

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Aspectos Técnicos e Ambientais do Uso do
Carvão Mineral em Caldeiras**

Autor: **Rogério Corá**

Orientador: **Prof. Dr. Rogério José da Silva**

Itajubá, Fevereiro de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aspectos Técnicos e Ambientais do Uso do Carvão Mineral em Caldeiras

Autor: **Rogério Corá**

Orientador: **Prof. Dr. Rogério José da Silva**

Curso: **Mestrado em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Conversão de Energia**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Fevereiro de 2006

M.G. – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aspectos Técnicos e Ambientais do Uso do Carvão Mineral em Caldeiras

Autor: **Rogério Corá**

Orientador: **Prof. Dr. Rogério José da Silva**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri – FEG/UNESP

Prof. Dr. Sebastião Varella – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Genésio José Menon – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Rogério José da Silva – IEM/UNIFEI (Orientador)

Resumo

CORÁ, R. (2005), *Aspectos Técnicos e Ambientais do Uso do Carvão Mineral em Caldeiras*, Itajubá, 130p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Apesar dos impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis, o carvão mineral tem o seu uso previsto para estender-se por mais de 200 anos, pois apresenta as maiores reservas mundiais, sendo responsável por cerca de 40% da energia elétrica gerada mundialmente. Essa realidade, juntamente com outros aspectos econômicos e ambientais, fez com que muitos países, nas últimas décadas, induzissem o desenvolvimento de tecnologias que possam tornar o seu uso mais eficiente e limpo. O presente trabalho tem a finalidade de descrever as principais tecnologias para combustão do carvão e para o controle dos principais poluentes gerados pela mesma, as quais fazem parte do programa denominado de **Tecnologia do Carvão Limpo (CCT)**, desenvolvido e aplicado pelos países que mais utilizam o carvão como combustível. Esta pesquisa busca a obtenção de conclusões sobre as tecnologias usadas atualmente, e também sobre tecnologias em estágios de pesquisa e desenvolvimento. No final deste trabalho é apresentado um exemplo de cálculo para comprovar a eficiência de uma das tecnologias com relação à emissão de poluentes.

Palavras-chave

Carvão Limpo, Controle de poluentes, Tecnologias de Combustão, Baixas Emissões, Modelagem da combustão.

Abstract

CORÁ, R. (2005), *Technical and Environmental Aspects of the Use of Mineral Coal in Boilers*, Itajubá, 130p. MSc. Dissertation - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 130p.

In spite of the environmental impacts caused by the use of fossil fuels, the mineral coal has its use predicted to extend for more than 200 years, because it presents the largest world reservations, being responsible for about 40% of the electric power globally generated. This reality, allied with other economic and environmental aspects, have been taking the effort of many countries in the last decades in the sense of development of technologies in order to achiev more efficient and cleaner use. The present work has the purpose to describe the main technologies for combustion of the coal and their control of the main their generated pollutants, which takes part of the denominated of Clean Coal Technology program (CCT) developed and applied in the countries that uses coal as their main fuel. This research has its fover in obtaining the conclusions about the technologies used nowadays, and also on technologies in the ones under and development. A calculation example is shown the end of this work aiming to demonstrate the efficiency at one of these technologies regarding the emission of pollutant.

Keywords

Clean Coal, Pollutants Control, Combustion Technologies, Low Emissions, Modeling of Combustion.

Sumário

SUMÁRIO	I
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VI
SIMBOLOGIA	VII
LETRAS LATINAS	VII
LETRAS GREGAS	IX
SUBSCRITOS	IX
ABREVIATURAS	X
SIGLAS	XI
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação do Trabalho -----	4
1.2 Objetivos do Trabalho -----	5
1.3 Organização do Trabalho -----	5
CAPÍTULO 2	8
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Origem do Carvão -----	8
2.2 Produção de Carvão no Mundo -----	10
2.3 Comércio de Carvão no Mundo -----	13
2.4 Preço do Carvão no Mundo -----	16
2.5 Demanda de Carvão no Mundo -----	18
CAPÍTULO 3	22
A TECNOLOGIA DO CARVÃO LIMPO	22
3.1 Controles Avançados de Óxido de Nitrogênio -----	24

3.2 Controles de Mercúrio -----	26
3.3 Controle de Particulados -----	28
3.4 Utilização dos sub-produtos da Combustão -----	29
3.5 O Gerenciamento da Água -----	30
3.6 Combustão -----	33
3.7 Pós-combustão -----	34
3.8 Conversão -----	35
CAPÍTULO 4 _____	37
TECNOLOGIAS PARA A COMBUSTÃO DO CARVÃO _____	37
4.1 Combustão do Carvão Pulverizado -----	38
4.2 A Combustão em Leito Fluidizado -----	41
4.3 A Gaseificação do Carvão -----	44
CAPÍTULO 5 _____	47
TECNOLOGIAS PARA CONTROLE DE POLUENTES _____	47
5.1 O Controle de Óxido de Nitrogênio -----	47
5.1.1 Queimadores de Baixo NO _x -----	48
5.1.2 A Combustão Estagiada -----	54
5.1.3 A Combustão Secundária -----	56
5.1.4 A Recirculação dos Gases -----	57
5.1.5 A Redução Catalítica Seletiva -----	57
5.1.6 A Redução Catalítica não Seletiva -----	59
5.2 O Controle de Óxido de Enxofre -----	60
5.2.1 Os Lavadores Úmidos (Wet Scrubbing ou wet FDG) -----	61
5.2.2 Os Lavadores Seco (dry scrubbing) -----	62
5.2.3 A Injeção de Sorvente -----	63
5.3 O Controle de Particulados -----	65
5.3.1 Os Ciclones -----	65
5.3.2 Os Precipitadores Eletrostáticos (EPS) -----	66
5.3.3 Os Filtros de Mangas -----	69
5.4 O Controle de Mercúrio -----	70
5.4.1 O Controle Pelos Equipamentos Existentes -----	71
5.4.2 A Injeção de Carbono Ativado -----	72
CAPÍTULO 6 _____	74

ESTUDO DE CASO: AS CALDEIRAS DE LEITO FLUIDIZADO	74
6.1 Caldeiras de Leito Fluidizado Borbulhante	75
6.2 Caldeiras de Leito Fluidizado Circulante	76
6.3 Descrição das Caldeiras	77
6.4 Fluidização	86
6.5 Combustão e Transferência de Calor	89
6.6 Exemplo de Cálculo	93
6.6.1 Desvolatilização e Combustão de Voláteis	95
6.6.2 A Combustão do Char	98
6.6.3 Formação do NO _x	100
6.6.4 A Absorção de Enxofre	101
6.6.5 Resultados	105
CAPÍTULO 7	109
CONCLUSÕES	109
7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	111
APÊNDICE A	112
DESCRIÇÃO DOS DADOS E CÁLCULO	112
A.1 Descrição dos Dados	112
A.2 Listagem do Cálculo Feito no Mathcad	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

Lista de Figuras

Figura 1: Reservas Mundiais Recuperáveis de Carvão -----	3
Figura 2: Origem do Carvão, com seu Respectivo Uso e Reservas Mundiais -----	9
Figura 3: Produção Mundial de Carvão por Região-----	11
Figura 4: Comércio Mundial de Carvão -----	14
Figura 5: Importação de Carvão pelas Maiores Regiões de Importação-----	14
Figura 6: Demanda Mundial de Carvão por Região-----	19
Figura 7: Suprimento de Energia Prevista por Geradores -----	23
Figura 8: Custo do Programa Tecnologia do Carvão Limpo Original -----	24
Figura 9: Principais Fontes de NO _x -----	25
Figura 10: Emissões Globais de Mercúrio-----	27
Figura 11: Partícula PM _{2,5} Semelhante a um Fio de Cabelo Humano -----	28
Figura 12: Vantagens e Desvantagens do Uso do Carvão-----	31
Figura 13: Trajetória das Tecnologias e de Eficiência Térmica -----	32
Figura 14: Esquema da Combustão do Carvão Pulverizado -----	33
Figura 15: Esquema de Leito Fluidizado -----	34
Figura 16: Esquema de um Lavador de Gás Úmido (Wet Scrubber ou Wet FDG) -----	35
Figura 17: Esquema Simplificado do Processo de Gaseificação -----	36
Figura 18: Típica Caldeira a carvão pulverizado com Combustão Estagiada-----	39
Figura 19: Queimadores e Configuração de Chama-----	40
Figura 20: Esquema de caldeira Atmosférica com Leito Fluidizado Circulante -----	43
Figura 21: Esquema da Combustão em Leito Fluidizado Pressurizado -----	44
Figura 22: Ciclo IGCC Acoplado a um Combustor -----	46
Figura 23: Esquema de Avançado Queimador de Baixo NO _x -----	49
Figura 24: Comparação entre OFA Convencional e Avançado -----	55
Figura 25: Esquema Simplificado do Processo de Combustão Secundária -----	56

Figura 26: Esquema do Processo de SCR -----	58
Figura 27: Processo de SNCR em uma Central Termoelétrica -----	60
Figura 28: Sistema Wet FDG ou Wet Scrubber -----	62
Figura 29: Lavador de Gás por Atomização a Seco -----	63
Figura 30: Esquema de Injeção de Sorvente na Fornalha -----	64
Figura 31: Esquema de Injeção de Sorvente no Duto -----	64
Figura 32: Princípio de Funcionamento do Ciclone -----	66
Figura 33: Esquema de Funcionamento de um Precipitador Eletrostático -----	67
Figura 34: Processo de Captura EPS de Placa e Arame -----	68
Figura 35: Esquema e Princípio de um Filtro de Manga -----	70
Figura 36: Configuração Típica de Equipamento de Controle de Poluição do Ar -----	71
Figura 37: Esquema de Injeção de Carbono Ativado para Controle de Mercúrio -----	73
Figura 38: Fluxo do Processo da Combustão em Leito Fluidizado -----	74
Figura 39: Exemplo de Projeto BFB da Babcock & Wilcox -----	76
Figura 40: Esquemático Fluxo do Processo -----	80
Figura 41: Separadores de Sólidos (a) Primário e (b) Secundário -----	81
Figura 42: Configuração Geral de uma Caldeira da Babcock & Wilcox -----	83
Figura 43: Exemplo de Caldeira Compacta Usada na Polônia -----	85
Figura 44: Principais Fases de Fluidização -----	86
Figura 45: Movimento das Partículas Dentro de um Leito Fluidizado -----	88
Figura 46: Seqüência de Eventos de Combustão de uma Partícula de Carvão -----	90
Figura 47: Diferentes Modelos de Mecanismos de Combustão do Carbono -----	92
Figura 48: Comportamento das Emissões de NO _x com a Temperatura -----	106
Figura 49: Influência da Razão de ar Primário para Combustível nas Emissões de NO _x ---	107
Figura 50: Eficiência de Remoção de SO ₂ -----	108
Figura 51: Conversão do CaO com a Temperatura -----	108
Figura 52: Configuração da Caldeira de onde Foram Obtidos os Dados -----	113

Lista de Tabelas

Tabela 1: Reservas Brasileiras de Carvão -----	3
Tabela 2: Produção Mundial de Carvão por Países (Milhões de Toneladas Curtas)-----	12
Tabela 3: Projeções de Produção de Carvão no Brasil (mil tep)-----	12
Tabela 4: Principais Importadores Mundiais de Carvão (Mt)-----	15
Tabela 5: Principais Exportadores Mundiais de Carvão Sólido (Mt) -----	16
Tabela 6: Unidades de valores de Importação (CIF) do Carvão para Vapor-----	17
Tabela 7: Unidades de valores de Exportação (FOB/FAS) do Carvão para Vapor(US\$/t) ---	17
Tabela 8: Unidades de valores de Importação (CIF) para o Carvão de Coking (\$/t)-----	18
Tabela 9: Unidades de valores de Exportação (FOB/FAS) para o Carvão de Coking (\$/t) ---	18
Tabela 10: Demanda Mundial de Carvão por Países (Milhões de toneladas curtas)-----	21
Tabela 11: Análise dos Carvões da Índia -----	79
Tabela 12: Dados Utilizados para o Modelo -----	105
Tabela 13: Resultados para a combustão do char-----	106

Simbologia

Letras Latinas

A	Área da seção transversal do leito	m^2
Arq	Número de Arquimedes	-
a	Coefficiente do CO_2 na equação de combustão	kmol/s
b	Coefficiente do H_2O na equação de combustão	kmol/s
c	Coefficiente do SO_2 na equação de combustão	kmol/s
d	Diâmetro	m
C_0	Concentração de SO_2 na região densa da caldeira	kmol/ m^3
C_{CaCO_3}	Concentração de $CaCO_3$	kmol/s
C_{Vol}	Fração em massa de carbono na massa de voláteis	-
C_{Char}	Fração em massa de carbono na massa de char	-
Ca/S	Razão de cálcio para enxofre	-
CD	Coefficiente de resistência	-
$C_p(T)_i$	Calor específico do componente i	
E	Coefficiente do N_2 da equação de combustão	kmol/s
G_ϕ	Momento angular	kg m^2/s^2
G_x	Momento axial	kg m/s^2
g	Aceleração da gravidade	
hf_i	Entalpia de formação do componente i	kJ/kg
H	Altura expandida do leito fluidizado	m
H_T	Altura total da caldeira	m
H_d	Altura da região densa da caldeira	m

K_{eq}	Constante de equilíbrio para a reação de calcinação	-
M_i	Massa molecular da espécie i	kg/kmol
M_r	Razão de momento entre o ar primário e o ar secundário	
m_C	Razão de alimentação de carvão	kg/s
m_{Char}	Massa de char	kg/s
mg	Somatório do número de moles dos gases da combustão	kmol/s
mf	Razão de alimentação de calcário	kg/s
mv	Massa de voláteis	kg/s
$NO_{emissão}$	Emissão de óxido de nitrogênio (NO_x)	ppmv
$n_{C_{Char}}$	Número de moles de carbono na massa de char	kmol/s
n_i	Número de moles da espécie i nos reagentes da equação de combust.	kmol/s
P	Pressão atmosférica	Pa
p	Pressão estática	Pa
Q_1 e Q_2	Constantes para o cálculo da razão de consumo de matéria volátil	1/s
R	Constante universal dos gases	kJ/kmol.K
R_{char}	Razão de geração de char	kg/m ³ .s
$R_{carvão}$	Razão de consumo de carvão	kg/m ³ .s
R_{emf}	Número de Reynolds para a mínima condição de fluidização	
R_{G, O_2}	Razão de consumo de oxigênio devido à combustão do char	kg/m ³ .s
$R_{G, CO}$	Razão de produção de CO devido à combustão do char	kg/m ³ .s
R_{G, CO_2}	Razão de produção de CO ₂ devido à combustão do char	kg/m ³ .s
R_0	Razão de geração de SO ₂ na região densa da caldeira	kmol/m ³ .s
R_v	Razão de geração de voláteis	kg/m ³ .s
s	Relação entre as densidades do sólido e do gás	
sf_i	Entropia de formação do componente i	kJ/kmol.K
T	Temperatura	K
U	Componente de velocidade axial	m/s
U_0	Velocidade superficial do gás	m/s
u	Velocidade de partícula	
V_{cal}	Volume da câmara de combustão da caldeira	m ³
V_g	Fluxo volumétrico dos gases	m ³ /s
W	Componente de velocidade tangencial	m/s
w	Coefficiente do O ₂ livre nos gases da equação de combustão.	kmol/s
X_{CaCO_3}	Conversão do CaCO ₃ para CaSO ₄	%

Y_i	Fração em massa da espécie i da composição química do carvão	%
%CaO	Fração em massa de CaO presente no calcário	%

Letras Gregas

α	Quantidade de CO que oxida para CO ₂ na combustão do char	-
ρ_i	Densidade da espécie i	kg/m ³
Φ	fator de mecanismo	-
ϕ_p	Razão ar primário para combustível	-
φ	Calor disponível no carvão	kJ/s
ε	Fração de volume dos sólidos	-
μ	Viscosidade	Kg/m s
θ	Esfericidade dos sólidos	
Δh_i	Varição de entalpia do componente i	kJ/kg
Δs_i	Varição de entropia do componente i	kJ/kg
ΔG_1	Varição da energia livre de Guibbs da reação de calcinação	kJ/kmol
ΔH_{298}	Calor de formação padrão para a reação de calcinação	kJ/kg
ΔH_{real}	Calor de formação padrão adaptado para os dados deste trabalho	kJ/kg
ΔH_{Total}	Calor total a ser fornecido para o processo de calcinação	kJ/kg

Subscritos

0	Valor inicial
A	Cinza
ar	Referente ao ar de combustão
b	Leito
comb	Referente ao combustível
d	Região densa
eq	Condição de equilíbrio da reação da equação 73
g	Gás

G	Consumo, Geração
mf	Mínima condição de fluidização
p	Partícula de carvão ou do char
w	Umidade
S, s	Enxofre, Sólidos
t	terminal
v	Voláteis, Volatilização, Desvolatilização

Abreviaturas

AFBC	Combustão em leito Fluidizado Atmosférico	
BFBC	Combustão em Leito Fluidizado Borbulhante	
CA	Carbono Ativado	
CAP	Carbono Ativado Pulverizado	
CCT	Tecnologia do Carvão Limpo	
CF	Carbono fixo	%
CFBC	Combustão em Leito Fluidizado Circulante	
CWM	Combustores de Resíduos Médicos	
EPS	Precipitador Eletrostático	
FBC	Combustão em Leito Fluidizado	
FF	Filtro de Manga	
ICA	Injeção de Carbono Ativado	
IGCC	Ciclo Combinado com Gaseificação Integrada	
IWM	Incineradores de Resíduos Municipais	
LBN	Queimador de Baixo NO _x	
MV	Matéria volátil	
PCI	Poder calorífico inferior do carvão	kJ/kg
PF	Combustível Pulverizado	
PFBC	Combustão em Leito Fluidizado Pressurizado	
PM	Material Particulado	
PM _{2,5}	Material Particulado com 2,5µm de diâmetro	
PM ₁₀	Material Particulado com 10µm de diâmetro	
SNC	Redução Catalítica Seletiva	

SNCR	Redução Catalítica não Seletiva
tep	Tonelada Equivalente de Petróleo
tce	Tonelada Equivalente de Carvão
ZRI	Zona de recirculação interna

Siglas

AGMCFC	Gaseificação Avançada -Célula Combustível C/carbonato Fundido	
ACEA	Ar da Combustão Estagiada Avançada	
CCPI	Iniciativa de Potência do Carvão Limpo	
CIF	Unidade de Preço do Carvão para Importação	US\$/t
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia	
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos	
EIO	Perspectiva Internacional de Energia	
EPA	Agência de Proteção Ambiental	
EU	União Européia	
FAS	Unidade de Preço do Carvão para Carregamento Livre	US\$/t
FOB	Unidade de Preço do Carvão na Mina	US\$/t
IEA	Agência Internacional de Energia	
IGMCFC	Gaseificação Integrada-Célula Combustível com Carbonato Fundido	
IGHAT	Gaseificação Integrada – Turbina com Ar Úmido	
NETL	Laboratório de Tecnologia e Energia Nacional	
NMA	Associação de Mineração Nacional	
OECD	Organização Econômica para Cooperação e Desenvolvimento	
ACE	Ar da Combustão Estagiada	
PPE	Projetos, pesquisa e Estudos	
UBC	Carbono não Queimado (incombusto)	
UFRJ	Universidade federal do Rio de Janeiro	
UFS	Formadores da Antiga União Soviética	

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A grande necessidade de energia nos sistemas de geração de eletricidade por meio de termoelétricas com o uso de combustíveis fósseis, além do grande consumo em unidades de produção de aço, cimento, papel e celulose, e outros sistemas industriais, bem como o uso de derivados de petróleo nos sistemas de transporte, trouxe como consequência problemas ambientais, tendo efeitos locais em termos de poluição e globais como o caso do efeito estufa.

As nações mais industrializadas, em geral, situam-se no hemisfério norte, em regiões temperadas e frias, e em grande parte delas existem reservas de combustíveis fósseis, como o carvão mineral e o petróleo, e por isso, basearam seus projetos de desenvolvimento no uso intensivo desses combustíveis. O predomínio tecnológico das nações industrializadas, os custos relativamente baixos do carvão, e que em certo período também ocorreu com o petróleo, e ainda, a forte dependência tecnológica das demais nações em desenvolvimento, impuseram ao mundo o uso generalizado de combustíveis fósseis.

O carvão mineral, ou simplesmente carvão, é hoje um dos combustíveis mais utilizados nos diferentes países como fonte de calor, principalmente na geração de vapor para geração de potência ou para o uso em processos industriais. Ele tem sido usado pela humanidade durante séculos, e por isso, com o desenvolvimento de novas tecnologias, o seu uso pode ser expandido, com a definição dos melhores usos para cada tipo definido de carvão, aproveitando de forma mais adequada cada composição em particular. Tem-se ainda que o

carvão é um combustível de grande uso, porém sofre influências, em seu uso, da sua composição química e posição geográfica da extração, a qual interfere nos custos de transporte e, portanto, interfere no mercado global de fornecimento deste combustível. O carvão é empregado em escala planetária como uma das principais fontes de calor, na geração de energia elétrica, e empregado como combustível na produção de diversos produtos industriais, sendo, portanto, fundamental nos dias de hoje na economia mundial.

A grande dependência do uso do carvão como fonte de energia em muitos países industrializados possibilitou o conhecimento dos problemas com relação ao uso deste combustível para a qualidade ambiental e saúde humana. O domínio desses conhecimentos levou ao desenvolvimento de muitas tecnologias para o uso do carvão, sendo algumas já consagradas e outras em estágios de demonstração.

O esforço conjunto de governos e setor privado através de grandes investimentos em programas de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para a combustão e para o controle de poluentes resultou em sistemas de combustão com baixas emissões, apesar dos perigosos poluentes gerados. Existe uma variedade muito grande de tecnologias para a combustão do carvão e também para o controle dos poluentes gerados pela mesma, sendo os principais os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os óxidos de enxofre (SO_x). Cada uma dessas tecnologias é mais ou menos adequada para cada tipo de situação, pois a escolha de uma ou outra varia de acordo com o tipo de carvão e quantidade de poluentes. Em se tratando da geração de vapor, as características do carvão interferem no tipo construtivo da caldeira a ser utilizada, considerando o tipo de fornalha ou câmara de combustão e suas dimensões, o arranjo dos tubos internos, dos sistemas de tratamentos dos poluentes gerados e os tipos de sorventes utilizados.

Quando se fala em reservas mundiais de carvão pode-se dizer que, dentre todos os combustíveis fósseis, este é o que apresenta as maiores reservas mundiais. Por exemplo, nos Estados Unidos estão concentradas grandes reservas de carvão que representam cerca de 25% das reservas mundiais (U.S Department of Energy, 2004). Com o uso da tecnologia atual de exploração de minas, estima-se que há mais de um trilhão de toneladas de carvão de reservas mundiais economicamente acessíveis, sendo que estas estão geograficamente espalhadas por centenas de países em todos os continentes.

Apesar das reservas estarem amplamente distribuídas, 60% das reservas mundiais estão localizadas em três países: Estados Unidos (25%), países formadores da União Soviética (23%) e China (12%). Um adicional de 29% é distribuído entre outros quatro países, a saber: Austrália, Índia, Alemanha e África do Sul (IEA/EIO, 2004). A Figura 1 mostra as principais reservas mundiais de carvão.

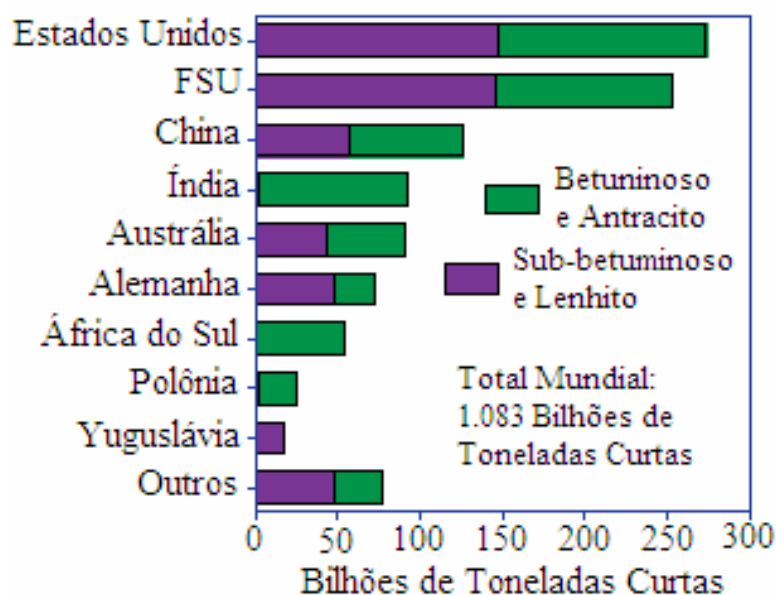


Figura 1: Reservas Mundiais Recuperáveis de Carvão
Fonte: IEA/IEO (2004)

O Brasil possui reservas de combustíveis fósseis não-renováveis, nas quais o carvão mineral representa 50% do total. As reservas de carvão mineral no Brasil em termos energéticos são cinco vezes maiores que as reservas de petróleo conhecidas no país (comparação em tep). As jazidas de carvão situam-se nos estados do Paraná (0,32%), Santa Catarina (10,41%) e principalmente no Rio Grande do Sul (89,25%). O Brasil, além de contar com reservas de carvão siderúrgico em Santa Catarina, possui grandes reservas de carvão metalúrgico (carvão de coking) no Rio grande do Sul (Gomes, 2003). A Tabela 1 apresenta as reservas brasileiras de carvão.

Tabela 1: Reservas Brasileiras de Carvão

Localização	Reservas (Milhões de Toneladas)	%
Rio Grande do Sul	28,81	89,0
Santa Catarina	3,36	10,5
Paraná	0,16	0,5
Total no Brasil	32,33	100

Fonte: Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (2004).

Considerando a importância estratégica e o volume das reservas conhecidas de carvão, o estudo de seu uso em condições adequadas do ponto de vista ambiental, demonstra a necessidade de se desenvolver tecnologias limpas e à minimização dos impactos ambientais decorrentes da utilização como combustível em diversos setores da economia mundial.

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O carvão mineral é um combustível fóssil com grande potencial impactante, seja no processo de extração em minas abertas ou subterrâneas, na queima, com a conseqüente emissão de gases poluentes e materiais particulados, ou ainda pelo destino de suas cinzas e resíduos do tratamento de gases. Considerando o atual nível de utilização, as reservas mundiais atuais possibilitam o seu uso para além de 200 anos. O contínuo aumento do uso do carvão para várias finalidades (principalmente para geração de energia) levou ao desenvolvimento de tecnologias e de pesquisas para o melhor uso deste combustível, principalmente em função da pressão exercida pelas legislações ambientais quanto aos padrões de emissão de poluentes permitidos.

O desenvolvimento de tecnologias que possam ser adaptadas em caldeiras existentes tornando possível a recuperação das caldeiras possibilita uma redução nos custos para manter o funcionamento da instalação. Dentre as tecnologias que possibilitam o controle dos poluentes dentro da própria câmara de combustão estão, por exemplo, os controles nas caldeiras de leito fluidizado, nos quais não existe a necessidade de outros sistemas de controles externos. Tais sistemas estão sendo utilizados em escala crescente em diversos países desenvolvidos devido a questões econômicas e questões ambientais.

No caso do Brasil, o incentivo ao uso do carvão nacional enfrenta muitas críticas, principalmente por parte de ambientalistas, sendo que os principais argumentos usados são a geração de poluentes e o custo não competitivo com outros combustíveis. Mesmo não sendo um carvão de boa qualidade, as reservas deste combustível no Brasil permitem estimar que seria possível a geração de 15 GW de energia elétrica por um período de aproximadamente 100 anos (Instituto de Desenvolvimento Estratégico do Setor Energético, 2005). Os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina detêm a maior parte destas reservas, sendo que o

Rio Grande do Sul apresenta considerável reserva de carvão metalúrgico (carvão de coking) com qualidade superior ao carvão siderúrgico de Santa Catarina.

Finalmente, pode-se considerar que a importância do carvão mineral para o mundo é uma realidade que não pode ser ignorada. O Brasil, para aumentar a sua oferta de energia terá que aumentar a participação do seu carvão na matriz energética, sendo para isso fundamental o conhecimento de tecnologias que possibilitem geração de energia segura com conseqüências ambientais mínimas.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Neste trabalho pretende-se apresentar um estudo sobre os principais aspectos que envolvem o uso do carvão mineral no mundo. Em vista da complexidade do assunto, pretende-se descrever as principais e mais avançadas tecnologias relativas à combustão e também ao controle de poluentes como, por exemplo, NO_x , SO_x e MP, em sistemas de geração de vapor. Também é apresentado um exemplo de cálculo para demonstrar a grande habilidade com relação à captura e emissão de poluentes de tecnologias já consagradas. Como principal objetivo pretende-se dar uma visão geral do uso do carvão mineral em sistemas térmicos de geração de vapor, buscando ainda a obtenção de conclusões sobre as tecnologias em desenvolvimento e as tecnologias de futuro.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 7 capítulos, sendo que no Capítulo 1 é feita uma breve introdução, onde são definidos a motivação e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica em que se procura dar uma visão geral na questão do carvão mineral no mundo. Neste capítulo são discutidas as teorias sobre as origens dos diversos tipos de carvão e suas características básicas. São apresentados os dados relativos à produção de carvão nos diferentes países. Os dados relativos ao mercado mundial de carvão também são apresentados, relacionando os principais países exportadores e

importadores deste combustível. Discutem-se ainda os preços deste energético nos principais mercados. Os dados relativos à demanda de carvão nas diversas regiões também são apresentados, além das tendências de uso futuro, onde verificam-se possibilidades de aumento no consumo na América do Norte e na Ásia, e diminuição do consumo em alguns países da Europa, com o aumento do uso do gás natural.

No Capítulo 3 são descritos os conceitos relacionados ao programa da Tecnologia do Carvão Limpo (CCT), juntamente com um esclarecimento dos principais aspectos que fazem parte deste programa. Os principais tópicos deste programa são: controles avançados de óxidos de nitrogênio (NO_x); o controle de mercúrio (Hg); o controle de material particulado (PM); a utilização dos sub-produtos da combustão e o gerenciamento da água. Também é apresentada uma breve definição das tecnologias para o uso do carvão segundo as três principais categorias, sendo elas: a combustão, a pós-combustão e a conversão. Na combustão discutem-se as tecnologias para a queima do carvão em caldeiras. Na pós-combustão discutem-se as tecnologias para o tratamento dos gases após a combustão, seja ainda na caldeira ou nos sistemas de tratamento de gases e material particulado. Na conversão discutem-se as tecnologias de conversão do carvão em combustíveis líquidos ou gasosos (gaseificação).

No Capítulo 4 descrevem-se as principais tecnologias para a combustão do carvão utilizadas atualmente, entre elas a combustão do carvão pulverizado, a combustão em leito fluidizado e a gaseificação. Neste capítulo é apresentada uma descrição sobre estas tecnologias principalmente com relação à forma de introdução do combustível, do arranjo construtivo da caldeira, segundo a posição dos queimadores, no caso do carvão pulverizado. No caso da tecnologia de combustão em caldeiras de leito fluidizado são descritos aspectos com relação às vantagens desta tecnologia, sendo apresentadas as principais configurações em que se apresentam tais sistemas, sendo as mesmas definidas com base em dois critérios básicos, sendo eles a pressão de operação e a velocidade de fluidização. No processo de gaseificação, embora seja um processo ainda com poucas instalações em funcionamento, discute-se a grande eficiência verificada nesta tecnologia, na qual o carvão é convertido em outros produtos gasosos que podem ser usados como combustível.

O Capítulo 5 trata sobre as tecnologias para o controle de poluentes gerados pela combustão do carvão. Neste capítulo são descritas as formas de controle dos óxidos de

nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), controle de material particulado (PM) e controle de mercúrio. As tecnologias apresentadas para controle de NO_x na combustão são os queimadores de baixo NO_x , a combustão estagiada, a combustão secundária e a recirculação dos gases. Para o controle de NO_x após a combustão são apresentadas as duas principais tecnologias, sendo elas a redução catalítica seletiva e a redução catalítica não seletiva. Para as tecnologias de controle de SO_x são descritas as principais tecnologias de controle através do tratamento dos gases, sendo estas tecnologias conhecidas como lavadores de gás ou *scrubbers*. Também são descritos alguns processos de injeção de sorvente para controle de SO_x , além do controle do SO_x feito através da combustão em leito fluidizado descrita no Capítulo 4.

