em peneiras moleculares, podendo ser *PSA – Pressure Swing Adsorption*, o qual apresenta como principal vantagem a possibilidade da produção em pequena escala, muito embora as purezas atingidas não costumem ser elevadas – da ordem de 90 a 92%. É possível aumentar este grau de pureza para valores superiores, com a instalação de equipamentos de purificação, mas na grande maioria dos casos tal prática não é necessária.

O processo de produção é muito simples, resumindo-se na passagem do ar comprimido, seco e isento de óleo por uma coluna com zeolitas sintéticas que adsorvem as moléculas de nitrogênio sob pressão. Após a coluna estar saturada com nitrogênio, o fluxo de ar comprimido é desviado para uma segunda coluna enquanto a primeira coluna é descomprimida, liberando as moléculas de nitrogênio, o qual é expulso por um pequeno fluxo de oxigênio da segunda coluna.

O consumo específico de energia elétrica estaria na faixa de 0,5 a 1,0 kWh por m³ a 90% de pureza, 21°C e 1 atm absoluta (AIRSEP, 1997). Existe ainda outro processo similar, onde são combinados pressão e vácuo, denominado *VPSA – Vacuum Pressure Swing Adsorption*.

Estes equipamentos de produção de oxigênio por *PSA* ou *PVSA* são possíveis de serem utilizados por empresas de incineração, pois existem modelos de pequeno porte disponíveis no mercado.

E, finalmente, existe o processo de obtenção de oxigênio por eletrólise da água, o qual apresenta custos muitos elevados, justificando-se apenas quando o oxigênio é considerado como subproduto da produção de hidrogênio. Segundo HORTAL (2005), o consumo específico médio de energia elétrica para a eletrólise da água está por volta de 45 kWh/kg de hidrogênio + 8 kg de oxigênio, ou seja 45 kWh/11,8 m³ de hidrogênio + 5,9 m³ de oxigênio (21°C, 1 atm abs). Assim, considerando 45 kWh/(11,8 + 5,9), o consumo específico seria de 2,54 kWh/m³.

A alta pureza do oxigênio em quase a totalidade dos processos de combustão não é uma característica importante. Em primeiro lugar, se o oxigênio for utilizado apenas para enriquecer o ar de combustão, uma elevada pureza não faz sentido pois ele será de qualquer forma diluído na corrente de ar. E se a aplicação for a queima com oxigênio puro, quando

analisadas as curvas dos parâmetros da combustão, nota-se claramente que a eficiência da combustão praticamente não varia quando a pureza do oxigênio é superior a 90%, como será visto mais adiante no texto.

Assim, o suprimento de oxigênio poderia ser feito através de compra das empresas de gases do ar sob a forma criogênica ou através da instalação de uma *PSA* ou *VPSA*.

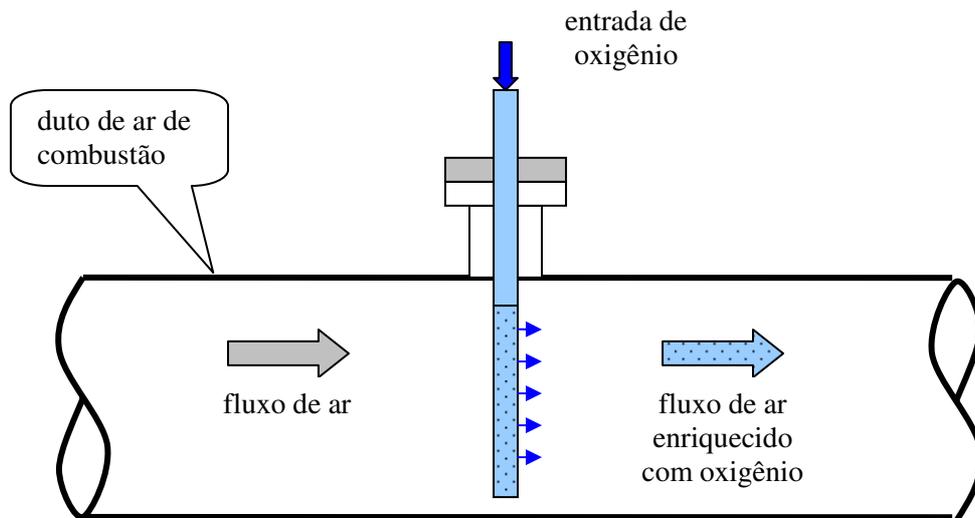
3.4.3 Queima com ar enriquecido por diluição

Segundo COSTA (1984), nesta modalidade o ar de combustão é enriquecido com oxigênio puro por diluição, mantendo-se o mesmo queimador utilizado na queima com ar atmosférico. Como é necessário misturar um pouco de oxigênio com o ar de combustão para enriquecê-lo e tornar esta mistura homogênea, esta prática é mais indicada para queimadores do tipo duobloco.

A mistura ar - oxigênio é feita no duto de ar de combustão entre o ventilador e o(s) bloco(s) do(s) queimador(es), sendo recomendável guardar uma distância mínima de 6 a 8 diâmetros entre o ponto de injeção de oxigênio e a entrada do bloco do queimador. O dispositivo de injeção de oxigênio deve ser projetado para dividir o fluxo de oxigênio de uma forma bem distribuída na seção do tubo de ar, proporcionando uma mistura homogênea antes da entrada no bloco de queima.

Os dois dispositivos mais empregados para injeção de oxigênio na corrente do ar de combustão são do tipo flauta e do tipo radial.

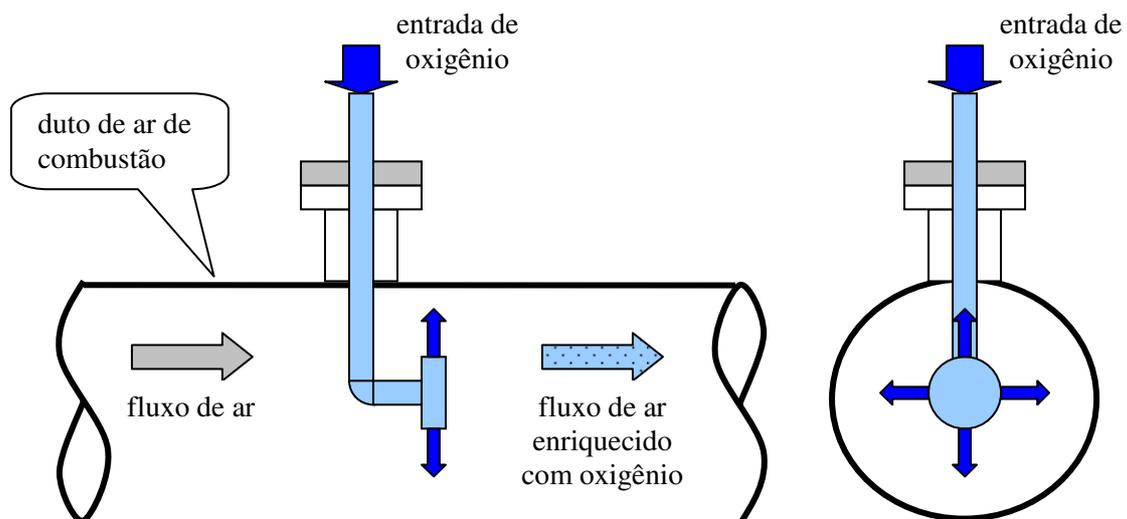
O dispositivo do tipo flauta, como mostra a FIGURA 6, injeta o oxigênio na corrente do ar de combustão através de um tubo perpendicular ao eixo do duto de ar, de forma que o oxigênio seja espargido através de jatos paralelos num plano perpendicular ao fluxo de ar, de forma a proporcionar a turbulência necessária para que a mistura homogênea dos dois gases se faça num curto trajeto do duto.



FONTE: O AUTOR

FIGURA 6 – DISPOSITIVO PARA ENRIQUECIMENTO DO AR DE COMBUSTÃO
TIPO FLAUTA

No dispositivo tipo radial (FIGURA 7), a injeção de oxigênio é feita também no plano perpendicular ao eixo do duto de ar, porém sendo espargido no sentido radial do eixo do duto, apresentando ângulos iguais entre os eixos dos jatos. No caso de 4 jatos, o ângulo é de 90° como mostra a FIGURA 7; no caso de 6 jatos, o ângulo seria de 60° .



FONTE: O AUTOR

FIGURA 7 – DISPOSITIVO PARA ENRIQUECIMENTO DO AR DE COMBUSTÃO
TIPO RADIAL

O equipamento para controle do fluxo de oxigênio deve estar de acordo com o modo de operação dos queimadores e com os parâmetros de controle do processo, de forma que o teor de oxigênio no comburente não apresente variações significativas.

O sistema mais simples é aquele em que os queimadores trabalham na modalidade liga - desliga, com potência fixa e pré-determinada. Assim, o sistema de controle do fluxo de oxigênio resume-se num sistema de bloqueio e de medição, trabalhando também com uma vazão fixa e pré-determinada enquanto o queimador permanece ligado e com vazão nula com o queimador desligado.

Em outro tipo de sistema, ainda considerado simples, os queimadores trabalham na modalidade ligado em chama alta - ligado em chama baixa - desligado, exigindo que a vazão de oxigênio de enriquecimento trabalhe de forma análoga: vazão alta, vazão baixa e vazão nula.

Os sistemas mais sofisticados podem operar de várias formas, como exposto a seguir.

No caso de queimadores com potência modulante, o fluxo de oxigênio deverá também modular de forma proporcional à vazão de ar de combustão e, conseqüentemente, à potência do queimador, mantendo o teor de enriquecimento constante. Os equipamentos básicos necessários são medidores de vazão instantânea de ar e de oxigênio, válvulas dosificadoras de oxigênio e controlador lógico programável (PLC).

Outra forma de controlar o fluxo de oxigênio seria a análise contínua do teor de oxigênio no ar enriquecido, cuja informação fornecida ao PLC geraria o sinal de controle para a válvula dosificadora de oxigênio, de forma a manter o teor de enriquecimento constante.

Uma forma mais adequada ao processo de incineração, onde o fluxo total de combustível fornecido ao incinerador provem tanto do combustível continuamente fornecido ao queimador, o qual pode ser controlado, como dos resíduos a serem incinerados cuja alimentação é intermitente, seria o controle do teor de oxigênio na atmosfera do incinerador.

Nos sistemas mais sofisticados, um detalhe muito importante a ser observado é a velocidade de resposta das alterações no fluxo de oxigênio, de forma a evitar que o teor de oxigênio remanescente na câmara de combustão atenda às exigências mínimas da legislação.

Este processo apresenta uma limitação no teor máximo de enriquecimento do ar de combustão com oxigênio, devido a problemas com superaquecimento do bocal do queimador ou com retrocesso de chama. Esse limite varia conforme as condições de projeto de cada queimador e no seu posicionamento na câmara de combustão, mas é possível afirmar que tal limite situa-se na faixa de 30 - 40%. Porém, na prática, os teores de enriquecimento do ar de combustão dificilmente ultrapassam o teor de 25% de oxigênio no ar enriquecido.

No enriquecimento por diluição, independentemente do sistema utilizado, o acréscimo da temperatura da chama ocorre de forma distribuída em todo o volume da chama. Este fato exige a atenção para evitar que alguma parte da câmara de combustão seja eventualmente superaquecida, por estar em contato ou nas proximidades da chama.

3.4.4 Queima com o ar enriquecido por lança

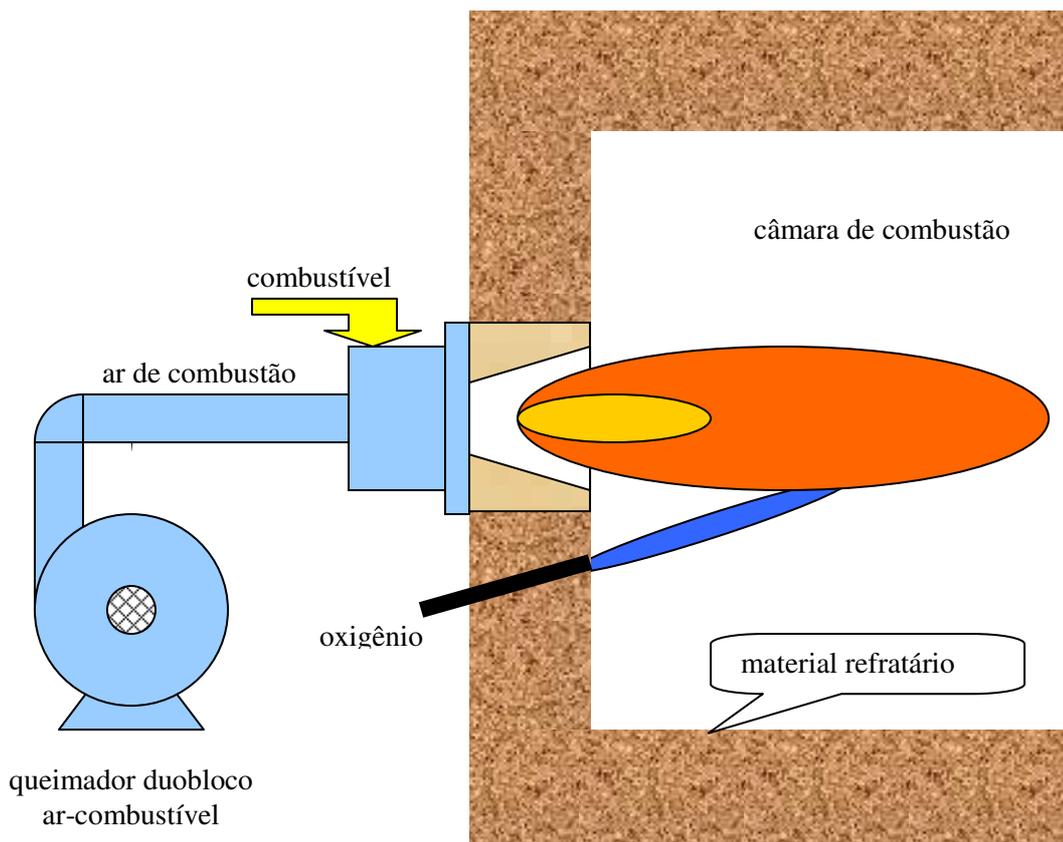
Ainda segundo COSTA (1984), nesta outra modalidade o queimador permanece com sua montagem original, sendo o oxigênio insuflado através de uma lança externa ao queimador. Esta configuração permite direcionar o fluxo de oxigênio para o local da câmara de combustão onde ele é necessário. Em alguns processos industriais, existe a necessidade de aumentar a temperatura em apenas uma determinada região da chama, geralmente localizada entre a chama e a carga, de forma a poupar a estrutura do equipamento térmico do calor excessivo liberado. Em outros processos, o insuflamento por lança pode aumentar o teor de oxigênio nos pontos onde seja necessária uma atmosfera oxidante, como nos incineradores.

Os equipamentos necessários são: lança de oxigênio e sistema de controle de fluxo.

As lanças para a injeção de oxigênio podem ser subdivididas em três grupos:

- Lanças metálicas refrigeradas pelo fluxo de oxigênio, construídas em aço inoxidável e dimensionadas para médias e altas velocidades, devendo portanto manter o fluxo enquanto posicionadas em locais onde a absorção de calor pudesse a vir danificá-las. Caso cesse o

fluxo de oxigênio sem que a lança seja retirada do incinerador, será necessário manter um fluxo de ar comprimido para refrigerá-la. O fluxo mínimo necessário para a refrigeração depende do posicionamento da lança na parede do incinerador e da temperatura neste local. A FIGURA 8 mostra a instalação típica de queimador ar-combustível com enriquecimento do ar de combustão com lança de oxigênio.



FONTE: O AUTOR

FIGURA 8 - INSTALAÇÃO TÍPICA DE LANÇA DE OXIGÊNIO

- Lanças metálicas refrigeradas por camisa de água, também construídas em aço inoxidável, podendo operar com quaisquer velocidades. Neste caso, é necessário monitorar o fluxo de água de refrigeração pois, caso se interrompa, será necessária a retirada da lança imediatamente após o disparo de alarmes luminoso e sonoro. A retirada da lança poderá ser feita manualmente por um operador ou automaticamente por um dispositivo mecânico ou elétrico.

- Lanças cerâmicas apresentam uma excelente resistência a elevadas temperaturas, porém sua resistência mecânica a golpes é muito baixa. Seu posicionamento deverá impedir a ocorrência de golpes da carga.

O sistema de controle de fluxo pode ser projetado para operar juntamente com o(s) queimador(es), geralmente quando o fluxo de oxigênio é direcionado à chama, ou então comandado por outro parâmetro da(s) câmara(s) de combustão dos incineradores, como temperatura e teor de oxigênio livre nos produtos da combustão.

Outra opção de sistema de enriquecimento por lança poderia enriquecer diretamente a atmosfera da(s) câmara(s) de combustão dos incineradores com oxigênio, sem relacionamento operacional direto com o(s) queimador(es).

3.4.5 Queima com oxigênio

Inicialmente cabe definir a pureza do oxigênio. Na realidade não existe nenhum gás absolutamente puro. E, quanto maior for o grau de pureza, mais caro será o gás, dificultando sua utilização comercial. A queima relatada neste item refere-se ao uso do oxigênio obtido com diversos graus de pureza, conforme relatado no item 3.4.2, mas sem haver sido misturado com ar atmosférico conforme relatado nos itens 3.4.3 e 3.4.4.

A queima com oxigênio puro possibilita, segundo COSTA (1984), a obtenção das mais elevadas eficiências de combustão e temperaturas de chama para cada combustível, além de gerar os menores volumes específicos de produtos da combustão.

Os queimadores do tipo oxi-combustível são projetados especificamente para este fim, possibilitando também funcionarem como lança de injeção de oxigênio quando apagados, ou ainda trabalharem com uma chama super-oxidante sem comprometer sua estabilidade. Estes queimadores podem ser subdivididos em quatro grupos:

- Queimadores metálicos sem camisa, refrigerados pela passagem dos fluxos de combustível e de oxigênio. Estes queimadores devem operar sempre em potências próximas às suas potências máximas para evitar superaquecimento, devendo ser retirados

da câmara de combustão no momento que forem apagados e que não estejam insuflando oxigênio.

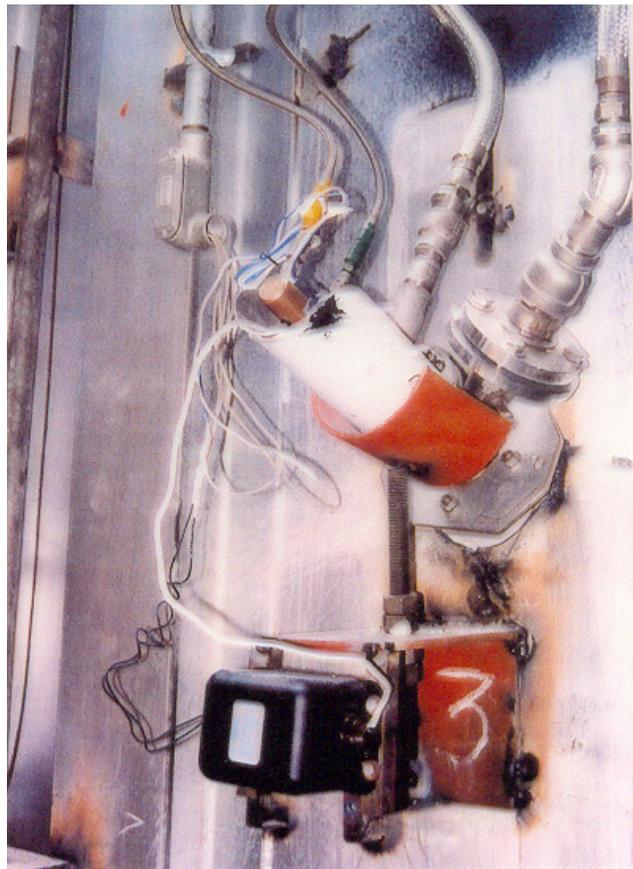
- Queimadores metálicos com camisa, refrigerados pelo fluxo de oxigênio através da dita camisa. Também devem operar com potências elevadas para garantir a refrigeração, devendo estar fora da câmara de combustão quando apagados sem insuflar oxigênio.
- Queimadores metálicos refrigerados por camisa de água, que podem operar em quaisquer potências dentro da faixa operacional. Como a vida desses queimadores, quando a câmara de combustão está aquecida, depende do fluxo de água, este deverá ser continuamente monitorado e, em caso de falha, os queimadores deverão ser imediatamente retirados.



FONTE: SALTIN (1981)

FIGURA 9. QUEIMADOR METÁLICO OXI-COMBUSTÍVEL, REFRIGERADO A ÁGUA

- Queimadores cerâmicos, que dispensam refrigeração, são constituídos por blocos cerâmicos, instalados permanentemente na parede do incinerador, alimentados por um corpo metálico externo fabricado em aço inoxidável, acoplado aos citados blocos.



FONTE: FOTOS TIRADAS PELO AUTOR EM BARRAQUILLA - COLÔMBIA
FIGURA 10. QUEIMADOR CERÂMICO OXI-GÁS NATURAL INSTALADO
EM FORNALHA (VISTAS INTERNA E EXTERNA)

As principais vantagens dos queimadores do tipo oxi-combustível são: a elevada eficiência de combustão, devida à alta temperatura de chama associada à baixa vazão de produtos da combustão; a intensa transmissão de calor por radiação; a alta turbulência gerada pela chama na atmosfera interior do equipamento, pois sua velocidade é cerca de onze vezes maior do que a obtida na queima com o ar; e o aumento do tempo de residência dos produtos da combustão no ambiente onde se processa a queima e seus periféricos como recuperadores de calor, lavadores e filtros.

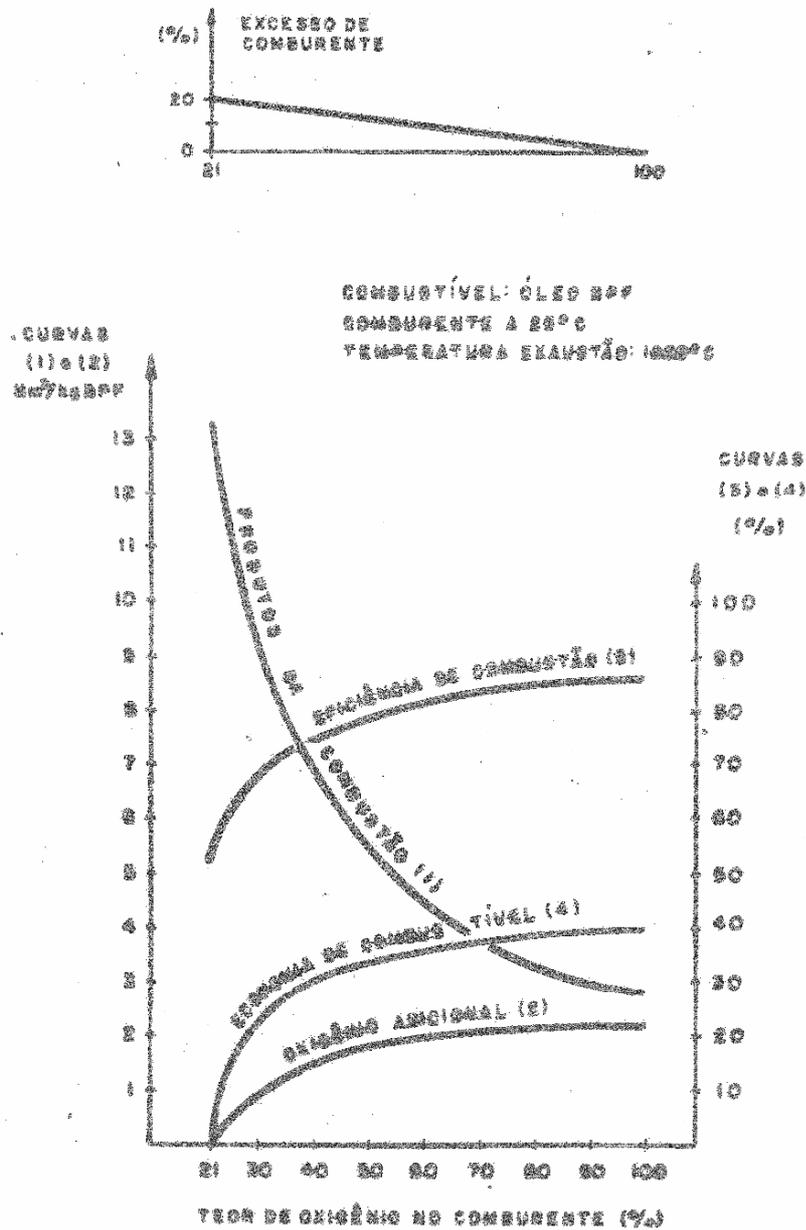
A FIGURA 11 mostra o inter-relacionamento entre o teor de oxigênio no comburente, desde o ar atmosférico até o oxigênio puro, com a eficiência de combustão, com a vazão de produtos da combustão e com a economia de combustível, na queima de óleo combustível e com o comburente na temperatura ambiente (considerada 25°C), considerando a temperatura de exaustão de 1.000°C. Esta temperatura de exaustão, na realidade, deve ser considerada a partir do ponto onde deixa de existir a interação significativa dos gases quentes com a função do processo térmico. Normalmente se considera a temperatura média no ponto onde a superfície interna da fornalha intercepta o canal destinado à exaustão.

A curva nº 2 da FIGURA 11, quadro inferior, indica a quantidade específica de oxigênio consumida por quilograma de óleo combustível em função do teor de oxigênio na atmosfera comburente, a partir de 21% até 100% (base volumétrica).

A informação existente no quadro superior da FIGURA 11, referente ao excesso de comburente, mantém correspondência projetiva com o quadro inferior. Assim, no caso do comburente ser o ar atmosférico, onde o teor de oxigênio é de aproximadamente 21% (V/V), o excesso de comburente com óleo combustível é de 20%. Já no outro extremo, caso da oxi-combustão, não seria necessário fornecer comburente em excesso se o processo não necessitasse de atmosfera oxidante.

A curva nº 1 mostra o comportamento dos produtos da combustão. Vemos que a redução do seu volume unitário é muito significativa na medida em que se aumenta o teor de oxigênio na atmosfera comburente. Na queima de um quilograma de óleo combustível com ar atmosférico são gerados cerca de 13 Nm³ de produtos da combustão, reduzindo-se para cerca de 3 Nm³ no caso da oxi-queima.

Como consequência direta da redução das perdas de calor através dos produtos da combustão, a eficiência de combustão (curva 3) por sua vez aumenta significativamente, passando de 52% para 86%, respectivamente, na queima com ar e com oxigênio.



FONTE: COSTA, 1984

FIGURA 11. RELACIONAMENTO DOS PARÂMETROS DA COMBUSTÃO COM OXIGÊNIO

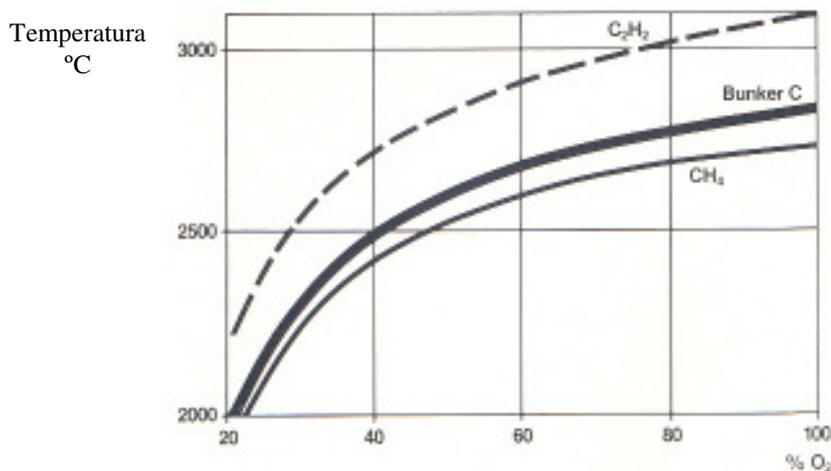
E, finalmente, a curva 4 que indica a economia de combustível apresenta um aspecto comportamento semelhante ao da eficiência de combustão, atingindo uma economia de combustível da ordem de 40% na oxi-combustão, nas condições consideradas.

As curvas 3 e 4 sofreriam variações caso a temperatura de exaustão do processo térmico fosse diferente do valor considerado (1.000°C). Para processos com temperaturas superiores, as economias de combustível seriam mais elevadas e vice versa.

Agora, observando as quatro curvas apenas na faixa vertical compreendida entre os teores de 90 e 100% de oxigênio no comburente, percebe-se claramente que todas as curvas tendem a apresentar um comportamento assintótico com a direção horizontal. Isso possibilita concluir que as diferenças de comportamento para cada curva são praticamente desprezíveis nessa faixa, quer dizer, a pureza do oxigênio não é um fator relevante para o desempenho térmico da oxi-combustão.

Portanto seria mais vantajosa a utilização de um processo de obtenção de oxigênio que fosse mais barato, mesmo que os teores de pureza obtidos fossem da ordem de 90% como nos casos dos geradores PSAs e VPSAs descritos no item 2.4.2.

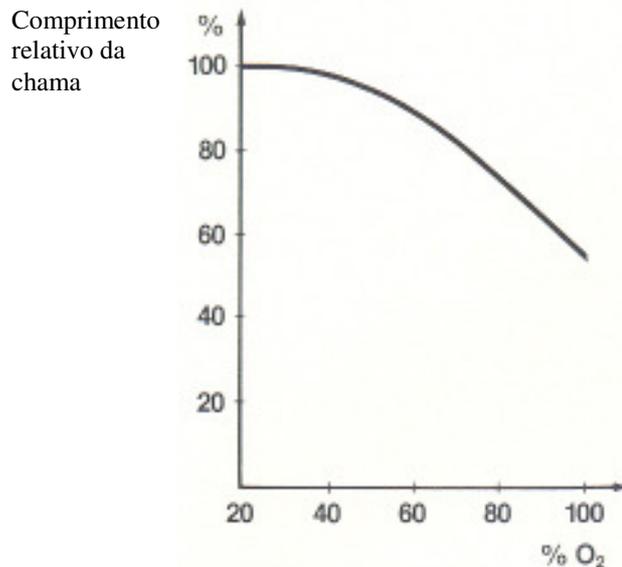
A FIGURA 12 mostra o comportamento da temperatura adiabática da chama em função do teor de oxigênio no comburente para acetileno, gás natural (considerando sua composição como sendo 100% de metano) e óleo combustível residual.



FONTE: SALTIN, 1981

FIGURA 12 – TEMPERATURA ADIABÁTICA DA CHAMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO

O comprimento da chama se reduz na medida em que se enriquece o ar de combustão com oxigênio. Segundo SALTIN (1981), a FIGURA 13 mostra uma estimativa para a redução do comprimento de chama, embora o comprimento e a aparência da chama também dependam da forma como o oxigênio seja adicionado ao ar de combustão por diluição ou por lança.



FONTE: SALTIN, 1981

FIGURA 13 – COMPRIMENTO DE CHAMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO.

A energia total irradiada pelo corpo negro, segundo KREITH (1969), na temperatura absoluta T , segundo a equação de Stefan-Boltzmann é igual a:

$$Q_{\text{rad}} = \sigma T^4, \quad (10)$$

onde: σ = constante de Stefan-Boltzmann

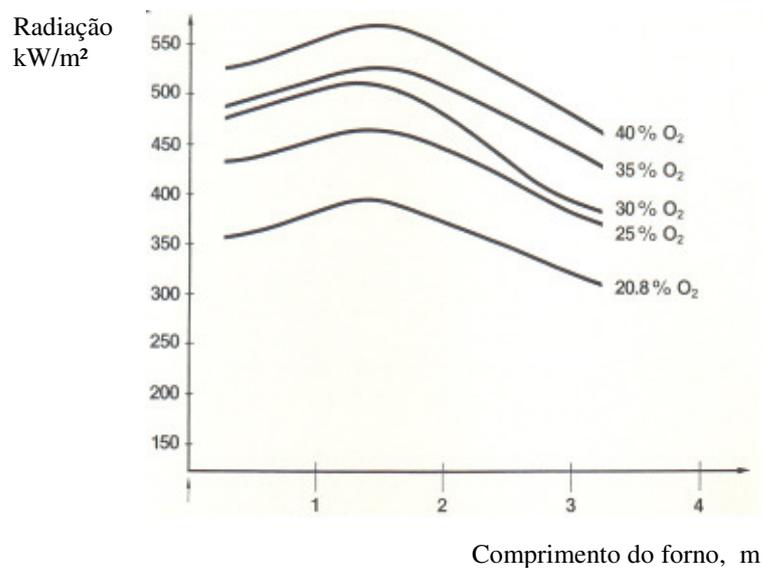
T = temperatura absoluta do corpo

A equação de Stefan-Boltzmann (10) indica que a energia liberada por radiação é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo radiante.

Isto possibilita a compreensão do comportamento das curvas da FIGURA 14, onde pequenos aumentos das temperaturas da chama, pela elevação do teor de oxigênio no comburente, implicaram em significativas elevações da potência disponível por radiação. Os valores indicados na FIGURA 14, segundo SALTIN (1981), foram obtidos no forno de testes da AGA Innovation em Lidingö – Suécia, o qual foi aquecido com óleo combustível leve até que sua temperatura de parede se mantivesse em 1.200°C. Os testes foram realizados mantendo-se tanto a vazão de óleo como o teor de oxigênio nos produtos da combustão, tendo sido

apenas variado o teor percentual de oxigênio no ar de combustão. As medições foram realizadas ao longo do comprimento da chama desenvolvida no comprimento do forno de testes. Na experiência foi utilizado um queimador duobloco da marca OFU.

Esses resultados obtidos por SALTIN (1981) são interessantes para o caso da incineração pois as temperaturas de parede estão na mesma ordem de grandeza dos incineradores de RSS.