Para o controle de material particulado são apresentados os principais equipamentos utilizados, como os ciclones, os precipitadores eletrostáticos e os filtros de manga. Quanto a estes equipamentos são descritos aspectos referentes ao princípio de funcionamento e também alguns fatores que afetam o desempenho e projeto dos mesmos. Para o controle de mercúrio são apresentadas as duas principais formas de controle, ou seja, a primeira feita através dos próprios equipamentos de controle de poluentes existentes na instalação, e a segunda feita através do processo de injeção de carbono ativado pulverizado.

No Capítulo 6 foi feito um estudo de caso sobre as caldeiras de leito fluidizado, comentando aspectos com relação aos tipos de caldeira de leito fluidizado, processo de combustão, transferência de calor etc. Este capítulo apresenta uma descrição sobre os principais fabricantes de caldeiras de leito fluidizado, bem como algumas diferenças de projeto entre eles. Alguns exemplos de configurações de caldeiras utilizadas por alguns países, inclusive apresentando carvões de baixa qualidade, também são descritos. No final deste Capítulo é apresentado um exemplo de cálculo para avaliar a emissão de poluentes com a finalidade de demonstrar a grande vantagem das caldeiras de leito fluidizado quanto a este aspecto.

No Capítulo 7 foram apresentadas as principais conclusões deste trabalho. No Apêndice A foi apresentado uma breve descrição sobre a obtenção dos dados para fazer o cálculo juntamente com a listagem do programa utilizado.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ORIGEM DO CARVÃO

O carvão mineral – ou simplesmente carvão – é um combustível fóssil sólido formado a partir da matéria orgânica de vegetais depositados em bacias sedimentares. Por ação de pressão e temperatura em ambiente sem contato com o ar, em decorrência de soterramento e atividade orogênica, os restos vegetais ao longo do tempo geológico se solidificam, perderam oxigênio e hidrogênio e se enriqueceram em carbono, em um processo denominado carbonificação. Quanto mais intensas a pressão e a temperatura a que a camada de matéria vegetal for submetida, e quanto mais tempo durar o processo, mais alto será o grau de carbonificação atingido, ou *rank*, e maior a qualidade do carvão.

Os diversos estágios de carbonificação, do menor para o maior *grau de carbonificação*, são dados pelo esquema: turfa → sapropelito → linhito → carvão sub-betuminoso → carvão betuminoso → antracito. O estágio mínimo para a utilização industrial do carvão é o do linhito. Outro índice qualitativo do carvão é o “*grade*”, que mede de forma inversamente proporcional o percentual em massa de matéria mineral incombustível (cinzas) presente na camada carbonífera. Um baixo “*grad*” e significa que o carvão possui um alto percentual de cinzas misturado à matéria carbonosa, conseqüentemente, empobrecendo sua qualidade. Abaixo segue uma breve descrição dos principais tipos de carvão segundo Goodger (2004):

Linhito: o carvão que apresenta ambos, baixo grau de carbonificação e poder calorífico a partir de uma base úmida, livre de matéria mineral. Este carvão está subdividido em 2 grupos: lenhito A com PCI igual ou maior que 14650 kJ/kg (3499 kcal/kg) e menor que 19310 kJ/kg (4612 kcal/kg), e lenhito B com PCI menor que 14650 kJ/kg. Um resumo da classificação dos carvões por grau de carbonificação, juntamente com o seu uso e percentagem de reservas mundiais está ilustrado na Figura 2.

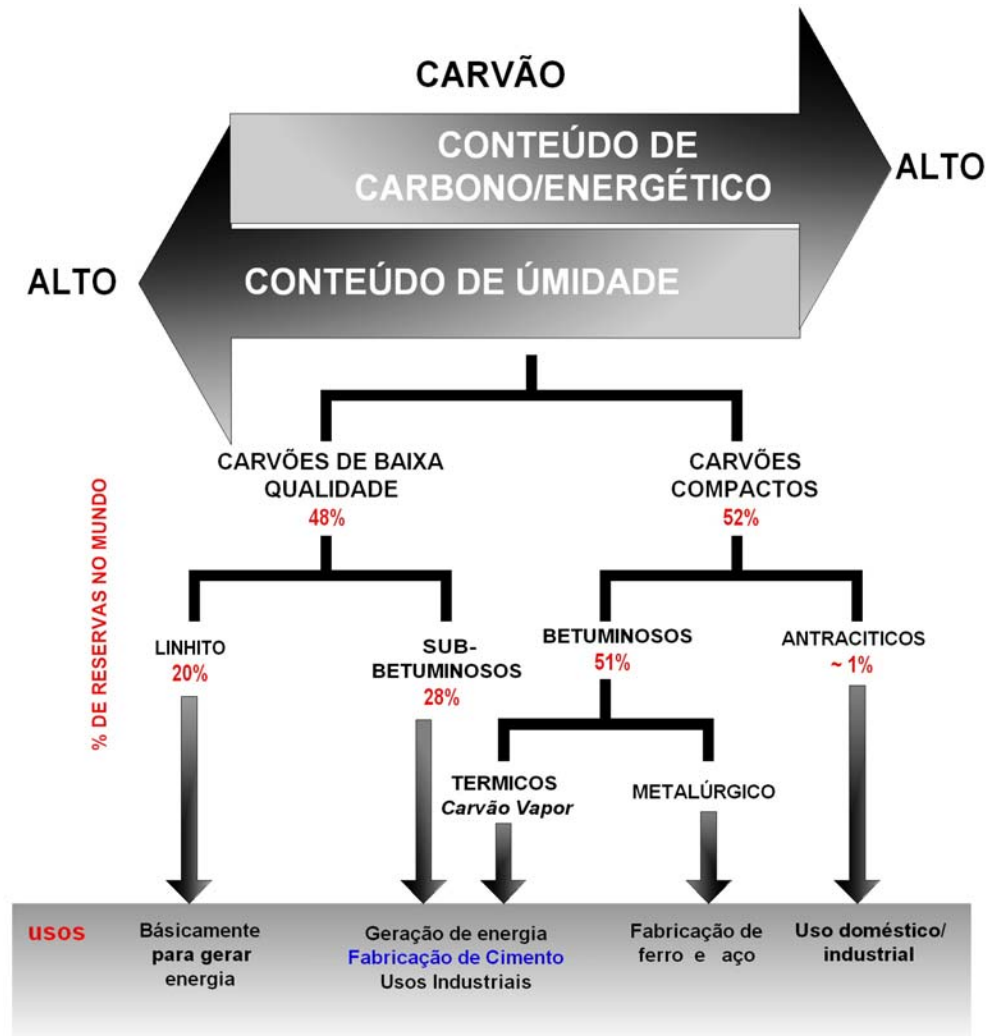


Figura 2: Origem do Carvão, com seu Respectivo Uso e Reservas Mundiais
Fonte: World Coal Institute (2004)

Sub-betuminoso: o carvão que apresenta um grau de carbonificação ligeiramente superior ao apresentado pelo lenhito, a partir de uma base úmida, livre de matéria mineral. Este carvão é classificado em três grupos em uma ordem decrescente de poder calorífico: carvão sub-betuminoso A com PCI igual ou maior que 24420 kJ/kg (5832 kcal/kg) e menor que 26750 kJ/kg (6389 kcal/kg), carvão sub-betuminoso B com PCI igual ou maior que 22100 kJ/kg

(5278 kcal/kg) e menor que 24420 kJ/kg, e carvão sub-betuminoso C com PCI igual ou maior que 19310 kJ/kg (4612 kcal/kg) e menor que 22100 kJ/kg.

Betuminoso: o carvão que apresenta um alto grau de carbonificação, possuindo menos que 86% de carbono fixo, 14% de matéria volátil em uma base seca, livre de matéria mineral. Esse tipo de carvão está subdividido em cinco grupos de carvão a partir de uma ordem decrescente de poder calorífico e carbono fixo e crescente de matéria volátil: carvão betuminoso de baixo volátil e médio volátil, carvão betuminoso de grande volátil A com PCI igual ou maior que 32570 kJ/kg (7792 kcal/kg), carvão betuminoso de grande volátil B, com PCI igual ou maior que 30240 kJ/kg (7222 kcal/kg) e menor que 32570 kJ/kg (7779 kcal/kg), e carvão betuminoso de grande volátil C com PCI igual ou maior que 26750 kJ/kg (6389 kcal/kg) e menor que 30240 kJ/kg (7222 kcal/kg).

Antracito: o carvão de maior grau de carbonificação, apresentando mais que 86% de carbono fixo e menos que 14% de matéria volátil em uma base seca, livre de matéria mineral. Esse tipo de carvão está subdividido em três grupos em uma ordem decrescente de carbono fixo e conteúdo crescente de matéria volátil : meta-antracito, antracito e semi-antracito.

2.2 PRODUÇÃO DE CARVÃO NO MUNDO

A produção mundial de carvão está projetada para aumentar em todas as regiões, com exceção do Oeste Europeu, Leste Europeu e os países formadores da União Soviética (IEA/IEO, 2004).

A produção de carvão em 2002 teve um aumento de 0,9% do nível de 2001, sendo que em 2001 o aumento foi de 4,6%. Essa variabilidade se deve principalmente a um forte aumento na produção de carvão dos Estados Unidos em 2001 de 6,3% e uma subsequente queda de produção de 3,6% em 2002, e também devido a quedas de produção em 2002 na Rússia, Kaskistão, União Européia (EU), Coréia do Sul, África do Sul e Japão. O aumento da produção de carvão sólido em 2002 é atribuído principalmente à produção na China e Índia, buscando atender a demanda dos seus mercados domésticos. Fortes aumentos na

produção também ocorreram nos maiores países exportadores, incluindo Austrália, Indonésia e Venezuela (International Energy Agency, 2003a).

Em geral, a produção de carvão em 2002 (Betuminoso, Sub-betuminoso e lenhito) é de 0,3% seguindo o aumento de 3,9% de 2001. O aumento na produção de carvão total em 2001 é o mais forte desde 1985, continuando a aumentar em 2002, mantendo o exemplo de aumento estável experimentado desde 1998 com diminuição em 2000. Portanto, em 2002, o aumento é unicamente atribuído para o aumento do suprimento de carvão sólido, pois a produção de carvão lenhito declinou pela primeira vez desde 1999 (International Energy Agency, 2003a). A Figura 3 apresenta a produção mundial de carvão por região, e a Tabela 2 resume os principais produtores mundiais de carvão.

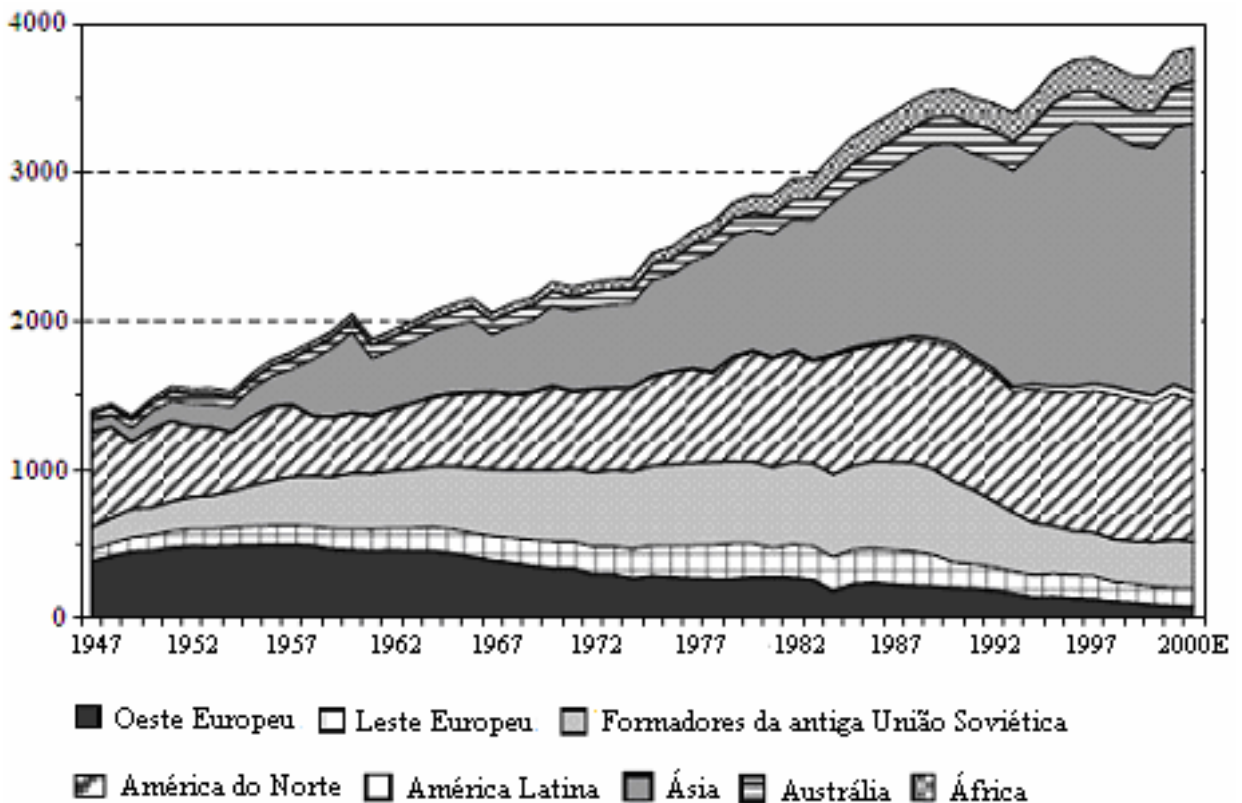


Figura 3: Produção Mundial de Carvão por Região
Fonte: International Energy Agency (2003a)

Tabela 2: Produção Mundial de Carvão por Países (Milhões de Toneladas Curtas^a)

País/Ano	2000	2001	2002	2003
China	1314,43	1458,73	1521,19	1634,97
Estados Unidos	1073,61	1127,69	1094,28	1069,50
Índia	370,02	385,42	401,06	403,12
Austrália	338,19	362,86	376,82	373,36
Rússia	264,91	273,41	261,82	294,03
África do Sul	248,93	250,79	245,77	263,78
Alemanha	226,05	227,11	232,57	229,10
Polônia	179,48	180,28	178,48	177,80
Ucrânia	69,08	67,99	65,57	63,47
Indonésia	84,44	102,01	113,95	132,39
Canadá	76,24	77,55	73,30	68,49
Turquia	69,57	68,27	58,75	53,11
Colômbia	42,04	47,89	48,34	52,50
Venezuela	8,69	8,36	8,12	7,85
Brasil	7,40	6,23	5,67	6,38

Fonte: International Energy Agency (2003b)

O Brasil produz atualmente apenas o carvão energético, com a indústria siderúrgica nacional importando 100% do suas necessidades (Gomes, 2004). Atualmente a maior produção do carvão energético encontra-se em Santa Catarina. A produção do Paraná não tem grande destaque, dada a baixa qualidade do produto. O carvão mineral produzido no Rio Grande Sul (carvão-vapor) é usado basicamente como combustível em caldeiras.

O carvão metalúrgico não é mais extraído no Brasil desde 1991, restando a partir daí apenas uma pequena parcela de carvão coqueificável para fundição. Nos últimos anos, com o aumento dos preços do petróleo somado às recentes instabilidade cambial e crise energética brasileiras, a indústria carbonífera vem se recuperando e atingiu em 2000 a maior produção de carvão energético dos últimos doze anos. O carvão coqueificável para uso siderúrgico, porém, não tem nenhuma perspectiva de voltar a ser produzido (Borba, 2001). A Tabela 3 apresenta uma projeção para a produção de carvão mineral no Brasil para os anos 2005 e 2010 (Bajay e Badanhan, 2004).

Tabela 3: Projeções de Produção de Carvão no Brasil (mil tep)

Ano	Carvão Energético	Carvão metalúrgico
2003		
2005	3047	0
2010	3406	0

Fonte: Bajay e Badanhan (2004)

2.3 COMÉRCIO DE CARVÃO NO MUNDO

A quantidade de carvão comercializada no mercado internacional é pequena comparada com o consumo mundial de carvão. Em 2002 as importações contavam com 13% do consumo total e para 2025 são projetadas para contarem 13% (IEA/IEO, 2004).

O comércio de carvão Betuminoso e Sub-betuminoso apresentou um pequeno aumento de 0,2% em volume em 2002 devido a uma diminuição das exportações entre o Leste Europeu e países formadores da antiga União Soviética. Além do mais, o comércio de carvão metalúrgico (carvão de coking) declinou 4,9% e o comércio de carvão energético (carvão para vapor) aumentou 2,5% (International Energy Agency, 2003a).

Os dois mais significantes mercados estavam nas regiões da Ásia-Pacífico e Europa-Mediterrâneo. Em 2002, 54% e 35% do comércio total de carvão sólido estavam nas regiões da Ásia-Pacífico e Europa-Mediterrâneo, respectivamente. A importação total de carvão na área da Ásia-Pacífico aumentou fortemente em 2002. No mercado da Europa-Mediterrâneo, as importações declinaram em 2002 (International Energy Agency, 2003a).

O comércio internacional por terra representa 7% do comércio internacional total, pois este consiste primeiramente do comércio entre os Estados Unidos e Canadá, e do comércio entre países dentro da Europa Continental e os países formadores da antiga União Soviética. O comércio marítimo de carvão foi de aproximadamente 579 Mt em 2002, das quais 403 Mt foram carvão energético (carvão para vapor) e 176 Mt foram carvão metalúrgico (carvão de coking).

O Japão é o grande importador mundial de carvão e existem previsões de que suas importações serão da ordem de 22% do total das importações mundiais projetadas para 2020. As importações de carvão na Europa, Oriente Médio e África do Sul são projetadas para aumentarem ligeiramente para 2010 e para diminuir em 2020. Devido ao baixo custo do seu carvão, a América do Sul pode aumentar a sua parte na exportação de carvão para a Europa, porém, a África do Sul ainda mantém a sua posição de maior fornecedor de carvão para a Europa (IEA/IEO, 2004). A Figura 4 ilustra uma projeção do comércio mundial de carvão.

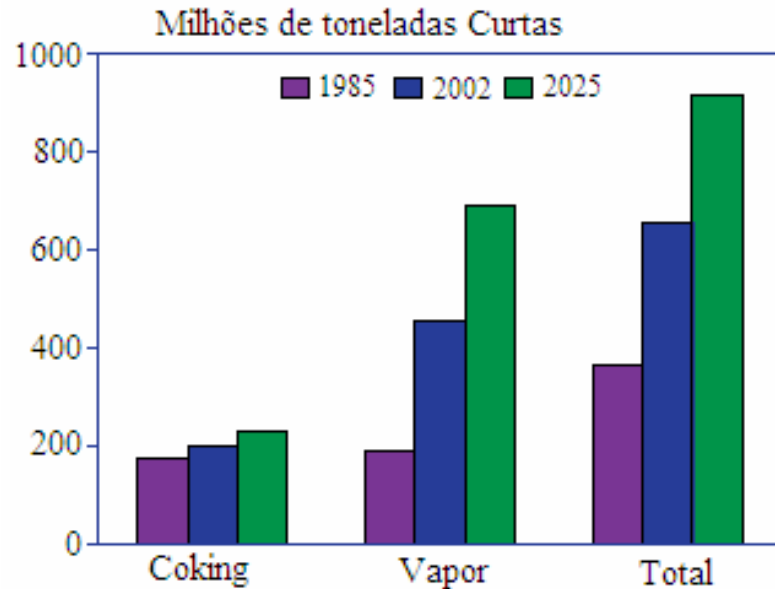


Figura 4: Comércio Mundial de Carvão
Fonte: IEA/IEO (2004)

Para as Américas do Norte e do Sul, as exportações de carvão estão previstas para serem relativamente pequenas comparadas com a Ásia e a Europa. A maior parte desta quantidade adicional vai para Estados Unidos, Brasil e México. As projeções das importações de carvão do Brasil e México apresentam uma tendência de aumento para fins de geração de eletricidade e fabricação de aço (IEA/IEO, 2004). A Figura 5 apresenta as importações de carvão pelas maiores regiões de importação.

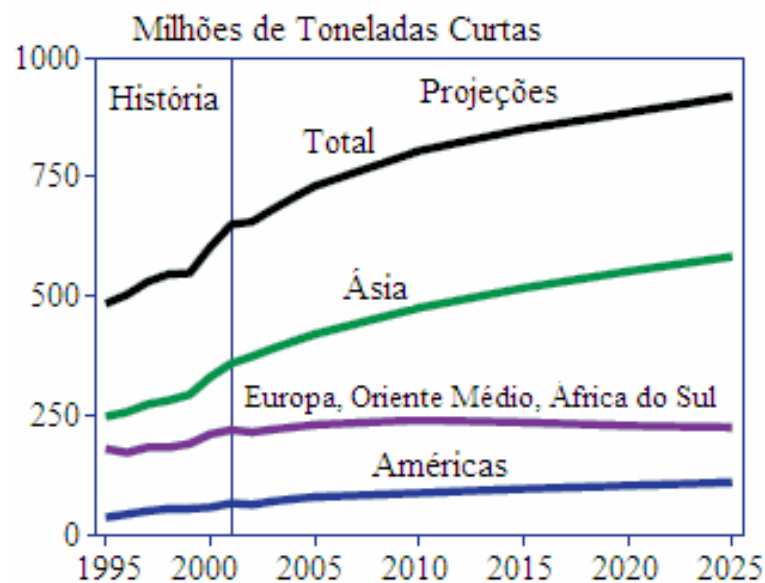


Figura 5: Importação de Carvão pelas Maiores Regiões de Importação
Fonte: IEA/IEO (2004)

A Tabela 4 apresenta uma relação dos maiores países importadores de carvão do mundo.

Tabela 4: Principais Importadores Mundiais de Carvão (Mt)

País/Ano	2000	2001	2002
Japão	149,4	147,6	157,8
Coréia	63,7	60,2	62,0
Chinese Taypei	45,5	47,9	52,2
Alemanha	27,9	45,8	36,2
Reino Unido	23,4	36,2	28,8
Espanha	21,6	20,1	24,5
Holanda	22,3	32,3	22,5
França	19,0	17,9	21,8
Itália	19,0	19,5	19,8
Canadá	18,8	19,4	19,0
Brasil	14,6	15,7	14,2

Fonte: International Energy Agency (2003a)

A Austrália foi o principal exportador de carvão do mundo em 2002. A China foi o segundo exportador no ranking, posição alcançada pela primeira vez em 2001. A Indonésia assume a terceira posição no ranking dos países exportadores à frente da África do Sul (agora na quarta posição). A Rússia também assumiu a quinta posição, posição anteriormente ocupada pelos Estados Unidos. Os maiores países exportadores que apresentaram queda significativa nas exportações foram o Kazaquistão, os Estados Unidos, a Colômbia, a China e o Canadá (International Energy Agency, 2003a).

Dos cinco grandes fornecedores de carvão, a Austrália, a Indonésia e a Rússia apresentaram aumento nas exportações em 2002. China e África do Sul ambas exportaram menos carvão para vapor. A Austrália como o primeiro país exportador de carvão, detem cerca de 21% do mercado total de carvão para vapor, e o segundo exportador, a China, detem cerca de 16% deste mercado. A Austrália detem 56% e o Canadá 12,4% das exportações mundiais de carvão metalúrgico (International Energy Agency, 2003a).

Na América do norte, grande quantidade de carvão é transportado por ferrovias das regiões de produção das montanhas rochosas do Appalachiam e levados por transporte fluvial para o ponto final de consumo. O comércio entre os Estados Unidos e o México é feito principalmente por ferrovia. O comércio internacional de carvão entre os países formadores da União Soviética consiste de carregamentos de carvão por ferrovia do Kazaquistão, Rússia e Ucrânia para outros membros formadores da antiga União Soviética (International Energy Agency, 2003a). A Tabela 5 resume os principais exportadores de carvão sólido do mundo.

Tabela 5: Principais Exportadores Mundiais de Carvão Sólido (Mt)

País/Ano	2000	2001	2002
Austrália	186,8	193,6	197,9
China	55,0	86,6	85,7
Indonésia	58,7	64,0	73,0
África do sul	67,0	68,3	68,7
Estados Unidos	53,0	44,1	34,6
Colômbia	34,1	37,4	34,4
Canadá	32,1	30,6	26,8
Polônia	23,2	23,0	22,6
FSU	31,5	32,6	40,8
Rússia	37,8	37,5	45,1
Kasaquistão e Outros	28,2	28,2	14,7
Outros	32,3	40,6	38,5
Total	573,8	620,8	622,9

Fonte: International Energy Agency (2003a)

Na América do Norte, o comércio ocorre principalmente entre os Estados Unidos e Canadá. Em 2002, os Estados Unidos exportaram aproximadamente 14,3 Mt de carvão para o Canadá e 0,9 Mt para o México. O Canadá exportou aproximadamente 1,9 Mt para os Estados Unidos. O comércio internacional por terra entre os países formadores da antiga União Soviética (FSU) em 2002 teve um declínio de 20,8% em relação a 2001. Grande parte do declínio é relatada pela forte baixa no carregamento de carvão para vapor entre Kasaquistão e Rússia. Carregamentos da Ucrânia e outros países (FSU) também caíram fortemente (International Energy Agency, 2003a).

2.4 PREÇO DO CARVÃO NO MUNDO

Geralmente os preços do carvão mineral são cotados em dólares (US\$). O custo estimado do carvão energético importado pelas duas maiores áreas importadoras (isto é, 15 países da União Européia e Japão) foi estimado pela IEA em US\$36,57/tce em 2002, assim medido pela unidade de valores habituais. O custo médio do carvão para vapor importado no Japão foi de US\$36,95/tce em 2002 (International Energy Agency, 2003a).

Em 2002, devido à queda do preço do carvão, as exportações de países como Austrália, Rússia, China e Indonésia foram favorecidas. Por outro lado, as exportações do Canadá, Estados Unidos e África do Sul apresentaram um custo mais elevado. O custo do carvão para

vapor importado na União Européia apresentou um custo médio de US\$38,65/t. Em 2002, os custos de importação do carvão para vapor declinaram para as importações da Austrália, Estados Unidos, África do Sul, Polônia, Colômbia e Rússia. Os custos aumentaram para importações de carvão para vapor da China e Indonésia (International Energy Agency, 2003a). A Tabela 6 mostra as principais unidades de valores de importação.

Tabela 6: Unidades de valores de Importação (CIF) do Carvão para Vapor

Ano/Local	IEA (US/t)	Japão (US/t)	EU (15) (US/t)
2000	33,47	34,59	34,93
2001	38,67	37,95	42,79
2002	36,57	36,95	38,65

Fonte: International Energy Agency (2003a)

Para exportação as unidades refletem o preço do carvão para o ponto de origem dos países produtores: portanto, o preço inclui o custo de transporte para mover o carvão da mina de produção para o ponto de saída (International Energy Agency, 2003a). A Tabela 7 mostra as principais unidades de valores de exportação.

Tabela 7: Unidades de valores de Exportação (FOB/FAS) do Carvão para Vapor(US\$/t)

Ano/pais	Austrália	Indonésia	Colômbia	África do Sul	Estados Unidos
	FOB	FOB	FOB	FOB	FAS
2000	24,27	22,34	26,99	22,93	31,84
2001	28,71	25,14	31,36	28,24	34,51
2002	28,08	24,32	30,09	26,94	37,40

Fonte: International Energy Agency (2003a)

O sistema de referência de preços usado pelo Japão continua estabelecendo uma faixa de preços entre vendedores da Austrália e Companhias de Energia Japonesas para todas os tipos de carvão. Diferentes preços continuam prevalecendo, igualmente entre os mesmos compradores e vendedores, para diferentes volumes de carvão. Padrões de qualidade são muitas vezes modificados para permitir mudanças de preço em carregamentos específicos. Em 2003 foi estabelecido um preço de referência de US\$26,75/tce em um acordo feito entre vendedores australianos e as centrais de geração térmica japonesas (International Energy Agency, 2003a).

Para o carvão metalúrgico a média de valores para importações em unidade de valores habituais aumentou 2,5% no Japão em 2002 em relação a 2001, pois nos 15 países da União

Europa (EU) o aumento foi de 5,6%. Na Austrália, o aumento em unidades de valores de exportação (FOB) foi de 8,7% em 2002, nos Estados Unidos foi de 9,1% (FAS) e no Canadá foi de 7,7% (FOB), ambos em relação a 2001. Os preços caíram para a Colômbia (4%), Indonésia (3,3%) e África do Sul (7,1%) (International Energy Agency, 2003a).

Em 2003 foi estabelecido um preço entre os fabricantes de aço japoneses e os maiores fornecedores da Austrália e do Canadá, resultando em uma média de preços menores, em cerca de US\$1,90/t ou 4,0% em relação aos preços praticados em 2002 para uma certa faixa do carvão. Os preços para o carvão da China diminuíram 4,4% (International Energy Agency, 2003a). A Tabela 8 e a Tabela 9 mostram as principais unidades de valores de importação e exportação para o carvão de coking.

Tabela 8: Unidades de valores de Importação (CIF) para o Carvão de Coking (\$/t)

	Japão	União Européia (EU)
2000	39,46	47,85
2001	41,13	53,50
2002	42,14	56,50

Fonte: International Energy Agency (2003a)

Tabela 9: Unidades de valores de Exportação (FOB/FAS) para o Carvão de Coking (\$/t)

	Austrália	Estados Unidos	Canada
2000	32,85	42,98	34,01
2001	36,93	45,88	38,57
2002	40,16	50,06	41,54

Fonte: International Energy Agency (2003a)

2.5 DEMANDA DE CARVÃO NO MUNDO

A demanda mundial de carvão sólido em 2002 foi 2,1% acima da demanda de 2001. Em 2002, a OECD foi responsável por quase 41% da demanda de carvão sólido. A demanda de carvão sólido na OECD em 2002 diminuiu 0,8% do nível de 2001. A demanda de carvão da OECD na região da América do Norte declinou 1,3%, devido a uma queda de demanda nos Estados Unidos, onde a demanda caiu 1,2%, e Canadá onde a demanda caiu 4,2%. A demanda de carvão sólido da OECD na região da Ásia-Pacífico aumentou 1,9%. Na região da Europa, a demanda da OECD declinou 1,7% (International Energy Agency, 2003a).

Em países que não fazem parte da OECD, a demanda alcançou em 2002 um aumento de 4,3%. Fora da OECD, a China foi o grande consumidor de carvão do mundo, com demanda de 5,0% de aumento sobre 2001. Outros grandes consumidores de carvão não integrantes da OECD são Índia, África do Sul, Rússia e Ucrânia. Os cinco países, China, Estados Unidos, Índia, Rússia e Japão, respondem pelo consumo de dois terços do carvão. Se uma segunda relação de cinco países for adicionada a esta lista – Alemanha, África do Sul, Austrália, Polônia e Ucrânia, então esse conjunto responde por 81% do carvão consumido. Em 2002, aproximadamente 46,1% da demanda de carvão total verificou-se na OECD, pois a demanda para 2002 apresentou um declínio de 0,6% em relação ao nível de 2001. Convém acrescentar que para os países da Ásia em desenvolvimento, a China e a Índia responderão por aproximadamente 50% do aumento de demanda total de carvão entre 2000 e 2025 (International Energy Agency, 2003a).

Em outros países em desenvolvimento da Ásia a demanda de carvão para geração de eletricidade tende a diminuir segundo previsões de 33% (2001) para 27% (2025) devido ao fato de que estes países possuem grandes reservas de gás natural. Para a Ásia industrializada está previsto que a demanda de carvão aumentará ligeiramente na Austrália, com o Japão importando praticamente todo o carvão para o seu consumo (IEA/IEO, 2004). A Figura 6 apresenta projeções para a demanda de carvão mundial.