FONTE: SALTIN, 1981

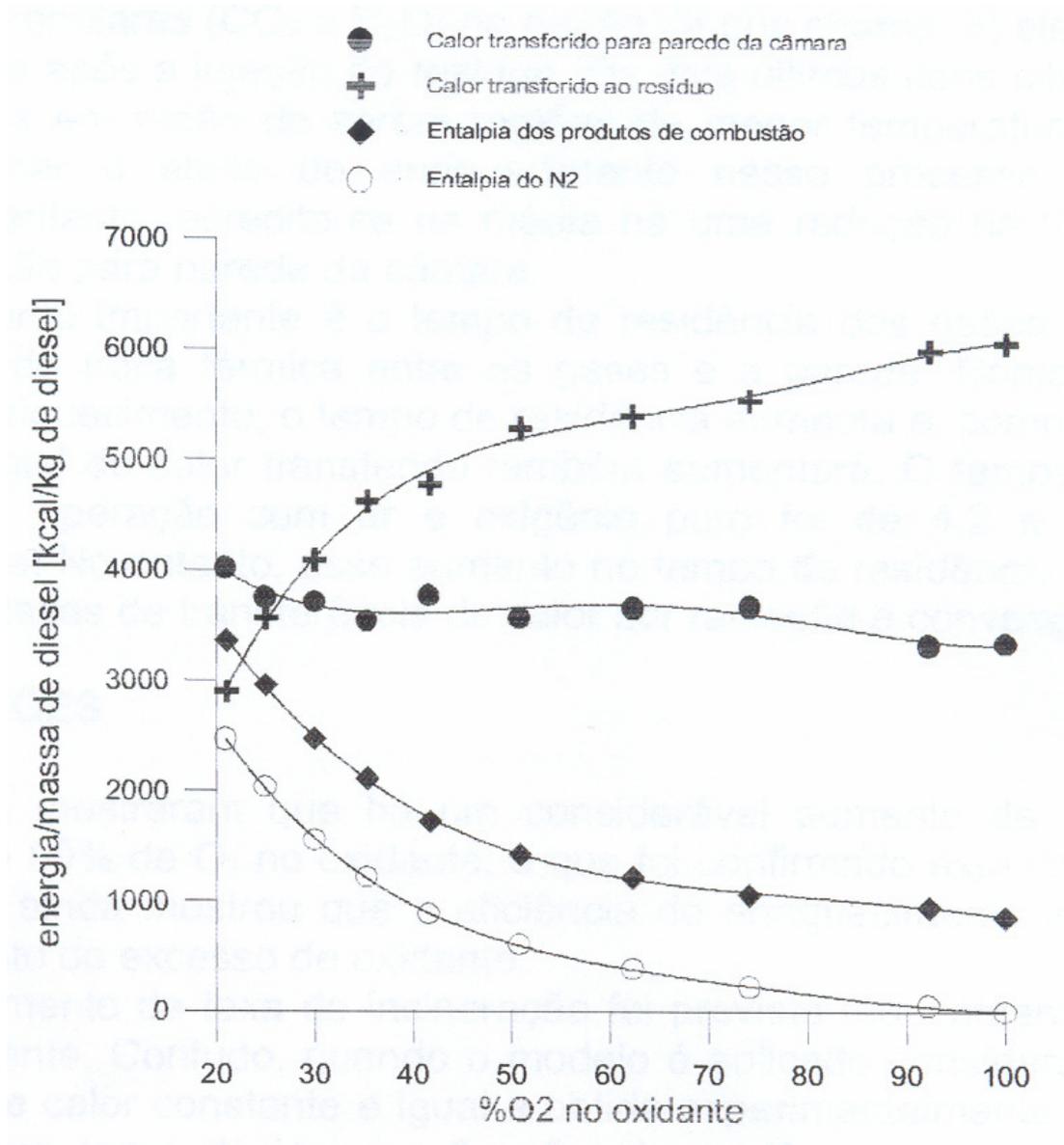
FIGURA 14 – POTÊNCIA DISPONÍVEL POR RADIAÇÃO

Os resultados experimentais do uso de oxigênio em processos de incineração podem ser estimados a partir do trabalho “Análises Térmicas do Processo de Incineração de Resíduos Aquosos com Chamas Enriquecidas”, segundo LACAVA (2003).

A FIGURA 15 mostra graficamente o resultado do balanço de energia, obtido experimentalmente por LACAVA (2003) numa câmara de combustão projetada para operar com ar atmosférico, quando praticadas percentagens variáveis de oxigênio, desde ar (20,7% O₂ V/V) até oxigênio puro (100% O₂ V/V).

A FIGURA 15 mostra claramente a redução das entalpias dos produtos da combustão e da entalpia do nitrogênio, ambas em seus valores específicos por massa de combustível (no caso

óleo diesel), na medida em que o teor de oxigênio no comburente se eleva desde o ar atmosférico até o oxigênio puro.



FONTE: LACAVA, 2003.

FIGURA 15 – RESULTADO DO BALANÇO DE ENERGIA NA CÂMARA

Além disso, a energia específica transferida para a parede da câmara apresenta também uma redução para teores de oxigênio mais elevados. Como consequência direta dessas reduções, o calor transferido ao resíduo por quilograma de óleo diesel aumenta significativamente, passando de cerca de 2.900 kcal/kg diesel com ar para 6.000 kcal/kg diesel com oxigênio puro.

Comportamento análogo da redução das entalpias dos produtos da combustão e da entalpia do nitrogênio ocorre com os demais combustíveis utilizados em processos de incineração de RSS, como o GLP e o gás natural.

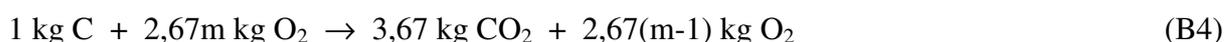
Outro parâmetro muito importante do trabalho de LACAVA (2003) é o aumento do tempo de residência dos gases na câmara de incineração, o que possibilitará o aumento da taxa de incineração dos resíduos sem perda da eficiência de destruição e remoção (em inglês, *destruction and removal efficiency – DRE*). As combinações entre aumento da taxa de incineração e teor de enriquecimento com oxigênio poderão possibilitar a obtenção de resultados que conduzam a uma maior eficiência de destruição e remoção.

3.4.6 Cálculos de combustão com oxigênio

Os cálculos de combustão dos principais elementos combustíveis que constituem os RSS permitirão comparar as massas dos produtos da combustão entre a queima com ar e com oxigênio.

De forma análoga aos cálculos da queima com ar, os cálculos de combustão com oxigênio estão indicados no ANEXO B, de onde são originárias as equações que se seguem.

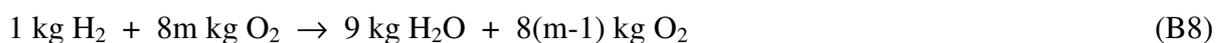
A Equação B4 refere-se à queima do carbono com excesso de oxigênio de combustão, onde “m” é o fator que representa o índice de excesso de oxigênio:



Considerando-se o excesso de oxigênio de combustão típico de 10% ($m = 1,1$) nos processos de queima de resíduos sólidos, a Equação (B4) se transforma em:



A Equação B8 refere-se à queima do hidrogênio com excesso de oxigênio de combustão, onde “m” é o fator que representa o índice de excesso de oxigênio:



Considerando-se o excesso de oxigênio de combustão típico de 10% ($m = 1,1$) nos processos de queima de resíduos sólidos, a Equação (B8) se transforma em:



A Equação B12 refere-se à queima do enxofre com excesso de oxigênio de combustão, onde “m” é o fator que representa o índice de excesso de oxigênio:



Considerando-se o excesso de oxigênio de combustão típico de 10% ($m = 1,1$) nos processos de queima de resíduos sólidos, a Equação (B12) se transforma em:



Das equações anteriores (11), (12), (13) e das TABELAS nº B1, B2, B3 e B4 observa-se o seguinte:

- Contrariamente à combustão com ar, para se obter atmosferas oxidantes com a oxidação basta apenas praticar baixos teores de excesso de comburente (oxigênio); com um excesso de comburente da ordem de 10% apenas, o teor de oxigênio após a combustão é da ordem de 6 - 7% (base volumétrica).
- Como principais resultados, encontram-se o aumento do tempo de residência dos produtos da combustão nas câmaras de queima e o aumento da eficiência de combustão devido à significativa redução da quantidade de calor transportada pelo nitrogênio para fora do incinerador.
- Além disso, a possibilidade de formação de óxidos de nitrogênio (NOx) se reduz, pois as fontes de nitrogênio resumem-se apenas à infiltração de ar ou à sua presença na alimentação dos RSS no incinerador.

Comparando as tabelas da combustão com ar (ANEXO A, TABELAS A1, A2, A3 e A4) com as tabelas da combustão com oxigênio (ANEXO B, TABELAS B1, B2, B3 e B4) nota-se claramente a redução da massa específica dos produtos da combustão.

Considerando o excesso de comburente que proporciona um teor de oxigênio de 7% (molar em base úmida) após a queima completa do combustível, nas queimas com ar e com oxigênio, foi montada a TABELA 13 para possibilitar a comparação entre ambos os casos com os principais combustíveis que podem ser utilizados nos incineradores.

A TABELA 13 mostra claramente que, para obter uma atmosfera oxidante com 7% (molar) de oxigênio residual nos produtos da combustão, o uso do oxigênio puro como comburente reduz a massa dos produtos da combustão (p.c.) em cerca de 80%. Ou seja, a vazão de 100 kg/h de produtos da combustão com ar se reduziria para 20 kg/h com o uso de oxigênio puro.

TABELA 13 – COMPARATIVO DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS COM AR E OXIGÊNIO PURO

COMBUSTÍVEL	Teor de oxigênio nos gases úmidos da combustão (% molar)	Excesso de comburente (%)	Gases da combustão (kg p.c./kg comb)	Redução dos p.c. com uso de oxigênio (%)
ETANOL				
Queima com ar	7,0	59,2	15,5	
Queima com O ₂	7,0	12,55	3,3	78,71
DIESEL				
Queima com ar	7,0	55,5	23,9	
Queima com O ₂	7,0	9,93	4,7	80,33
GLP				
Queima com ar	7,0	56,3	25,6	
Queima com O ₂	7,0	10,48	5,0	80,47
GÁS NATURAL				
Queima com ar	7,0	57,4	27,5	
Queima com O ₂	7,0	11,27	5,3	80,73

Obs.: p.c. = produtos da combustão

FONTE.: VULCANO 1.1 (2006)

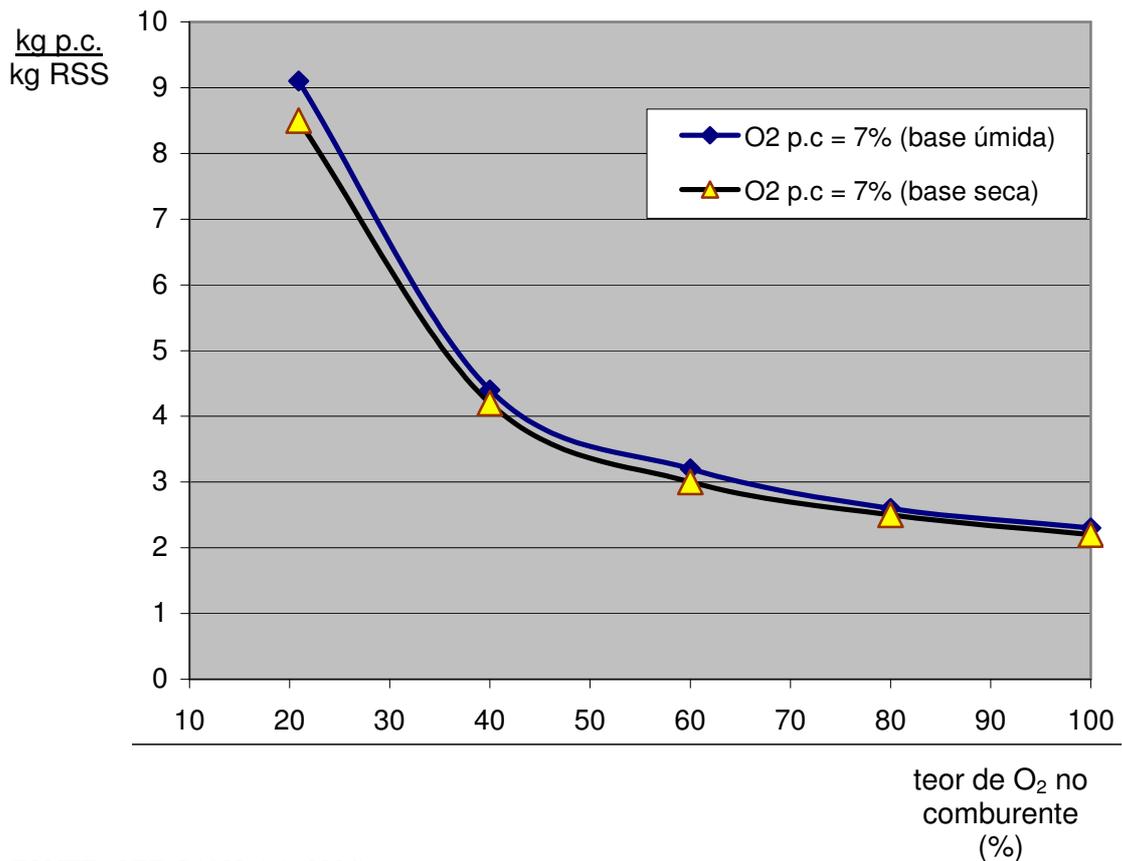
Essa redução da vazão dos produtos da combustão é uma condição muito importante para se obter um rápido resfriamento dos produtos da combustão nos sistemas de condicionamento já instalados.

QUEIMA DOS RSS

(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)

Os cálculos de combustão dos resíduos de serviços de saúde tomaram por base a composição média ponderada estimada na TABELA 5. As curvas da FIGURA 16 foram determinadas a

partir dos cálculos de combustão através do software VULCANO 1.1 (2006), considerando diferentes níveis de oxigênio no comburente, desde ar atmosférico até oxigênio puro, considerando os excessos de comburente correspondentes a 7% (molar) de oxigênio nos produtos da combustão (p.c.) em base seca e base úmida, de acordo com as exigências dos valores mínimos preconizados pela Norma CETESB E-15011 (rev. Fev/97), item 5.1.2.3.



FONTE: VULCANO 1.1 (2006)

FIGURA 16 – CURVAS DE MASSA DE PRODUTOS DA COMBUSTÃO DOS RSS VS. TEOR DE OXIGÊNIO

Analisando as curvas da FIGURA 16 nota-se claramente que seus comportamentos qualitativos não se alteraram, quando comparados com os comportamentos dos demais combustíveis estudados anteriormente. Os resultados específicos mais significativos da redução da massa de produtos da combustão ocorrem com baixos níveis de enriquecimento do ar de combustão com oxigênio, onde as inclinações das curvas são mais acentuadas, como na faixa de 21 a 35% de oxigênio no comburente. Já na faixa de 90 a 100%, o ganho na redução

dos produtos da combustão é mínimo pois as curvas já apresentam um desenvolvimento quase horizontal, indicando que seria dispensável o uso de oxigênio com elevados teores de pureza.

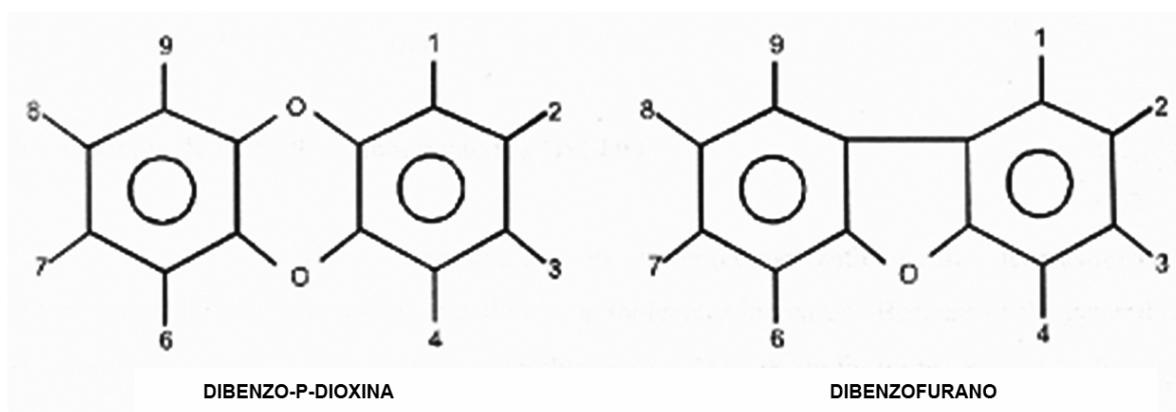
Assim, o somatório dos produtos da combustão dos RSS e dos combustíveis, nas devidas proporções, possibilita significativas reduções da massa e do volume dos produtos da combustão dos incineradores quando o comburente possui taxas elevadas de oxigênio. A redução da vazão volumétrica dos produtos da combustão diminuirá a velocidade média dos gases no interior dos incineradores, aumentando o tempo de residência, contribuindo para um menor arraste de material particulado e possibilitando o aumento da taxa de incineração nos equipamentos existentes.

3.5 DIOXINAS E FURANOS

3.5.1 Definições

As dioxinas são denominações genéricas de uma classe de compostos aromáticos tricíclicos, cujo nome científico é dibenzo-p-dioxinas policloradas, ou seja, na língua inglesa *polychlorinated-p-dibenzodioxins* – *PCDD*, onde os dois anéis benzênicos ligados a átomos de cloro (1 a 8) são interligados por dois átomos de oxigênio (FIGURA 17).

Os furanos, dibenzofuranos policlorados ou *polychlorinated-p-dibenzofurans* – *PCDF*, são estruturas semelhantes onde os dois anéis benzênicos com seus átomos de cloro (1 a 8) são interligados por apenas um átomo de oxigênio (FIGURA 17).



FONTE: USEPA (1997)

FIGURA 17 – ESTRUTURA MOLECULAR DAS DIOXINAS E DOS FURANOS

A fórmula química genérica das dioxinas é $C_{12}H_{(8-n)}Cl_nO_2$, onde “n” é um número inteiro que representa a quantidade de átomos de carbono, variando desde 1 até 8 (UNEP, 2002).

A fórmula genérica dos furanos é $C_{12}H_{(8-n)}Cl_nO$, onde “n” também varia desde 1 até 8 (UNEP, 2002).

As combinações dos átomos de cloro nas posições disponíveis nos anéis benzênicos possibilitam a formação de 75 compostos para as dioxinas e 135 compostos para os furanos, os quais apresentam muitos isômeros e diferentes graus de toxicidade.

Segundo UNEP (2002), a solubilidade em água das dioxinas e furanos está na faixa de 0,43 a 0,0002 ng/L a 25°C e a pressão de vapor situa-se na faixa de 2 a $0,007 \times 10^{-6}$ mm Hg a 20°C. Por serem solúveis em água, as dioxinas e os furanos poderão estar presentes nos líquidos de lavagem dos efluentes dos incineradores de RSS e, a partir deste veículo, serem lançados no meio ambiente. A citada referência cita, de uma forma genérica, que as dioxinas e furanos são subprodutos formados a partir de processos de obtenção de outros químicos, da combustão em baixa temperatura e de processos de incineração.

As dioxinas e os furanos são compostos considerados, de uma forma genérica, substâncias com elevado grau de toxicidade para a vida animal e, em particular, para os seres humanos. Segundo o artigo “Dioxinas e furanos: origens e riscos” (ASSUNÇÃO, 1999), publicado na Rev. Saúde Pública vol.33 n.5 São Paulo em outubro de 1999, cujos autores selecionaram e analisaram 16 referências bibliográficas do período de 1986 a 1997, concluiu-se que:

“a) Esses compostos são de origem não natural, considerados altamente tóxicos, extremamente persistentes, tendo sido detectados em todas as matrizes ambientais como: solo, sedimentos, ar, água, animais e vegetais;”

“b) emissões desses compostos para a atmosfera ocorrem principalmente nos processos de combustão;”

“c) dispersão atmosférica, deposição e subsequente acumulação na cadeia alimentar têm sido a principal rota de exposição da população em geral;”

“d) devido à natureza lipofílica e persistência, estes se acumulam em tecidos gordurosos, sendo os alimentos de origem animal os que apresentaram maiores concentrações;”

“e) no Brasil, os poucos estudos realizados, com medidas de concentrações desses compostos no meio ambiente, apresentaram alguns níveis comparáveis aos da Alemanha.”

3.5.2 Toxicidade

Considerando as 75 dioxinas e os 135 furanos existentes, as substâncias que possuem átomos de cloro nas posições 2,3,7 e 8 são aquelas que apresentam maior grau de toxicidade. As posições numéricas referidas estão indicadas na FIGURA 17. O mais tóxico destes compostos, além da sua estabilidade e persistência, é a dioxina denominada 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (2,3,7,8-TCDD), segundo ASSUNÇÃO (1999). Portanto esta dioxina foi tomada como padrão para a escala de toxicidades destes compostos, tendo sido atribuído à 2,3,7,8-TCDD o valor unitário. Os Fatores de Equivalência de Toxicidade – FTEQ, para dioxinas e furanos, são os seguintes segundo o Anexo I da Resolução nº 316 do CONAMA, de 29/10/2002:

DIOXINAS	FTEQ
mono-,di- e tri-cloro-dibenzo-p-dioxinas	0
2, 3, 7, 8 – TCDD (tetracloro-dibenzo-p-dioxina)	1
outros TCDDs	0
1, 2, 3, 7, 8 – PeCDD (pentacloro-dibenzo-p-dioxinas)	0,5
outros PeCDDs	0
1, 2, 3, 4, 7, 8 – HxCDD (hexacloro-dibenzo-p-dioxinas)	0,1
1, 2, 3, 6, 7, 8 – HxCDD (hexacloro-dibenzo-p-dioxinas)	0,1
1, 2, 3, 7, 8, 9 – HxCDD (hexacloro-dibenzo-p-dioxinas)	0,1
outros HxCDDs	0
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 – HpCDD (heptacloro-dibenzo-p-dioxina)	0,01
outros HpCDDs	0
OCDD (octacloro-dibenzo-p-dioxina)	0,001
FURANOS	FTEC
mono-,di- e tri-cloro-dibenzofuranos	0
2, 3, 7, 8 – TCDF (tetracloro-dibenzofurano)	0,1
outros TCDFs	0
1, 2, 3, 7, 8 – PeCDF (pentacloro-dibenzofurano)	0,05

2, 3, 4, 7, 8 – PeCDF (pentacloro-dibenzofurano)	0,5
outros PeCDFs	0
1, 2, 3, 4, 7, 8 – HxCDF (hexacloro-dibenzofurano)	0,1
1, 2, 3, 6, 7, 8 – HxCDF (hexacloro-dibenzofurano)	0,1
1, 2, 3, 7, 8, 9 – HxCDF (hexacloro-dibenzofurano)	0,1
2, 3, 4, 6, 7, 8 – HxCDF (hexacloro-dibenzofurano)	0,1
outros HxCDFs	0
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 – HpCDF (heptacloro-dibenzofurano)	0,01
1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 – HpCDF (heptacloro-dibenzofurano)	0,01
outros HpCDFs	0
OCDF (octacloro-dibenzofuranos)	0,001

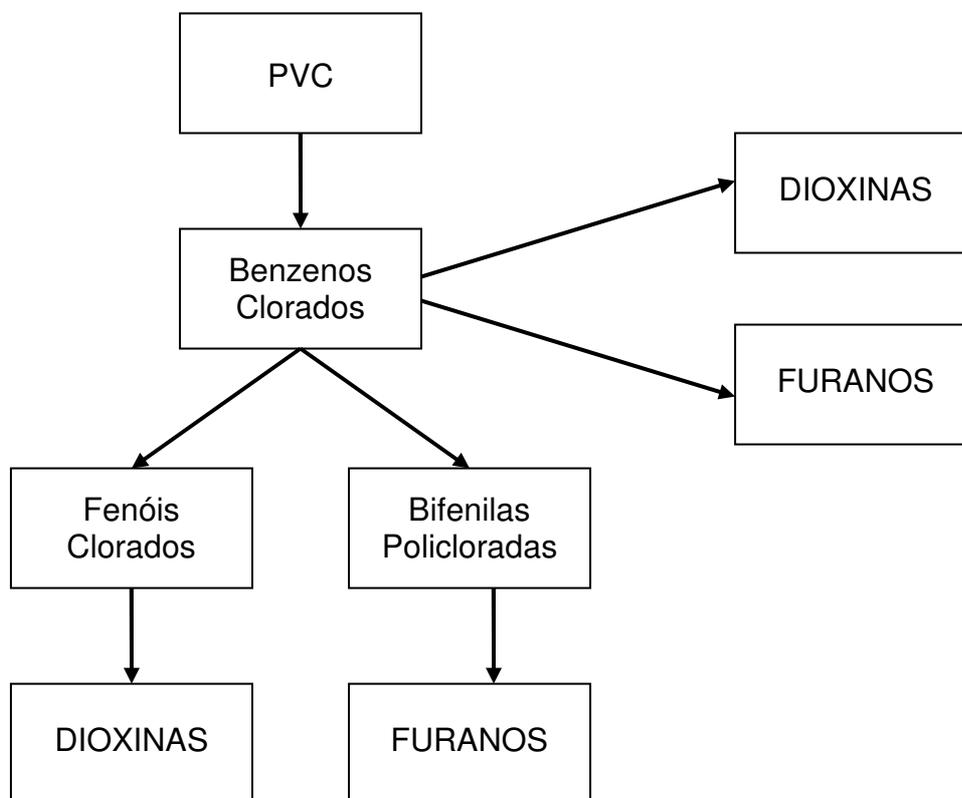
Os Fatores de Equivalência de Toxicidade (FTEC) são números que representam apenas a ordem de grandeza da toxicidade conhecida dos citados compostos. Por exemplo, a comparação de dois compostos que apresentem $FTEC = 0,01$ e $FTEC = 0,001$ significa que a ordem de grandeza da toxicidade do primeiro é dez vezes superior à do segundo, de acordo com o atual estado-da-arte do conhecimento no assunto. De forma análoga, o fato do FTEC ser zero não significa que o composto não apresente nenhuma toxicidade de uma forma absoluta. Os referidos fatores não são números precisos, mesmo porque os resultados obtidos nos testes de laboratório apresentam muitas variações.

Considerando a 2, 3, 7, 8 - TCDD, a dioxina de maior toxicidade, os resultados apresentam grandes variações para diferentes animais. Enquanto a dose letal para cobaias, via oral, é da ordem de $1\mu\text{g}/\text{kg}$ peso corporal, a dose aguda para hamster está por volta de 3.000 a 4.000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ peso corporal (GROSSI, 1993 apud ASSUNÇÃO).

3.5.3 Formação

As dioxinas e os furanos não apresentam nenhuma aplicação prática para o bem estar da humanidade e não são produzidos intencionalmente, sendo formados como subprodutos indesejáveis de certos processos químicos durante a produção de intermediários clorados e na queima de substâncias cloradas, não havendo nenhuma evidência que sejam formados bio-sinteticamente por organismos vivos (USEPA, 1997).

Os possíveis caminhos para formação de dioxinas e furanos são mostrados na FIGURA 18, segundo USEPA, 1997.



FONTE: USEPA (1997)

FIGURA 18 – POSSÍVEIS CAMINHOS PARA FORMAÇÃO DE DIOXINAS E FURANOS.

A formação das dioxinas e furanos ainda é um assunto que gera controvérsias. Com relação à ocorrência desses compostos em incineradores de resíduos sólidos municipais, três teorias básicas têm sido propostas (ASSUNÇÃO, 1999):

“a) Ocorrem como constituintes em pequeníssimas quantidades, traços, no próprio resíduo e uma parte passa através do incinerador, sem transformação;”

“b) são produzidos durante a incineração ou em caldeiras, através de precursores, como o PCB [*polychlorinated biphenyl* – bifenila policlorada], os pentaclorofenóis e os benzenos clorados;

“c) são produzidos a partir de materiais não diretamente relacionados a esses compostos (ex: produtos do petróleo em geral, hidrocarbonetos clorados, íons cloreto inorgânico e plásticos).”

“A primeira hipótese tem sido descartada nos casos em que a temperatura da câmara de combustão é alta o suficiente para destruir os PCDD e PCDF, como ocorre na incineração de resíduos em que a temperatura em geral está próxima ou acima de 900°C e o tempo de residência é alto (1 a 2 segundos).”

“Na terceira hipótese, esses compostos podem ser formados por mecanismo conhecido como síntese “*de novo*” através de reações elementares entre carbono, hidrogênio, oxigênio e cloro. Tem sido observada a formação de dioxinas, furanos e compostos relacionados com o benzeno e fenóis clorados no carbono residual coletado na saída do sistema de combustão (região de temperatura entre 300 e 400°C), quando na presença de ácido clorídrico, oxigênio e água. Essas reações são catalisadas por vários metais, óxidos metálicos e silicatos, presentes no material particulado arrastado” (MILLIGAN, 1993 e DICKSON, 1987 apud ASSUNÇÃO, 1999).

“Na faixa de temperatura de 250°C a 400°C ocorre a maior formação de dioxinas (PCDD e PCDF), na combustão de resíduos químicos, como PCB” (PORTEOUS, 1992 apud ASSUNÇÃO, 1999). Esta afirmativa leva à reflexão quanto à formação e disseminação de dioxinas e furanos a partir de uma prática de certa forma comum nas áreas periféricas das cidades, onde não exista serviço de coleta de lixo, nas quais observam-se muitos focos de queima do lixo em ambiente aberto, em baixa temperatura, com a presença de quase todos os tipos de materiais plásticos presentes – fontes de cloro e de hidrocarbonetos.

Portanto os processos de combustão e os produtos químicos seriam os dois grandes grupos que poderiam gerar dioxinas e furanos (WHO/EURO, 1987 apud ASSUNÇÃO, 1999).

Segundo FANGMARK et alli, 1994 apud GRIPP (1999), o aumento do tempo de residência na região de pós-combustão, quando a temperatura se encontra na faixa de 260°C e 430°C, acarreta no aumento da formação de dioxinas. Fora desta faixa, não existe variação na formação de dioxinas em função do tempo de residência.

No caso que se aplica a esta dissertação, o processo de incineração de RSS seria uma provável fonte geradora de PCDD e PCDF principalmente nas regiões onde o tráfego dos produtos

completos e incompletos da combustão estiver submetido à faixa de temperatura entre 250° e 430°C, na presença de substâncias cloradas e dos citados catalisadores.

3.6 CONDICIONAMENTO DOS PRODUTOS DA INCINERAÇÃO

No Art. 37, da Resolução nº 316 do CONAMA, de 29/10/2002, é exigida a instalação de equipamentos que venham a reduzir a emissão de poluentes, de forma que os Limites de Emissão fixados nesta Resolução sejam atendidos. Assim, os produtos da incineração são habitualmente resfriados em lavadores de gases, os quais apresentam a principal função de remover o material particulado antes do lançamento na atmosfera. De acordo com o Art. 38 da citada Resolução, os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos não deverão ultrapassar os seguintes valores estabelecidos:

PARA SÓLIDOS

Material particulado total: 70 mg / Nm³ (setenta miligramas por normal metro cúbico), desde que sejam respeitados as emissões agrupadas em conjunto nas classes descritas a seguir.

Classe 1: 0,28 mg / Nm³ (vinte e oito centésimos de miligrama por normal metro cúbico), incluindo cádmio, mercúrio, tálio medidos puros ou contidos em seus respectivos compostos.

Classe 2: 1,4 mg / Nm³ (um miligrama e quatro décimos por normal metro cúbico), incluindo arsênio, cobalto, níquel, telúrio, selênio medidos puros ou contidos em seus respectivos compostos.

Classe 3: 7 mg / Nm³ (sete miligramas por normal metro cúbico), incluindo antimônio, chumbo, cromo, cianetos facilmente solúveis, cobre, estanho, fluoretos facilmente solúveis, manganês, platina, paládio, ródio, vanádio medidos puros ou contidos em seus respectivos compostos.

PARA GASES

280 mg SO_x / Nm³ (duzentos e oitenta miligramas por normal metro cúbico), medidos como dióxido de enxofre (SO₂).

560 mg NO_x / Nm³ (quinhentos e sessenta miligramas por normal metro cúbico), medidos como dióxido de nitrogênio (NO₂).

100 ppm v/v de monóxido de carbono.

80 mg/Nm³, até 1,8 kg/h de compostos clorados inorgânicos, medidos como HCl.
5 mg/Nm³ de compostos fluorados inorgânicos, medidos como fluoreto de hidrogênio.
0,50 ng/Nm³ de dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina), onde a correção dos parâmetros medidos deve tomar por base o teor de oxigênio de 7% do volume dos gases de combustão do ponto de descarga, considerados em base seca. Dependendo do local e dos padrões de qualidade do ar da região, o órgão ambiental pode reduzir o valor limite estabelecido nesta resolução.

Posteriormente, a Resolução nº 382 do CONAMA, de 26/12/2006, veio estabelecer os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Tais limites estão fixados por poluente e por tipologia das fontes estabelecidas nos anexos desta Resolução. Como não há nenhum anexo específico a processos de incineração, a Resolução nº 316 do CONAMA, de 29/10/2002, continua válida com respeito aos limites máximos de emissão de poluentes nestes processos.

3.7 EXPERIÊNCIAS ENCONTRADAS

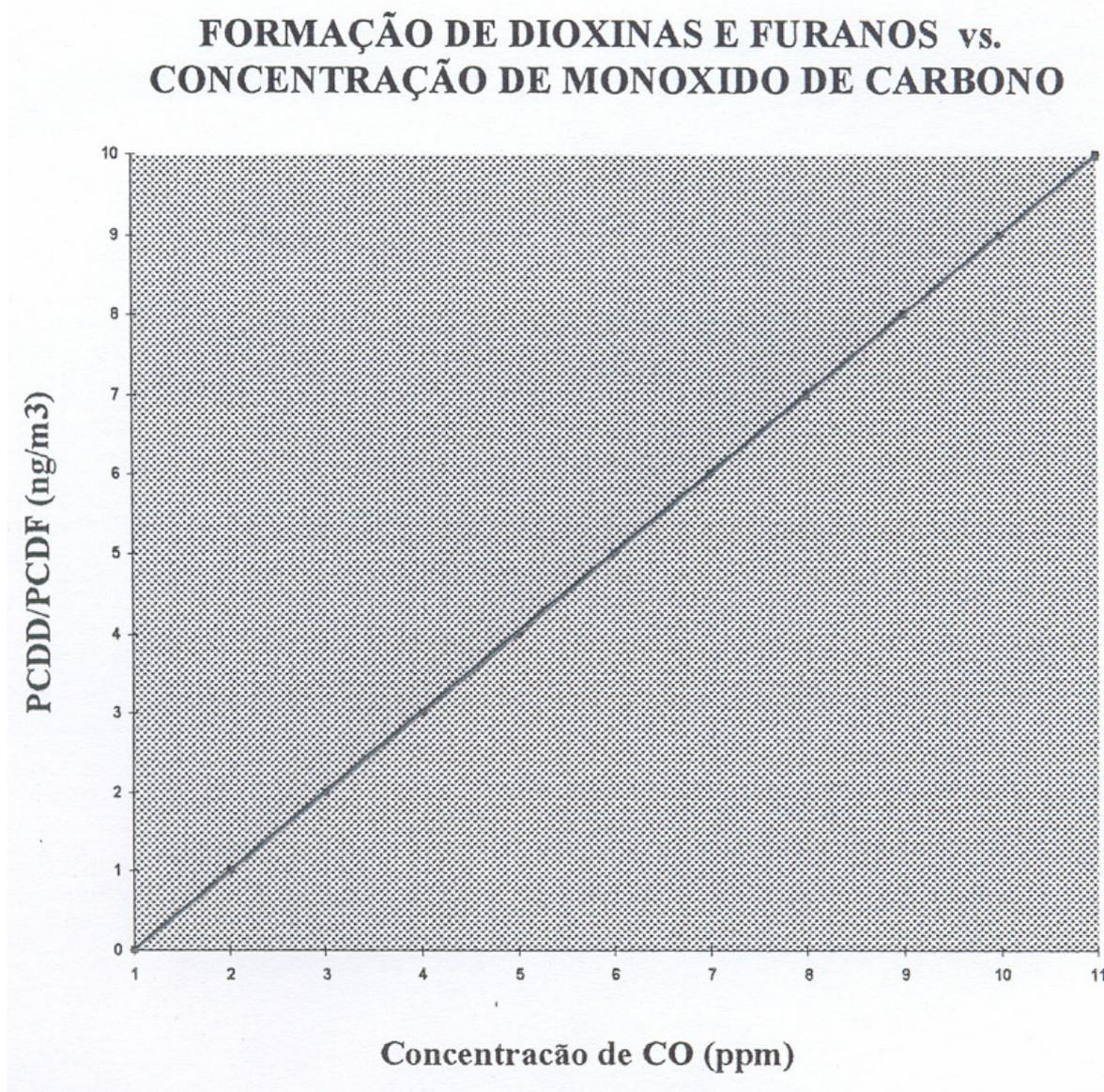
Neste item estão descritas algumas experiências encontradas e respectivos resultados obtidos, cujos subsídios colaboram para os capítulos finais.