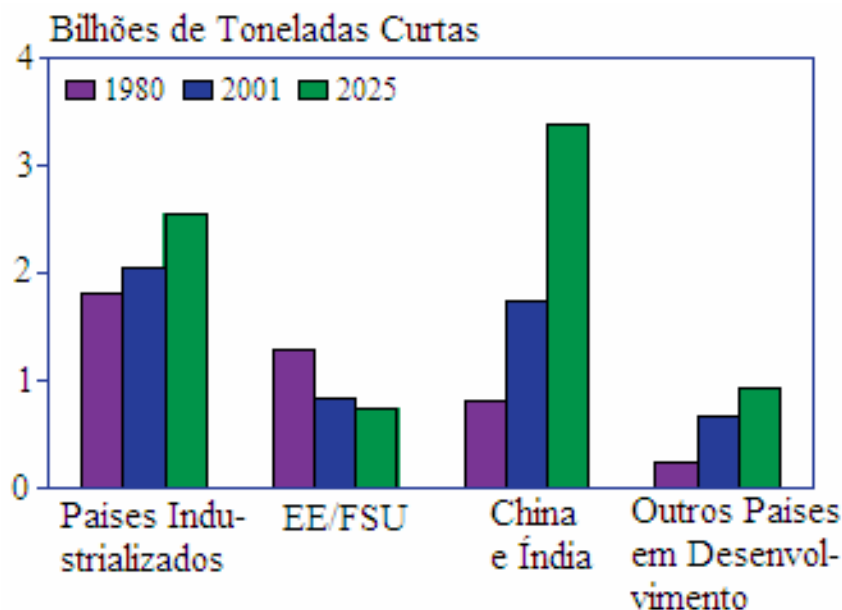


Figura 6: Demanda Mundial de Carvão por Região
Fonte: IEA/IEO (2004)

Nos Estados Unidos, a demanda de carvão em 2002 diminuiu 0,9% em relação ao nível de 2001. O carvão é usado em 50 Estados, com os Estados do Texas, Indiana, Ohio e Pensilvânia representando aproximadamente 30% do consumo de carvão. Cerca de 90% do consumo de carvão nos Estados Unidos é usado para geração de eletricidade, que é o mais importante mercado para o uso do carvão desde a década de 1950. No restante da OECD, na região da América do Norte a demanda de carvão sólido declinou 8,9% no México e permaneceu estável no Canadá para ambos 2001 e 2002 (International Energy Agency, 2003a).

No Oeste Europeu há uma previsão de diminuição na demanda de carvão, devido ao fato de que, nestes países o uso do gás natural em substituição ao carvão tende a crescer. A Alemanha mantém seu consumo de carvão, sendo que mais de 50% da sua eletricidade é gerada pelo carvão, com previsão de se diminuir ligeiramente sua demanda até o ano de 2025. No Leste Europeu, a demanda de carvão também diminuiu segundo uma previsão de 23% em 2001 para 15% em 2010 (em relação a milhões de toneladas). A diminuição da demanda tem como principal motivo o declínio econômico seguido pelo colapso do regime político iniciado em 1989 e a dissolução da União Soviética em 1991. Como fator secundário tem-se o aumento do uso do gás natural, sendo a Polônia e a República Tcheca os dois maiores consumidores de carvão (IEA/IEO, 2004).

Na África do Sul, a demanda de carvão está prevista para aumentar entre 2001 e 2025, principalmente para a geração de eletricidade, atividade na qual a demanda do mesmo deve aumentar em uma média de 2,7% ao ano (IEA/IEO, 2004).

No Oriente Médio, a Turquia e Israel são os principais países consumidores de carvão e, segundo as previsões, os seus consumos tendem a aumentar para os próximos anos. O aumento de demanda se deve principalmente à produção de energia elétrica, sendo que para a Turquia o aumento previsto é de 3 Mt/ano e para Israel de 23 Mt/ano (IEA/IEO, 2004).

Não há previsão de grandes aumentos na demanda de carvão para as Américas do Sul e Central, visto que o gás natural pode vir a suprir a maioria da demanda de energia do futuro. O Brasil, por ocupar o nono lugar na produção de aço do mundo, contribuiu para aproximadamente 65% da demanda de carvão da região em 2001, sendo que o restante ficou

para Colômbia, Chile, Argentina e a menor parte para o Peru (IEA/IEO, 2004). A Tabela 10 resume a demanda mundial de carvão por países.

Tabela 10: Demanda Mundial de Carvão por Países (Milhões de toneladas curtas)

País/Ano	2000	2001	2002	2003
China	1282,29	1356,60	1412,96	1531,09
Estados Unidos	1084,09	1060,15	1066,35	1094,13
Índia	406,07	413,56	430,63	430,62
Alemanha	269,81	278,15	280,12	273,05
Rússia	252,51	241,65	240,17	250,73
África do Sul	176,06	173,52	172,11	187,76
Polônia	158,71	152,00	149,45	152,58
Japão	156,88	166,88	171,92	175,58
Austrália	141,00	140,98	145,25	144,08
Ucrânia	72,64	70,62	68,79	67,17
Turquia	88,67	80,11	72,50	71,02
Grécia	72,41	75,49	76,81	76,04
Canadá	69,62	69,58	68,22	69,43
Brasil	24,04	23,73	22,09	23,88
Chile	5,29	4,16	4,42	4,39
Colômbia	4,51	4,55	4,07	1,87

Fonte: International Energy Agency (2003b)

Capítulo 3

A TECNOLOGIA DO CARVÃO LIMPO

O termo “ **Tecnologia do Carvão Limpo (CCT)** ” pode ser identificado como uma família de inovações tecnológicas que são ambientalmente superiores às tecnologias atualmente usadas. Esse termo descreve uma nova geração de processos industriais de geração de eletricidade e combustíveis derivados do carvão com vistas a aumentar a eficiência dos processos e minimizar os impactos ambientais causados pela combustão do carvão, buscando como resultado final a geração de maior quantidade de energia de cada tonelada de carvão queimado.

O programa está sendo desenvolvido através de parcerias entre governos e setores privados para melhorar as tecnologias de instalações existentes e desenvolver tecnologias avançadas para futuras instalações, sendo que as principais metas são obter equipamentos avançados de controle de poluição e sistemas de geração de potência mais avançados, eficientes e super-limpo (U.S Department of Energy, 2004). Sabendo que existem previsões de que o uso do carvão deverá se manter e inclusive aumentar em algumas regiões, é vital encontrar caminhos para a sua utilização, dentro de novos padrões de exigências tecnológicas e ambientais. A Figura 7 apresenta uma projeção do suprimento de energia mundial pelo conjunto das fontes energéticas e para o carvão.

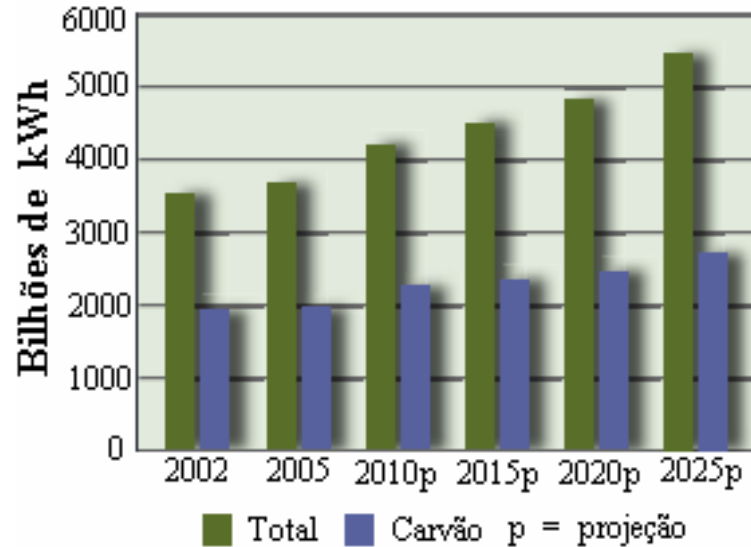


Figura 7: Suprimento de Energia Prevista pelo Conjunto das Fontes Energéticas e pelo Carvão
Fonte: (National Mining Association, 2003)

O programa **Tecnologia do Carvão Limpo** original, o qual desenvolvido em 1986 pelos Estados Unidos, fundamentado na comercialização de processos que auxiliaram a redução de óxido de enxofre e de óxido de nitrogênio demonstrou melhores alternativas em termos ambientais para as caldeiras de carvão pulverizado tradicionais. Novos programas, assim como a Iniciativa de Potência do Carvão Limpo (CCPI), são essenciais no processo para o progresso do programa original (CCT), encontrando soluções para redução de emissões de mercúrio; redução ou eliminação das emissões de dióxido de carbono e aumento da eficiência do combustível. Como uma perspectiva de longo-prazo está previstas pesquisas direcionadas para o desenvolvimento de combustíveis de hidrogênio baseado no carvão, pois a junção desta com tecnologias de captura podem possibilitar grande uso do carvão com baixas emissões (National Mining Association, 2003).

Como um exemplo de metas a serem alcançadas, em fevereiro de 2002 o presidente norte-americano George W. Bush propôs mais redução nas emissões dos principais poluentes emitidos por instalações de potência com caldeira a carvão. Os percentuais de redução previstos para o ano de 2018 são os seguintes: corte de 73% em dióxido de enxofre (SO₂) dos níveis atuais de 11 milhões de toneladas, corte de 67% em óxido de nitrogênio (NO_x) dos níveis atuais de 5 milhões de toneladas e corte de 69% em mercúrio (Hg) dos níveis atuais de 48 toneladas (U.S Department of Energy, 2004). A Figura 8 representa o custo do programa Tecnologia do Carvão Limpo original.

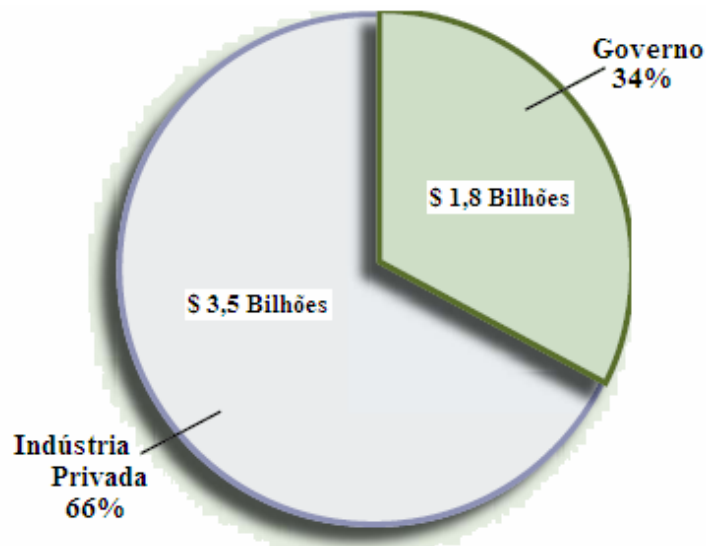


Figura 8: Custo do Programa Tecnologia do Carvão Limpo Original
Fonte: (National Mining Association, 2003)

Esse programa está voltado principalmente para desenvolver conceitos inovadores que possam ser readaptados para os 320.000 MW brutos da existente carga de base da capacidade de geração de potência com caldeira a carvão nos Estados Unidos (U.S Department of Energy, 2004). Os principais tópicos incluídos nas metas deste programa estão descritos abaixo:

3.1 CONTROLES AVANÇADOS DE ÓXIDO DE NITROGÊNIO

Neste tópico pode-se destacar, por exemplo, os queimadores de baixo NO_x e sistemas de queima secundária, que podem prevenir a formação de NO_x no processo de combustão, processos químicos que reduzam o NO_x já formado dos gases de combustores de carvão e combustão com aumento de oxigênio, que desloca uma porção do nitrogênio carregado no ar em um combustor de baixo NO_x (U.S Department of Energy, 2004).

Além da queima de combustíveis fósseis em altas temperaturas em sistemas industriais, existem outras fontes de geração do NO_x . Por exemplo, a gasolina utilizada nos automóveis é a maior fonte de NO_x nos Estados Unidos, pois os sistemas para geração de potência com caldeira a carvão respondem por cerca de 25% das emissões anuais de NO_x (U.S Department of Energy, 2004). A Figura 9 mostra as principais fontes de NO_x .

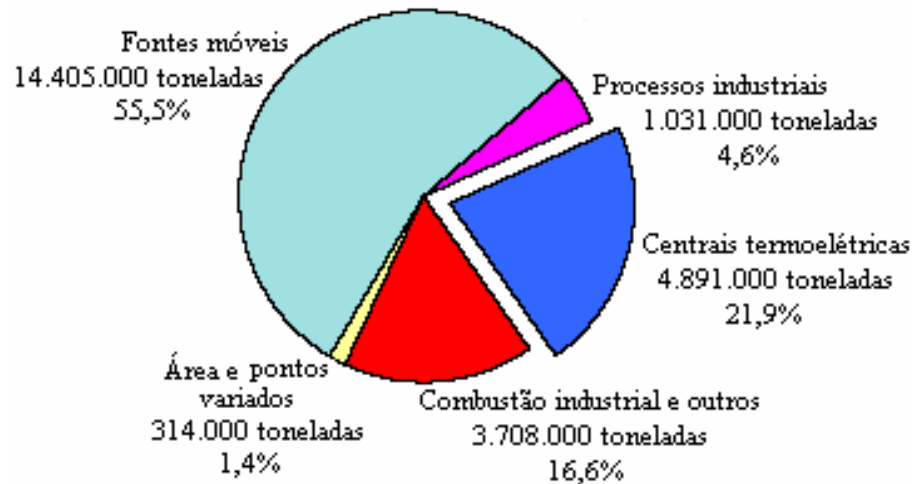


Figura 9: Principais Fontes de NO_x

Fonte: U.S Environmental Protection Agency (2003)

Durante a combustão do carvão, a formação de NO origina-se de três diferentes fontes, a saber: NO térmico, NO rápido e NO combustível. Essas três fontes podem ser distinguidas teoricamente, mas na prática não é possível quantificar a contribuição de cada fonte (Van der Lans et al., 1997).

O NO térmico se forma em temperaturas acima de 1700K pela reação do N₂ com o O₂, ambos provenientes do ar de combustão, pois altas temperaturas são requeridas para quebrar a forte tripla ligação na molécula de nitrogênio. O mecanismo de reações é o seguinte (Van der Lans et al., 1997):



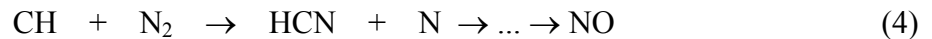
sendo que para chamas ricas em combustível a seguinte reação também é válida:



Os queimadores de baixo NO_x são designados para trabalhar em temperaturas abaixo de 1800K e por isso a contribuição de NO térmico para o total de NO é pequena, embora para temperaturas de pico da chama a formação de NO pode contribuir para o total de NO emitido (Van der Lans et al., 1997).

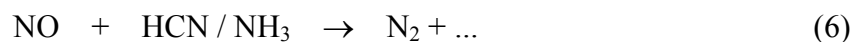
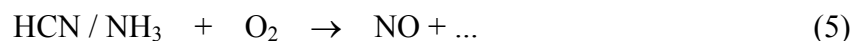
As taxas de formação de NO na combustão de combustíveis fósseis podem exceder as taxas atribuídas à oxidação direta de N₂ através do mecanismo térmico, especialmente em condições ricas de combustíveis. Este NO formado foi chamado de NO rápido, desde que a formação de NO foi confirmada em regiões próximas à região da chama (Fenimore apud José, 2004).

O NO rápido resulta, principalmente, do radical CH, que é uma espécie intermediária que é gerada através de uma reação complexa. O radical CH reage com nitrogênio do ar de combustão formando cianeto de hidrogênio, o qual em reações posteriores é transformado em NO (José, 2004).



A energia de ativação da reação (4) é muito menor do que a reação limitante para o NO térmico da reação (1). Assim, o NO rápido é formado em temperaturas relativamente baixas (em torno de 1000K).

A conversão de nitrogênio quimicamente ligado ao combustível em NO é observado, principalmente, na combustão de carvão, por que o carvão possui no mínimo cerca de 1% em massa de nitrogênio. Os compostos contendo nitrogênio evaporam durante o processo de gaseificação e resultam na formação de NO na fase gasosa. Cianeto de hidrogênio (HCN) é o principal produto quando o nitrogênio está contido em anéis aromáticos, e amônia (NH₃) quando o nitrogênio está contido em aminas. HCN e NH₃ são oxidados a NO, mas também podem ser reduzidos a N₂ através de reações paralelas (José, 2003):



3.2 CONTROLES DE MERCÚRIO

Esse item refere-se a tecnologias que incorporam o seguinte: (1) sorventes e agentes oxidantes que transformam formas gasosas de mercúrio liberadas durante a queima do carvão,

em formas que podem ser capturados pelos filtros de gases e outros equipamentos de remoção de particulados e (2) agentes oxidantes que trabalham externamente a um lavador de gás úmido para capturar mercúrio no sulfato dos sub-produtos. O esforço também inclui o desenvolvimento de maneiras para medir emissões de mercúrio instantaneamente e continuamente de maneira que operadores de plantas podem validar a eficácia das tecnologias de controle (U.S Department of Energy, 2004)

Existem pequenas quantidades de mercúrio no carvão (em ppm) e em outros combustíveis fósseis, e quando este queima, vapor de mercúrio pode ser liberado para a atmosfera, onde pode permanecer por um ano ou mais, expandindo com correntes de ar para vastas regiões do globo. Grandes níveis de concentração de mercúrio podem ter um efeito tóxico no sistema nervoso de seres humanos. O termo “mad hatter” deriva do fato que mercúrio foi usado em curtumes de couro nos séculos passados, e algumas pessoas desenvolveram distúrbios nervosos, a partir da exposição contínua a grandes níveis de mercúrio (U.S Department of Energy, 2004). A Figura 10 apresenta as emissões de mercúrio em um contexto global.

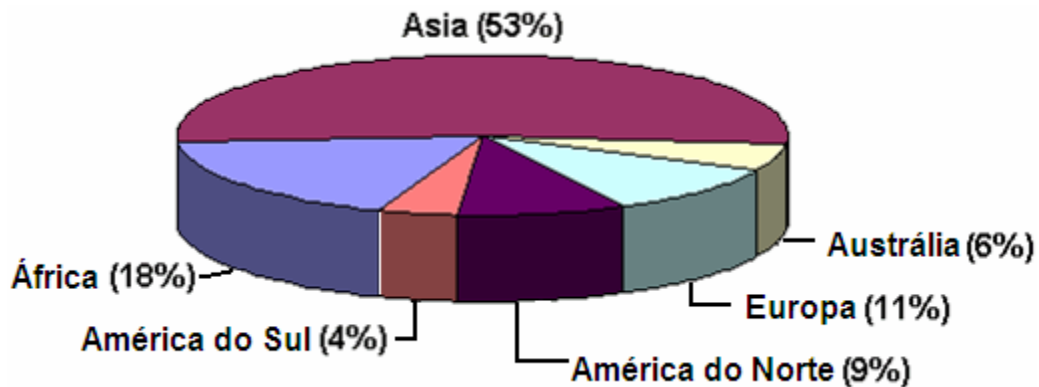


Figura 10: Emissões Globais de Mercúrio
Fonte: U.S Environmental Protection Agency (2004)

A meta a curto-prazo é para que sejam desenvolvidas tecnologias que possam alcançar 50 a 70% de captura de mercúrio, com custos menores em cerca de 75% do que a atual tecnologia de injeção de carvão ativado pulverizado. A longo prazo, a meta é desenvolver tecnologias avançadas que possam alcançar 90% de captura, e tenham custos de 50 a 75% do custo atual das tecnologias hoje empregadas e que podem estar disponíveis a partir de 2010 (U.S Department of Energy, 2004).

3.3 CONTROLE DE PARTICULADOS

Refere-se a controles que podem encontrar padrões de qualidade do ar ambiente para partículas microscópicas chamadas “PM_{2,5}” (partículas com 2,5 μ m de diâmetro). Os departamentos de pesquisa e energia estão desenvolvendo maneiras para melhorar os equipamentos de captura de particulados como os filtros, precipitadores eletrostáticos, ou híbridos de ambos equipamentos, de maneira que eles possam ser efetivos na captura de pequenas partículas (U.S Department of Energy, 2004).

Material particulado (PM) descreve aerossóis de pequenas partículas sólidas, assim como sujeira, solo, névoa, cinzas, tão igualmente como gotículas de líquido que são suspensas na atmosfera. Algumas partículas são grandes ou escuras o suficiente para serem vistas como fuligem ou fumaça. Outras são tão pequenas que podem ser vistas apenas com microscópio eficaz. Material particulado pode ser emitido de chaminés de fábricas e usinas termelétricas, exaustão de veículos, queima de lenha, atividades de construção, agricultura e fontes naturais como os vulcões (U.S Department of Energy, 2004). A Figura 11 representa uma partícula “PM_{2,5}” como um fio de cabelo humano aumentado em 1000 vezes.

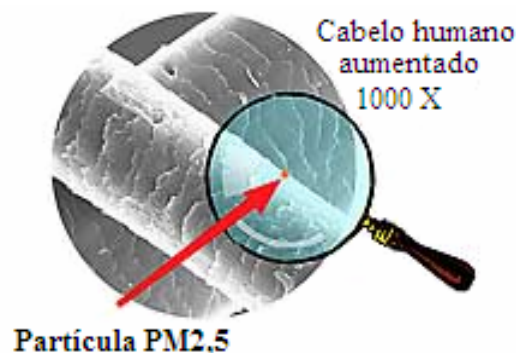


Figura 11: Partícula PM_{2,5} Semelhante a um Fio de Cabelo Humano
Fonte: U.S Department of Energy (2004)

Matéria particulada primária é gerada por uma variedade de processos químicos e físicos. Esta é emitida na atmosfera diretamente da combustão, processos industriais, emissões fugitivas e fontes naturais. Matéria particulada secundária é formada na atmosfera pela condensação dos gases. Durante a combustão do carvão, matéria mineral (impurezas inorgânicas) é convertida para cinza, sendo que esta é descarregada no fundo da fornalha como cinza de fundo. As partículas suspensas nos gases são conhecidas como resíduos das cinzas, pois estes constituem a matéria particulada primária, a qual entra no equipamento de

controle de matéria particulada. Essa matéria particulada é referida como “PM”, “PM10”, “PM2,5”(matéria particulada (PM) com um diâmetro aerodinâmico equivalente de 10 μ m ou menos e 2,5 μ m ou menos respectivamente) (IEA Clean Coal Centre, 2004).

3.4 UTILIZAÇÃO DOS SUB-PRODUTOS DA COMBUSTÃO

A utilização dos sub-produtos da combustão fundamenta-se em pesquisas para desenvolver maneiras de aumentar a reciclagem de carbono e outros produtos residuais de centrais de potência, que muitas vezes, em grande parte destas, são jogados fora. O Departamento de Energia dos Estados Unidos está estudando a composição química destes produtos e desenvolvendo maneiras de separar carbono e outros elementos dos produtos e expandir seu uso comercial. De acordo com o Departamento de Energia Americano (U.S. Department of Energy, 2004), são gerados anualmente nos Estados Unidos cerca de 100 milhões de toneladas de sub-produtos da combustão do carvão, dos quais apenas 30% são aproveitados de alguma forma.

O maior uso dos resíduos das cinzas é como adições ao cimento, ao concreto e aos produtos de concreto. Muitos especialistas crêm que os sub-produtos gerados nos Estados Unidos representam um vasto recurso não usado. Os sub-produtos da combustão podem reforçar materiais de construção e reduzir o custo geral do produto. Os subprodutos ricos em gesso dos sistemas de lavagem podem prover nutrientes de plantas e aumentar a fertilidade do solo em muitas aplicações na agricultura. Subprodutos da combustão do carvão podem ser usados para imobilizar resíduos perigosos para uma segura disposição (U.S Department of Energy, 2004).

Grande uso de subprodutos da combustão do carvão pode auxiliar a diminuir as preocupações com gases que contribuem para o efeito estufa. Usando os resíduos das cinzas para a fabricação de cimento, por exemplo, reduz-se a necessidade de calcinação do calcário, um processo que requer uma grande quantidade de calor tipicamente provida pela queima de combustíveis fósseis. Para toda tonelada de resíduos das cinzas usada no concreto, aproximadamente 0,8 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) são impedidas de serem liberadas para a atmosfera. A meta do Departamento de Energia dos Estados Unidos é

aumentar o uso dos subprodutos de 30% para 50% para o ano de 2010 com o objetivo de assegurar que a indústria geradora de energia elétrica continue a adotar tecnologias mais avançadas e limpas para o uso do carvão (U.S Department of Energy, 2004).

3.5 O GERENCIAMENTO DA ÁGUA

O gerenciamento da água compreende a pesquisa para desenvolver tecnologias mais eficientes que possam reutilizar a água de resfriamento de usinas termelétricas a carvão e de outros processos, pois o mesmo busca também obter um conhecimento mais amplo das características químicas e físicas de lagoas de minas e também das vertentes de água que ficam localizadas próximas das centrais de potência com caldeiras a carvão.

As usinas termelétricas respondem pelo segundo grande uso de água nos Estados Unidos, pois isso representa 39% de toda a água utilizada para fins de abastecimentos industrial, comercial e doméstico, naquele país. Aproximadamente 75% da água é utilizada em usinas termoelétricas baseadas em combustíveis fósseis. A demanda de água para o setor de utilidades elétricas compete com a demanda de água para outros setores da economia. Desta maneira, a disponibilidade de adequado suprimento de água para uso nas usinas termelétricas e o impacto de suas operações na qualidade da água estão recebendo aumentada atenção (U.S Department of Energy, 2004).

Para alcançar todas as metas colocadas acima, muitos esforços em pesquisa e desenvolvimento estão sendo feitos em tecnologias de geração de potência emergentes, as quais são comentadas adiante.

A força que impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias para a combustão do carvão está na necessidade de criar significantes melhorias em áreas vitais, tais como o melhor uso do combustível, desenvolvimento tecnológico dos sistemas de queima e das próprias caldeiras, bem como a minimização de impactos ambientais. O carvão permanece como uma opção atrativa como fonte estável de suprimento de energia para muitas décadas, visto que seu baixo custo, comparado com o de outros combustíveis, é certamente sustentado por suas enormes reservas mundiais (Osborne et al., 1996). O esquema mostrado na Figura 12

apresenta vantagens e desvantagens que devem ser observadas quando se considera o potencial do carvão em termos de continuar a ser a maior fonte de combustível para geração de potência no futuro.

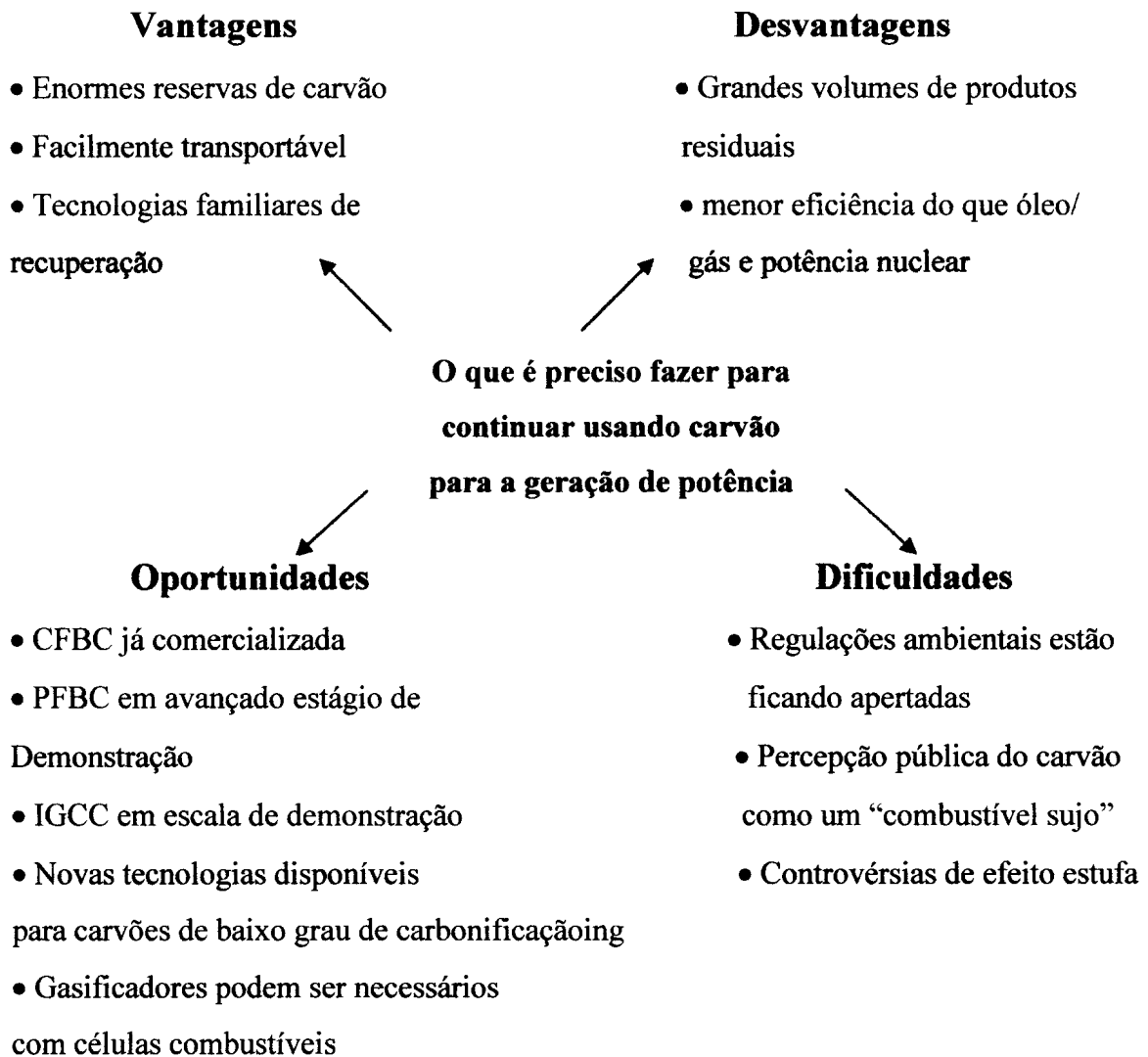


Figura 12: Vantagens e Desvantagens do Uso do Carvão
Fonte: Osborne *et al.* (1996)

O maior problema relacionado ao uso do carvão é o seu potencial de poluição, o qual requer melhorias na eficiência dos equipamentos utilizados nas usinas termoelétricas, com o fim de reduzir as emissões de dióxido de carbono e outras emissões de poluentes. Conseqüentemente, o desenvolvimento tecnológico para melhorar a eficiência de caldeiras que operem com o carvão mineral está sendo procurado. As principais tecnologias em franco desenvolvimento são: a combustão em leito fluidizado pressurizado (PFBC) e a gaseificação integrada ao ciclo combinado (IGCC), (Osborne *et al.* 1996).

Em relação aos futuros progressos com tecnologias de gaseificação, os quais possibilitam a obtenção de combustível para células combustíveis, pode-se dizer que o desenvolvimento e comercialização de sistemas de combustão em leito fluidizado atmosférico (principalmente o de leito circulante) foi parte de um passado bem sucedido (Osborne *et al.*, 1996). A Figura 13 mostra a trajetórias destas tecnologias acompanhando o aumento de sua eficiência.