3.7.1 Subsidiária argentina da multinacional AGA AB

As informações a seguir foram obtidas através da subsidiária argentina da empresa multinacional AGA AKTIEBOLAG, uma empresa química na área de gases industriais (AGA ARGENTINA, 2000). As referências baseiam-se em estudo realizado pelo *Chemical Laboratory Research Centre of Finland* (SONG, data não informada).

A FIGURA 19 mostra um gráfico da formação de dioxinas e furanos em função da concentração de monóxido de carbono (CO), segundo SONG (data não informada), o qual apresenta um comportamento perfeitamente linear e diretamente proporcional na faixa indicada, onde o aumento da concentração de CO corresponde ao aumento da formação de dioxinas e furanos.

Porém, não foi explicado como tais dados foram obtidos. Os pontos que constituem a reta traçada na FIGURA 19 estão perfeitamente alinhados, o que sugere o fato de que tenham sido obtidos a partir de cálculos matemáticos e não de dados colhidos experimentalmente.



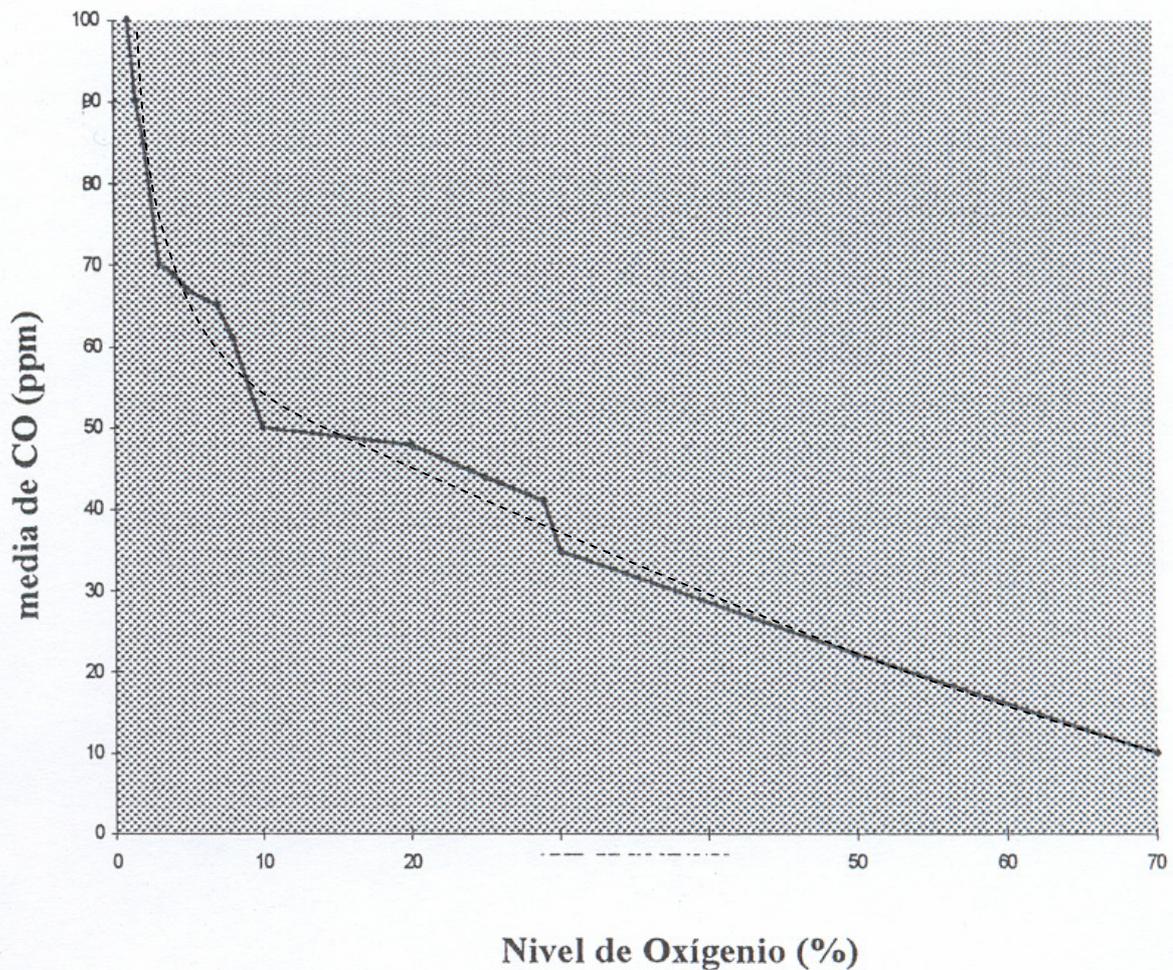
FONTE: SONG (DATA NÃO INFORMADA)

FIGURA 19 – FORMAÇÃO DE DIOXINAS E FURANOS VERSUS CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO.

A FIGURA 20 mostra o efeito do oxigênio na formação de monóxido de carbono, segundo (SONG, data não informada), onde nota-se claramente a redução dos valores médios encontrados para o CO na medida em que o nível de oxigênio se eleva. Porém a plotagem do gráfico da FIGURA 20, pela simples interligação dos pontos por segmentos de reta, não

parece ser o procedimento mais correto para expressão do significado físico do fenômeno . Portanto foi traçada pelo autor a curva tracejada como sugestão do comportamento de continuidade do fenômeno físico.

EFEITO DO OXIGÊNIO NA FORMAÇÃO DE MONOXIDO DE CARBONO



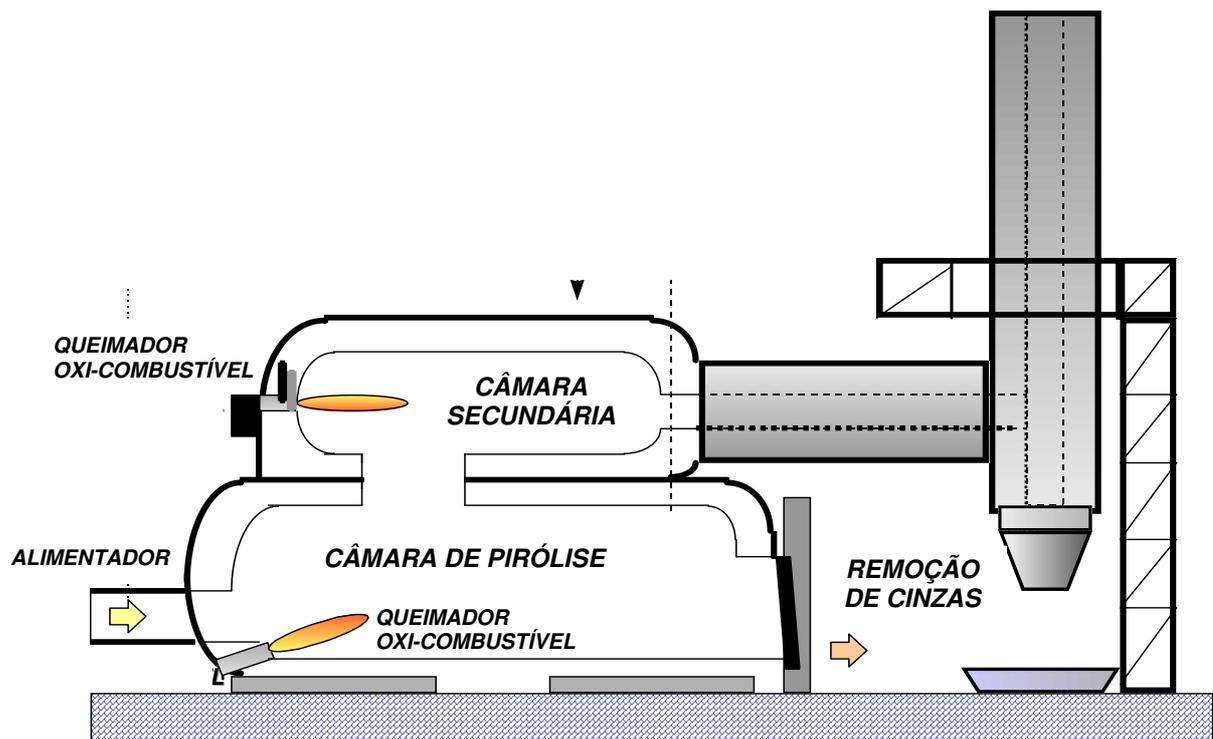
FONTE: SONG (DATA NÃO INFORMADA)

FIGURA 20 – EFEITO DO NÍVEL DE OXIGÊNIO NA FORMAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO

Assim, sendo válidas ambas as premissas das FIGURAS 19 e 20, pode-se esperar que sejam obtidas reduções significativas na formação de dioxinas e furanos a partir do uso de atmosferas de combustão enriquecidas com oxigênio ou da prática da oxi-combustão onde o oxigênio, em seus diferentes graus de pureza, em seria o único ator como comburente do processo de incineração.

O incinerador existente na LAM-CEF, onde foram realizadas as experiências, é um incinerador tradicional de duas câmaras: a primeira câmara onde ocorre a pirólise dos RSS e a câmara secundária onde a incineração dos produtos da pirólise é completada.

Continuando ainda com a experiência da AGA na Argentina, a TABELA 14 indica os valores médios alguns parâmetros obtidos com a prática da oxi-combustão em experiência realizada na LAM-CEF, Planta La Plata – Argentina, comparando-se com os limites máximos de emissões estabelecidos pela legislação local. O combustível utilizado na referida planta é o gás natural, que por si só garante a inexistência de óxidos de enxofre nos seus produtos da combustão.



FONTE: AGA ARGENTINA (2000)

FIGURA 21 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO INCINERADOR DA LAM-CEF

Além das informações referentes à experiência da LAM-CEF, existe outro documento da AGA referente ao processo de solicitação de patente para o procedimento de tratamento térmico de resíduos, particularmente para RSS.

TABELA 14 – PARÂMETROS OBTIDOS EM EXPERIÊNCIA NA LAM-CEF

LAM-CEF, PLANTA LA PLATA		
PARÂMETROS MÉDIOS OBTIDOS NOS TESTES		
Produtos da combustão	Legislação (valores admissíveis)	Parâmetros médios obtidos com oxigênio
NOx (ppm)	200 (máx.)	26
SO ₂ (ppm)	50 (máx.)	0 (*)
CO (ppm)	100 (máx.)	39
Excesso de O ₂ (%)	7 (mín.)	7

(*) Não há relação com o uso de oxigênio neste caso onde o combustível foi o gás natural.

FONTE: AGA ARGENTINA (2000)

Os benefícios citados para a incineração de RSS (AGA ARGENTINA, 2000), considerando-se o comburente com um teor de oxigênio acima de 90%, foram os seguintes:

- Aumento da capacidade de incineração entre 15 e 60%.
- Redução do consumo de combustível entre 60 e 95%.
- Benefícios ambientais com a redução dos valores de emissão na faixa de 80 a 100% para substâncias como NOx, CO, SOx, dioxinas e furanos.
- Redução da emissão de material particulado devido ao menor arraste pelo reduzido fluxo de gases (efeito *carry-over*).
- Redução dos níveis de odores desagradáveis.
- Redução dos níveis de ruído devido à eliminação dos ventiladores do ar de combustão.

A redução das emissões absolutas de SOx, devido ao enxofre contido no combustível, diminuem na mesma proporção em que se reduz o consumo do combustível.

3.7.2 Linde Gases Ltda.

Entrevista não estruturada com o Eng^o Vitor Murari da empresa LINDE GASES LTDA. no dia 26 de setembro de 2007.

O Eng^o Vitor Murari relatou as duas experiências realizadas na empresa SILCON AMBIENTAL LTDA, com as seguintes declarações:

“A primeira experiência foi realizada em finais do ano 2003 na unidade da SILCON situada na Estrada PLN 190 x PLN 040, Parque da Represa (CEP 13140-000), em Paulínia – SP. Esta unidade possuía na ocasião 2 (dois) incineradores de dupla câmara, do tipo pirolítico, conforme mostra a FIGURA 22. A capacidade unitária máxima, com queimadores convencionais a GLP e ar atmosférico, era de 4,0 ton de RSS por dia, a qual constava da licença de operação da CETESB. Cada incinerador dispunha de dois queimadores na câmara secundária, instalados inclinados nas duas laterais em posições simétricas ao eixo longitudinal da câmara (ver FIGURA 22, indicação com setas vermelhas). Inicialmente foi feita a modificação em um dos incineradores, com a instalação de um queimador a GLP e oxigênio na câmara secundária, na posição central, paralela ao eixo do corpo cilíndrico da câmara, eliminando os dois queimadores convencionais (ver FIGURA 22, indicação com seta branca). As aberturas destinadas aos queimadores convencionais foram obliteradas com material refratário e flangeadas. Posteriormente, devidos aos ótimos resultados iniciais obtidos, o segundo incinerador foi também convertido para oxigênio. A redução da vazão dos produtos da combustão permitiu aumentar a capacidade do incinerador para 7,5 ton de RSS por dia, ou seja, um expressivo aumento de 87,5%. A economia de GLP no processo de incineração não pode ser quantificado, pois haviam outros pontos de consumo alimentados a partir da mesma fonte de gás. Mas a economia global de GLP, indicada pelo consumo mensal, foi da ordem de 50%, o que permite afirmar que a economia no processo de incineração foi superior a este valor.”

“Posteriormente, com a desativação da unidade de incineração em Paulínia, os equipamentos de oxi-combustão foram transferidos para a unidade da SILCON situada na Rua Ruzzi nº 440, Sertãozinho (CEP 09370-850), em Mauá – SP. Nesta unidade, o consumo de GLP havia sido recentemente substituído por gás natural, o que exigiu a modificação na lança de gás dos queimadores. A modificação foi feita nos dois incineradores lá existentes, semelhantes aos incineradores de Paulínia, razão pela qual os queimadores oxi-GN foram instalados na mesma posição. Nesta unidade o aumento de produção mínimo garantido foi superior a 40%. Também não foi possível avaliar com precisão o consumo de combustível nesta unidade, principalmente devido à recente troca do gás combustível. Outra informação complementar é a diminuição da vazão do exaustor, como consequência direta da redução significativa da vazão dos produtos da combustão.”

Em nenhuma das duas experiências, infelizmente, foi feita a análise dos teores de dioxinas e furanos presente nos efluentes dos incineradores até o momento da entrevista com o Engº Vitor.

Não foi possível entrevistar diretamente o técnico da SILCON envolvido na operação com oxigênio, pois o mesmo já não se pertence mais ao quadro de funcionários da empresa.

A obtenção de informações mais detalhadas, da parte de ambas as empresas, esbarra nas limitações referentes à divulgação de dados que possam ser estratégicos para a concorrência.



OBS.: Esta foto foi tirada antes da implantação do queimador gás natural – oxigênio.

FONTE: WEBSITE DA SILCON

FIGURA 22 – INCINERADORES DE RSS INSTALADOS NA SILCON – MAUÁ

4. DISCUSSÃO

Como se pode mostrar, o uso de atmosferas comburentes com teores de oxigênio superiores ao do ar atmosférico contribui para a redução do fluxo mássico dos produtos da combustão, na medida em que são reduzidos os teores de nitrogênio oriundos do ar e o consumo de combustível. No caso da queima com oxigênio, sem a participação de ar, a chamada oxicomustão, os teores de nitrogênio serão muito baixos, devido apenas a uma eventual entrada de ar falso na câmara de combustão ou seus equipamentos periféricos em regiões de pressão negativa ou na alimentação da carga a incinerar.

A prática de elevados teores de oxigênio na atmosfera comburente possibilita reduções das vazões mássicas dos produtos da combustão, atingindo valores de 70 a 80% menores. Consequentemente, as vazões volumétricas também se reduzem, aumentando significativamente o tempo de residência tanto nas câmaras do incinerador como no sistema de tratamento.

Para uma exemplificação prática, considere-se o tempo de residência dos produtos da combustão com ar na câmara secundária, em determinado incinerador, sendo 1 segundo. Considerando-se uma redução da vazão de 75% através da queima com oxigênio, o novo tempo de residência na câmara secundária do mesmo incinerador será de 4 segundos, preservadas as mesmas condições de pressão e temperatura.

Nas atmosferas de combustão ricas em oxigênio, as temperaturas desenvolvidas na chama são mais elevadas em relação à queima com ar, proporcionando uma maior garantia da manutenção das temperaturas mínimas desejadas nas câmaras de combustão e pós-combustão, além de uma mais rápida recuperação em caso de queda de temperatura. Isto não quer dizer que a temperatura da câmara de combustão irá necessariamente se elevar, pois os queimadores são controlados por sensores de temperatura.

A velocidade da chama nas atmosferas ricas em oxigênio são mais elevadas do que na queima com ar atmosférico, o que promove uma maior turbulência na câmara de combustão, proporcionando melhores condições para garantir uma destruição térmica mais homogênea e completa.