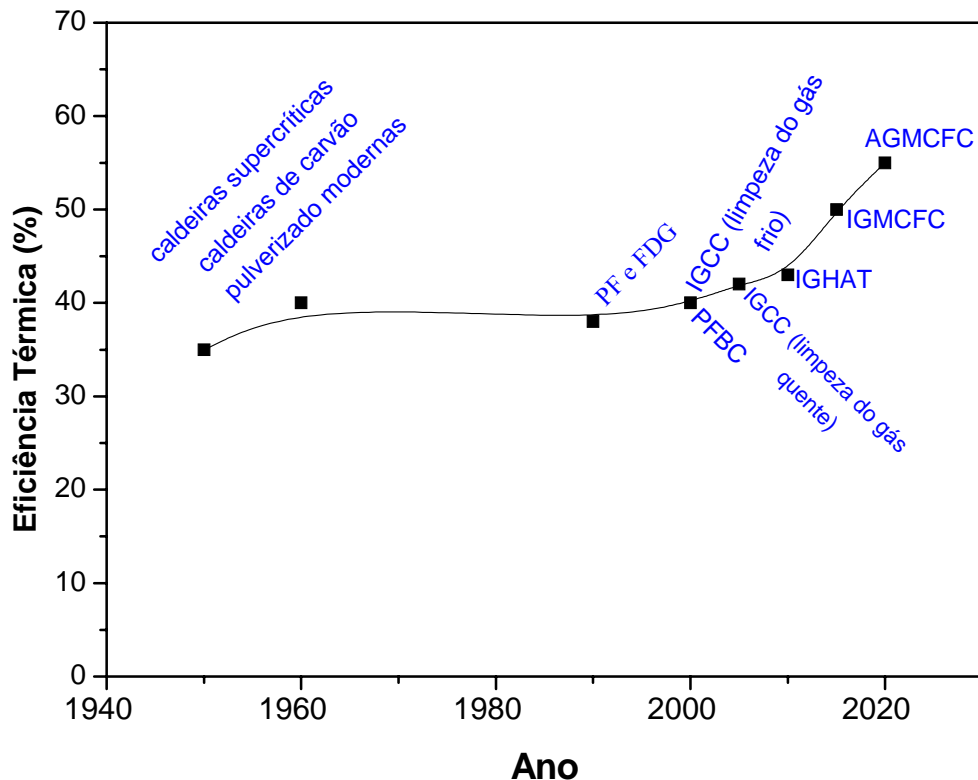


Figura 13: Trajetória das Tecnologias e de Eficiência Térmica
Fonte: Osborne *et al.* (1996).

Com relação às Tecnologias do Carvão Limpo (CCT), os resultados de pesquisas e do desenvolvimento tecnológico alcançados nos últimos 20 anos tem resultado em mais de 20 novas tecnologias, as quais apresentam custo mais baixo, maior eficiência e melhor compatibilidade ambiental. Essas tecnologias refletem resultados alcançados em usinas termelétricas, usinas siderúrgicas, fábricas de cimento e ainda em outros setores industriais (National Mining Association, 2003). As inovações em tecnologias baseadas no carvão são ambientalmente superiores e mais eficientes operacionalmente que as tecnologias atuais, e de um modo geral pode-se agrupá-las nas seguintes categorias: combustão, pós-combustão e conversão (liquefação e gaseificação).

3.6 COMBUSTÃO

Nesta categoria podem ser citados os dois tipos principais de combustão para carvão, a combustão de carvão pulverizado e a combustão em leito fluidizado. A combustão do carvão pulverizado (mais detalhada no Capítulo 4) é o sistema mais antigo de combustão do carvão, pois este tem alcançado grandes progressos com relação ao passado devido principalmente à utilização de avançados sistemas de queima. Apesar das novas tecnologias em uso e em desenvolvimento, mais de 90% da eletricidade gerada a partir do carvão no mundo é ainda baseada na combustão do carvão pulverizado.

Uma vez que o uso do carvão mineral para geração de potência em função das suas reservas, deve ter a sua utilização por muitos anos ainda, os métodos de combustão devem avançar em termos de dominar a atual combustão de carvão pulverizado em caldeiras subcríticas e supercríticas. Os atuais projetos supercríticos (pressão do vapor acima de 210 bar) apresentam eficiência de 43%. A maior tendência para o futuro é o projeto ultrasupercrítico baseado em altas pressões e temperaturas (por exemplo 37,5 MPa e 700°C) para os projetos de avançadas plantas de potência na Europa, apresentando eficiência de 55% ou mais (Henderson, 2003). A obtenção de tal nível é fortemente dependente da engenharia, assim como do projeto das turbinas e o desenvolvimento de materiais que suportem tais temperaturas do vapor. A Figura 14 mostra um simples esquema da combustão do carvão pulverizado.

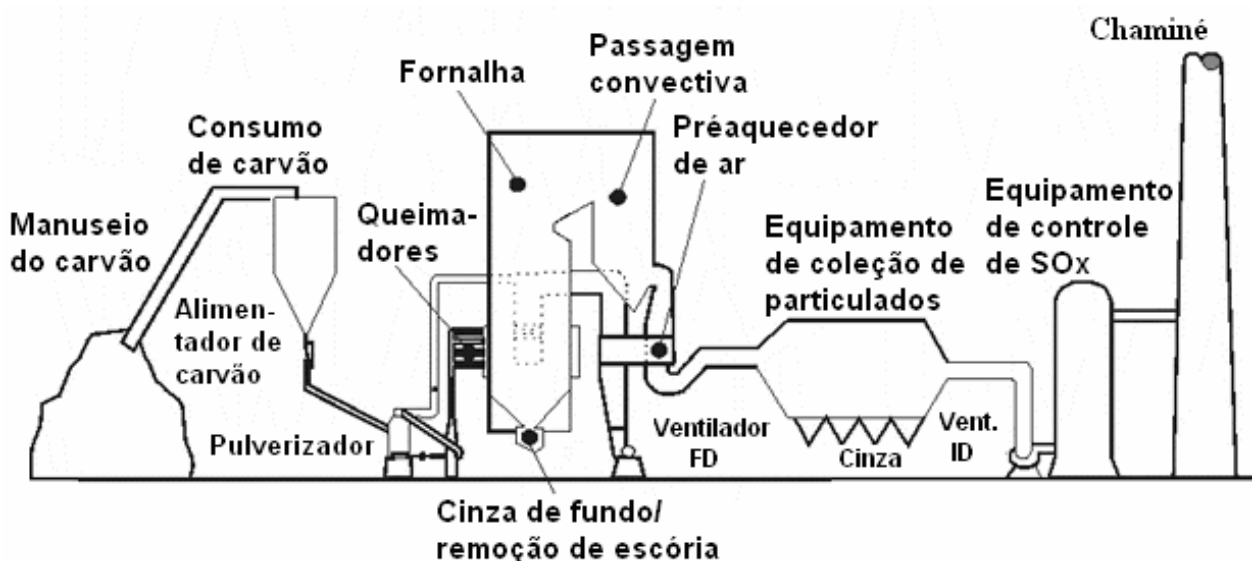


Figura 14: Esquema da Combustão do Carvão Pulverizado
Fonte: UND University of North Dakota (2004).

A combustão em leito fluidizado (FBC) constitui uma opção viável para a geração de potência, pois estas unidades operam com competitiva eficiência, com menores custos que unidades atuais e com níveis de emissão abaixo dos definidos na legislação ambiental (National Energy Technology Laboratory, 2004).

A Combustão em Leito Fluidizado é uma tecnologia para a combustão do carvão em avançado estágio de demonstração, pois apresenta grandes vantagens sobre outros sistemas de combustão. Duas das principais vantagens desta tecnologia é a grande flexibilidade de combustível e o controle do óxido de enxofre (SO_x) feito no próprio leito através da utilização de um sorvente (geralmente o calcário), não necessitando de equipamentos de pós-combustão como os lavadores de gás (*scrubbers*).

A Combustão em Leito Fluidizado é uma tecnologia que se apresenta muito adequada à queima de carvões “pobres” (altos teores de inertes e baixo poder calorífico, e carvões com alto teor de cinza) (PPE/COPPE/UFRJ, 2001). A Figura 15 mostra um esquema de leito fluidizado.

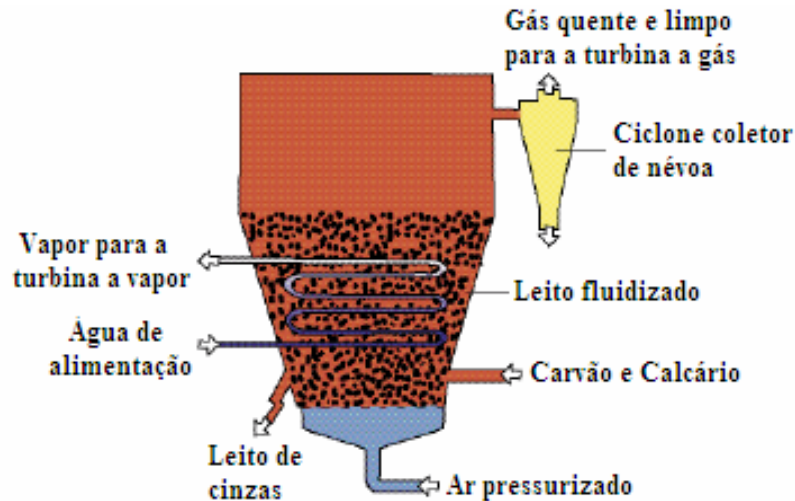


Figura 15: Esquema de Leito Fluidizado
Fonte: National Mining Association (2003)

3.7 PÓS-COMBUSTÃO

O termo pós-combustão representa o grupo das tecnologias utilizadas geralmente para o controle de poluentes após a combustão do carvão, ou seja, o controle feito através do

tratamento dos gases da combustão. Como exemplo destas tecnologias pode-se citar os lavadores de gás ou *scrubbers* (dessulfurização dos gases), limpeza química ou precipitadores para remover grandes quantidades de enxofre, outras impurezas e material particulado (poeira e cinzas) de emissões antes de eles serem liberados para a atmosfera (National Mining Association, 2003). A Figura 16 mostra o esquema de uma destas tecnologias, ou seja, um lavador de gás úmido usado em uma central termoeletrica (Souza e Moreira, 2001).

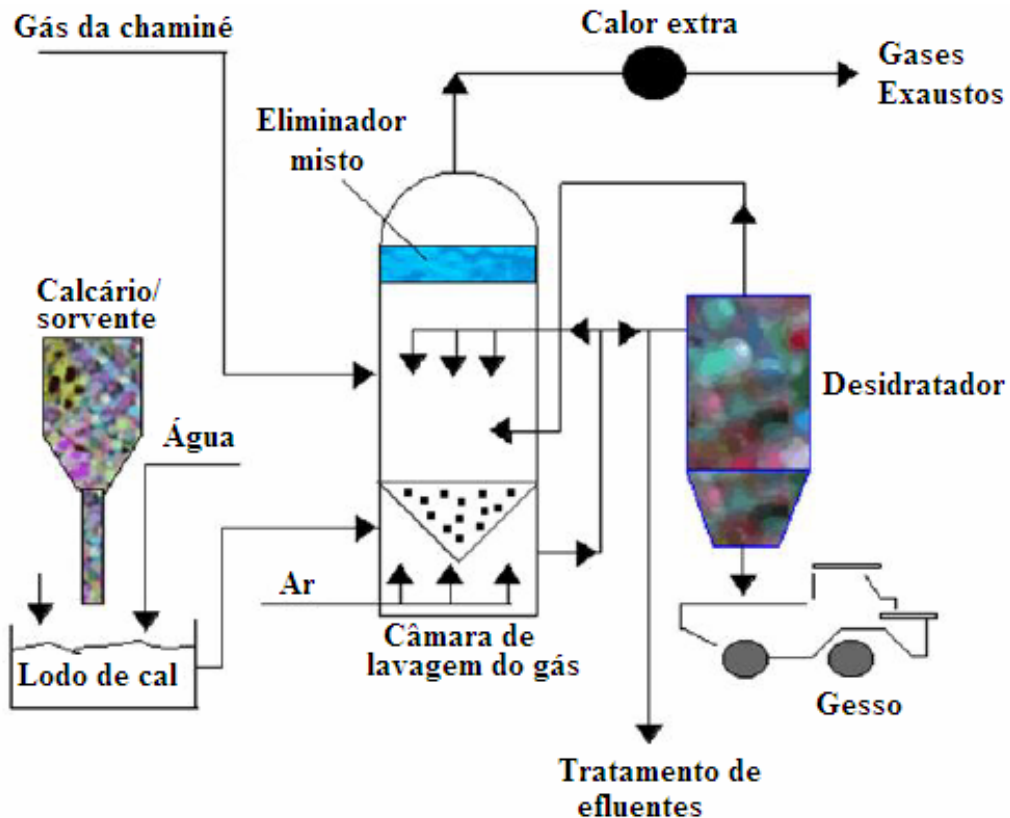


Figura 16: Esquema de um Lavador de Gás Úmido (Wet Scrubber ou Wet FDG)
Fonte: Souza e Moreira (2001)

3.8 CONVERSÃO

Conversão significa, por exemplo, o uso de calor e pressão para converter carvão em um gás ou líquido, os quais podem passar por um sistema de limpeza para serem mais refinados para o seu uso. Um exemplo desta tecnologia pode ser a gaseificação integrada a um ciclo combinado (IGCC) e outros processos de gasificação ou liquefação. A gaseificação se constitui na melhor de todas as alternativas para a combustão do carvão, pois esta tecnologia é bastante eficiente e limpa (National Mining Association, 2003).

O processo de conversão denominado de gaseificação do carvão apresenta as seguintes características: melhor tecnologia para conversão de carvão em potência limpa e eficiente, químicos, fertilizantes e combustíveis; baixo NO_x , SO_x e material particulado; baixa quantidade de resíduos sólidos e baixo custo para remoção de mercúrio e SO_x ; baixo custo de investimento e custo competitivo com outras tecnologias. A gaseificação está recebendo apoio e incentivo de muitos grupos ambientais, pois a mesma se constitui em uma grande promessa para o futuro, sendo conhecida como conversão direta de carvão a hidrogênio (Eastman Gasification Services Company, 2003). A Figura 17 mostra o esquema simplificado do processo de gaseificação.

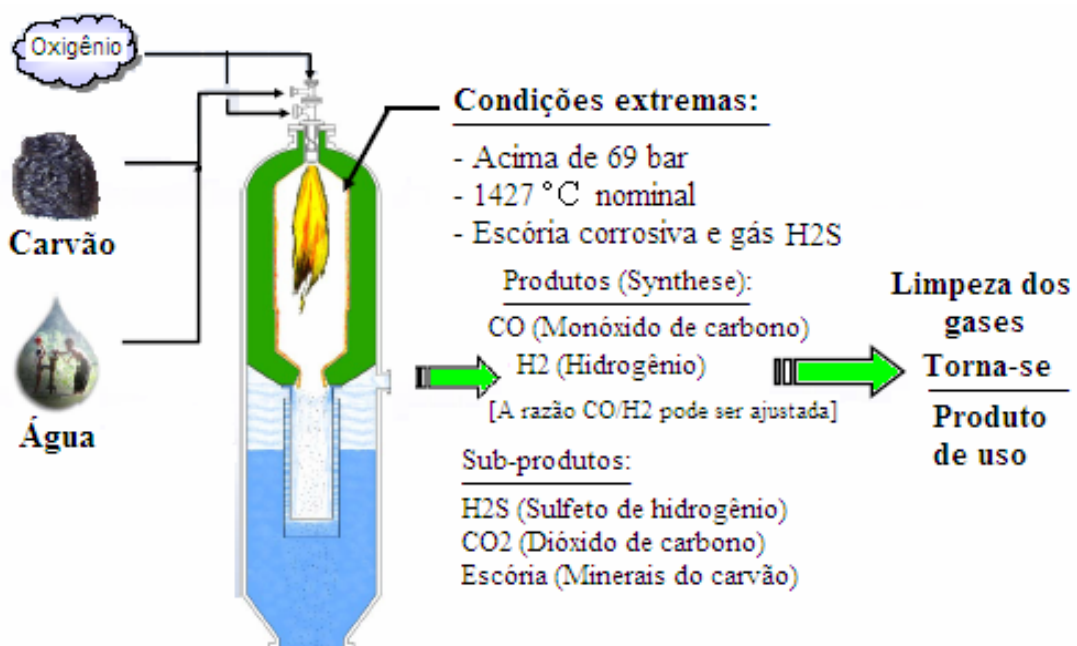


Figura 17: Esquema Simplificado do Processo de Gaseificação
Fonte: Eastman Gasification Services Company (2001)

Capítulo 4

TECNOLOGIAS PARA A COMBUSTÃO DO CARVÃO

Combustão é uma das tecnologias mais antigas da humanidade. Atualmente, a maior parte da energia consumida no mundo (por exemplo: em transporte, geração de energia elétrica, aquecimento) é fornecida por processos de combustão. Deste modo, o conhecimento desse processo é de grande importância para muitas áreas (José, 2001).

Combustão é o processo que prevalece na utilização da energia fóssil, e no caso do carvão, ele é o principal combustível fóssil utilizado para a geração de potência elétrica. O carvão, devido ao seu baixo custo e grande disponibilidade, deve ser ainda utilizado por algumas centenas de anos, como o principal energético, pois os sistemas de combustão a carvão para geração de potência devem atender às seguintes demandas (Beér, 2000):

- baixo grau de carbono “não queimado” com o mínimo de excesso de ar;
- ausência de excessiva fusão da escória na câmara de combustão de grandes caldeiras;
- operações com fácil remoção de cinzas e baixa emissão de NO_x a partir de modificações dos processos de combustão;
- aceitação da variação da qualidade do carvão sem significativa redução da eficiência da combustão e disponibilidade da caldeira da usina.

Dentre as várias tecnologias para a combustão do carvão (algumas amplamente usadas e outras ainda em fase de pesquisa ou demonstração), pode-se enumerar como principais as

seguintes: a combustão do carvão pulverizado, a combustão em leito fluidizado e a gaseificação do carvão, as quais serão discutidas a seguir.

4.1 COMBUSTÃO DO CARVÃO PULVERIZADO

O sistema de Combustão do Carvão Pulverizado é o mais amplamente usado no mundo e o mesmo é baseado em muitas décadas de experiência. Neste tipo de combustão, o carvão é secado e fundamentado em uma granulação específica, que depende do grau de carbonificação do carvão e, conseqüentemente, da sua reatividade. O sistema de preparação - alimentação, secagem e moagem do carvão e o transporte pneumático do carvão pulverizado para os queimadores está totalmente integrado com a caldeira. Para carvões com baixa reatividade, a granulometria das partículas é diminuída para criar uma grande área de superfície específica do carvão, assim como para melhorar as condições de ignição e combustão (Beér, 2000).

O carvão pulverizado é pneumaticamente transportado para os queimadores e injetado na forma de jato de partículas na câmara de combustão. O ar de transporte que carrega o carvão do moinho para os queimadores é uma pequena fração do ar de combustão total, sendo sua temperatura limitada a aproximadamente 100°C por razões de segurança contra a ignição e explosão do moinho e da tubulação de transporte entre o moinho e os queimadores (Beér, 2000).

A partir da injeção na câmara de combustão, o jato de carga das partículas de carvão mistura-se com os produtos quentes da combustão, os quais aumentam sua temperatura (Beér, 2000). O restante do ar de combustão, geralmente pré-aquecido, é injetado separadamente e misturado com o jato de combustível queimando na câmara de combustão. A Figura 18 representa a estrutura de um equipamento de teste para verificar as características da combustão do carvão no Japão.

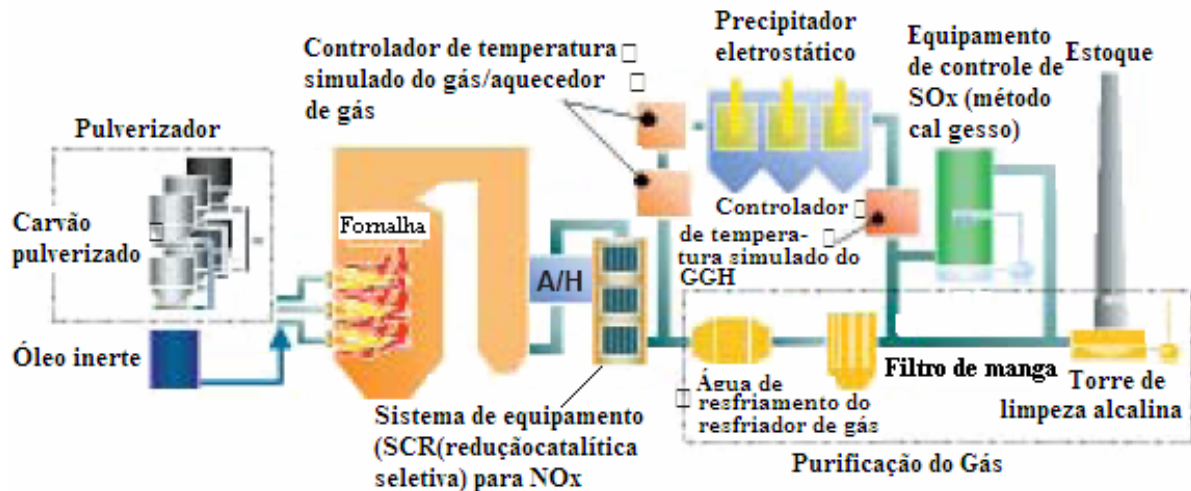


Figura 18: Típica Caldeira a carvão pulverizado com Combustão Estagiada
Fonte: (CRIEPI News, 2004)

Na combustão de carvão pulverizado as partículas queimam em suspensão, criando chamas e liberando calor na câmara de combustão, sendo que a temperatura de chama do carvão usualmente alcançada se encontra em torno de 1500°C. O calor liberado na câmara de combustão é transferido, principalmente por radiação e convecção, para os tubos de água que estão localizados nas paredes da câmara de combustão. Gases quentes movem-se para a parte de cima da fornalha e mais calor é extraído pelos tubos do superaquecedor, que está localizado próximo ao topo da câmara de combustão. Finalmente, mais calor é extraído usualmente em um economizador para aquecer a água antes que esta entre nos tubos da caldeira e os gases da combustão então sigam para a chaminé (heat and power, 2004).

A configuração das caldeiras de carvão pulverizado geralmente varia de acordo com a posição a qual os queimadores são montados nas mesmas. De uma maneira geral as configurações podem ser basicamente de três tipos: 1) caldeiras com queima na parede frontal, 2) caldeiras com queima em paredes opostas e 3) caldeiras com queima tangencial (queimadores montados nos cantos da caldeira), nos quais os queimadores são ajustados, por exemplo, segundo a variação do ângulo de inclinação (IEA Clean Coal Centre 2004). A Figura 19 ilustra exemplos de configurações de caldeiras com queima na parede e queima tangencial, juntamente com a configuração da chama segundo a posição dos queimadores.

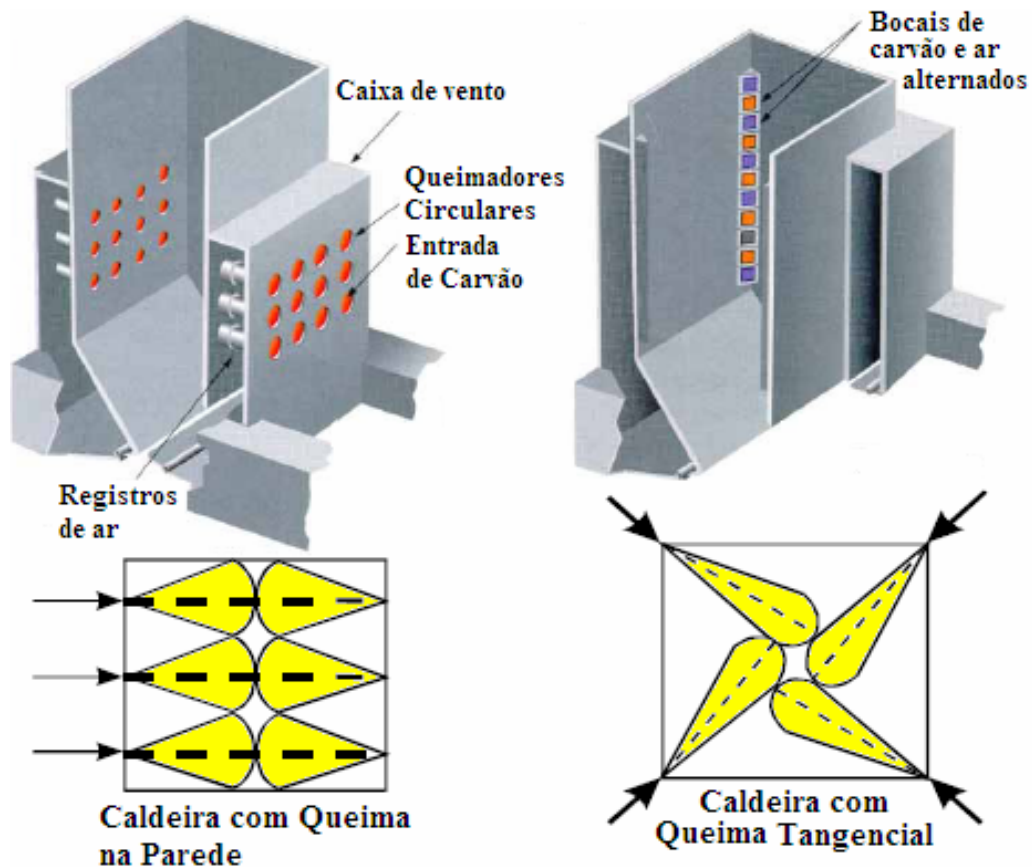


Figura 19: Queimadores e Configuração de Chama
Fonte: U.S Department of Energy (1996)

Na combustão de carvão pulverizado a qualidade do carvão possui grande influência na eficiência da combustão. Experimentos feitos mostram que a temperatura de chama dos gases não é fortemente dependente da localização dos queimadores na fornalha. Para a temperatura na fornalha experimentos mostram que para carvões com baixa quantidade de voláteis (por exemplo, um carvão betuminoso da África do Sul), a temperatura é maior do que para carvões com alta quantidade de voláteis. Para caldeiras com queima tangencial o perfil de temperatura radial na fornalha é alta no centro e baixa próximo das paredes, pois nesta localização o perfil de temperatura é dominado pelo resfriamento das paredes da fornalha (Van der Lans *et al.*, 1998).

A quantidade de voláteis no carvão não exerce grande influência na temperatura de chama, pois isto mostra que a mistura limita a razão de combustão do carvão. As temperaturas na fornalha são maiores em caldeiras que apresentam uma maior razão de mistura entre combustível e ar e uma maior qualidade, ou seja, caldeiras de maior capacidade ou maior potência. Em um caso mais particular as diferenças de temperatura entre carvões são pequenas para caldeiras que possuem um material refratário de revestimento das paredes, pois

a temperatura deste está próximo da temperatura dos gases. Neste caso, a transferência de calor por convecção é a mais importante, sendo que a diferença de temperatura entre os carvões é fortemente influenciada pela capacidade de calor do refratário. Durante um dia de teste a temperatura do refratário aumenta continuamente, resultando em um aumento da temperatura na fornalha durante o dia (Van der Lans *et al.*, 1998)

4.2 A COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO

A combustão em leito fluidizado é uma tecnologia de combustão que constitui uma opção viável para a geração de potência no futuro. As unidades FBC operam com competitiva eficiência, menores custos que as unidades atuais e com emissões de NO_x e SO_x abaixo dos padrões estabelecidos. Os sistemas de combustão de leito fluidizado são classificados segundo dois critérios básicos, sendo eles a pressão de operação e a velocidade de fluidização. Quanto à pressão de operação tem-se sistemas atmosféricos (unidades operando próximo a pressão atmosférica) e sistemas pressurizados (altas pressões de operação). Com relação à velocidade de fluidização, pode-se ter leito borbulhante (baixa velocidade do ar de fluidização) e leito circulante (alta velocidade do ar de fluidização) (National Energy Technology Laboratory, 2004).

No sistema de combustão em leito fluidizado, o carvão e um sorvente (usualmente calcário) são introduzidos juntos de maneira que o carvão represente de 1 a 3% do leito. Esta tecnologia apresenta várias vantagens sobre as demais, sendo algumas delas as seguintes:

- temperaturas de operação mais baixas do que em caldeiras de Carvão Pulverizado;
- podem queimar ampla faixa de combustíveis, desde carvões de alto e baixo grau até resíduos;
- possibilidade de controle de SO_x no próprio leito;
- menor emissão de poluentes devido à baixa temperatura de combustão;
- menor gasto com a diminuição do tamanho do combustível.

O termo “**Leito Fluidizado**” reflete o estado de matéria particulada mantida em livre movimento por uma corrente de ar introduzida no fundo do leito. O estado de qualquer sistema de partículas é limitado por duas variáveis: a velocidade para a mínima condição de fluidização e a velocidade de suspensão (heat and power, 2004).

Quando o sistema está operando entre estes dois pontos de referência este é conhecido como um leito fluidizado **borbulhante**, pois este é uma mistura de partículas de areia e cinzas grossas do combustível. Grãos de cinza podem ser removidos pelo fundo do leito ou pela suspensão com os gases, uma vez que as partículas de cinza podem ser reduzidas de tamanho pela ação erosiva da areia. O calor da combustão é recuperado via trocadores de calor dentro do leito e outros equipamentos padrões das caldeiras. O ar requerido para fluidização e combustão é alimentado via um distribuidor de ar, o qual é comumente uma bandeja de bocais cujo projeto é classificado pelo fabricante (heat and power, 2004).

Em uma seção acima do leito conhecida como bordo livre, onde o diâmetro é maior que o do leito, a reduzida velocidade assegura que as partículas sólidas retornem ao leito por gravidade. Ar adicional para pós-combustão de componentes gasosos do combustível, conhecido como ar secundário, é introduzido na seção de bordo livre para assegurar completo carbono não queimado (heat and power, 2004).

Quando um sistema de combustão de leito fluidizado é projetado para operar acima da velocidade de suspensão, este é conhecido como leito fluidizado **circulante**. Neste sistema, um grande ciclone é usado para separar os gases das partículas em suspensão, as quais são retornadas para o fundo do leito fluidizado. As partículas recirculadas passam direto a resfriadores de areia antes de passarem no leito e o calor recuperado é usado para aumentar a elevação do vapor. Por esta razão combustores de leito fluidizado circulante usualmente dispensam trocadores de calor dentro do leito, os quais podem sofrer erosão e eventual falha (heat and power, 2004).

Ainda para os sistemas atmosféricos, pode-se destacar que as caldeiras de leito fluidizado circulante podem queimar combustíveis com baixo conteúdo de matéria volátil e baixa temperatura de fusão das cinzas, pois isto é devido à baixa temperatura de operação (850-900°C) que possibilita queimar combustíveis com conteúdo de cinzas acima de 70%. As caldeiras de leito fluidizado circulante apresentam maior eficiência térmica, maior retenção de

SO₂ pela maior interação entre partículas e maior tempo de residência. Neste caso, porém, um elevado nível de sólidos gerados leva à necessidade de se promover uma maior separação de partículas e a sua reciclagem parcial à caldeira (Parivesh, 2002). A Figura 20 mostra o esquema de uma caldeira atmosférica com leito fluidizado circulante.

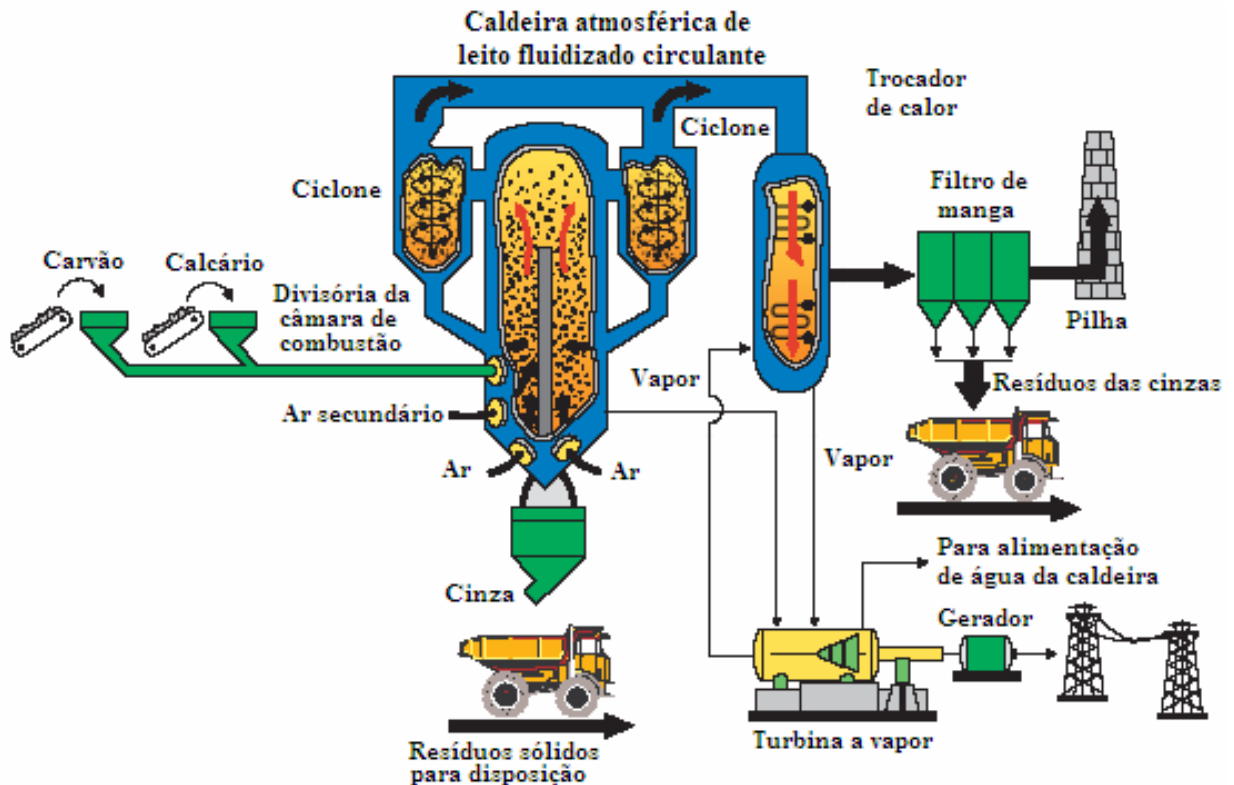


Figura 20: Esquema de Caldeira Atmosférica com Leito Fluidizado Circulante

Fonte: National Mining Association (2003)

A combustão em leito fluidizado pressurizada é uma avançada tecnologia de ciclo combinado para geração de potência, a qual possibilita geração de potência limpa e eficiente do carvão e de outros combustíveis. Um combustor de leito fluidizado, operando com alta pressão (geralmente de 1,2 a 1,6 MPa), queima o carvão na presença de ar e de um sorvente (calcário ou dolomita). A pressão no combustor é suprida com ar pressurizado do compressor da turbina a gás, pois este é forçado direto ao leito inerte o qual se fluidiza. Em um leito fluidizado pressurizado as mudanças no processo de combustão conduzem a uma grande eficiência de combustão. Os gases da combustão passam por um sistema de limpeza para reduzir sua concentração de particulados primeiramente para expansão em uma turbina a gás. O gás então passa direto a um economizador em direção à chaminé.