Observe-se que estes três últimos parágrafos referem-se à otimização da combustão pelo conceito dos 3 Tês, citado no item 3.3.4. Essas condições (tempo de residência, turbulência e temperatura de reação) são fundamentais para a otimizar o processo de incineração.

Além disso, as atmosferas ricas em oxigênio proporcionam uma significativa redução dos teores de monóxido de carbono, o que por sua vez também possibilita a redução da formação de dioxinas e furanos conforme corrobora estudo realizado pelo *Chemical Laboratory Research Centre of Finland* (SONG, data não declarada).

Sobre as dioxinas e furanos vale comentar a existência de inúmeras publicações que, a despeito de apresentarem embasamentos verdadeiros, apresentam os fatos de geração e conseqüências da presença de dioxinas e furanos nos gases da combustão sob aspectos muito radicais, parciais e específicos.

Como exemplo, cita-se as publicações Greenpeace e de LUSCOMBE (1999), que se restringem a condenar veementemente a produção e a utilização do cloro no mundo.

Por outro lado, existem publicações que minimizam o aspecto de vilão da química do cloro, como o artigo da AMICLOR (1997) que relata o caso da planta de incineração de Spittelau em Viena – Áustria, onde os índices de emissão de dioxinas e furanos são apresentados como aceitáveis. Esta planta de incineração foi selecionada no concurso da ONU denominado HABITAT II como “boa prática” e catalogada como “BEST”.

Todavia não há de se perder o foco do tema central da discussão, que são as perspectivas para reduzir as emissões de dioxinas e furanos, além de outros benefícios, a partir da prática da incineração através de atmosferas ricas em oxigênio.

Apesar das controvérsias existentes, os estudos anteriormente citados concordam ao afirmar que as condições necessárias à formação de dioxinas e furanos geralmente estão presentes na incineração de RSS.

Assim, não sendo possível eliminar todas as condições apontadas, como a presença de hidrocarbonetos e plásticos, dentre eles o PCV que aporta o mais elevado teor de cloro, e as temperaturas na faixa de 250° a 400°C durante o processo de resfriamento dos produtos da

combustão após a saída do incinerador, a proposta desta dissertação foi fundamentada nos seguintes princípios:

- Redução do fluxo mássico dos produtos da combustão.
- Temperaturas de chama mais elevadas.
- Velocidades de chama e turbulência mais intensa
- Significativa redução dos teores de monóxido de carbono nos produtos da combustão.

Como já mencionado, combustão em atmosferas enriquecidas com oxigênio contribui simultaneamente para aumentar o tempo de residência e garantir a temperatura mínima desejada no processo de destruição térmica. Além disso, a redução do fluxo mássico permitirá um resfriamento muito mais rápido dos produtos da combustão, que ocorre no sistema de lavagem dos efluentes gasosos dos incineradores, reduzindo assim o tempo da passagem na faixa dos 430° a 250°C, onde também se atribui à formação de dioxinas e furanos. Esta faixa de temperaturas entre 430° e 250°C foi obtida pela união das faixas citadas pelas seguintes referências: MILLIGAN, 1993 e DICKSON, 1987 apud ASSUNÇÃO, 1999; PORTEUS, 1992 apud ASSUNÇÃO, 1999; WHO/EURO, 1987 apud ASSUNÇÃO, 1999; e FANGMARK et alli, 1994 apud GRIPP, 1999.

Como benefícios adicionais, é possível citar a redução do consumo de combustível e suas emissões como dióxido de carbono, além da redução das emissões de óxidos de nitrogênio e de monóxido de carbono, que são conseqüentes nas novas condições de combustão.

Outra possibilidade muito importante, já comprovada nas experiências citadas na LAM-CEF, na SILCON – Paulínia e na SILCON – Mauá é o aumento da produtividade dos incineradores existentes, tanto pelo aumento da taxa de incineração como pela redução dos tempos improdutivos gastos no preaquecimento após as paradas operacionais. Além disso, é possível conjugar, simultaneamente, tanto o aumento de produtividade dos incineradores como a redução do volume dos produtos da combustão.

Por exemplo, um incinerador que tenha a capacidade de incinerar 200 kg de RSS por hora com ar atmosférico geraria dessa queima uma vazão de 1.820 kg de produtos da combustão por hora (consumo específico tomado da FIGURA 16, referente a 21% de oxigênio).

Considerando que a queima com oxigênio possibilitasse aumentar a capacidade de incineração em 50%, passando de 200 para 300 kg de RSS por hora, a nova vazão dos produtos da combustão seria de apenas 690 kg de produtos da combustão por hora (consumo específico tomado da FIGURA 16 referente a 100% de oxigênio). Portanto seria possível aumentar a produtividade do incinerador em 50% e, ao mesmo tempo, reduzir a vazão dos produtos da combustão dos RSS em 62%. Neste cálculo foram consideradas apenas as vazões dos produtos da combustão dos RSS, não tendo sido incluído o consumo de combustível da chama de suporte. Porém, como o uso de oxigênio acarreta em reduções ainda mais significativas do consumo de combustível, os resultados finais tendem a ser ainda melhores no que diz respeito à comparação das vazões dos produtos da combustão nas hipóteses com ar e com oxigênio.

5. CONCLUSÕES

A realidade brasileira mostra que a destinação inadequada dos RSS pode ser considerada como um grave problema de saúde pública, principalmente nas centenas de municípios onde não existe tratamento e sua destinação final são os lixões a céu aberto, onde tais resíduos são lançados juntamente com os demais resíduos sólidos urbanos. Nesses lixões freqüentemente se encontram pessoas da classe mais desfavorecida da sociedade, desde crianças até idosos, na busca da sua renda de sobrevivência.

1ª) Neste panorama, a incineração criteriosa é um método de tratamento que garante a eliminação total da patogenicidade do RSS, reduzindo significativamente sua massa (taxa de redução média = 70%) e seu volume (taxa de redução média = 90%).

2ª) Embora a incineração de RSS possa apresentar aspectos discutíveis quanto ao seu futuro em um mundo preocupado com emissões colaterais de substâncias tóxicas persistentes, a incineração apresenta-se como uma realidade em nosso país, não havendo nenhuma perspectiva de que venha a ser substituída, pelo menos a curto prazo, por outra melhor técnica disponível.

3ª) A incineração de resíduos de serviços de saúde em atmosferas ricas em oxigênio apresenta sólidas perspectivas para a redução das emissões de dioxinas e furanos pois, além de garantir sua destruição durante o processo de incineração, dificulta significativamente sua

formação no processo de resfriamento dos produtos da combustão devido à significativa redução do seu volume. Além disso, a redução do consumo de combustíveis, proporciona ainda a redução das emissões de outros gases cujas presenças são indesejáveis no meio ambiente, como dióxido de carbono, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio.

4ª) Outra possibilidade que se descortina com o emprego de atmosferas ricas em oxigênio é o aumento da capacidade dos incineradores existentes sem a necessidade de investimento, tanto nos incineradores como nos sistemas de tratamento dos produtos da combustão, proporcionando ainda ganhos para o meio ambiente, conforme os resultados obtidos tanto na empresa LAM-CEF (AGA ARGENTINA, 2000), como na SILCON em Paulínia e em Mauá no Estado de São Paulo.

5ª) A prática do uso de oxigênio pode permitir ainda, simultaneamente, o aumento da capacidade dos incineradores em um nível tal que o volume dos produtos da combustão seja significativamente mais baixo do que na situação original da queima com ar.

6ª) Quanto ao oxigênio a ser utilizado no enriquecimento do ar, ou puro, existem duas possibilidades: a compra do produto ou sua auto-produção. A compra do oxigênio pode ser feita diretamente das empresas de gases do ar, na forma criogênica, onde o tanque de armazenagem e a rede de distribuição costumam ser fornecidas sob a modalidade de comodato. A auto-produção exigiria o investimento no equipamento conhecido como PSA ou VPSA, a partir do qual o oxigênio seria produzido, havendo apenas as despesas com energia elétrica e manutenção. Como indicado na FIGURA 15, os teores do oxigênio obtido através das PSAs ou das VPSAs, embora um pouco mais baixos (item 3.4.2), não implicam na perda de rendimento significativo em sua aplicação nos incineradores.

7ª) Embora a utilização de oxigênio implique em custos extras, existem outros fatores que contribuem para compensá-lo como a significativa redução do custo de combustível e a possibilidade da receita adicional com o aumento da capacidade do incinerador, além das perspectivas da redução da formação de dioxinas e furanos.

6. RECOMENDAÇÕES

A maior dificuldade na obtenção de informações quanto aos resultados obtidos com as novas experiências relativas ao processo de incineração de RSS, com o uso de oxigênio, é o sigilo que costuma ser mantido para preservar os segredos empresariais. Mesmo as empresas envolvidas diretamente no desenvolvimento dos novos processos, que fornecem oxigênio, combustível e queimadores, nem sempre conseguem obter todas as informações solicitadas. E, além disso, nem sempre as informações fornecidas apresentam o grau de precisão desejável.

As recomendações citadas a seguir têm por objetivo sugerir o caminho a ser percorrido, na busca de resultados confiáveis.

1ª) A situação ideal seria a preparação de um mix padrão para a carga de RSS que será incinerada. Porém, como esta premissa parece ser de difícil realização, senão impossível, o requisito mínimo seria analisar a origem, o conteúdo e as características (peso, umidade etc.) de todas as cargas de RSS a serem incineradas, registrando tais informações. Assim, melhor poderia ser controlada a produtividade do processo de incineração para cada ensaio.

2ª) Registrar todos os parâmetros operacionais do incinerador e sistemas periféricos que estiverem disponíveis em função do tempo, como a temperatura ambiente e as temperaturas das câmaras e do sistema de condicionamento dos efluentes, potências dos queimadores auxiliares, teor de oxigênio na saída da última câmara de queima e modos de operação.

3ª) Registrar o consumo das utilidades envolvidas em cada ensaio, como o combustível auxiliar, o comburente e os fluidos de lavagem.

4ª) Analisar os efluentes sólidos, líquidos e gasosos do incinerador com o objetivo de verificar a presença e quantificar os teores de dioxinas e furanos, na incineração tradicional com ar atmosférico e com cada prática de incineração a oxigênio escolhida, com a observância dos métodos de confiabilidade estatística, possibilitando a comparação confiável entre os dois processos. Pesquisar os efluentes sólidos.

5ª) Fazer a análise econômica de cada ensaio, levando em conta:

- a receita que, sendo proporcional às quantidades incineradas, seria substancialmente incrementada na medida em que significativos aumentos de produtividade fossem obtidos;
- as despesas, onde seriam computados os custos do combustível, do comburente, do consumo de energia elétrica, da mão-de-obra direta e indireta, dos encargos sócio-trabalhistas, da disposição dos efluentes, da manutenção, do capital investido e dos impostos.

6^a) Durante as visitas que o autor tem realizado em diversas empresas de incineração de RSS, um fato lhe chamou a atenção: uma quantidade de caixas para materiais perfurocortantes aparentemente muito pequena destinada à incineração, em relação ao grande volume de sacos dos demais resíduos. Embora não tenha havido nenhum critério quantitativo para tal afirmação, esta observação apenas qualitativa levou o autor à reflexão sobre um possível reaproveitamento de materiais hospitalares descartáveis. Portanto, a recomendação é que as autoridades investiguem atentamente o ciclo de vida dos referidos materiais descartáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGA ARGENTINA. **Un procedimiento para el tratamiento térmico de residuos, y en particular para la incineración de residuos hospitalarios o patológicos o patogênicos y un horno para llevar a cabo un procedimiento de tratamiento térmico de residuos y en particular para la incineración de residuos y en particular para la incineración de residuos hospitalarios o patológicos o patogênicos.** Buenos Aires, Argentina, 2000, 10p.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – NOTÍCIAS. **Resíduos de serviços de saúde terão regras nacionais da origem até o seu destino final.** Brasília, DF, 06.03.2003. 2p.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Manual de gerenciamento de resíduos de serviços de saúde.** Brasília, DF, 2006, 182p.

AHLBERG, K. **AGA gas handbook.** Lidingö, Sweden: AGA AB, 1985, 582p.

AIRSEP, **PSA oxygen systems for industrial applications.** Buffalo, NY, USA, 1997, 6p.

AMICLOR. **Spittelau: todo um exemplo.** Barcelona, Espanha, 1997, 6p.

ASSUNÇÃO, J. V.; PESQUERO, C. R. **Dioxinas e furanos: origens e riscos.** Ver. Saúde Pública vol. 33 n.5 São Paulo Oct. 1999.

BOOKER, **Document F 21/ca/50,** International Flame Research Foundation, Ijmuiden, Netherlands, 1981.

BORMAN, G. L.; RAGLAND, K. W. **Combustion engineering.** Singapore: McGraw-Hill, 1998. 613p.

BRUNNER, C. R.. **Hazardous waste incineration.** Singapore: McGraw-Hill, 2nd edition, 1993. 461p.

CALDERONI, Sabetai – **Palestra.** 2003

CARDOSO, A. et alli. **Curso de informação sobre combustíveis e combustão - Apostila.** IBP – Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro, Brasil, 1977, 399p.

CETESB - Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Resíduos hospitalares.** São Paulo, SP: CETESB, 1981. 39p.

CETESB - Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Resíduos de serviços de saúde.** São Paulo, SP: CETESB, 1997. 18p.

CORNFORTH, J. L.. **Combustion engineering and gas utilisation.** London, UK: 3rd edition, 1992. 895p.

COSTA, F.C. **Oxigênio em Processos Térmicos – Alternativas Energéticas.** Rio de Janeiro, RJ: Anais do III Congresso Brasileiro de Energia, 1984. 8p.

COWARD and JONES, **Limits of flammability of gases and vapours**. Bulletin 503, U. S. Bureau of Mines, 1952.

DEMPSEY, C. R.; Oppelt, E. T. **Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica**. Tradução de Milton Norio Sogabe. São Paulo: A&WMA - Air and Waste Management Association - Seção Brasil, 1999. 78p.

DICKSON, L. C.; KARASEK, F. W. **Mechanism of formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins produced on municipal incinerator fly ash from reactions of chlorinated phenols**. J. Chromatogr 1987:389:127-37.

GLASSMAN, I. **Combustion**. San Diego, USA: Academic Press, 3rd edition, 1996. 631p.

GRIPP, W. G. **Dioxinas e furanos na incineração de resíduos sólidos urbanos: revisão bibliográfica**. Vitória, ES: Seminário Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos e Industriais, 1999. 9p.

GROSSI, M. G. **Avaliação da qualidade dos produtos obtidos de usinas de compostagem brasileiras de lixo doméstico, através de determinação de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas**. São Paulo, SP: Tese de Doutorado – Instituto de Química da USP, 1993.

HORTAL, M. A.; BARRERAS, A. L. M., **El hidrogeno, fundamento de um futuro equilibrado**. Espanha: Ediciones Díaz de Santos, 2005. 136p.

IPT/CEMPRE, **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo, SP: IPT, 2000. 370p.

JENKIN, D. B. **The properties of liquefied petroleum gases**. London, England: Shell, 1962. 73p.

KREITH, F. **Princípios da Transmissão de Calor**. São Paulo, SP: Editora Edgard Blücher, 1969. 641p.

LACAVA, P.T. et alli, **Análise Térmica do Processo de Incineração de Resíduos Aquosos com Chamas Enriquecidas**. Rio de Janeiro, RJ: Anais do 58º Congresso Annual da ABM, 2003. 10p.

LIPTÁK, B. G.; LIU, D.H.F. **Environmental engineers' handbook**. New York, USA: Lewis, 2nd edition, 1997. 1431p.

LUSCOMBE, D. **Dioxinas e Furanos: Formação**. Greenpeace Brasil, São Paulo, 1999, 8p.

MARTÍNEZ, M. M. **Combustión y quemadores**. Barcelona, España: Marcombo, 1989. 159p.

MILLIGAN, M. S.; ALTWICKER, E. **The relationship between de novo synthesis of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans and low-temperature carbon gasification in fly ash**. Environ Sci Technol 1993; 27:1595-601.

MINISTRY OF POWER, **The efficient use of fuel**. London, UK: Her Majesty's Stationery Office, 2nd edition, 1958. 888p.

MONTEIRO et alli. **Gestão de resíduos sólidos urbanos**. 2001

PORTEOUS, A. **Incineration – what prospects?** *Wastes manage* 1992;82:193-202.

REED, R. J. **North american combustion handbook**. Cleveland, USA: North American Mfg. Co., volume I, 3rd edition, 1986. 332p.

REED, R. J. **North american combustion handbook**. Cleveland, USA: North American Mfg. Co., volume II, 3rd edition, 1997. 457p.

SALTIN, L. **Oxygen in combustion for heating and melting**, Lidingö, Sweden, 1981, 8p.

SILCON, website <http://www.silcon.com.br>

SONG, X.; HASE, A.; LAUKKARINEN, A. **Estudo realizado pelo Chemical Laboratory Research Centre of Finland**. Finlândia, data não informada.

STREHLOW, R. **Combustion Fundamentals**. Singapore, McGraw-Hill, Inc., 1985. 554p.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Hospital waste combustion study - data gathering phase - final report**. North Carolina, USA: EPA-450/3-88-017. 1988. 197p.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, **Locating and estimating air emissions from sources of dioxins and furans**, EPA-454/R-97-003, 1997. 241p.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – CHEMICALS, **Eastern and western South America Regional Report**, Global Environment Facility, 2002.

VLASSOV, D. **Combustíveis, Combustão e Câmaras de Combustão**. Curitiba, PR: Editora da UFPR, 2001. 185p.

VULCANO 1.1, software da Dynamis, 2006, disponível em <http://www.dynamis.com.br>

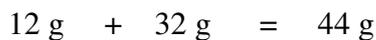
WHO/EURO, World Health Organization. Regional Office for Europe. **Dioxins and furans from municipal incinerators**. Copenhagen: WHO; 1987. (WHO – Environmental Health Series, 17).