O vapor para o ciclo a vapor é gerado em duas localizações principais: primeiro, no feixe de tubos imersos no combustor de leito fluidizado e, segundo, no economizador, o qual

recebe o calor do gás de exaustão ainda quente da turbina a gás. Os combustores de leito fluidizado, assim como os atmosféricos, apresentam sistemas com leito borbulhante e com leito circulante, sendo os de leito borbulhante os mais desenvolvidos e com maior número de plantas em demonstração. A Figura 21 mostra o esquema básico de combustão em leito fluidizado pressurizado.

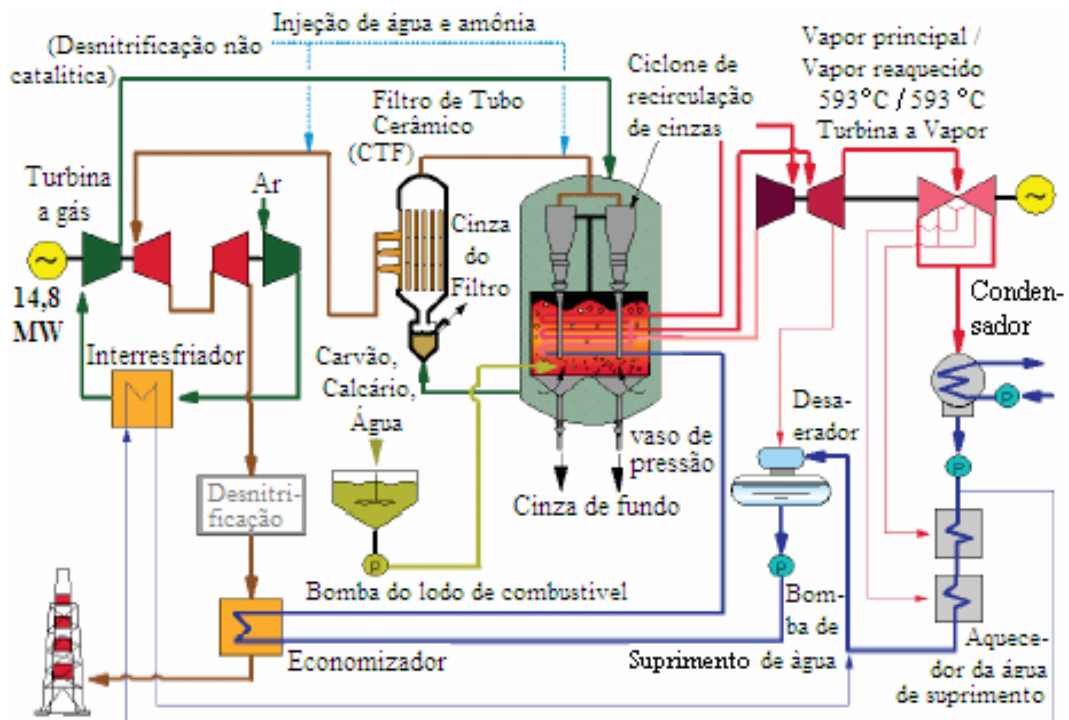


Figura 21: Esquema da Combustão em Leito Fluidizado Pressurizado
Fonte: Australian COAL Association (2004)

4.3 A GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO

A gaseificação se constitui na melhor de todas as alternativas para a combustão do carvão, pois esta tecnologia, que depende de converter o carvão em outros produtos, é bastante eficiente e limpa. Melhor que a combustão direta do carvão, um gaseificador de carvão reage carvão com vapor e controla a quantidade de ar ou oxigênio sob altas temperaturas e pressões. O calor e pressão quebram as ligações da estrutura molecular do carvão, pois a reação com o vapor forma um gás conhecido como gás de síntese que é composto principalmente de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), o qual é queimado em uma turbina a gás para produzir eletricidade. Quando o gás é usado para produzir

eletricidade, é utilizado o sistema de ciclo combinado com gaseificação integrada (IGCC) (Australian COAL Association, 2004).

O ciclo combinado com gaseificação integrada (IGCC) é o mais conhecido destes sistemas, pois neste os gases passam por um sistema de limpeza e então são alimentados para o combustor da turbina a gás. No processo de gaseificação, quase todo o enxofre é convertido para sulfeto de hidrogênio e este é então recuperado, e a eficiência do ciclo é aumentada para 45%, apresentando redução nas emissões de NOx e SOx acima de 95% (Australian COAL Association, 2004).

Avanços no próprio gaseificador para aumentar a eficiência, confiabilidade, flexibilidade e economia de material de alimentação são cruciais para melhoramentos no sistema de gasificação. Avançados materiais refratários e novos processos de instrumentação estão sendo desenvolvidos para aumentar a confiabilidade e disponibilidade do sistema, controle operacional e desempenho geral do sistema (Australian COAL Association, 2004).

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) tem voltado suas atenções em futuros conceitos de gaseificação que oferecem significativos melhoramentos na eficiência e flexibilidade de combustíveis. A configuração de gaseificadores que adaptam uma grande mudança na composição, poder calorífico, conteúdo de cinzas e outros fatores dos combustíveis está sendo investigada.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) tem voltado suas atenções em futuros conceitos de gaseificação que oferecem significativos melhoramentos na eficiência e flexibilidade de combustíveis. A configuração de gaseificadores que adaptam uma grande mudança na composição, poder calorífico, conteúdo de cinzas e outros fatores dos combustíveis está sendo investigada. A Figura 22 mostra um sistema com ciclo IGCC acoplado a um combustor.

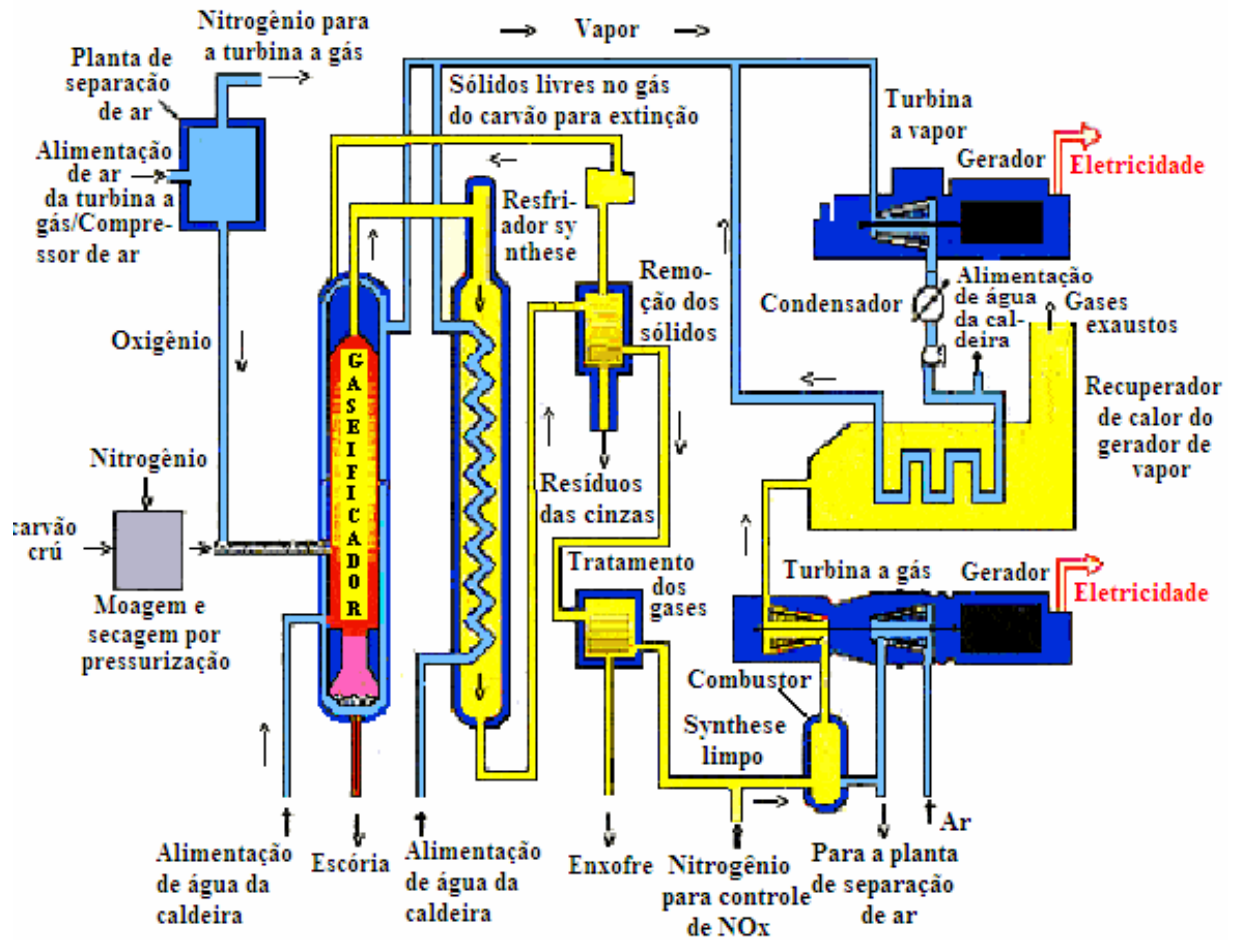


Figura 22: Ciclo IGCC Acoplado a um Combustor
Fonte: Australian COAL Association (2004)

Capítulo 5

TECNOLOGIAS PARA CONTROLE DE POLUENTES

O tipo de tecnologia de controle de emissões empregado para uma aplicação específica depende dos padrões ambientais de emissões estabelecidos pelos órgãos competentes. As emissões de poluentes dependem do combustível queimado e do sistema de combustão (Kitto, 1996)

5.1 O CONTROLE DE ÓXIDO DE NITROGÊNIO

A queima de combustíveis fósseis produz uma série de poluentes do ar, dentre eles o óxido de nitrogênio (NO_x). Carvão pulverizado é utilizado em larga escala para geração de eletricidade. Durante a combustão do carvão, óxido de nitrogênio é formado, o qual pode ser emitido para a atmosfera. Óxido de nitrogênio é um poluente, sendo em muitos países os limites de emissão atualmente regulados pela legislação ambiental (Van der Lans *et al.*, 1997).

A quantidade de matéria volátil presente no carvão é muito importante, influenciando significativamente na produção de NO_x . A emissão de NO_x tende a aumentar com o aumento do conteúdo de voláteis para condições de combustão não estagiada. Para condições de combustão estagiada, as emissões diminuem com o aumento do conteúdo de voláteis (Makino, 2000). A quantidade de NO_x formado na combustão do carvão é uma função do

conteúdo de nitrogênio presente no carvão, da temperatura de chama, da quantidade e distribuição do ar durante a combustão e da estrutura da chama (Energy Information Administration/Electric Power Monthly, 1998).

A concentração de óxidos de nitrogênio nos gases de combustão é produto da reação do nitrogênio atmosférico com oxigênio durante a queima. A concentração aumenta exponencialmente com o aumento da temperatura de combustão e aumenta linearmente com o acréscimo da concentração de oxigênio. A influência do nitrogênio do combustível na formação do NO_x dos gases de combustão é pequena, podendo ser mais forte em temperaturas de combustão maiores que 1500°C (NO_x térmico). Em fornalhas de temperaturas altas (carvão mineral) prevalece a formação de NO_x térmico (que usa basicamente para a reação o N_2 atmosférico) e em fornalhas de zonas de temperaturas baixas (carvão betuminoso) prevalece a formação do NO_x do combustível (PPE/COPPE/UFRJ, 2001).

O controle de NO_x pode ser feito através de dois métodos: métodos pré-combustão ou preventivos (controle antes da sua formação) e métodos pós-combustão ou corretivos (controle do NO_x através do tratamento dos gases da combustão).

O controle através dos métodos pré-combustão podem ser feitos por quatro principais tecnologias descritas abaixo:

5.1.1 Queimadores de Baixo NO_x

Queimadores são equipamentos de mistura projetados para assegurar ignição, estabilidade de chama e combustão completa do carbono do carvão ao longo do seu caminho na câmara de combustão (Beér, 2000). A operação nos queimadores de baixo NO_x com reduzido ar na zona primária de combustão pode conduzir a perdas econômicas devido a uma maior quantidade de carbono não queimado, fundição da escória na zona de combustão e acelerada corrosão. A diminuição da granulometria do carvão e o cuidadoso controle da distribuição de ar/combustível podem ajudar a diminuir a quantidade de carbono não queimado. O projeto de queimadores, assim como a disposição e operação dos mesmos podem ser modificadas para minimizar a combustão incompleta do carbono, a fundição da escória e a corrosão do equipamento. Os tubos na zona dos queimadores também podem ser revestidos com materiais resistentes à corrosão (U S Department of Energy, 1996).

Os queimadores são constituídos de uma entrada central de ar primário e uma entrada anular de ar secundário. Em queimadores industriais, a entrada de ar primário também é de forma anular devido à presença de um queimador piloto ou uma lança de óleo no centro. Os queimadores mais modernos são equipados com uma entrada de ar terciário, coaxial com a entrada de ar secundário (Beér, 2000). A Figura 23 mostra o esquema de um avançado queimador de baixo NO_x .

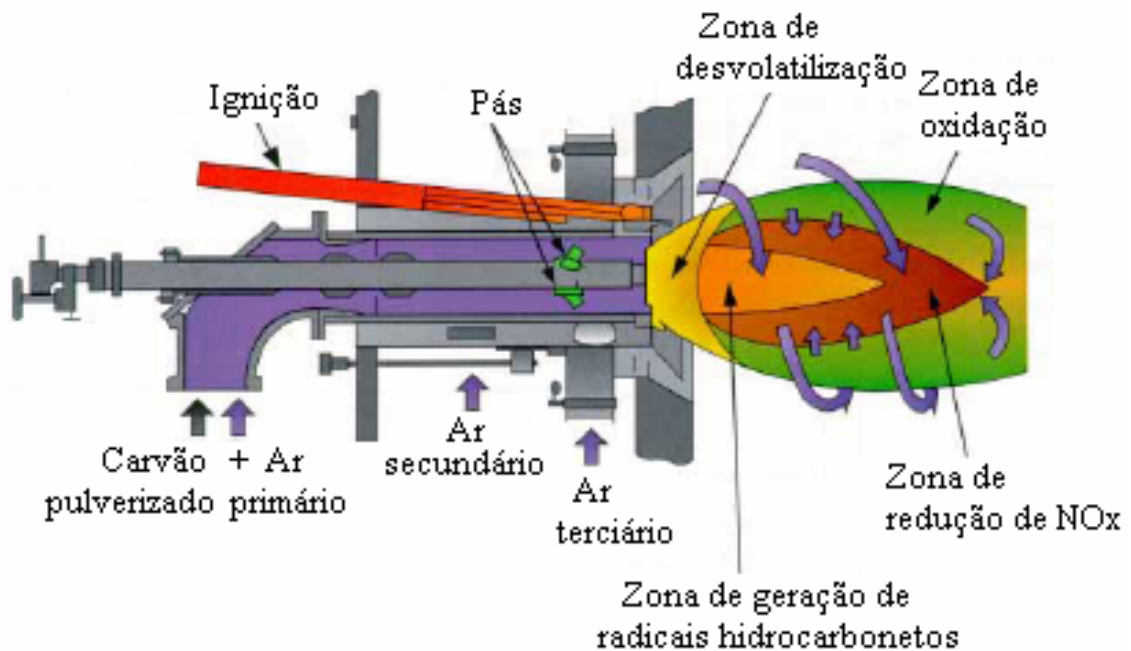


Figura 23: Esquema de Avançado Queimador de Baixo NO_x
Fonte: U.S Department of Energy (1996)

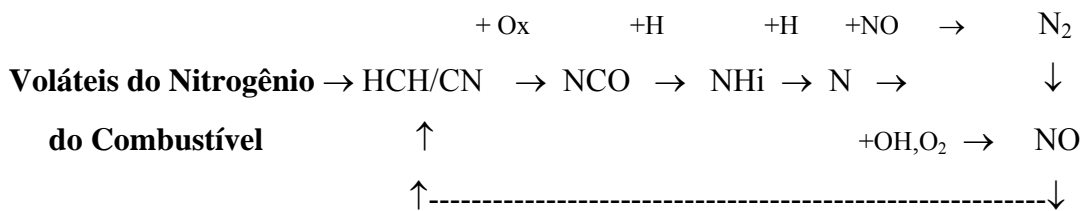
O carvão é misturado com o ar primário e transportado diretamente ao centro do queimador com 15 a 20 m/s. A velocidade é alta o suficiente para prevenir a deposição do carvão nas paredes do tubo e baixa o suficiente para ignição estável. A temperatura do ar é geralmente 70°C e a quantidade é em torno de 20% do ar de combustão total. O restante do ar é adicionado como ar secundário e/ou terciário direto a uma entrada coaxial e em movimento ciclônico para estabilizar a zona de fluxo reversa (Beér, 2000).

A seguir serão descritos alguns parâmetros do processo que influenciam a formação de NO_x nos queimadores de baixo NO_x :

a) razão de liberação: a razão de nitrogênio liberado em proporção com a razão de perda de massa é uma função do tipo de carvão e da temperatura. A fração de nitrogênio liberado de carvões de baixo grau de carbonificação é muito menor que a fração de massa liberada e

também menor que a liberação inicial de carbono. Para carvões de alto grau de carbonificação a fração de nitrogênio liberado é relativamente maior que a perda de massa (Bexter *et al.*, 1995 apud Van der Lans *et al.*, 1997).

Mudanças na razão de nitrogênio liberado são atribuídas a combinação de ambas diferenças entre a estrutura química do carvão e o perfil da temperatura durante a combustão. O esquema abaixo mostra o principal padrão de reação da conversão do nitrogênio do combustível para NO e N₂ (Van der Lans *et al.*, 1997).



b) espécies de voláteis do nitrogênio: a produção relativa de HCN e NH₃ durante a desvolatilização depende da estequiometria local. Em experimentos feitos com relativamente grandes concentrações de O₂ observou-se um aumento na concentração de NH₃. Carvões de baixo grau de carbonificação produzem uma maior concentração de NH₃, pois estes contêm mais nitrogênio e oxigênio que carvões de alto grau de carbonificação. A eficiência de conversão do nitrogênio do combustível para NO em altas temperaturas (1750-2300 K) é independente do combustível e fortemente dependente do ambiente de combustão local (Van der Lans *et al.*, 1997).

c) propriedades do carvão: A conversão a NO das espécies de nitrogênio contidas nos voláteis é mais eficiente do que a conversão do nitrogênio do combustível. A combustão estagiada reduz a formação de NO. Além disso, o uso de um combustível com baixo conteúdo de voláteis também contribui para essa redução. Usualmente a diferença entre grau de carbonificação causa uma diferença na temperatura e tempo de residência na zona rica em combustível, influenciando indiretamente a liberação do nitrogênio e as razões de reação. Carvões de baixo grau de carbonificação com grande quantidade de voláteis conduzem a grandes emissões de NO sob condições não-estagiada (Van der lans *et al.*, 1997).

Para a combustão não estagiada há uma clara relação existente entre o conteúdo de nitrogênio da matéria volátil e as emissões de NO. Para combustão estagiada, portanto, a

relação não é mais muito clara e a variação nas emissões é muito pequena entre os carvões. A configuração ótima do queimador mostra-se como uma função do tipo de carvão (Morgan, 1990 apud Van der Lans *et al.*, 1997).

d) estequiometria e tempo de residência: condições sub-estequiométricas são requeridas para diminuir as emissões de NO da combustão do carvão. Investigações mostram que a ótima razão de ar/combustível fica em torno de 0,7. A quantidade de NO produzido pode ser reduzida para mais de 50%, quando comparada com uma estequiometria de 1,15 no primeiro estágio (Van der Lans *et al.*, 1997). A concentração de NO é claramente uma função do tempo de residência para as estequiometrias de 0,6 e 0,8 com o tempo de residência na faixa de 0,1 – 2 s (Bose *et al.*, 1988 apud Van der Lans *et al.*, 1997).

Nos queimadores de baixo NO_x não é possível distinguir claramente a zona rica em combustível, na qual o tempo de residência é de difícil acesso. A ótima estequiometria no primeiro estágio e a quantidade de ar adicionada no segundo estágio devem ser mantidas o mais baixo possível, com o propósito de se ter um longo tempo de residência (Van der Lans *et al.*, 1997).

e) temperatura: o efeito da temperatura na zona primária de combustão na emissão de NO é uma função da estequiometria e do tipo de carvão. Para altas temperaturas, a quantidade de voláteis é maior, mas a emissão de NO pode ser controlada. Em baixa razão ar/combustível, com um longo tempo de residência, a produção de espécies voláteis do nitrogênio é baixa e a conversão destas para NO é baixa e pode ser considerada proporcional à conversão do nitrogênio do carvão para NO (Van der Lans *et al.*, 1997).

Para altas razões ar/combustível a emissão de NO aumenta devido a um aumento na produção de voláteis e um aumento na conversão destes para NO (Spliethoff *et al.*, 1996 apud Van der Lans *et al.*, 1997).

A conversão do nitrogênio do carvão para NO para temperaturas acima de 1000°C é levemente influenciada pela temperatura. A contribuição do nitrogênio do char para o total de NO está, portanto, relacionada com a temperatura pela produção de char. O tipo de carvão constitui um fator muito importante, pois este determina a produção de voláteis (Van der Lans *et al.*, 1997).

f) o parâmetro de giro: várias técnicas podem ser usadas para estabilizar o giro, como o uso de pás radiais em aplicações industriais para ar secundário e terciário e o uso de pás axiais giratórias para ar primário. O parâmetro de giro é uma relação adimensional utilizada para quantificar a intensidade da zona de recirculação interna (IRZ), pois o mesmo é descrito matematicamente como a relação entre os momentos angular e axial, os quais são conservados em jato livre segundo a equação (Van der Lans *et al.*, 1997):

$$\frac{G_{\varphi}}{G_x R} \quad (7)$$

na qual G_{φ} é o momento angular, G_x é o momento axial e R é o raio do queimador. G_x e G_{φ} podem ser calculados do perfil de velocidades:

$$G_{\varphi} = \int_0^R (Wr) p U 2 \pi r dr \quad (8)$$

$$G_x = \int_0^R U p U 2 \pi r dr + \int_0^R p 2 \pi r dr \quad (9)$$

Nas quais U e W são as componentes de velocidade axial e tangencial respectivamente, p é a pressão estática e r o raio. Para o cálculo correto do impulso axial, a pressão da parede deve também ser levada em conta para jatos confinados.

O parâmetro de giro não é uma medida universal para o fenômeno de fluxo, uma vez que fluxos com o mesmo parâmetro de giro, os quais podem ser estabilizados com diferentes tipos de giradores, podem apresentar variações no perfil da mistura e nas características do fluxo reverso. Considerando que um parâmetro de giro universal não está presente, torna-se difícil a comparação dos resultados de diferentes instalações de testes experimentais. Portanto, o parâmetro de giro é um critério de similaridade significativa para jatos produzidos por fontes de giro geometricamente semelhantes (Van der Lans *et al.*, 1997).

g) velocidades do ar primário e secundário: a velocidade do ar primário determina a distância de penetração da corrente na zona de recirculação interna (IRZ) antes que esta seja

defletida radialmente e para trás para mistura com o ar secundário. Frequentemente o momento da razão de fluxo (Mr) entre o ar primário e o ar secundário é tido como um parâmetro para caracterização das condições de entrada:

$$Mr = \frac{r_p^2 \rho_p U_p^2}{r_s^2 \rho_s U_s^2} \quad (10)$$

na qual r é o raio, U a velocidade média axial, ρ a densidade, os subscrito p é referente ao ar primário e s ao ar secundário.

Uma alta velocidade do ar primário pode aumentar a chama e a mistura de ar com o carvão, oferecendo grandes emissões de NO. Um aumento no parâmetro de giro conduz a uma redução nas emissões de NO. Tais fatos mostram que as velocidades do ar primário e secundário e o parâmetro de giro não podem ser regulados independentemente. A estequiometria do estágio primário muda com a velocidade, pois isto pode ter uma influência na emissão de NO. A influência da velocidade do ar primário não pode ser considerada independente de outros parâmetros do queimador. O fluxo de ar secundário está fortemente relacionado com a estequiometria, pois uma mudança no fluxo de ar secundário não é possível sem mudar a estequiometria, a menos que ar terciário seja usado (Van der Lans *et al.*, 1997).

O parâmetro de giro tem uma maior influência na conversão do nitrogênio do combustível para NO, HCN e NH₃. Por exemplo, para as razões de ar/combustível de 1,0 e 1,32, uma redução de 50% nas emissões de NO é alcançada quando o parâmetro de giro varia de 0 a 1, pois a partir de 1 a influência deste parâmetro é pequena. Para uma estequiometria de 0,66, as emissões de NO diminuem linearmente com o parâmetro de giro variando na faixa de 0 a 3 (Harding *et al.*, 1982 apud Van der Lans *et al.*, 1997).

h) ar terciário: o ar terciário pode ser injetado diretamente a uma entrada anular do queimador, paralelo ao ar secundário ou muitas vezes mais abaixo da fornalha (esse chamado de *ar da combustão estagiada*, ACE). O ar terciário possibilita a mudança na velocidade do ar secundário independentemente da estequiometria geral, aumentando a razão de fluxo do ar terciário, enquanto diminui a razão de fluxo do ar secundário resulta em redução de NO. (Van der Lans *et al.*, 1997). Experimentos feitos com a maioria do ar injetado como ar terciário

mostram melhores resultados. A quantidade ótima de ar terciário é uma função do calor extraído da parede da fornalha. (Kimoto *et al.*, 1995 apud Van der Lans *et al.*, 1997).

A influência do giro depende da estequiometria próximo ao queimador e das condições de entrada do ar (geometria, momento). Portanto, não há uma tendência geral a ser formulada: giro aumenta a mistura e estabiliza a chama, mas a formação de NO depende da combinação entre a geometria do injetor de carvão e as velocidades do ar. Deve-se ter em mente que a penetração do carvão na zona de recirculação interna é o principal parâmetro para ser executado de modo a se ter baixas emissões de NO (Van der Lans *et al.*, 1997).

i) tamanho das partículas: o diâmetro do orifício e a razão de momentos são os dois fatores de maior importância na penetração das partículas na zona reversa de fluxo interna. Os valores de emissões podem ser altos ou baixos para pequenas e grandes partículas, dependendo das condições de operação, como o tipo de orifício do queimador (anular, central) e o tipo de combustão (estagiada na fornalha ou estagiada no queimador) (Abbas *et al.*, 1993 apud Van der Lans *et al.*, 1997).

Para combustão estagiada na fornalha, a influência do tamanho das partículas diminui com o tempo de residência e com a baixa estequiometria da zona primária. Grandes partículas podem formar mais NO devido a um baixo tempo de residência na zona primária, combinado com um baixo carbono não queimado quando elas alcançam o segundo estágio rico em oxigênio. Para combustão estagiada no queimador, as emissões de NO são altas quando referidas para orifícios anular e oblíquo, tendo uma tendência contrária para orifício central. Em estudos nos quais a razão de momentos é alta não há mudança nas emissões com o tamanho das partículas (Maier *et al.*, 1994 apud Van der Lans *et al.*, 1997).

5.1.2 A Combustão Estagiada

Essa tecnologia é “implementada” pela injeção de uma porção do ar total de combustão (geralmente de 10 a 25%) direto a pontos de alimentação localizados acima dos queimadores. A combustão estagiada é uma técnica muito efetiva na redução de NO_x e pode ser usada para todos os combustíveis e na maioria dos sistemas de combustão. Tipicamente 10 a 25% do ar total de combustão é desviado para os pontos de alimentação de ar da combustão estagiada, possibilitando que os queimadores operem em uma condição sub-estequiométrica, reduzindo

a formação de NO_x no estágio inicial da combustão. Com o uso da combustão estagiada a temperatura dos gases é reduzida fazendo com que todo o CO e H_2 sejam rapidamente oxidados para CO_2 e H_2O , minimizando a formação de NO_x térmico (Moore, 2000).

A colocação de um sistema de combustão estagiada em caldeiras existentes requer a adição de um duto de ar, perfurações nas paredes da fornalha para os pontos de alimentação de ar e um possível aumento da capacidade dos ventiladores para o suprimento de ar. Geralmente a retroajustagem envolve detalhamento e estudo de lugares específicos usando CFD (*Computational Fluid Dynamic*) para avaliar a compatibilidade com projeto de caldeiras existentes, materiais e restrições de operação. Dentre alguns problemas operacionais da combustão estagiada pode-se incluir a diminuição da eficiência de combustão e a deterioração das condições finais do vapor (Moore, 2000). A Figura 24 mostra os sistemas ACE e ACEA e o efeito da velocidade de injeção.

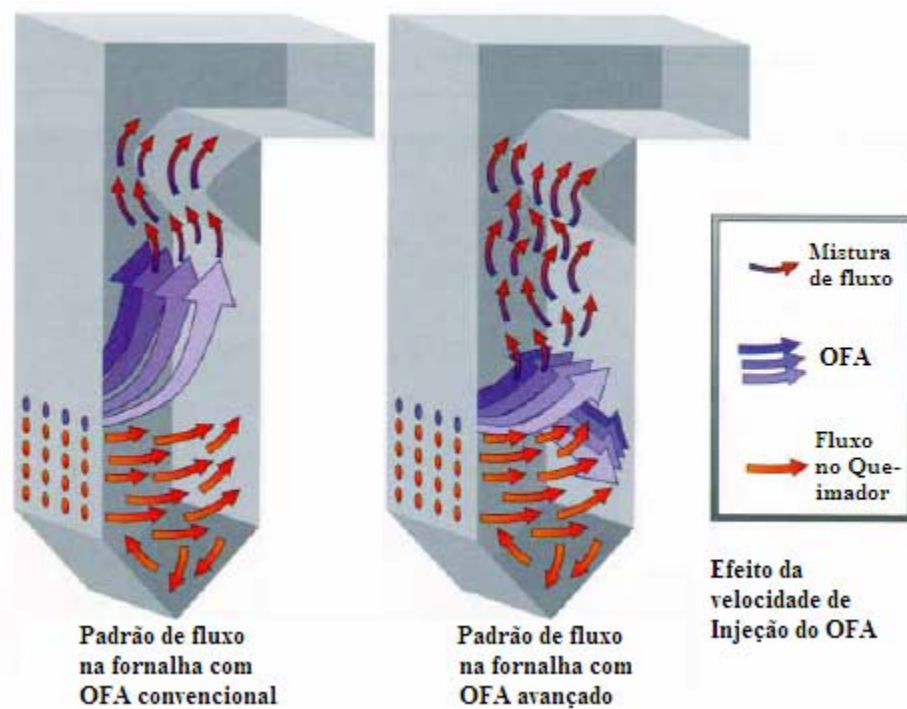


Figura 24: Comparação entre OFA Convencional e Avançado
Fonte: U.S Department of Energy (1996)

Em um sistema de combustão estagiada mais avançada (ACEA) o ar é desviado da tubulação do ar secundário, sendo que a este sistema incorporam-se quatro amortecedores de controle de fluxo nos cantos da caixa de vento do sistema de combustão estagiada, e quatro orifícios de ar para combustão estagiada em ambas as paredes da frente e do fundo da

fornalha. Para melhorar a mistura, o sistema de ACEA aumenta a velocidade de injeção do ACE comparado com outros sistemas de ACE (U.S Department of Energy, 1996).