ANEXO A

CÁLCULOS DE COMBUSTÃO COM AR

QUEIMA ESTEQUIOMÉTRICA DO CARBONO:

(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)



(valores das respectivas massas moleculares expressas em gramas)

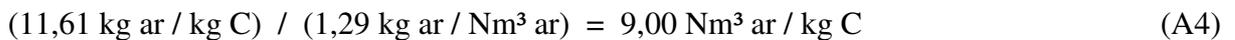
Assim, recalculando nas mesmas proporções mássicas da Equação A1, obtêm-se:



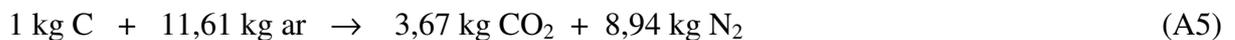
Com ar atmosférico seco, considerando a composição mássica do ar para fins práticos como sendo 23% de oxigênio e 77% de nitrogênio:



Ar estequiométrico de combustão:



Produtos da combustão estequiométrica:



QUEIMA DO CARBONO COM EXCESSO DE AR DE COMBUSTÃO:

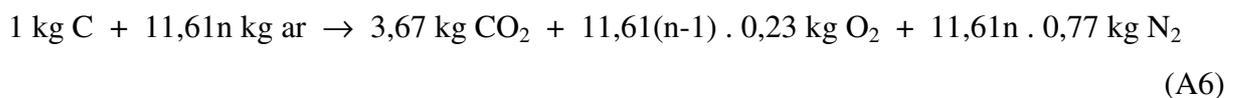
(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)

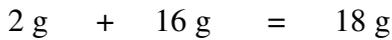
Seja o excesso de ar de combustão (XS) representado pelo fator “n”, onde:

$$\text{XS} = 10\% \Rightarrow n = 1,1$$

$$\text{XS} = 20\% \Rightarrow n = 1,2 \text{ e assim por diante.}$$

Com a queima do carbono com excesso de ar de combustão a Equação A5 passa a apresentar a seguinte forma:



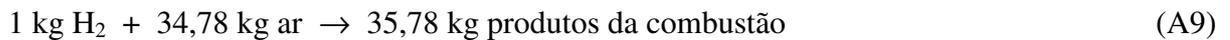
QUEIMA ESTEQUIOMÉTRICA DO HIDROGÊNIO:

(valores das respectivas massas moleculares expressas em gramas)

Assim, recalculando nas mesmas proporções mássicas da Equação A7, obtêm-se:



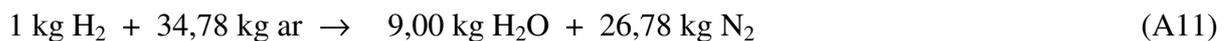
Com ar atmosférico seco, considerando a composição mássica do ar para fins práticos como sendo 23% de oxigênio e 77% de nitrogênio:



Ar estequiométrico de combustão:

$$(34,78 \text{ kg ar} / \text{kg H}_2) / (1,29 \text{ kg ar} / \text{Nm}^3 \text{ ar}) = 26,96 \text{ Nm}^3 \text{ ar} / \text{kg H}_2 \quad (\text{A10})$$

Produtos da combustão estequiométrica:

**QUEIMA DO HIDROGÊNIO COM EXCESSO DE AR DE COMBUSTÃO:**

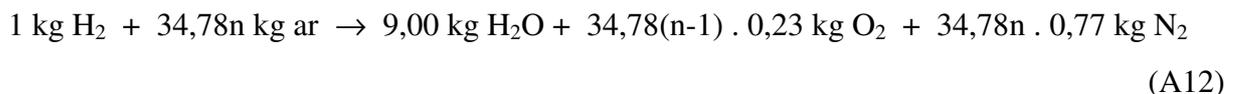
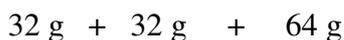
(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)

Seja o excesso de ar de combustão (XS) representado pelo fator “n”, onde:

$$\text{XS} = 10\% \Rightarrow n = 1,1$$

$$\text{XS} = 20\% \Rightarrow n = 1,2 \text{ e assim por diante.}$$

Com a queima do hidrogênio com excesso de ar de combustão a Equação A11 passa a apresentar a seguinte forma:

**QUEIMA ESTEQUIOMÉTRICA DO ENXOFRE:**

(valores das respectivas massas moleculares expressas em gramas)

Assim, recalculando nas mesmas proporções mássicas da Equação A13, obtêm-se:



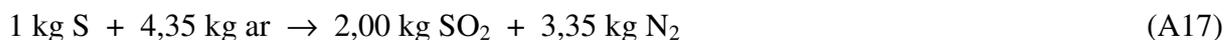
Com ar atmosférico seco, considerando a composição mássica do ar para fins práticos como sendo 23% de oxigênio e 77% de nitrogênio:



Ar estequiométrico de combustão:

$$(4,35 \text{ kg ar / kg H}_2) / (1,29 \text{ kg ar / Nm}^3 \text{ ar}) = 3,37 \text{ Nm}^3 \text{ ar / kg H}_2 \quad (\text{A16})$$

Produtos da combustão estequiométrica:



QUEIMA DO ENXOFRE COM EXCESSO DE AR DE COMBUSTÃO:

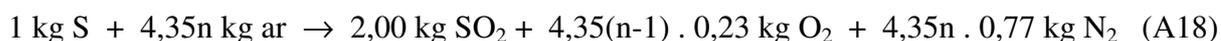
(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)

Seja o excesso de ar de combustão (XS) representado pelo fator “n”, onde:

$$\text{XS} = 10\% \Rightarrow n = 1,1$$

$$\text{XS} = 20\% \Rightarrow n = 1,2 \text{ e assim por diante.}$$

Com a queima do enxofre com excesso de ar de combustão a Equação A17 passa a apresentar a seguinte forma:



QUEIMA DO ETANOL COM AR ATMOSFÉRICO

TABELA A1 – COMBUSTÃO DE ETANOL COM AR ATMOSFÉRICO

(0,015 kg VAPOR / kg AR SECO)

Gases da combustão	Excesso de ar = 0 % 9,1 kg ar/kg combustível 10,1 kg p.c./kg comb		Excesso de ar = 25 % 11,4 kg ar/kg combustível 12,4 kg p.c./kg comb		Excesso de ar = 50 % 13,6 kg ar/kg combustível 14,6 kg p.c./kg comb	
	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida
CO ₂	15,01	12,00	11,83	9,84	9,76	8,33
H ₂ O	0	20,04	0	16,85	0	14,63
SO ₂	0	0	0	0	0	0
O ₂	0	0	4,43	3,68	7,31	6,24
N ₂	84,99	67,96	83,74	69,63	82,93	70,79

Obs.: p.c. = produtos da combustão

FONTE: VULCANO (2006).

QUEIMA DO ÓLEO DIESEL COM AR ATMOSFÉRICO

TABELA A2 – COMBUSTÃO DE ÓLEO DIESEL COM AR ATMOSFÉRICO

(0,015 kg VAPOR / kg AR SECO)

Gases da combustão	Excesso de ar = 0 %		Excesso de ar = 25 %		Excesso de ar = 50 %	
	14,7 kg ar/kg combustível 15,7 kg p.c./kg comb		18,4 kg ar/kg combustível 19,4 kg p.c./kg comb		22,1 kg ar/kg combustível 23,1 kg p.c./kg comb	
	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida
CO ₂	15,23	13,03	12,01	10,56	9,92	8,87
H ₂ O	0	14,42	0	12,13	0	10,56
SO ₂	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
O ₂	0	0	4,42	3,88	7,30	6,53
N ₂	84,72	72,51	83,53	73,40	82,76	74,01

FONTE: VULCANO (2006).

QUEIMA DO GLP COM AR ATMOSFÉRICO

TABELA A3 – COMBUSTÃO DE GLP COM AR ATMOSFÉRICO

(0,015 kg VAPOR / kg AR SECO)

Gases da combustão	Excesso de ar = 0 %		Excesso de ar = 25 %		Excesso de ar = 50 %	
	15,8 kg ar/kg combustível 16,8 kg p.c./kg comb		19,7 kg ar/kg combustível 20,7 kg p.c./kg comb		23,6 kg ar/kg combustível 24,6 kg p.c./kg comb	
	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida
CO ₂	13,85	11,49	10,88	9,33	8,97	7,86
H ₂ O	0	17,01	0	14,26	0	12,37
SO ₂	0	0	0	0	0	0
O ₂	0	0	4,48	3,84	7,38	6,46
N ₂	86,15	71,49	84,64	72,57	83,66	73,31

FONTE: VULCANO (2006).

QUEIMA DO GÁS NATURAL COM AR ATMOSFÉRICO

TABELA A4 – COMBUSTÃO DE GÁS NATURAL COM AR ATMOSFÉRICO

(0,015 kg VAPOR / kg AR SECO)

Gases da combustão	Excesso de ar = 0 %		Excesso de ar = 25 %		Excesso de ar = 50 %	
	16,9 kg ar/kg combustível 17,9 kg p.c./kg comb		21,1 kg ar/kg combustível 22,1 kg p.c./kg comb		25,3 kg ar/kg combustível 26,3 kg p.c./kg comb	
	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida
CO ₂	11,87	9,46	9,29	7,71	7,63	6,51
H ₂ O	0	20,32	0	16,99	0	14,71
SO ₂	0	0	0	0	0	0
O ₂	0	0	4,55	3,78	7,48	6,38
N ₂	88,13	70,23	86,16	71,52	84,90	72,41

FONTE: VULCANO (2006).

Da análise das TABELAS nº A1, A2, A3 e A4 observa-se o seguinte:

- Por tratar-se de cálculos da combustão teórica não estão indicados produtos da combustão incompleta como monóxido de carbono nem aparecem produtos da reação de oxidação do nitrogênio (NO_x), como ocorrem na combustão real.
- O principal gás constituinte dos produtos da combustão é o nitrogênio oriundo do ar de combustão, estando presente em percentagens elevadas, da ordem de 80%.

ANEXO B

CÁLCULOS DE COMBUSTÃO COM OXIGÊNIO

QUEIMA ESTEQUIOMÉTRICA DO CARBONO

(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)



$$12 \text{ g} + 32 \text{ g} = 44 \text{ g}$$

(valores das respectivas massas moleculares expressas em gramas)

Produto da combustão estequiométrica:



Oxigênio estequiométrico de combustão:

$$(2,67 \text{ kg O}_2 / \text{kg C}) / (1,429 \text{ kg O}_2 / \text{Nm}^3 \text{ O}_2) = 1,87 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 / \text{kg C} \quad (\text{B3})$$

QUEIMA DO CARBONO COM EXCESSO DE OXIGÊNIO DE COMBUSTÃO

(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)

Seja o excesso de oxigênio de combustão (XS) representado pelo fator “m”, onde:

$$\text{XS} = 10\% \Rightarrow m = 1,1$$

$$\text{XS} = 20\% \Rightarrow m = 1,2 \text{ e assim por diante}$$

Com a queima do carbono com excesso de oxigênio, a Equação 5 passa a apresentar a seguinte forma:



QUEIMA ESTEQUIOMÉTRICA DO HIDROGÊNIO

(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)



$$2 \text{ g} + 16 \text{ g} = 18 \text{ g}$$

(valores das respectivas massas moleculares expressas em gramas)

Produtos da combustão estequiométrica:



Oxigênio estequiométrico de combustão:

$$(8 \text{ kg O}_2 / \text{kg H}_2) / (1,429 \text{ kg O}_2 / \text{Nm}^3 \text{ O}_2) = 5,60 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 / \text{kg H} \quad (\text{B7})$$

QUEIMA DO HIDROGÊNIO COM EXCESSO DE OXIGÊNIO DE COMBUSTÃO

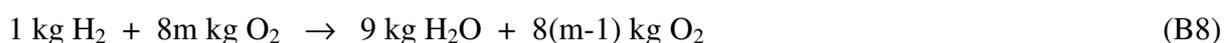
(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)

Seja o excesso de oxigênio de combustão (XS) representado pelo fator “m”, onde:

$$XS = 10\% \Rightarrow m = 1,1$$

$$XS = 20\% \Rightarrow m = 1,2 \text{ e assim por diante}$$

Com a queima do carbono com excesso de oxigênio, a Equação 11 passa a apresentar a seguinte forma:



QUEIMA ESTEQUIOMÉTRICA DO ENXOFRE

(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)



$$32 \text{ g} + 32 \text{ g} = 64 \text{ g}$$

(valores das respectivas massas moleculares expressas em gramas)

Produtos da combustão estequiométrica:



Oxigênio estequiométrico de combustão:

$$(1 \text{ kg O}_2 / \text{kg S}) / (1,429 \text{ kg O}_2 / \text{Nm}^3 \text{ O}_2) = 0,700 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 / \text{kg S} \quad (\text{B11})$$

QUEIMA DO ENXOFRE COM EXCESSO DE OXIGÊNIO DE COMBUSTÃO

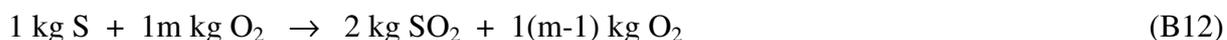
(sem a formação de produtos da combustão incompleta, nem formação de NOx)

Seja o excesso de oxigênio de combustão (XS) representado pelo fator “m”, onde:

$$XS = 10\% \Rightarrow m = 1,1$$

$$XS = 20\% \Rightarrow m = 1,2 \text{ e assim por diante}$$

Com a queima do carbono com excesso de oxigênio, a Equação 17 passa a apresentar a seguinte forma:



As tabelas seguintes apresentam os parâmetros da combustão teórica dos principais combustíveis possíveis de serem utilizados na incineração de RSS.

TABELA B1 – COMBUSTÃO DO ETANOL COM OXIGÊNIO PURO (SECO)

Gases da combustão	Excesso de O ₂ = 0 % 2,1 kg O ₂ /kg combustível 3,1 kg p.c./kg comb		Excesso de O ₂ = 10 % 2,3 kg O ₂ /kg combustível 3,3 kg p.c./kg comb		Excesso de O ₂ = 20 % 2,5 kg O ₂ /kg combustível 3,5 kg p.c./kg comb	
	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida
CO ₂	100,00	40,03	86,97	37,76	76,94	35,74
H ₂ O	0	59,97	0	56,58	0	53,55
SO ₂	0	0	0	0	0	0
O ₂	0	0	13,03	5,66	23,06	10,71
N ₂	0	0	0	0	0	0

Obs.: p.c. = produtos da combustão

FONTE: VULCANO (2006).

TABELA B2 – COMBUSTÃO DO ÓLEO DIESEL COM OXIGÊNIO PURO (SECO)

Gases da combustão	Excesso de O ₂ = 0 % 3,4 kg O ₂ /kg combustível 4,4 kg p.c./kg comb		Excesso de O ₂ = 10 % 3,7 kg O ₂ /kg combustível 4,7 kg p.c./kg comb		Excesso de O ₂ = 20 % 4,0 kg O ₂ /kg combustível 5,0 kg p.c./kg comb	
	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida
CO ₂	99,70	50,53	86,94	47,90	77,08	44,74
H ₂ O	0	48,31	0	44,91	0	41,95
SO ₂	0,30	0,16	0,27	0,15	0,24	0,14
O ₂	0	0	12,80	7,05	22,69	13,17
N ₂	0	0	0	0	0	0

Obs.: p.c. = produtos da combustão

FONTE.: VULCANO (2006).

TABELA B3 – COMBUSTÃO DO GLP COM OXIGÊNIO PURO (SECO)

Gases da combustão	Excesso de O ₂ = 0 % 3,6 kg O ₂ /kg combustível 4,6 kg p.c./kg comb		Excesso de O ₂ = 10 % 4,0 kg O ₂ /kg combustível 5,0 kg p.c./kg comb		Excesso de O ₂ = 20 % 4,3 kg O ₂ /kg combustível 5,3 kg p.c./kg comb	
	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida
CO ₂	100,00	43,64	85,87	40,72	75,24	38,16
H ₂ O	0	56,36	0	52,58	0	49,28
SO ₂	0	0	0	0	0	0
O ₂	0	0	14,13	6,70	24,76	12,56
N ₂	0	0	0	0	0	0

Obs.: p.c. = produtos da combustão

FONTE: VULCANO (2006).

TABELA B4 – COMBUSTÃO DO GÁS NATURAL DA BOLÍVIA COM OXIGÊNIO PURO (SECO)

Gases da combustão	Excesso de O ₂ = 0 % 3,9 kg O ₂ /kg combustível 4,9 kg p.c./kg comb		Excesso de O ₂ = 10 % 4,2 kg O ₂ /kg combustível 5,2 kg p.c./kg comb		Excesso de O ₂ = 20 % 4,6 kg O ₂ /kg combustível 5,6 kg p.c./kg comb	
	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida	% molar base seca	% molar base úmida
CO ₂	98,69	34,06	82,69	31,93	71,15	30,05
H ₂ O	0	65,49	0	61,39	0	57,77
SO ₂	0	0	0	0	0	0
O ₂	0	0	16,21	6,26	27,90	11,78
N ₂	1,31	0,45	1,10	0,43	0,95	0,40

Obs.: p.c. = produtos da combustão

FONTE: VULCANO (2006).

Das TABELAS n° B1, B2, B3 e B4 observa-se o seguinte:

- Por tratar-se de cálculos da combustão teórica não estão indicados produtos da combustão incompleta como monóxido de carbono, como ocorre na combustão real.
- Neste caso de oxi-combustão, o nitrogênio já não é mais o principal gás constituinte dos produtos da combustão; sua presença fica restringida a apenas as situações onde o ar infiltra-se no processo, geralmente junto com a carga, ou então como constituinte do combustível como no caso do gás natural.

ANEXO C

LEGISLAÇÃO FEDERAL COMENTADA

No Brasil, encontramos legislação no assunto nos níveis federal, estadual e municipal. Além disso, existem as normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A legislação vem se desenvolvendo ao longo do tempo, o que é um processo natural de evolução e maturação. Nos últimos três anos tem ocorrido um conflito entre o Ministério do Meio Ambiente e o Ministério da Saúde, onde ambos se julgam competentes para legislar sobre o assunto, culminando em desacordos na legislação com respeito a procedimentos e a destinações dos resíduos.

A revisão bibliográfica da legislação é um processo que exige uma atenção contínua, principalmente devido às últimas resoluções que foram editadas nos anos 2003 e 2004 pela ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária e a Norma Regulamentadora NR nº 32 editada em 2005 pelo Ministério do Trabalho.

A Portaria MINTER (Ministério de Estado do Interior) nº 53, de 01/03/1979, é o documento mais antigo analisado nesta dissertação. Ele versa sobre a problemática da disposição de resíduos sólidos em geral, provenientes de todas as atividades humanas, causando a poluição do solo, do ar e das águas. Entre outras resoluções, os itens que dizem respeito às restrições impostas à incineração em geral começavam a indicar preocupação com a queima indiscriminada de resíduos sólidos em edificações residenciais comerciais e de prestação de serviços, bem como a incineração a céu aberto. Naquela ocasião, a incineração indiscriminada e mal controlada era um significativo vetor de contaminação atmosférica. Quanto aos RSS, esta portaria preconizava a incineração de todos os resíduos sólidos portadores de agentes patogênicos, excluindo esta obrigatoriedade quando tais resíduos fossem esterilizados por radiações ionizantes. A instalação de incineradores para as aplicações indicadas deveria: atender aos padrões de qualidade do ar, de acordo com a Portaria nº 231 de 27/03/1976; possibilitar a cremação de animais de pequeno porte; ser instalados por autoridades municipais para uso público.

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 006, de 19/09/1991, veio desobrigar a incineração ou qualquer outro tratamento que queimasse os RSS e outros resíduos contaminados de portos e aeroportos, excetuando-se os casos previstos pela lei e acordos internacionais. Esta resolução exigia ainda que os órgãos municipais de meio ambiente estabelecessem normas para tratamento especial como condição de licenciamento. Foi ainda estipulado o prazo de 180 (cento e oitenta) dias para que os órgãos federais e estaduais apresentassem ao CONAMA uma proposta com as exigências mínimas para o tratamento de tais resíduos.

Em 05/08/1993, a Resolução CONAMA nº 5 veio complementar a Resolução CONAMA nº 006 de 19/09/1991, definindo procedimentos mínimos para o tratamento e o gerenciamento de resíduos sólidos gerados nos portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários e estabelecimentos prestadores de serviços de saúde. Surgiu assim a exigência do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos como documentação integrante do processo de licenciamento ambiental, abrangendo a geração, segregação, acondicionamento, coleta, armazenagem, transporte, tratamento e disposição final de tais resíduos. Em seu Anexo I, esta resolução apresentava a classificação dos resíduos sólidos em quatro grupos: A, B, C e D. No grupo A estavam os resíduos que apresentavam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente pela presença de agentes biológicos, para os quais era recomendada a esterilização a vapor ou a incineração no Artigo 11, não podendo ser reciclados (§ 3º). Para os resíduos sólidos pertencentes ao grupo B recomendava-se que fossem submetidos a tratamento e disposição final específicos, segundo suas características, de acordo com as exigências do órgão ambiental competente, o que parecia ser algo vago. Já os resíduos radiativos do grupo C estavam afetos às exigências da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, enquanto que os resíduos do grupo D seriam tratados de modo análogo aos resíduos domiciliares.

A Resolução nº 237 do CONAMA, de 19/12/1997, é uma resolução geral que dispõe sobre o licenciamento ambiental, oriunda da necessidade de revisão dos procedimentos e critérios utilizados, incorporando ainda os instrumentos de gestão ambiental. Em seu Anexo 1 são listadas as atividades ou empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental, onde nos Serviços de Utilidade estão incluídas as empresas que lidam com o tratamento e a disposição de resíduos especiais como os RSS.

A Resolução nº 283 do CONAMA, de 12/07/2001, foi elaborada para atualizar e aprimorar os procedimentos preconizados pela Resolução CONAMA nº 5 de 05/08/1993, onde o documento integrante do processo de licenciamento ambiental passou a ser denominado “Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde - PGRSS”.

Esta resolução estabelece as condições mínimas e parâmetros gerais para o tratamento dos resíduos, que “deve ser realizado em sistemas, instalações e equipamentos devidamente licenciados pelos órgãos ambientais, e submetidos a monitoramento periódico de acordo com parâmetros e periodicidade definida no licenciamento ambiental, apoiando quando for o caso a formação de consórcios de geradores de resíduos”.

Em seu Anexo I, a definição dos resíduos foi aprimorada em relação à Resolução anterior.

Os resíduos do Grupo A, definidos no Anexo I da referida Resolução nº 283 como aqueles que apresentam risco devido à presença de agentes biológicos, deverão ter sua disposição final procedida de forma tal que seja assegurada a proteção ao meio ambiente e à saúde pública através de processos de tratamento específicos, de forma que venham a se tornar resíduos comuns do Grupo D. Assim desaparecem as recomendações de que os processos de tratamento seriam a esterilização a vapor ou a incineração, abrindo oficialmente o caminho para o desenvolvimento de novos processos.

Outra novidade introduzida pela Resolução nº 283 foi a devolução de medicamentos vencidos, alterados, interditados, parcialmente utilizados ou impróprios para consumo ao fabricante ou importador, através do distribuidor. Assim, os processos de tratamento específico seriam destinados apenas aos demais resíduos do grupo B.

A Resolução nº 316 do CONAMA, de 29/10/2002, dispõe sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos em geral, apresentando artigos específicos para o tratamento térmico de RSS. Esta resolução era muito necessária e veio preencher uma lacuna existente, estabelecendo os critérios para o licenciamento das unidades e para o tratamento térmico como a documentação, os padrões mínimos operacionais e os prazos para adaptação dos sistemas existentes às novas exigências. Quanto aos padrões de operação com RSS, foram estabelecidas temperatura mínima e tempo de residência em cada câmara, além padrões para os limites de emissão e critérios para intertravamento do sistema para interromper automaticamente a alimentação dos RSS, além da descrição detalhada do Plano de Teste de Queima (PTQ) e do Plano de Contingência. Para o objetivo desta dissertação, esta resolução é de vital importância por estabelecer os limites de emissão

para dioxinas e furanos, indicando também seus Fatores de Equivalência de Toxicidade – FTEQ.

A Resolução RDC nº 305 da ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária, de 14/11/2002, trata especificamente das condições que possam vir a causar risco à saúde considerando a ocorrência da encefalopatia espongiforme bovina (EEB) em países europeus e a possível suspeita de sua relação com a ocorrência de casos da variante da Doença de Creutzfeldt-Jakob (vDCJ) em humanos, onde é recomendada a incineração de eventuais materiais com possibilidade de contaminação.

A Resolução RDC nº 33 da ANVISA, de 25/02/2003, dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de RSS, sendo na ocasião o documento mais importante e completo já redigido no assunto. Não cabe tecer mais comentário a respeito pois esta resolução foi revogada em 07/12/2004, sendo substituída pela resolução citada a seguir.

A Resolução RDC nº 306, de 07/12/2004, veio aprimorar, atualizar e complementar os procedimentos contidos na Resolução RDC nº 33, cujo texto foi tomado como base, devido a um processo de harmonização interministerial. Assim, o gerenciamento dos RSS foi regulamentado de comum acordo entre as normas do Ministério do Meio Ambiente (MMA) através do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA e as normas do Ministério da Saúde através da Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. A abrangência deste regulamento são todos os geradores de resíduos de serviços de saúde humana ou animal, laboratórios de análise de produtos relacionados com a saúde, necrotério, funerárias, serviços de medicina legal, drogarias, farmácias e distribuidores de produtos farmacêuticos, estabelecimentos de ensino e pesquisa ligados à saúde, centros de controle de zoonoses, unidades móveis de atendimento à saúde, serviços de acupuntura, tatuagem e similares, além de importadores, produtores e distribuidores de materiais e controles para diagnóstico *in vitro*. O objetivo do gerenciamento dos RSS é a proteção dos trabalhadores, a preservação da saúde pública, dos recursos naturais e do meio ambiente através de um conjunto de procedimentos de gestão com os objetivos de minimizar a produção de resíduos e de garantir sua destinação segura e eficiente. O Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde – PGRSS deve ser elaborado pelo gerador, de acordo com as características dos resíduos, atendendo também às legislações estaduais e municipais. As etapas preconizadas por este regulamento, com relação ao manejo, são: segregação, acondicionamento, identificação, transporte interno,

armazenamento temporário, tratamento, armazenamento externo, coleta e transporte externos e disposição final. Com respeito à incineração, esta técnica está incluída na etapa do tratamento anteriormente indicada, onde o texto admite que possa ser realizada no próprio estabelecimento gerador ou em outro estabelecimento (empresa terceirizada). Os sistemas para tratamento e disposição dos RSS devem ser objetos de licenciamento ambiental de acordo com a Resolução CONAMA nº 237/97 anteriormente referida. No capítulo IV, Responsabilidades, está declarado que compete aos serviços geradores de RSS requerer às empresas prestadoras de serviços terceirizados a apresentação da licença ambiental para o tratamento, no caso incineração, ou disposição final dos RSS e solicitar aos órgãos públicos responsáveis a documentação que ateste a conformidade com os órgãos do meio ambiente. No capítulo VI, Manejo de RSS, são estipulados todos os procedimentos para cada grupo de resíduo agora detalhadamente classificado no Apêndice I da RDC nº 306. O capítulo VII se refere à segurança ocupacional, cujo assunto foi posteriormente regulamentado de uma forma muito mais completa e detalhada através da NR 32, a seguir relacionada.

A Resolução nº 358 do CONAMA, de 29 de abril de 2005, dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos de serviços de saúde além de dar outras providências. Esta Resolução veio aprimorar, atualizar e complementar os procedimentos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 283, de 12 de julho de 2001, objetivando a preservação da saúde pública e da qualidade do meio ambiente. Além da atualização e da complementação, esta Resolução revogou a Resolução nº 283 e a Resolução nº 5 de 5 de agosto de 1993 com respeito ao artigo 1º da desta Resolução (nº 358), o qual define todos serviços relacionados com o atendimento à saúde humana ou animal de uma forma mais ampla e completa.

A Portaria nº 485 do Ministério do Trabalho e Emprego, de 11/11/2005, aprovou o texto da **NR 32 – Segurança e Saúde no Trabalho em Serviços de Saúde**. O objetivo desta Norma Regulamentadora é o estabelecimento das diretrizes básicas para implementar medidas de proteção à saúde e à segurança dos trabalhadores dos serviços de saúde e de atividades relativas à promoção e assistência à saúde. Assim, as orientações singelas preconizadas no Capítulo VII – Segurança Ocupacional da Resolução RDC nº 306 passaram a ser amplamente estudadas, detalhadas e incrementadas na NR 32. Esta norma, apesar de parecer bem estudada e redigida, não faz nenhuma referência explícita aos trabalhadores cujas atividades estejam fora do ambiente prestador de serviços de saúde, como no caso de serviços de incineração

terceirizados. Por extensão de conceito, a NR 32 deveria ser aplicada tanto neste caso como em outros serviços como transporte dos RSS devido aos riscos inerentes.

A Resolução nº 382 do CONAMA, de 26 de dezembro de 2006, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Os limites estão fixados para cada poluente e de acordo com a tipologia de cada fonte, conforme os anexos da Resolução. O Anexo I diz respeito aos processos de geração de calor a partir da combustão externa de óleo combustível, processos esses definidos como aqueles onde os produtos da combustão não entram em contato com o material ou produto processado, não sendo portanto aplicável aos processos de incineração onde o contato é direto. O Anexo II refere-se aos processos de geração de calor a partir da combustão externa de gás natural, onde os produtos da combustão também não entram em contato direto com o material ou produto processado, não sendo também aplicável aos processos de incineração. Os demais anexos dizem respeito a segmentos específicos, a saber: Anexo III, queima de bagaço de cana-de-açúcar; Anexo IV, queima de derivados de madeira; Anexo V, queima de gás em turbinas para geração de energia elétrica; Anexo VI, processos de refino de petróleo; Anexo VII, processos de fabricação de celulose; Anexo VIII, processos de fusão secundária de chumbo; Anexo IX, processos da indústria de alumínio primário; Anexo X, processos de fornos de fusão de vidro; Anexo XI, processos da indústria do cimento Portland; Anexo XII, processos de fabricação de fertilizantes, ácido fosfórico, ácido sulfúrico e ácido nítrico; e, finalmente, Anexo XIII, processos nas indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas, e usinas de pelotização de minério de ferro. Portanto, esta resolução não dispõe sobre os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para processos de incineração, os quais permanecem regulamentados pelo Art. 37 da Resolução nº 316 do CONAMA, de 29/10/2002.

ANEXO D

Relação das Normas da ABNT

- NBR 7500 - Símbolo de Risco e Manuseio para o Transporte e Armazenamento de Material (1994)
- NBR 9190 - Sacos Plásticos para Acondicionamento de Lixo - Classificação
- NBR 9191 - Sacos Plásticos para Acondicionamento de Lixo - Especificação
- NBR 9195 - Sacos Plásticos para Acondicionamento de Lixo - Método de Ensaio
- NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação (1987)
- NBR 10005 - Lixiviação de Resíduos - Procedimento
- NBR 10006 - Solubilização de Resíduos - Procedimento
- NBR 10007 - Amostragem de Resíduos (1987) - Procedimento
- NBR 10664 - Águas - Determinação de Resíduos (Sólidos) - Método Gravimétrico
- NBR 12235 – Armazenamento de resíduos sólidos perigosos – abril de 1992
- NBR 12807 - Resíduos de Serviços de Saúde - Terminologia
- NBR 12808 - Resíduos de Serviços de Saúde - Classificação
- NBR 12809 - Manuseio de Resíduos de Serviços de Saúde - Procedimento
- NBR 12810 - Coleta de Resíduos de Serviços de Saúde - Procedimento
- NBR 13055 - Sacos Plásticos para Acondicionamento de Lixo - Determinação da Capacidade Volumétrica
- NBR 13056 - Filmes Plásticos para Sacos para Acondicionamento de Lixo - Verificação de Transparência
- NBR 13853 – Coletores para resíduos de serviços de saúde perfurantes ou cortantes – Requisitos e métodos de ensaio – maio de 1997
- NBR 14652 – Coletor-transportador rodoviário de resíduos de serviços de saúde – abril 2001
- NBR 14725 – Ficha de informações de segurança de produtos químicos – FISPQ – julho de 2001

ANEXO E

Relação das Normas da CETESB

- L9.213 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação de Fluoretos pelo Método do Eletrodo de Íon Específico (setembro/1995).
- L9.221 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação dos Pontos de Amostragem - Procedimento (julho/1990).
- L9.222 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação da Velocidade e Vazão dos Gases - Método de Ensaio (maio/1992).
- L9.223 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação da Massa Molecular Seca e do Excesso de Ar do Fluxo Gasoso - Método de Ensaio (junho/1992).
- L9.224 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação da Umidade dos Efluentes - Método de Ensaio (agosto/1993).
- L9.225 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação de Material Particulado (março/1995).
- L9.228 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação de Dióxido de Enxofre e de Névoas de Ácido Sulfúrico (junho/1992).
- L9.229 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação de Óxidos de Nitrogênio (outubro/1992).
- L9.231 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação de Cloro Livre e Ácido Clorídrico (maio/1994).
- E16.030 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Calibração dos Equipamentos Utilizados na Amostragem de Efluentes - Método de Ensaio (maio/1991).
- E15011 – Sistema de Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde (fevereiro/1997)
- L5.105 - Água: Determinação de Bário; Método da Espectrofotometria de Absorção Atômica (1989).
- L5.111 - Águas: Determinação de Chumbo; Método da Espectrofotometria de Absorção Atômica (1989).
- L5.116 - Água: Determinação de Cobre; Método da Espectrofotometria de Absorção Atômica (1989).
- L5.134 - Água: Determinação de Mercúrio Total; Método da Espectrofotometria de Absorção Atômica (1989).

- L5.160 - Água: Determinação de Cádmio; Método da Espectrofotometria de Absorção Atômica (1989).
- L5.193 - Água: Determinação de Cromo; Método da Espectrofotometria de Absorção Atômica (1990).

ANEXO F

Relação de Métodos do EPA – Environmental Protection Agency

- Method 23 - Determination of Polychlorinated Dibenzo-p-Dioxins and Polychlorinated Dibenzofurans from Stationary Sources
 - Method 50 - Isokinetic HCl/Cl₂ Emission Sampling Train
 - Method 51 - Midget Impinger HCl/Cl₂ Emission Sampling Train
 - Method 101 - Determination of Particulate and Gaseous Mercury Emissions from Chlor - Alkali Plants - Air Streams
 - Method 101-A - Determination of Particulate Gaseous Mercury Emissions from Sewage Sludge Incinerators.
 - Method 501.2 - The Analysis of Trihalomethanes in Drinking Water by Liquid/Liquid Extraction
 - Method 3050 - Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils
 - Method 7471 - Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique)
- Multi metals - Methodology for the Determination of Metals Emissions in Exhaust Gases from Hazardous Waste Incineration and Similar Combustion Processes.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)