5.1.3 A Combustão Secundária

No processo de combustão secundária, parte do combustível de entrada da caldeira (tipicamente 10 a 25%) é adicionado em uma zona de queima separada. O combustível rico em condições reduzidas nesta zona conduz para a redução da formação de NO_x na zona normal de combustão. Para completar a combustão é injetado ar sobre a zona de combustão secundária (OFA descrito acima) de maneira que tem-se então três zonas distintas na fornalha: 1) zona de combustão com uma razão normal ar/combustível; 2) zona de combustão secundária, onde o combustível adicional resulta em condições de combustível rico; e 3) zona de queima completa do carbono (cauterização), onde o OFA completa a combustão (National Energy Technology Laboratory, 2004). A Figura 25 mostra o esquema do processo de combustão secundária.

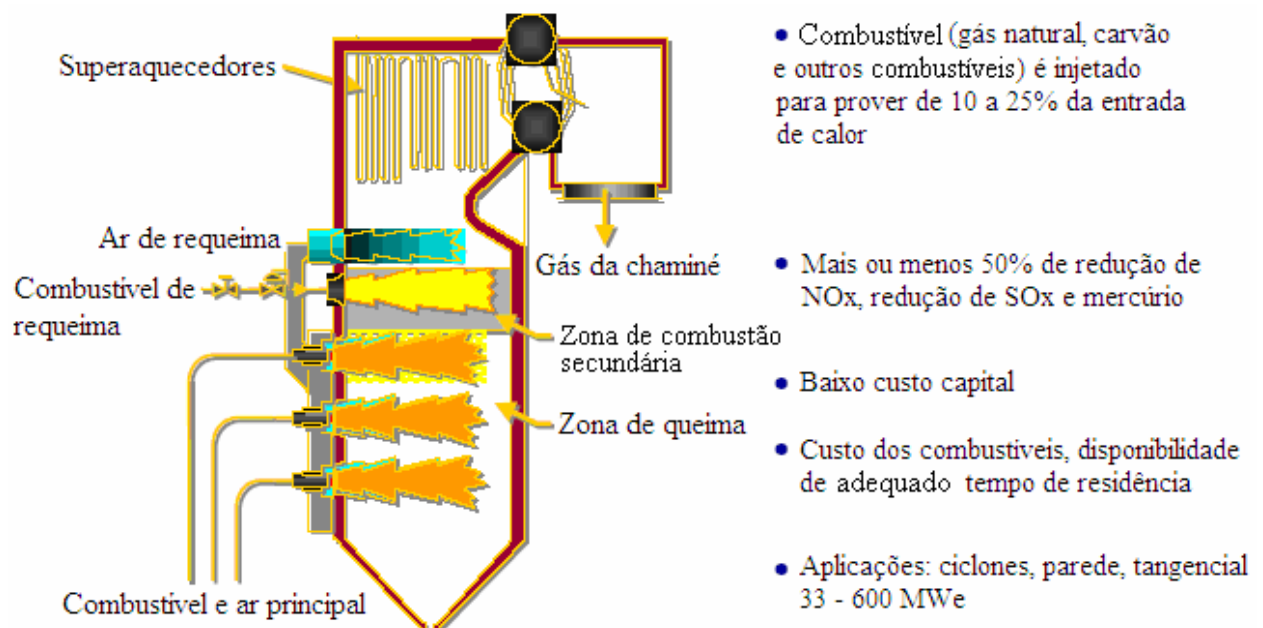


Figura 25: Esquema Simplificado do Processo de Combustão Secundária
Fonte: U.S Environmental Protection Agency (2003)

5.1.4 A Recirculação dos Gases

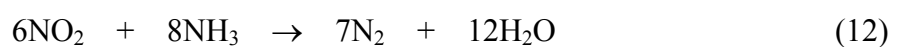
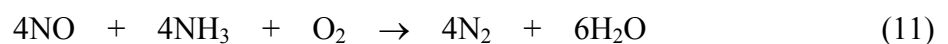
Nesta tecnologia, 20 a 30% dos gases da combustão (350 a 400°C) são recirculados e misturados com o ar de combustão, pois a resultante diluição da chama diminui a temperatura e disponibilidade do oxigênio, reduzindo assim a formação de NO_x térmico. Quando a recirculação é usada em queimadores de baixo NO_x, os gases são recirculados sujeitos a restrição operacional de estabilidade e impacto da chama. A instalação da recirculação em unidades de caldeira a carvão existentes envolve a instalação de sistema de coleta dos gases, duto de trabalho adicional, ventilador e equipamento de coleta dos resíduos das cinzas.

A distribuição do calor na fornalha pode ser afetada pela quantidade de gases, sendo que uma recirculação excessiva leva a uma instabilidade de chama e aumento da temperatura da corrente (IEA Clean Coal Centre, 2004). A recirculação sozinha apresenta uma baixa eficiência na redução de NO_x, sendo necessário a sua utilização em conjunto com outros métodos de controle de NO_x. Cabe destacar que o processo de recirculação é usado como um condutor do combustível para a combustão secundária com a finalidade de aumentar a penetração e mistura na zona de combustão secundária.

A seguir serão descritas as duas principais tecnologias de pós-combustão para o controle de NO_x através do tratamento dos gases da combustão.

5.1.5 A Redução Catalítica Seletiva

Esse método envolve a reação do NO_x com NH₃ dentro de um leito catalítico em condições apropriadas de temperatura (200 a 400°C). Espécies de NO_x reagem com NH₃ de acordo com várias reações, sendo as dominantes (Radojevic, 1998):



O NO_x dos gases está principalmente na forma NO, embora pouco NO₂ está também presente. A amônia é quimicamente absorvida nos locais da superfície ativa do catalisador,

onde esta reage com o NO_x da fase gás. A eficiência de remoção de NO_x de sistemas de SCR é de 70 a 90%. Vários catalisadores diferentes, operando sob diferentes faixas de temperatura encontram-se disponíveis (Radojevic, 1998). A Figura 26 esquematiza o processo de SCR com o sistema de alta-névoa.

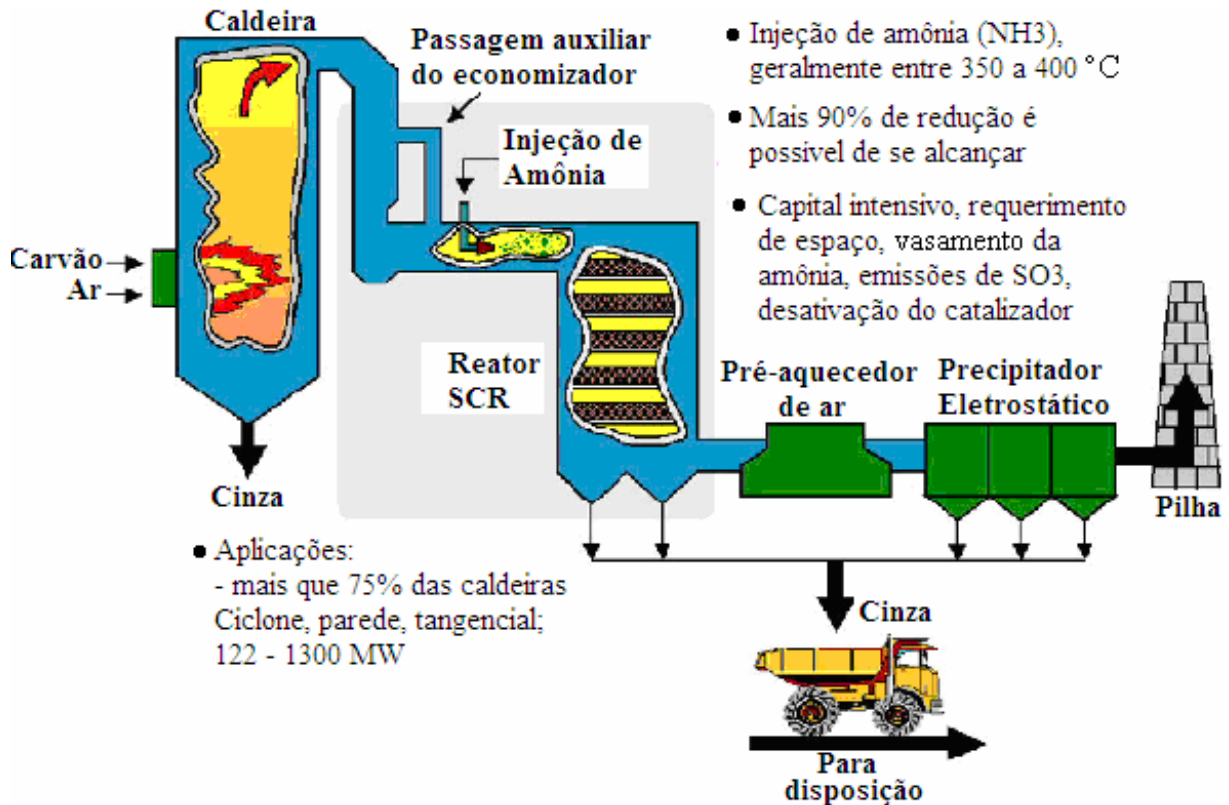


Figura 26: Esquema do Processo de SCR
Fonte: Coal Utilization Research Council (2004)

A maioria dos catalisadores usados em plantas de potência com caldeira a carvão consistem de misturas de vanádio (catalisador ativo) e titânio (usado para dispersar e apoiar o vanádio), portanto, a composição final do catalisador consiste de muitos metais ativos e materiais de apoio para encontrar requerimentos específicos para cada instalação de sistemas de SCR. A geometria do catalisador pode ser uma placa plana ou pode ser em forma de colméia (IEA Clean Coal Centre, 2004).

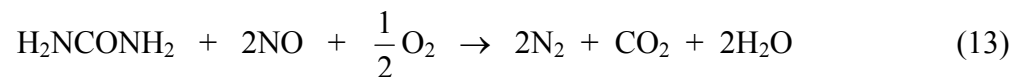
Em aplicações industriais, o leito catalítico pode ser instalado em várias localizações:

- sistema alta-névoa: antes do precipitador eletrostático e da unidade de FDG.
- sistema baixa-névoa: após o precipitador eletrostático mas antes da unidade FDG.
- sistema cauda-final: após o precipitador e a unidade FDG.

O sistema de alta névoa é atualmente o mais amplamente usado, pois neste o reagente é vaporizado, diluído com o ar e injetado nos gases à frente do leito catalítico (Radojevic, 1998).

5.1.6 A Redução Catalítica não Seletiva

No processo de SNCR o NO_x dos gases é reduzido para N_2 pela reação com NH_3 ou uréia, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, a uma alta temperatura (900 a 1000°C). As reações químicas gerais envolvidas são as mesmas que ocorrem em SCR, portanto, o processo é feito em um local com altas temperaturas sem a necessidade de um catalisador. No caso de uréia a reação geral para redução de NO é dada por (Radojevic, 1998):



Em aplicações práticas, aditivo NH_3 é injetado nos gases mais próximo da zona de combustão do que sistemas SCR. A eficiência do processo de SNCR depende de vários fatores incluindo a temperatura, nível de NO_x , mistura do gás com o fluxo de reagente, razão NH_3/NO_x e tempo de reação. Em aplicações práticas é essencial a obtenção de uma distribuição uniforme do aditivo nos gases dentro de uma zona de temperatura apropriada. Geralmente eficiências de remoção de NO_x de 30 a 70% são reportadas, mas eficiências tão grande quanto 80% podem ser alcançadas (Radojevic, 1998).

O processo de SNCR é mais adequado para o uso em plantas existentes, visto que o mesmo não necessita de leito catalítico. Apenas equipamentos de armazenagem e injeção são necessários, resultando em um menor custo capital comparado a sistemas SCR. Os custos de operação são compatíveis com os de SCR (Radojevic, 1998). A Figura 27 mostra o esquema simples de um sistema de SNCR empregando uréia em uma central termoelétrica.

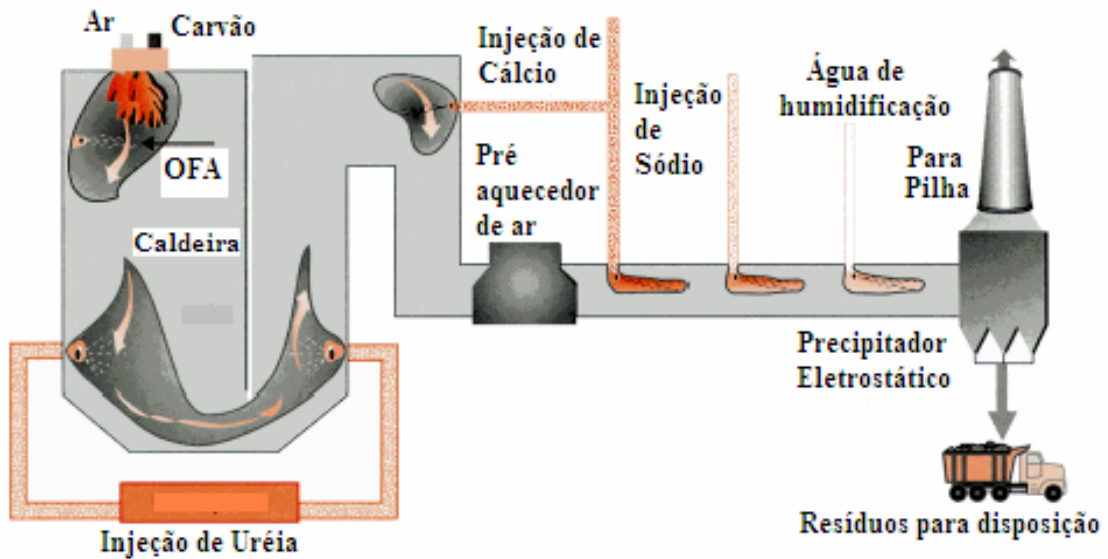


Figura 27: Processo de SNCR em uma Central Termoeletrica
Fonte: Souza e Morreira (2002)

5.2 O CONTROLE DE ÓXIDO DE ENXOFRE

A combustão de combustíveis fósseis para aquecimento e geração de energia é a maior fonte de emissões de SO_x para o ambiente. O SO_x é altamente solúvel na água e, portanto, é facilmente evaporado e absorvido pelas vias respiratórias. O controle de óxidos de enxofre pode ser realizado através de várias tecnologias, sendo estas aplicáveis principalmente nas fases de combustão e de pós-combustão.

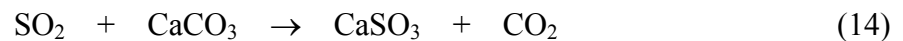
Durante a fase de combustão, o controle de SO_x pode ser realizado pelo emprego da combustão em leito fluidizado (descrita no Capítulo 4), a qual emprega um sorvente para a captura do enxofre no próprio leito fluidizado.

Para a fase de pós-combustão, tecnologias específicas estão disponíveis atualmente para controle das emissões de SO_x , as quais podem alcançar de 90 a 95% de eficiência. Um grande número de tecnologias de controle de SO_x vem sendo empregadas desde a introdução das mesmas na indústria de potência com caldeira a carvão na década de 1970. A tecnologia mais amplamente utilizada é o sistema de lavagem úmida (*Wet Scrubbing*). A segunda tecnologia mais utilizada é a lavagem seca ou lavagem por atomização a seco (*Dry Scrubbing ou Spray Dry Scrubbing*) (Kitto, 1996).

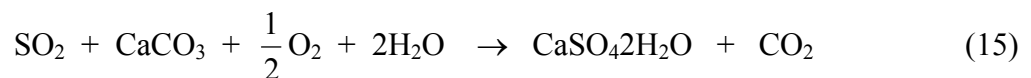
5.2.1 Os Lavadores Úmidos (Wet Scrubbing ou wet FDG)

Dessulfurização dos gases (FDG) é uma tecnologia de controle que remove SO_x dos gases pela reação destes com um sorvente alcalino, geralmente cal ou calcário. Em “Wet” FDG, a tecnologia mais comum, o sorvente está contido em um lodo de água que é atomizado em um recipiente absorvedor no qual o gás flui diretamente. Processos de Wet FDG tipicamente removem de 90-97% do enxofre dos gases, pois os mesmos podem ser configurados para produzirem gesso de elevada qualidade para uso em construções (IEA Clean Coal Centre, 2004).

Nos sistemas de lavagem úmida, tratamento da água residual é requerido. Esses sorventes são favorecidos pela sua disponibilidade e relativo baixo custo. A reação química geral que ocorre com o calcário ou cal pode ser expressa de uma maneira simples como:



O ar dos gases produz alguma oxidação e o produto final desta reação é uma mistura úmida de sulfeto e sulfato de cálcio. Um forçado grau de oxidação envolvendo a injeção de ar resulta em um sub-produto de valor comercial, o gesso, pela seguinte reação:



Sistemas Wet FDG tem provido custo efetivo e grande eficiência de remoção de SO_x (90 a 98%) para uma faixa de carvões de alto e baixo enxofre de plantas de potência de utilidades elétricas.

Melhoramentos no projeto e eficiência têm conduzido a uma significativa redução no custo capital inicial e no consumo de potência de operação nos últimos anos. Portanto, os sistemas para conversão do lodo residual úmido em um subproduto comercial ou em um material seguro exibem uma complexidade adicional, a qual faz o sistema Wet FDG menos atrativo para aplicações industriais (Kitto, 1996). A Figura 28 mostra um exemplo de sistema Wet FDG.

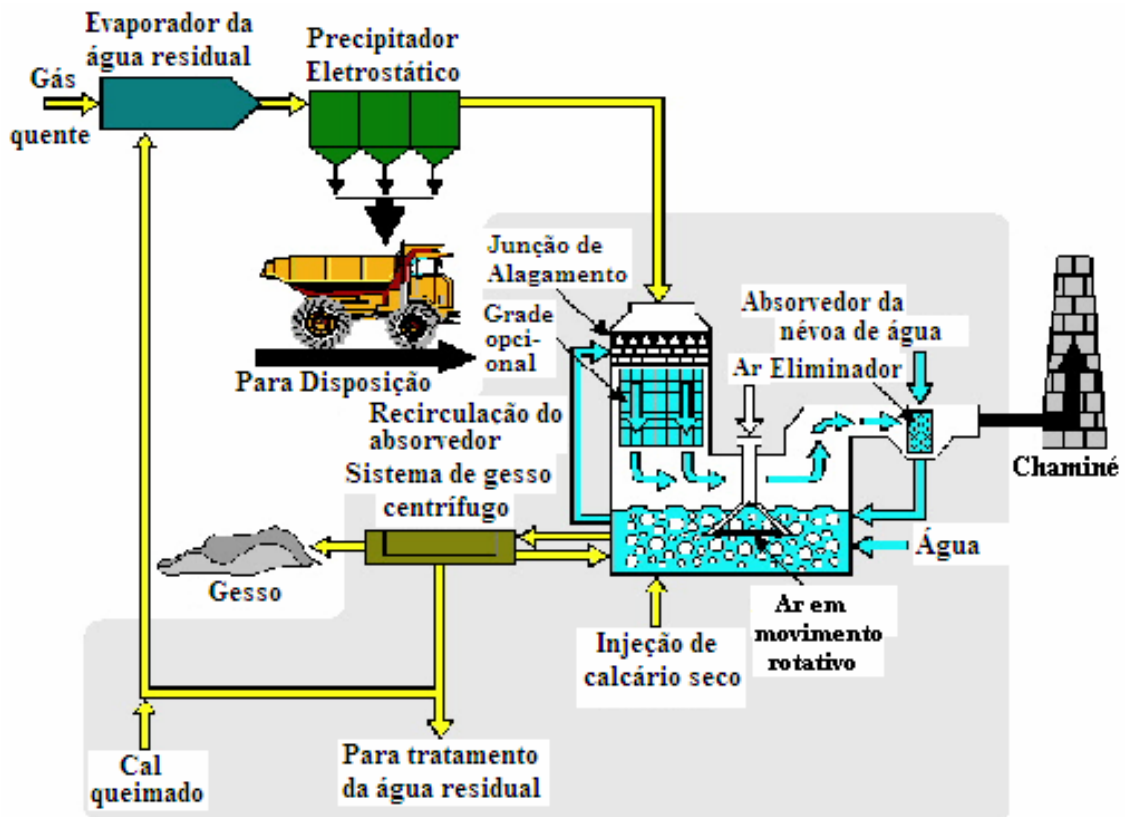


Figura 28: Sistema Wet FDG ou Wet Scrubber
Fonte: Coal Utilization Research Council (2004)

5.2.2 Os Lavadores Seco (dry scrubbing)

O termo “dry scrubbing” refere-se a uma classe de processos FDG nos quais um lodo aquoso ou uma solução de reagente alcalino é atomizada nos gases de uma caldeira de tal maneira que a água evapora imediatamente dentro do lavador e os produtos da reação são removidos essencialmente como um pó seco. Entre algumas vantagens dos lavadores seco pode-se citar material de construção barato, produto residual seco, ausência de água residual, baixa demanda de água e controle de processo simples. As desvantagens incluem uso menos eficiente do reagente, a exclusão de calcário como uma opção de reagente e uma menor eficiência de remoção do SO_x (Kitto, 1996).

Por causa da combinação destas forças e fraquezas, os lavadores secos têm se tornado importante em mercados selecionados, incluindo muitas aplicações em caldeiras industriais. Existem várias maneiras simples para classificar os lavadores secos incluindo o tipo de sorvente usado, o método de atomização, o tipo de coletor de pó usado e os aspectos gerais do próprio lavador seco. O reagente mais utilizado em lavadores seco é o CaO . Os lavadores

secos empregam 2 tipos de atomizadores (de disco rotativo ou de fluido duplo) (Kitto, 1996). A Figura 29 ilustra o esquema de um lavador por atomização seco.

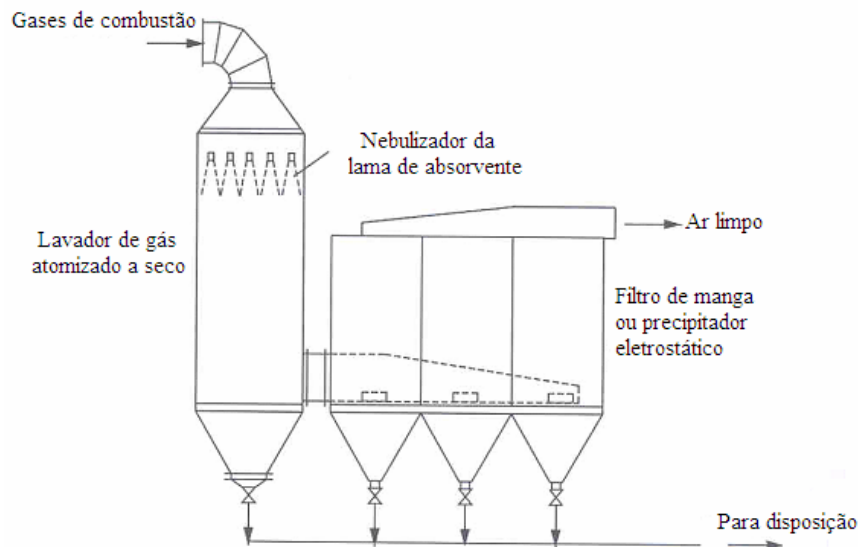


Figura 29: Lavador de Gás por Atomização a Seco
Fonte: PPE/COPPE/UFRJ (2001)

5.2.3 A Injeção de Sorvente

O processo de injeção de sorvente inclui todas as tecnologias onde o sorvente é adicionado seco ou levemente úmido dentro dos limites da caldeira existente (injeção na fornalha) ou no duto de trabalho (injeção no duto). Igualmente, esses processos necessitam de poucos equipamentos novos e, desta maneira, são mais adequados para operações de retroajustagem. Em geral, o nível de remoção de SO_x é relativamente baixo e o consumo de sorvente é alto. Assim, processos de injeção de sorvente parecem mais aplicáveis para caldeiras com espaço limitado (Kitto, 1996)

Em processos de injeção de sorvente na fornalha, este é injetado com o combustível, próximo dos queimadores, na parte de cima da fornalha, e em uma outra localização mais próxima do economizador. Em processos de injeção no duto, o sorvente pode ser injetado em contra-corrente do equipamento de controle de particulados (precipitador ou filtro), sendo a localização antes ou após o equipamento. A eficiência de remoção do SO_x depende das propriedades químicas do reagente, tamanho e distribuição do reagente, temperatura dos gases e tempo de residência (Kitto, 2000). A Figura 30 mostra um esquema de injeção de sorvente na fornalha.

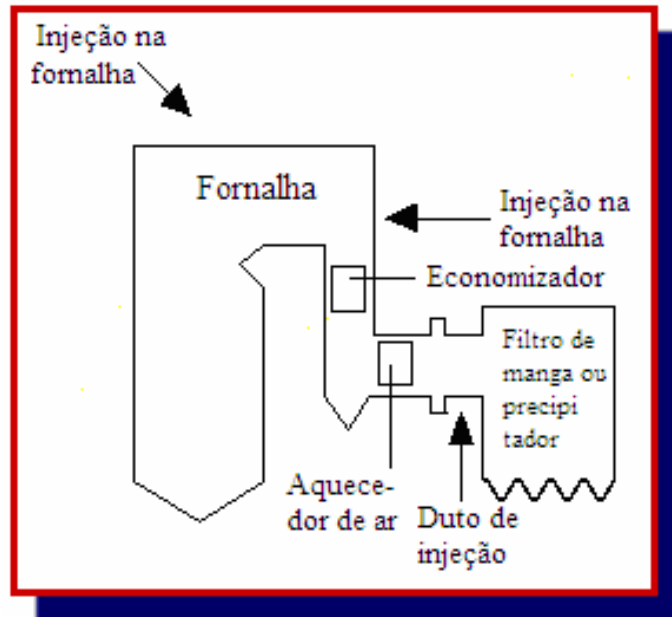


Figura 30: Esquema de Injeção de Sorvente na Fornalha
Fonte: The World Bank Group (2004)

Os processos de injeção de sorvente afetam as propriedades dos particulados e estes, por sua vez afetam o desempenho do precipitador ou filtro, sendo muitas vezes necessária a injeção de amônia, umidificação ou condicionamento dos gases para manter o desempenho destes equipamentos (The World Bank Group, 2004). A Figura 31 mostra um esquema da injeção de sorvente no duto após o equipamento de controle de particulados.

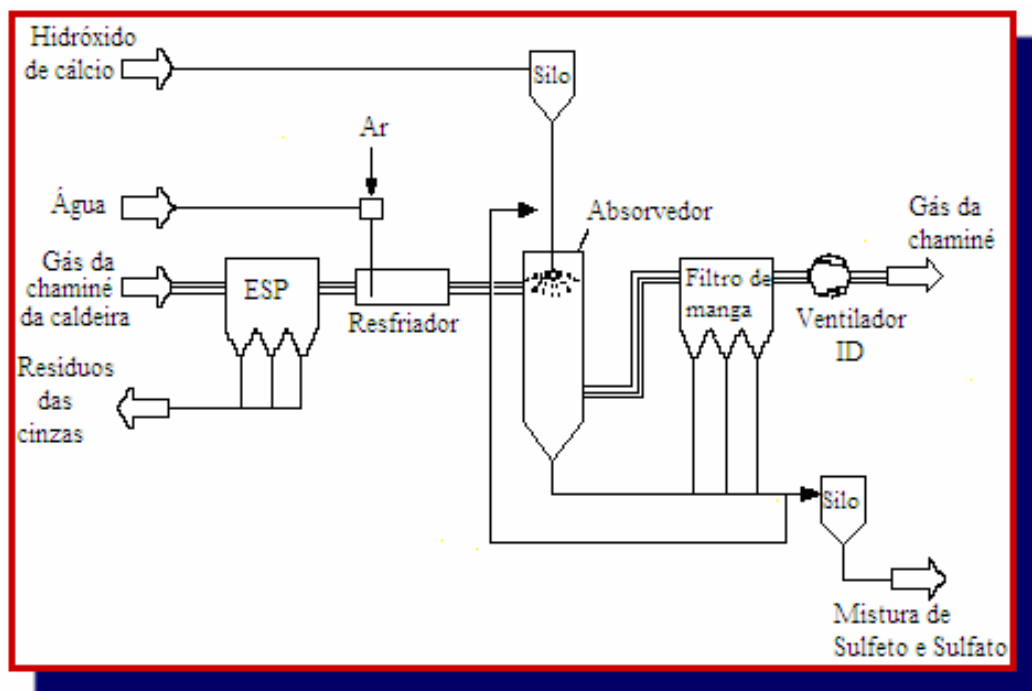


Figura 31: Esquema de Injeção de Sorvente no Duto
Fonte: The World Bank Group (2004)

5.3 O CONTROLE DE PARTICULADOS

Matéria particulada primária é gerada por uma variedade de processos químicos e físicos. Esta é emitida diretamente na atmosfera pelos processos de combustão, processos industriais, emissões fugitivas e fontes naturais. Matéria particulada secundária é formada na atmosfera da condensação dos gases e é predominantemente contida em fina extensão. Durante a combustão do carvão, matéria mineral (impurezas inorgânicas) é convertida para cinza, sendo que esta é descarregada no fundo da fornalha como cinza de fundo. As partículas suspensas nos gases são conhecidas como resíduos das cinzas, pois estes constituem a matéria particulada primária, a qual entra no equipamento de controle de material particulado. Essa matéria particulada é referida como “PM”, “PM10”, “PM2.5”(matéria particulada (PM) com um diâmetro aerodinâmico equivalente de 10 microns ou menos e 2,5 microns ou menos, respectivamente) (IEA Clean Coal Centre, 2004).

O material particulado, por ser um dos principais materiais a ser controlado pela legislação ambiental, possui uma variada gama de tecnologias de controle, algumas delas bastante antigas e tradicionais. Entre as tecnologias mais aplicadas em escala comercial em centrais de potência tem-se os ciclones, os precipitadores eletrostáticos e os filtros de manga.

5.3.1 Os Ciclones

Os ciclones ou multiciclones são equipamentos para separação sólido-gás e podem ser usados extensivamente para separar as grandes partículas da corrente dos gases. O fluxo ciclônico do gás dentro do coletor e a força centrífuga nos particulados conduz as partículas para fora dos gases. Tubos abaixo dos ciclones coletam o particulado e alimentam um sistema de separação de cinzas. Os ciclones são mais efetivos para grandes partículas, pois para pequenas partículas a eficiência de separação cai consideravelmente para menos de 90% (Kitto, 2000). A Figura 32 mostra o princípio de funcionamento de um ciclone.

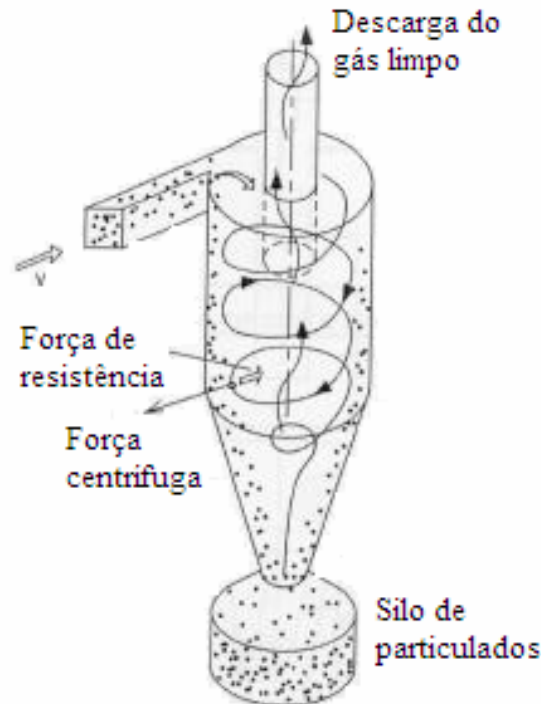


Figura 32: Princípio de Funcionamento do Ciclone
Fonte: PPE/COPPE/UFRJ (2001)

Com os padrões de emissões atuais, o ciclone pode não ser extensamente usado como equipamento de controle primário. Entretanto, com o aumento das caldeiras de leito fluidizado, os ciclones podem ter um aumento na sua parcela de utilização, no qual um ciclone de grande eficiência será usado em série com outro ciclone para controlar as emissões de particulados dentro de limites estabelecidos (Kitto, 2000).

5.3.2 Os Precipitadores Eletrostáticos (EPS)

Um precipitador eletrostático é um equipamento de controle de particulados que usa corrente elétrica para mover as partículas para fora do fluxo circulante dos gases e sobre as placas do coletor. No centro de fluxo do gás estão instalados eletrodos de polaridade negativa que produzem corrente elétrica e efeito corona, isto é, ionizam o gás que está à sua volta. As partículas carregadas são aprisionadas em eletrodos coletores e o material coletado sofre agitação mecânica ou é retirado e depositado no coletor de fundo (U.S. Environmental Protection Agency, 1999). A Figura 33 mostra um esquema da seqüência do processo de captura das partículas em um precipitador eletrostático.

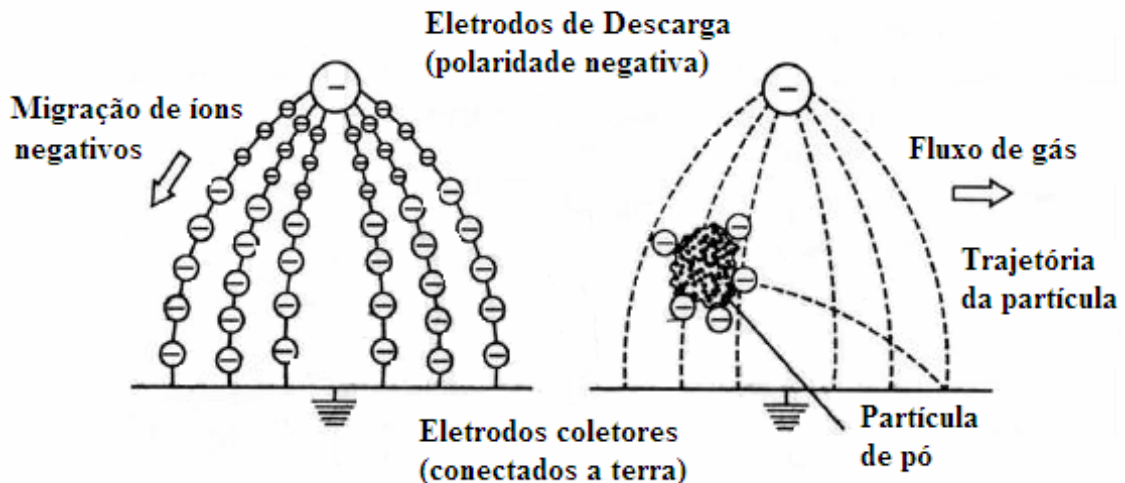


Figura 33: Esquema de Funcionamento de um Precipitador Eletrostático
Fonte: PPE/COPPE/UFRJ (2001)

Os precipitadores eletrostáticos podem apresentar-se em várias configurações, entre elas, a configuração de placa e arame e de placa plana. Quanto à localização dos precipitadores pode-se ter basicamente os precipitadores de superfície fria e de superfície quente. Os precipitadores de superfície fria ficam localizados após o pré-aquecedor de ar (temperatura de operação na faixa de 130 a 180°C) e os de superfície quente ficam localizados antes do pré-aquecedor de ar (temperatura de operação na faixa de 300 a 450°) (IEA Clean Coal Centre, 2004).

EPS podem ser projetados (ou dimensionados) para atender todas as exigências de controle de particulados. Vários fatores que afetam o dimensionamento de EPS incluem:

a) combustível e característica das cinzas - refere-se ao combustível e os constituintes das cinzas. Constituintes como mistura, enxofre, sódio e potássio favorecem a coleção das cinzas e a redução do tamanho do equipamento, ao passo que os constituintes cálcio, silício e magnésio dificultam a captura das cinzas e aumentam o tamanho do equipamento (Kitto, 2000).

b) Condições de operação - a temperatura do gás tem um efeito direto nas partículas dos resíduos das cinzas e no volume de fluxo que passa diretamente ao precipitador. Os EPS possuem duas faixas de temperaturas ótimas (abaixo de 150°C e acima de 315°). Operações em grandes faixas podem comprometer o desempenho devido a complicações de outros fatores. O fluxo de gás afeta diretamente o dimensionamento. A máxima eficiência do EPS é

alcançada quando o fluxo de gás está distribuído uniformemente em relação à seção transversal da unidade (Kitto, 2000).

c) tamanho da partícula e carregamento - o tamanho da partícula afeta o projeto e desempenho do EPS. Um EPS é menos eficiente para partículas pequenas do que para partículas grandes. Aplicação de EPS com grande percentagem de partículas pequenas pode necessitar de mais superfície de coleta ou menor velocidade do gás para alcançar baixas emissões na saída (Kitto, 2000). Na Figura 34 está ilustrado o esquema geral de um precipitador eletrostático de placa e arame.

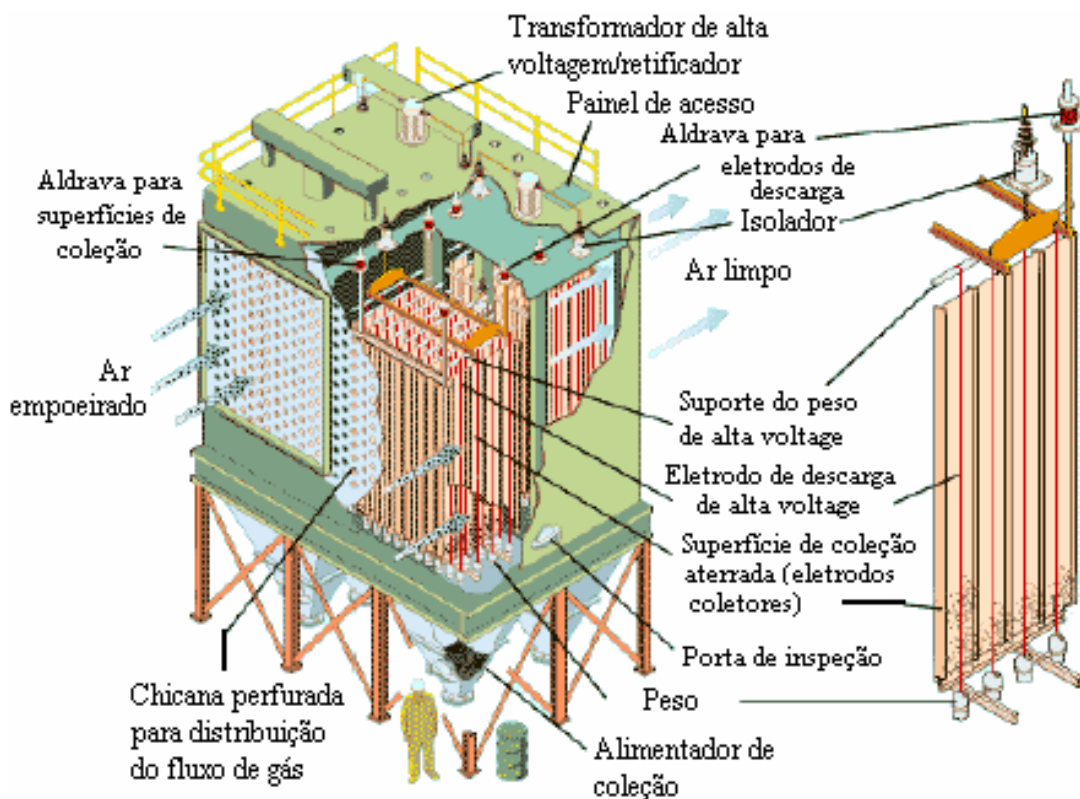


Figura 34: Processo de Captura EPS de Placa e Arame
Fonte: U.S Enviromental Protection Agency (1999)

Os EPS's representam a mais eficiente tecnologia para o controle de particulados disponível atualmente e podem ser suporte de trabalho das tecnologias disponíveis para aplicações em caldeiras dos próximos 30 anos. Internacionalmente o EPS pode também ser escolhido como principal equipamento de controle de particulados. As principais vantagens do EPS são grande eficiência de captura, alta confiabilidade, baixa queda de pressão do gás, resistência a umidade e variações de temperatura e pouca manutenção (Kitto, 2000).

5.3.3 Os Filtros de Mangas

Filtro de mangas é um equipamento para a captura de material particulado que utiliza o princípio da interseção das partículas quando estas passam pelo material poroso das mangas carregadas pelo gás. Um filtro de mangas é composto de um compartimento múltiplo cercado, com cada compartimento contendo um grande número de mangas de pano de pequenos diâmetros suportadas verticalmente. O gás passa direto ao material poroso das mangas, as quais separam as partículas dos gases.

Uma entrada oposta ao vácuo distribui o gás para cada um dos compartimentos para limpeza. Uma saída oposta ao vácuo coleta o gás limpo de cada um dos compartimentos e direciona este para um ventilador de fluxo induzido. Registros de entrada e saída possibilitam o isolamento de cada compartimento para limpeza e manutenção das mangas. Cada compartimento possui um alimentador para entrada de gás semelhante ao de um equipamento de captura e remoção de particulados convencional (Kitto, 2000).

As mangas individuais são fechadas em uma extremidade e conectadas a uma chapa tubular na outra para permitir que o gás passe direto à seção da manga. A camada de pó acumulada nas mangas é chamada de torta de pó. A captura de particulados é feita por meio da interseção direta através do contato direto entre o fluxo de material particulado e as mangas do filtro. Forças de menor intensidade as quais auxiliam a captura são a difusão, força eletrostática e gravidade. Uma vez formada, a camada de pó facilita a maior parte da captura (Kitto, 2000).

As mangas devem ser limpas periodicamente para manter a queda de pressão dentro de limites aceitáveis e remover os particulados, embora uma camada de pó seja mantida para aumentar a eficiência de captura do material particulado. Cada compartimento deve ser limpo sequencialmente. Um dos parâmetros chave do projeto é a razão proporcional de ar ou fluxo de gás para a área de pano (ou razão A/C), a qual está voltada para: 1) diminuir o tamanho e custo da unidade, 2) prover período razoável entre os ciclos de limpeza, e 3) otimizar a vida e substituição da manga. O material mais comum para a confecção das mangas é fibra de vidro, principalmente em unidades com caldeira a carvão. A Figura 35 mostra o esquema e princípio de funcionamento de um filtro de manga.

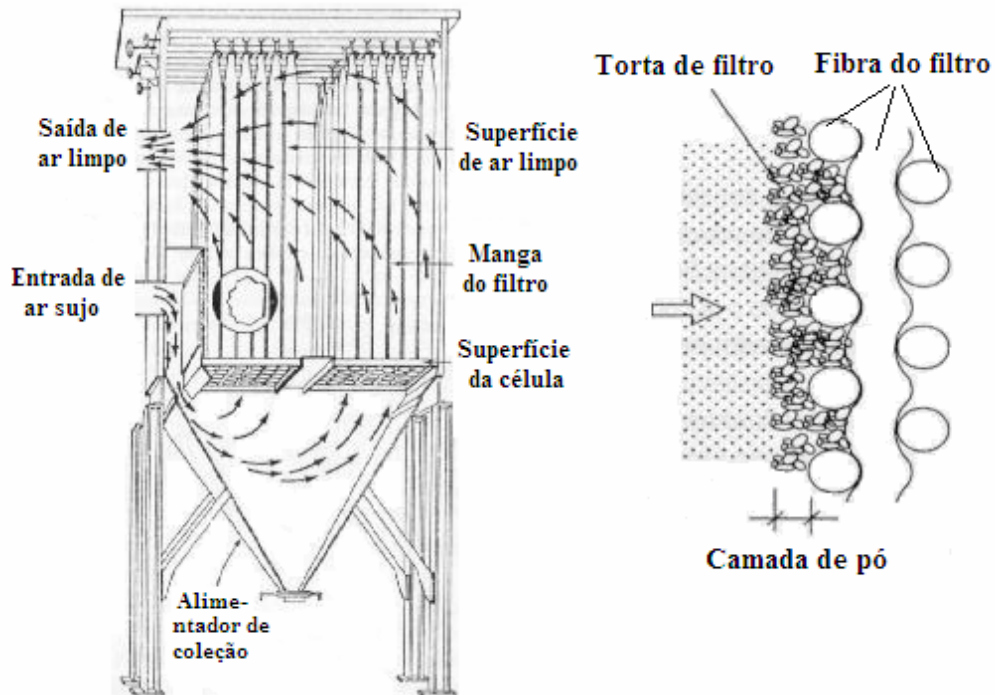


Figura 35: Esquema e Princípio de um Filtro de Manga
Fonte: PPE/COPPE/UFRJ (2001)

5.4 O CONTROLE DE MERCÚRIO

A habilidade para a captura de mercúrio dos gases em centrais de potência que utilizam caldeira a carvão é fortemente dependente da forma (ou espécie) de mercúrio na corrente dos gases. Durante a combustão, o mercúrio no carvão é volatilizado e convertido para a forma elementar vapor (Hg^0) nas regiões de alta temperatura das caldeiras. Quando os gases são resfriados ocorrem muitas reações complexas que acabam convertendo o mercúrio elementar para fase de mercúrio iônico (HG^{+2}) e também para a forma de material particulado (HG_p). A divisão do mercúrio nestas três fases pode possuir considerável influência na viabilidade de tecnologias específicas de captura (U.S Environmental Protection Agency, 2004).

A divisão do mercúrio nos gases é influenciada por diversos fatores incluindo o tipo de carvão a ser queimado, tempo/perfil de temperatura na corrente dos gases, a composição dos gases (incluindo o conteúdo de cloro), a composição dos resíduos das cinzas (isto é, carbono não queimado, cálcio, ferro), as características físicas dos resíduos das cinzas (isto é, área superficial, porosidade) e equipamentos de controle de poluição existentes. Em geral, a

maioria do mercúrio na fase vapor em caldeiras de queima de carvão betuminoso é Hg^{+2} e para carvão sub-betuminoso e linhito é Hg^0 (U.S Environmental Protection Agency, 2004).

5.4.1 O Controle Pelos Equipamentos Existentes

Dados da EPA (*Information Collection Request (ICR)*) tem revelado que muitas centrais de potência possuem a captura de mercúrio como um benefício indireto das tecnologias de controle de poluição existentes, pois estas oferecem uma boa oportunidade para a captura de mercúrio. Isso inclui a captura de mercúrio como material particulado (Hg_p) no equipamento de controle de material particulado (PM) e a captura de mercúrio na fase iônica (Hg^{+2}) no sistema de dissulfurização (FDG) ou sistema de lavagem (Wet scrubbers) (U.S Environmental Protection Agency, 2004).

Dados adicionais têm também mostrado que o uso da redução catalítica seletiva (SCR) para controle de NO_x aumenta consideravelmente a oxidação do mercúrio da fase elementar (Hg^0) para a forma ionizada (Hg^{+2}), resultando assim em um aumento de captura no sistema de lavagem (*Wet scrubber*), principalmente para carvão betuminoso (U.S Environmental protection Agency, 2004). A Figura 36 mostra uma configuração típica destes equipamentos de controle de poluição do ar.

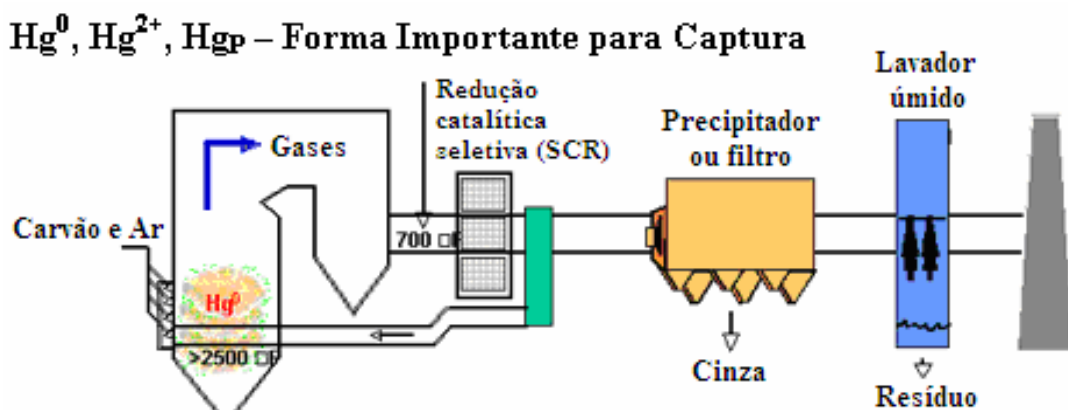


Figura 36: Configuração Típica de Equipamento de Controle de Poluição do Ar
Fonte: U.S Environmental Protection Agency (2004)

Para plantas de potência que empregam apenas precipitador eletrostático (ESP), o nível de captura de mercúrio é menor do que plantas que empregam Filtros (FF), pois em plantas que empregam ambos controle de particulados e controle de SO_x o nível de captura é consideravelmente maior. Convém observar que, para plantas que utilizam o carvão

betuminoso, os níveis de captura de mercúrio são maiores do que plantas que utilizam carvão sub-betuminoso e linhito (U.S Environmental Protection Agency, 2004).

A eficiência de remoção de mercúrio de alguns equipamentos de controle de poluição são: precipitadores e filtros 24%, sistema de dessulfurização (*scrubbers*) 34% e a combinação de redução catalítica seletiva (SCR) com *wet scrubber* pode alcançar 80% de remoção. A seguir será descrito um dos métodos específicos para o controle de mercúrio, que é a injeção de carbono ativado pulverizado (ACI).

5.4.2 A Injeção de Carbono Ativado

Controles específicos para mercúrio, notavelmente a injeção de carbono ativado (ACI) são usados em combustores de resíduos municipais (CWM) e em incineradores de resíduos médicos (IWM) nos Estados Unidos e na Europa. Na tecnologia ICA, o sorvente carbono ativado pulverizado (CAP) é injetado na corrente dos gases em uma localização do duto precedendo o equipamento de controle de particulados, o qual pode ser um precipitador ou um filtro. O sorvente CAP mistura-se com o mercúrio no duto dos gases, sendo que subsequentemente o mercúrio contendo o CAP é capturado no equipamento de controle de particulados. Grande remoção de mercúrio é obtida com um filtro comparativamente ao precipitador, pois isto é devido ao contato aumentado entre as partículas e o gás na torta do filtro segundo a superfície do pano (U.S Environmental Protection Agency, 2004).

A ICA é a mais estudada das tecnologias de controle específico para mercúrio devido a sua alta eficiência. Portanto, a experiência com aplicações de ICA em MWC e MWI não pode ser diretamente transferida para aplicações em caldeira a carvão por diversas razões, a saber: Em geral, a concentração de mercúrio nos gases de MWC e MWI é bem maior do que em sistemas com caldeira a carvão, e é conhecido que a remoção de mercúrio pela ACI é limitada pela transferência de massa (isto é, a transferência de mercúrio da massa de gases para a superfície das partículas de carbono). A transferência de massa é grande para grandes concentrações de mercúrio nos gases de MWC e MWI, e baseado nestas diferenças a quantidade de mercúrio capturado por unidade de massa de carbono ativado (CA) injetado pode ser grande quando comparado com sistemas de caldeira a carvão (U.S Environmental Protection Agency, 2004). A Figura 37 mostra um esquema da injeção de carbono ativado para o controle de mercúrio.

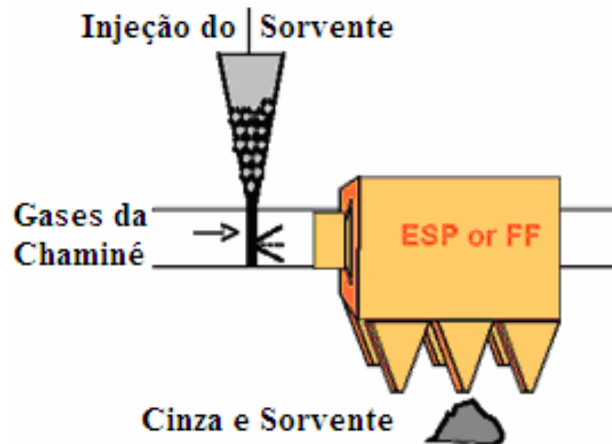


Figura 37: Esquema de Injeção de Carbono Ativado para Controle de Mercúrio
Fonte: U.S Environmental Protection Agency (2004)

O conteúdo de cloro (Cl) nos gases de CWM e IWM é maior do que em sistemas com caldeira a carvão, principalmente em caldeiras que queimam carvões de baixo grau de carbonificação, e isso acaba por afetar o desempenho da injeção de carbono ativado (ACI). O desempenho de ACI em CWM e IWM não é equivalente à sistemas de caldeira a carvão (U.S Environmental Protection Agency, 2004).

Capítulo 6

ESTUDO DE CASO: AS CALDEIRAS DE LEITO FLUIDIZADO

A combustão em leito fluidizado não é uma tecnologia nova. No ano de 1920, o cientista alemão Fritz Wincler fez as primeiras experiências utilizando para estas produtos gasosos de combustão e partículas de coque. Desde então, a solução técnica continuou em progresso, mas o desenvolvimento da combustão de produtos sólidos em leito fluidizado não teve grandes progressos até meados de 1970 (Karppanen, 2000). A Figura 38 mostra um esquema da idéia básica de um leito fluidizado.

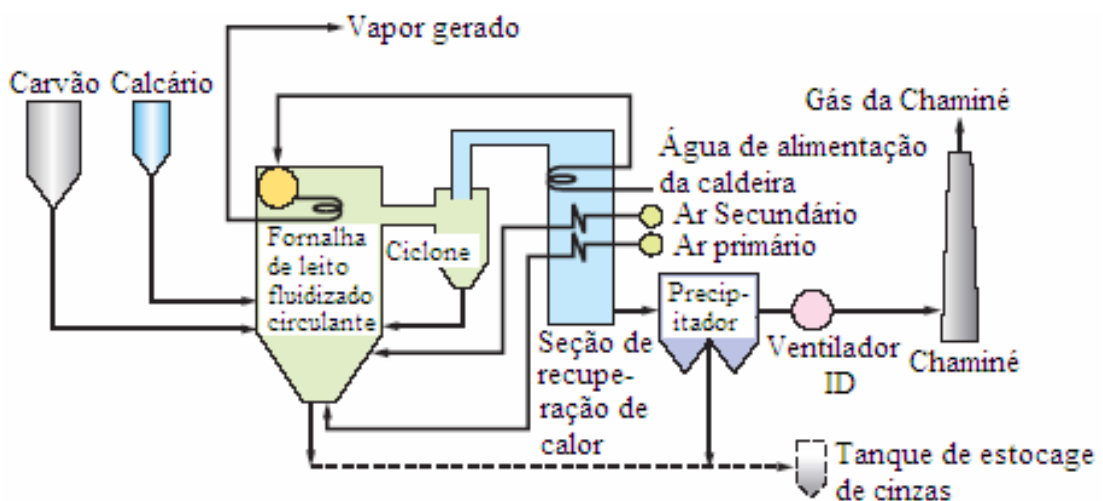


Figura 38: Fluxo do Processo da Combustão em Leito Fluidizado
Fonte: Part2 Outline de CCT (2004)

A idéia básica da combustão em leito fluidizado é a fluidização do material do leito (normalmente areia com cinza do combustível e possível material sorvente) pela introdução

do ar primário de fluidização diretamente no fundo da câmara de combustão. Neste capítulo será estudada a combustão em leito fluidizado atmosférica (AFBC), com uma atenção especial às caldeiras com leito fluidizado circulante (CFBC) devido à grande tendência de aumento dessas unidades em países que mais utilizam o carvão como fonte de energia.

6.1 CALDEIRAS DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

Neste tipo de caldeira, as superfícies de transferência de calor são colocadas no leito para alcançar a desejada absorção de calor e para manter a temperatura do leito. Para combustíveis com baixo poder calorífico a área de superfície pode ser mínima ou ausente. A temperatura do leito permanece uniforme, como resultado da vigorosa mistura de gases e sólidos. As caldeiras de leito fluidizado borbulhante são mais recomendadas para a queima de combustíveis com alto teor de umidade e baixo poder calorífico como, por exemplo, lodos e biomassa com grande conteúdo de umidade.

Essas unidades normalmente operam com uma velocidade de fluidização na faixa de 1 – 3 m/s para a carga máxima. Esse tipo de gerador de vapor requer um combustível com tamanho de partícula menor que 6 mm, com tamanho médio de partícula entre 3 e 6 mm. Essas unidades podem operar com mais de 30% de partículas com tamanho menor que 1 mm. A razão de calor liberado é de 2 MW/m² de área do leito. A eficiência térmica deste tipo de gerador de vapor se encontra entre 82 e 86%.

Unidades BFBC são capazes de capturar mais de 85% do enxofre pela injeção de calcário no leito. Algumas unidades incorporam um sistema de reciclagem de cinzas debaixo do economizador. Isso maximiza a eficiência da combustão e captura de enxofre. A quantidade de sólidos que pode ser reciclada é limitada para aproximadamente 25% do peso do gás de combustão.

Esses tipos de geradores de vapor estão disponíveis nas capacidades de 0,5 a 150 t/h. A construção além de 150 t/h torna-se inviável devido à grande área de leito requerida, resultando em grande tamanho da fornalha. Atualmente, o tamanho máximo de uma caldeira de leito fluidizado borbulhante para geração de vapor em operação no mundo é de 200 t/h.

Geradores de vapor BFBC são mais aceitáveis para substituir geradores de vapor com queima com grelha mecânica devido à grande eficiência, grande flexibilidade de combustível e baixo nível de emissões que pode ser alcançado. Um exemplo típico de caldeira de leito fluidizado borbulhante da Babcock & Wilcox com abertura de fundo é mostrado na Figura 39.

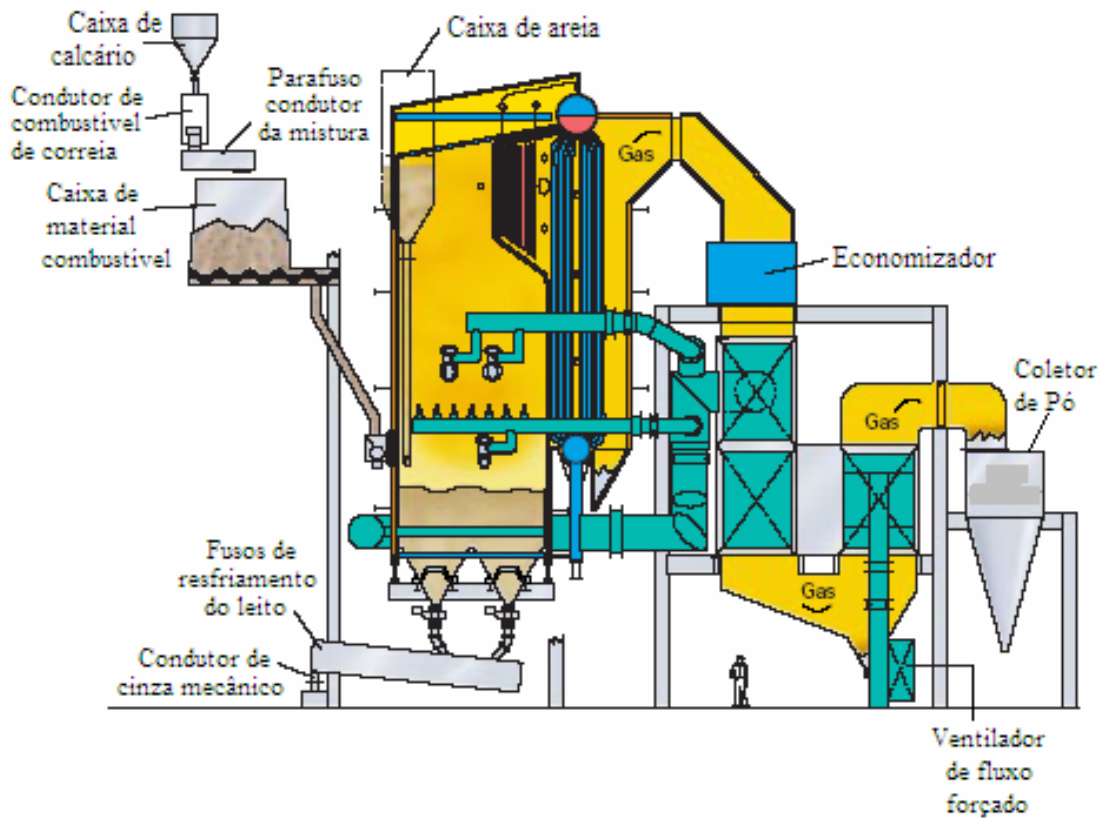


Figura 39: Exemplo de Projeto BFB da Babcock & Wilcox
Fonte: Kraft (1998)

6.2 CALDEIRAS DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Uma caldeira de leito fluidizado circulante é um equipamento para geração de vapor pela queima de combustíveis fósseis em uma câmara de combustão operada sob uma condição hidrodinâmica especial. Finos sólidos são suspensos diretamente à fornalha com uma velocidade que excede a velocidade terminal de partículas médias, com um grau de refluxo de sólidos adequado para assegurar uniformidade de temperatura na câmara de combustão (Karppanen, 2000).

Os pioneiros na utilização da tecnologia de leito fluidizado circulante são a companhia Lurgi na Alemanha e a Ahlstron na Finlândia. Ambas companhias fizeram suas primeiras instalações no ano de 1970, sendo a principal diferença entre as caldeiras da Lurgi e Ahlstron o uso de um trocador de calor externo nas caldeiras da Lurgi. Sendo assim, nas caldeiras da Ahlstron o calor requerido é absorvido inteiramente pelas paredes da fornalha. O terceiro desenvolvimento contemporâneo foi o do Laboratório Memorial Battelle nos U.S.A. Diferentemente da Lurgi e Ahlstron, Battelle usa uma alta velocidade do gás no combustor e chama essa caldeira de Caldeira Multi-Sólido (Basu e Fraser, 1991 apud Karppanen, 2000).

Durante os anos de 1980 a 1990, o processo de combustão em leito fluidizado circulante ganhou grande popularidade. A principal razão do aumento do interesse e grande número de instalações é a flexibilidade de combustível e a positiva influência ambiental. As vantagens incluem grande eficiência de combustão, baixa emissão de NO_x e SO_x e a habilidade para queimar uma ampla variedade de combustíveis (Basu e Fraser, 1991 apud Karppanen, 2000). Ainda como duas vantagens adicionais destas caldeiras podem-se citar a economia de espaço devido à ausência de unidades de dessulfurização, desnitrificação e unidade para pulverização do combustível e a facilidade de manutenção (Part2 Outline of CCT).

O número de caldeiras de leito fluidizado circulante tem aumentado rapidamente. Atualmente, são mais de 500 unidades em operação ou em construção. Aproximadamente 55% da capacidade total de vapor estimada mundialmente é para ser usada em co-geração, e aproximadamente 30% é para uso em usinas termoelétricas. As unidades de combustão em leito fluidizado circulante estão em operação em muitos países, com muitos destes apostando nessa tecnologia para resolver problemas ambientais, problemas de resíduos e de combustíveis (Grace *et al.*, 1997 apud Karppanen, 2000). Praticamente o domínio do mercado em termos de tecnologia em caldeiras está na mão de grandes fabricantes, como a Foster Wheeler, Lurgi, Steinmuller, Alstom e Babcock e Wilcox.

6.3 DESCRIÇÃO DAS CALDEIRAS

As caldeiras de leito fluidizado apresentam três componentes principais na sua configuração geral, mas os demais componentes variam de fabricante para fabricante de

acordo com o projeto de cada um. Os três componentes principais são a fornalha, o ciclone separador e o tubo para recirculação dos sólidos. Geralmente a fornalha é fechada com tubos resfriados a água e uma membrana a prova de gás. A seção de baixo da câmara de combustão é revestida com material refratário com passagens para introdução de combustível, calcário, ar secundário, cinza reciclada, um ou mais queimadores de gás ou óleo para partida e drenagem das cinzas de fundo.

O ciclone separador pode ser resfriado a água, resfriado a vapor ou sem resfriamento, sendo utilizado para separar os sólidos em suspensão nos gases quentes e retorná-los novamente ao leito. A velocidade do gás empregada em um leito fluidizado circulante se situa usualmente na faixa de 4,5 a 6 m/s. A alimentação de ar nestas caldeiras é feita de várias formas, sendo elas, ar primário, ar secundário, ar de transporte para alimentação de calcário e combustível, ar para o tubo de retorno e ar para o classificador de cinzas.

O classificador das cinzas de fundo é projetado para remover grandes partículas do leito e reciclar pequenas partículas de volta para a fornalha. Para o caso de carvões de baixo grau de carbonificação a temperatura do leito pode eventualmente ser menor que 800°C. A granulometria do calcário varia de 0 a 1 mm com tamanho médio de 1 a 3 mm e de 0 a 1 mm com tamanho médio de 0,1 e 0,3 mm, respectivamente (Karppanen, 2000).

A configuração básica das caldeiras de leito fluidizado circulante dos maiores fabricantes, como a Lurgi e a Foster Wheeler, são similares, com os principais componentes sendo a fornalha com paredes d' água, ciclone, tubo de retorno e passagem secundária. As principais diferenças de projeto estão no trocador de calor externo, projeto de grelha e sistema de manuseio de cinzas. Usualmente o trocador de calor externo é um aspecto de projeto da Lurgi, ao passo que o projeto da Foster Wheeler possui um trocador de calor interno (INTREX). Existem projetos de fabricantes nos quais o ciclone está localizado dentro da fornalha, pois neste caso o mesmo é totalmente resfriado a água operando com circulação natural semelhante às paredes da fornalha (Karppanen, 2000).

A maior diferença entre as caldeiras de leito fluidizado circulante no mercado atual está no tipo de separador de sólidos empregado por cada fabricante. Caldeiras de leito fluidizado circulante com grandes ciclones separadores conectados na saída da fornalha (tipo ciclone

quente) foram introduzidas em meados de 1970 e estão sendo oferecidas por vários fabricantes de caldeiras (Belin et al., 2001).

Serão descritas a seguir algumas configurações de caldeiras utilizadas por alguns países, segundo os principais fabricantes e também segundo as características de seus carvões.

Como um exemplo de aplicação da tecnologia Lurgi apresenta-se um exemplo de configuração utilizada pela Índia para a queima de seus carvões. Os carvões indianos são caracterizados pelo alto conteúdo de cinzas (>30%), grande percentual de voláteis (>15%), cinzas altamente abrasivas, baixo conteúdo de álcalis e baixo conteúdo de enxofre. Na parte oeste da Índia o lenhito possui alto conteúdo de enxofre (Rajaran, 1999). A Tabela 11 mostra a análise do carvão sub-betuminoso e dos dois principais depósitos de lenhito na Índia.

Tabela 11: Análise dos Carvões da Índia

Propriedades	Sub-Betuminoso	Lenhito (Surat)	Lenhito (Katuch)
Umidade (%)	2 – 5	10 – 50	30 – 35
Cinza (%)	30 – 45	7 – 48	21 – 35
Carbono Fixo (%)	35 – 40	14 – 40	13 – 18
Matéria Volátil (%)	15 – 20	25 – 44	22 – 26
Enxofre (%)	0,3 – 0,5	0,36 – 2,5	3 – 5
Poder Calorif. (kJ/kg)	14650 – 18420	10470 – 23000	8370 – 13400

Fonte: Rajaran (1999)

Devido ao grande conteúdo de cinza abrasiva dos combustíveis, medidas devem ser tomadas para minimizar o potencial de erosão na fornalha, como também na passagem secundária. Devido ao baixo álcali no combustível, o potencial de fusão da escória é mínimo. Enquanto injeção de calcário não é necessária para combustíveis com baixo teor de enxofre, combustíveis com alto conteúdo de enxofre requerem considerável injeção adicional de calcário (Rajaran, 1999).

No processo baseado na tecnologia Lurgi, 40% do ar de combustão é introduzido como ar primário de fluidização e o restante é adicionado como ar secundário por meio de múltiplos pontos de alimentação nas paredes da fornalha. Calor é recuperado do sistema em três áreas especiais (Rajaran, 1999):

- nas paredes d'água da parte superior do combustor, onde calor é recuperado da circulação dos sólidos.
- no trocador de calor de leito fluidizado externo pelo desvio de parte dos sólidos coletados no ciclone e fluidização destes para manter o fluxo de sólidos e transferência de calor para o superaquecedor, reaquecedor e superfície do evaporador.
- na parte de transferência de calor por convecção, onde calor é removido dos gases pelo superaquecedor, reaquecedor, economizador e pré-aquecedores de ar

A Figura 40 mostra o esquema de fluxo do processo da configuração de uma caldeira de leito fluidizado utilizada na Índia.

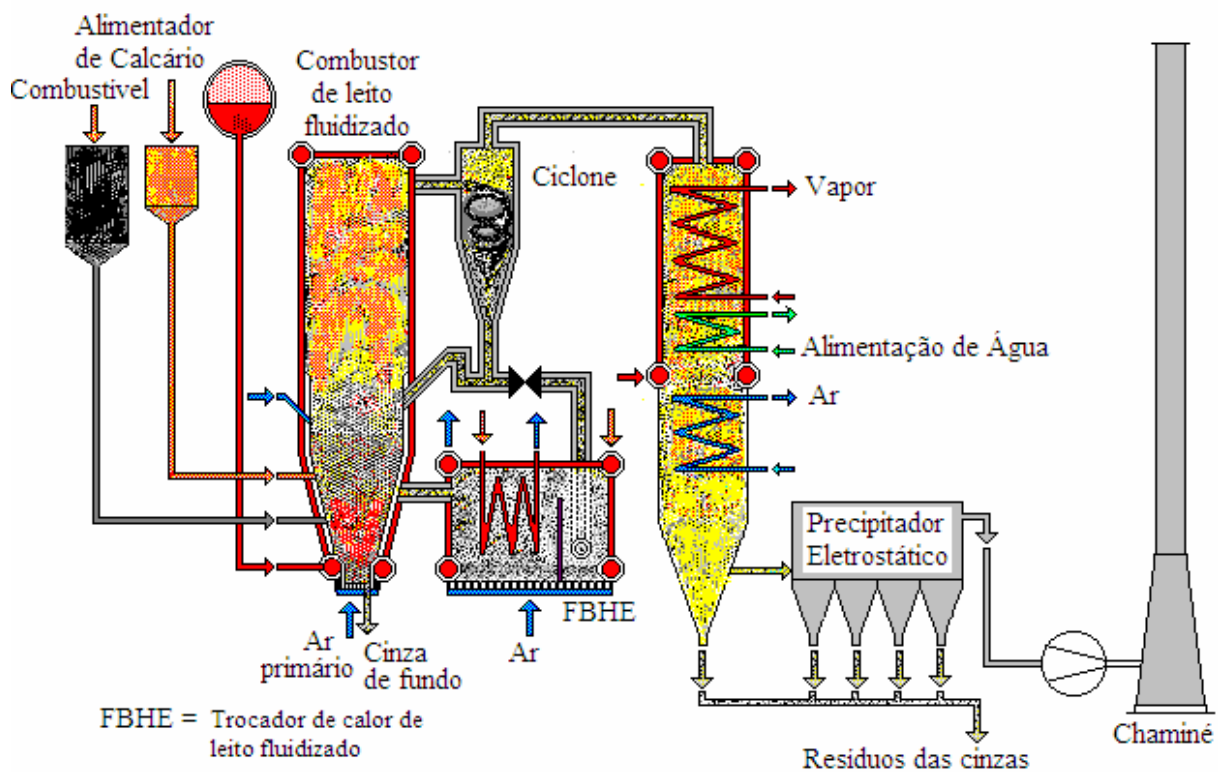


Figura 40: Esquemático Fluxo do Processo

Fonte: Rajaran (1999)

Como um segundo exemplo cita-se as caldeiras de leito fluidizado circulante da Babcock e Wilcox, as quais entraram no mercado na década de 1980, e desde então, têm ganhado grande aceitação. O aspecto principal destas caldeiras é a presença de um separador de sólidos de duplo estágio. O separador primário consiste de elementos verticais em forma de U arranjados na saída da fornalha, pois os mesmos coletam a massa de sólidos e os retornam para a fornalha por gravidade. O estágio de separação secundário consiste de um multiciclone

coletor de pó, localizado na região de baixa temperatura dos gases na passagem de convecção da caldeira, onde as temperaturas variam dentro da faixa de 250 a 510°C (Belin *et al.*, 2001).

O separador com vigas em U está presente em três gerações de caldeiras de leito fluidizado circulante da Babcock e Wilcox:

geração 1 (iniciada em 1986), com todas as vigas em U (11 fileiras) instaladas externamente à fornalha com toda a reciclagem dos sólidos feita através de válvulas em L não mecânicas e não controláveis.

geração 2 (iniciada em 1989), com duas fileiras de vigas em U dentro da fornalha descarregando as partículas coletadas (sob 70% da entrada de sólidos) diretamente à fornalha e sete fileiras de vigas em U externamente à fornalha com reciclagem dos sólidos direto a válvulas em L.

geração 3 (iniciada em 1996), com 2 fileiras de vigas em U dentro da fornalha e 3 ou 4 fileiras de vigas em U externas com todos os sólidos reciclados internamente dentro da fornalha (atualmente oferecido separador “IR CFB”) (Belin *et al.*, 2001). A Figura 41 mostra uma vista dos separadores de sólidos usados nas caldeiras da Babcock & Wilcox.

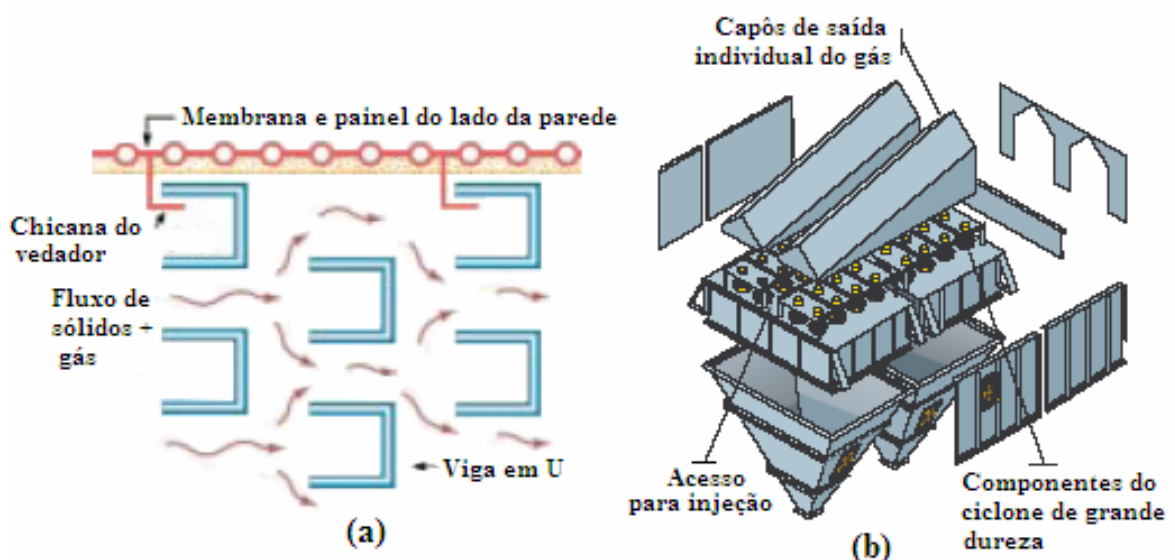


Figura 41: Separadores de Sólidos (a) Primário e (b) Secundário
Fonte: Belin *et al.* (2001)

Como resultado, grande simplificação e redução de custos podem ser alcançadas com o separador de vigas em U. Avanços no projeto do separador multiciclone possibilitaram melhorias na eficiência, no aumento da confiabilidade etc. Componentes como as pás

rotativas do ciclone são feitas de um material de grande dureza (Belin *et al.*, 2001). O projeto do separador de sólidos é o aspecto que exerce maior impacto na configuração da caldeira, uso do sorvente e combustível, flexibilidade operacional e confiabilidade.

A eficiência de separação do separador de sólidos de duplo estágio é consideravelmente alta devido à grande eficiência dos elementos de separação internos do multiciclone. Com isso, tem-se melhor transferência de calor, controle de temperatura e utilização do carbono e sorvente. A temperatura é controlada através da variação da carga e variação do combustível e/ou das propriedades do sorvente pelo controle da razão de reciclagem dos sólidos no multiciclone. Essas caldeiras não necessitam de potência auxiliar e nem de ventiladores de alta pressão para fluidização dos sólidos de retorno (Belin *et al.*, 2001).

Os gases saindo da fornalha para o separador de vigas em U colocado transversalmente a fornalha assegura padrão de fluxo de gás uniforme bi-dimensional. Isso possibilita a colocação de superfícies dentro da fornalha como necessárias sob toda a largura e altura total da fornalha, incluindo a região adjacente à parede do fundo da parte de cima da fornalha.

Vigas em U e multiciclones possuem alta confiabilidade e baixa manutenção, visto que estes não apresentam componentes de manutenção intensiva. Uma vez que o separador de vigas em U está dentro da caldeira tem-se configuração de caldeira mais compacta e redução de custos. Esse aspecto é especialmente importante para retroajustagem das obsoletas caldeiras de carvão pulverizado com a tecnologia de leito fluidizado em aplicações de repotenciação, nas quais a conservação da caldeira existente é desejada (Belin, 2001).

A quantidade de refratário usado nas caldeiras de leito fluidizado circulante da Babcock e Wilcox é cerca de 80 a 90% menor do que o usado para caldeiras de capacidade similar com ciclone quente não resfriado, e de 40 a 50% em caldeiras de leito fluidizado com ciclone resfriado. Para as caldeiras da Babcock e Wilcox o tempo de ignição não está limitado pela razão de aumento da temperatura do refratário.

Mundialmente, muitas caldeiras antigas com queima de carvão pulverizado estão em operação. O desempenho destas caldeiras diminui com o tempo devido à baixa qualidade do combustível. Algumas destas unidades estão deterioradas por causa da variação nas condições do combustível (umidade, cinzas, enxofre e poder calorífico). Melhoria das caldeiras

existentes e envelhecidas que usam o carvão pulverizado é uma das necessidades urgentes em muitos países, por causa da pressão econômica e ambiental (Kavidass *et al.*, 1999). A Figura 42 mostra a configuração geral de uma caldeira da Babcock & Wilcox, juntamente com uma vista do separador de vigas em U e do distribuidor de ar.

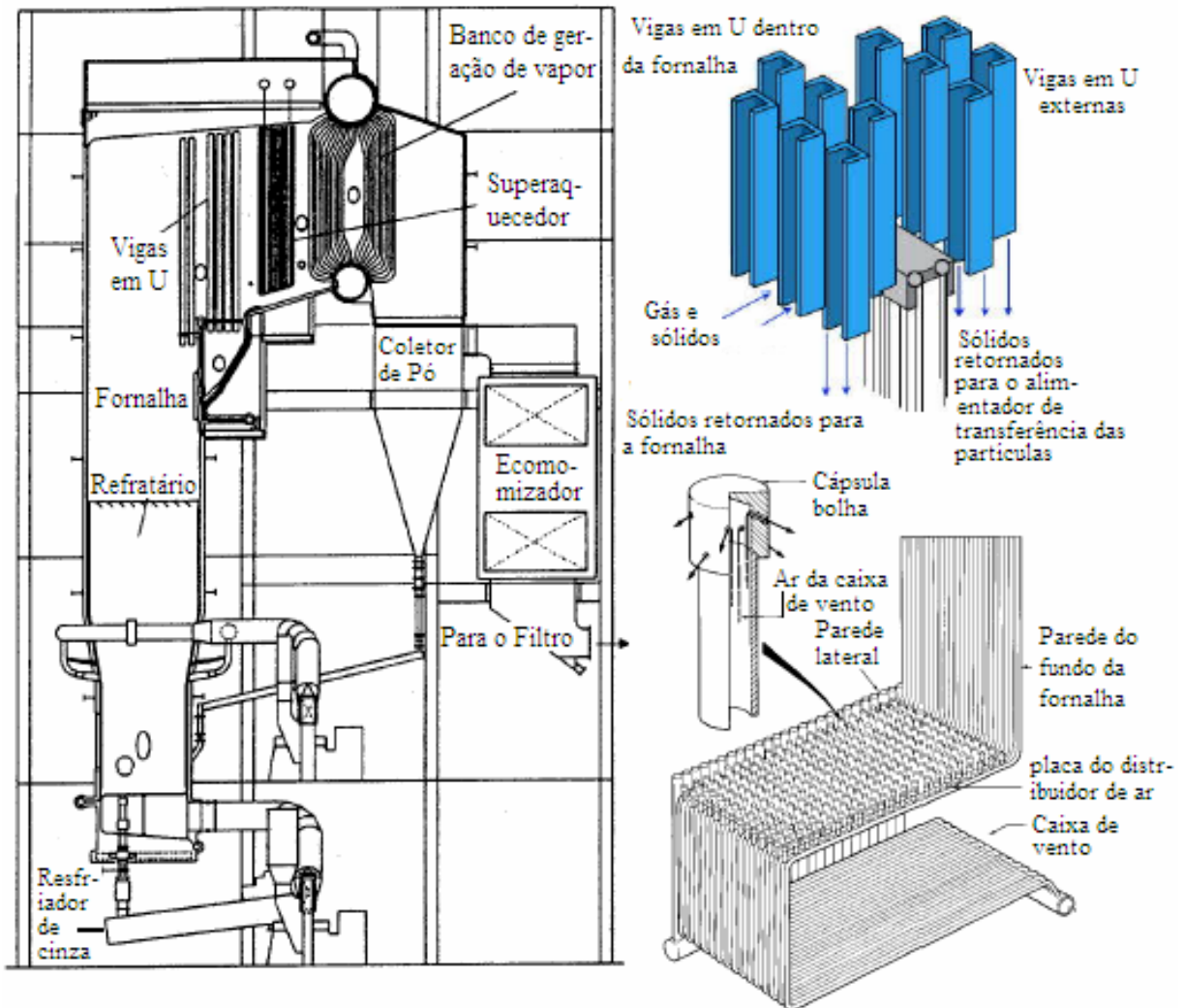


Figura 42: Configuração Geral de uma Caldeira da Babcock & Wilcox
Fonte: Belin et al. (2001)

A repotenciação das caldeiras de leito fluidizado circulante com recirculação interna tem um potencial para estender a vida de uma instalação antiga em mais de 20 a 25 anos. A Babcock e Wilcox têm realizado um extensivo estudo da viabilidade de repotencialização de várias caldeiras de carvão pulverizado para diferentes clientes nos Estados Unidos, China, Índia, Ucrânia e Tailândia. Esses estudos mostram claramente que combustão em leito fluidizado com recirculação interna (IR.FBC) é uma opção economicamente viável para utilizar o carvão existente, reduzir emissões, eliminar a grande manutenção dos

pulverizadores e reduzir o uso de combustíveis auxiliares, como óleo ou gás (Kavidass *et al.*, 1999).

Na Rússia, uma das principais necessidades com relação à energia é desenvolver tecnologias ambientalmente e economicamente eficientes. Um grande número de antigas caldeiras de carvão pulverizado com capacidade de vapor de 170 a 240 t/h necessitam ser reconstruídas. Os padrões ambientais atuais e a possibilidade de queima de carvão de baixo grau fazem mais atrativo o uso da tecnologia de leito fluidizado circulante. Os resultados de estudos e comparações de tecnologias mostraram que existe uma perspectiva para o uso de caldeiras de leito fluidizado circulante. (Ryabov e Nadirov, 1999).

Na Rússia, muitas caldeiras com capacidade de produção de vapor em torno de 200 t/h foram feitas entre 1950 e 1960 para a queima de diferentes combustíveis sólidos. A má condição de muitas dessas caldeiras torna necessária a sua reabilitação com instalação de equipamentos de controle de poluição. A maioria dos carvões para centrais de potência é de baixo grau de carbonificação, possuindo várias composições e diferentes propriedades (Ryabov e Nadirov, 1999).

O custo capital para repotenciação das centrais de potência térmica existentes com caldeiras de leito fluidizado circulante é 2,5 vezes menor do que o custo da construção de novas centrais de potência. O custo capital específico de instalação com caldeiras de leito fluidizado circulante é estimado na faixa de 400 a 600 US\$/kW. A diferença de custo entre caldeiras de leito fluidizado e caldeiras de carvão pulverizado depende de vários fatores, incluindo tamanho da caldeira, tipo de carvão, qualidade do sorvente e seu custo, e padrões de emissão, os quais definem o custo capital e de operação (Ryabov e Nadirov, 1999).

Na Ucrânia, as caldeiras operam com queima de combustível auxiliar (óleo combustível ou gás natural) para suprir de 20 a 25% do calor requerido, como consequência da baixa qualidade do combustível. Outro problema com as caldeiras existentes na Ucrânia é a dificuldade para controlar as emissões de NO_x e SO_x, pois a configuração das instalações existentes torna difícil ou até mesmo impossível a instalação de equipamentos para o controle de poluentes. Novas instalações baseadas em combustíveis fósseis não serão construídas na Ucrânia em um futuro próximo, pois a principal ênfase é a repotenciação e reabilitação das instalações existentes (Belin *et al.*, 1998).

Outro exemplo do emprego das caldeiras de leito fluidizado circulante é o considerável número dessas unidades na Polônia. Naquele país, os fabricantes de caldeiras de leito fluidizado dispõem de diversos projetos de leito fluidizado para potência ou para geração de calor incluindo um leito fluidizado típico projetado pela Alhstrom Pyropower com ciclones revestidos com refratário e ciclones resfriados a vapor. A Foster Wheeler é pioneiro no uso comercial de grande escala de caldeiras de leito fluidizado circulante compacto na Polônia. A Figura 43 mostra o esquema de uma caldeira compacta usada na Polônia.

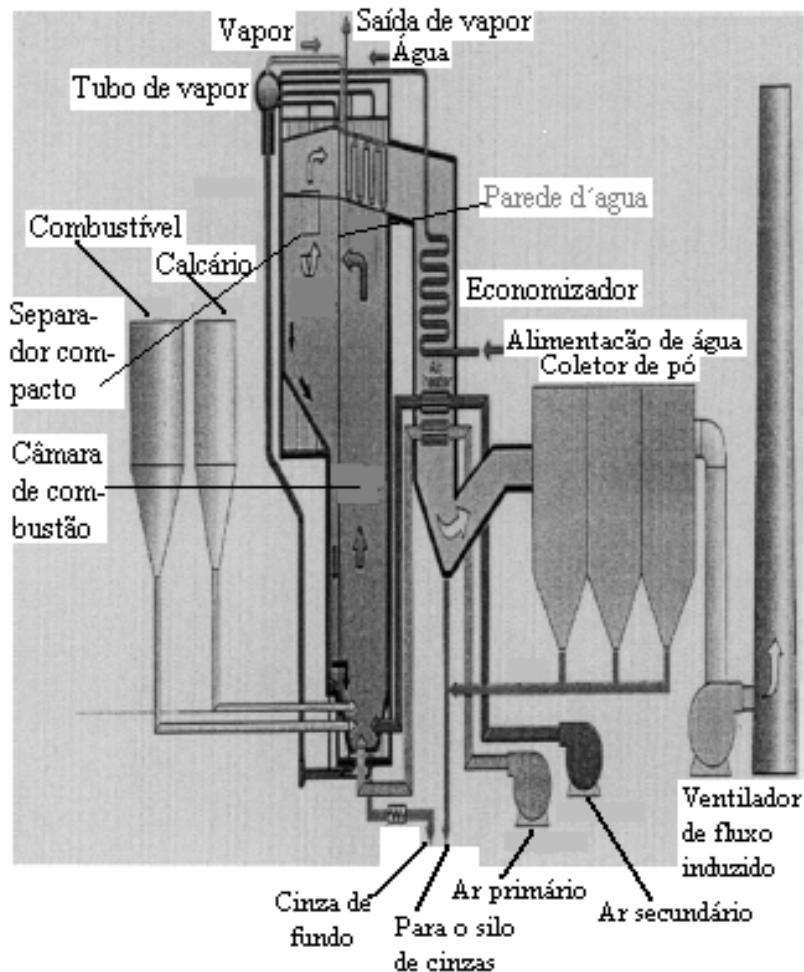


Figura 43: Exemplo de Caldeira Compacta Usada na Polônia
Fonte: Nowak (2003)

Quando comparadas com unidades típicas de leito fluidizado circulante em operação, os aspectos exclusivos dos blocos compactos de leito fluidizado circulante são os seguintes (Nowak, 2003):

- Separadores resfriados a vapor em vez de ciclones quentes;
- Diferente orientação da caldeira e localização dos queimadores de partida (abaixo da placa oposta ao vácuo);

- O uso de um trocador de calor integrado (INTREX).
- Separador resfriador para as cinzas de fundo;
- Aquecedores de ar tipo rotativo em vez de aquecedor de ar tubular.

6.4 FLUIDIZAÇÃO

Fluidização é a operação pela qual partículas sólidas são transformadas em um estado fluídico por completa suspensão em um gás ou líquido (Kunii e Levenspiel, 1991 apud Karppanen, 2000). A fluidização pode ser introduzida pelo uso de varias formas de contato entre um grupo de sólidos e o fluido (Kunii e Levenspiel, 1991 apud Karppanen, 2000). A Figura 44 mostra uma descrição simplificada onde 4 fases de fluidização são especificadas (Raiko *et al.*, 1995 apud Karppanen, 2000).

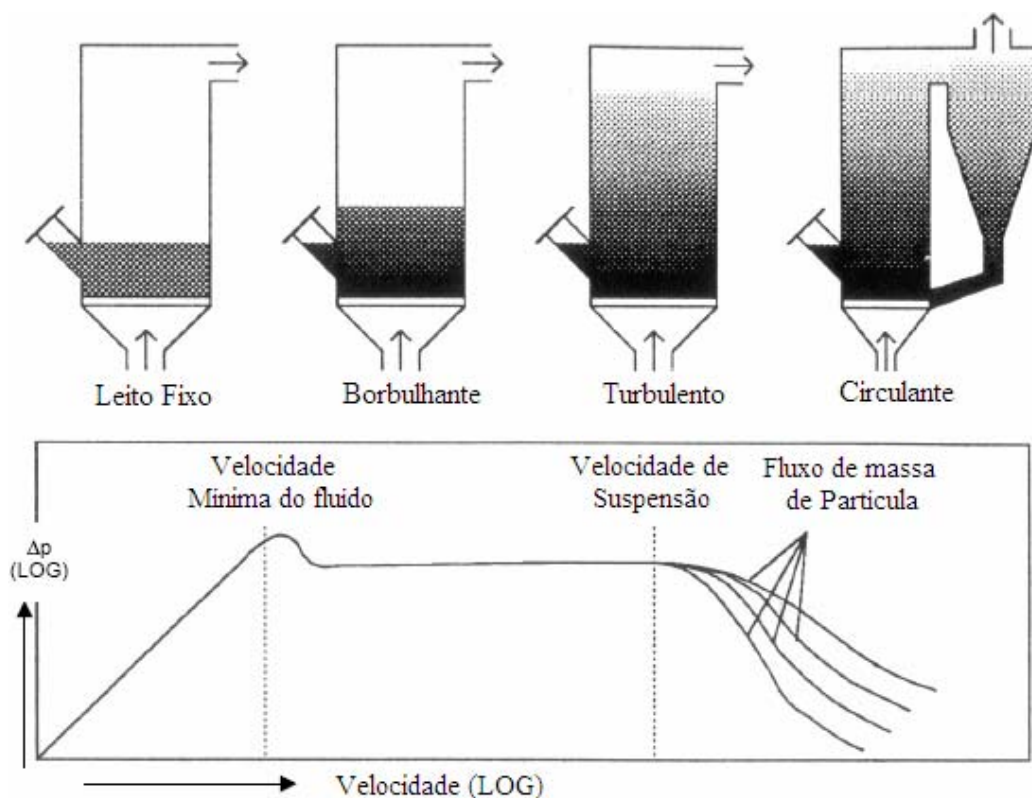


Figura 44: Principais Fases de Fluidização
Fonte: Rayko *et al.* (1995) apud Karppanen (2000)

A velocidade superficial para a mínima condição de fluidização (u_{mf}) pode ser frequentemente introduzida pelo uso da assim chamada equação de Ergun's (Hovard, 1983, Kunni e Levespiel, 1991, Rayko *et al.*, 1995 apud Karppanen, 2000).

$$150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \theta^2} \text{Re}_{mf} + \text{Re}_{mf}^2 \frac{1,75}{\varepsilon_{mf} \theta} = \text{Ar} q \quad (16)$$

na qual Re_{mf} é o número de Reynolds para a mínima condição de fluidização, definido como

$$\text{Re}_{mf} = \frac{d_p \rho_g u_{mf}}{\mu_g} \quad (17)$$

e $\text{Ar} q$ é o número de Arquimedes definido como

$$\text{Ar} q = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (18)$$

na qual

ε_{mf} é a fração de volume para a mínima fluidização (-)

θ é a esfericidade dos sólidos no leito (-)

μ_g é a viscosidade do gás (kg/m.s)

ρ_g é a densidade do gás (kg/m³)

ρ_s é a densidade dos sólidos (kg/m³)

d_p é o diâmetro médio da partícula (m)

g é a aceleração da gravidade (m/s²)

A velocidade mínima de fluidização não é o modo de operação de um leito fluidizado circulante e este está mais concentrado na fluidização rápida. No contexto do seu uso em caldeiras de leito fluidizado circulante o leito fluidizado rápido pode ser definido como (Basu e Fraser, 1991 apud Karppanen, 2000).

Leito fluidizado rápido é caracterizado por possuir uma grande velocidade capaz de manter a suspensão do gás-sólido, onde partículas, decantadas pelo gás de fluidização sob a velocidade terminal de partículas simples são recuperadas e retornadas para a fornalha com uma razão suficientemente grande para causar um grau de refluxo de sólidos que assegure um nível mínimo de uniformidade de temperatura na fornalha. A velocidade terminal u_t para partículas pode ser escrita como (Raiko, 1995 apud Karppanen, 2000).

$$u_t = \sqrt{\frac{4}{3} d_p \frac{(s-1)}{CD} \cdot g} \quad (19)$$

na qual

$$s = \frac{\delta_s}{\delta_g} \quad (20)$$

e CD é o fator de resistência, dependente do número de Reynolds, calculado por meio da seguinte equação (Mao *et al.*, 2004):

$$CD = \frac{24}{R_{emf}} \left(1 + 0,15 R_{emf}^{0,687} \right), \quad R_{emf} < 1000 \quad (21)$$

$$0,44, \quad R_{emf} \geq 1000$$

Apesar da velocidade de fluidização do ar primário, o tamanho das partículas do leito material tem um importante efeito no processo de fluidização do leito. Naturalmente, uma fina fração do material do leito pode ser fluidizada e decantada mais facilmente do que grandes partículas. Quando sólidos com uma ampla distribuição de tamanho e diferentes densidades são fluidizados, segregação de sólidos pode ocorrer (Grace *et al.*, 1997 apud Karppanen, 2000).

Leito fluidizado circulante exibe hidrodinâmica muito complexa, causada pelas iterações entre a fase gás e sólido. O movimento do gás e sólido é dirigido por mecanismos que são difíceis de se identificar e descrever. Embora o movimento de gás e sólido dentro da fornalha seja complicado e dependa de variáveis separadas, as principais correntes de sólidos podem ser descritas pelo modelo simplificado apresentado na Figura 45.

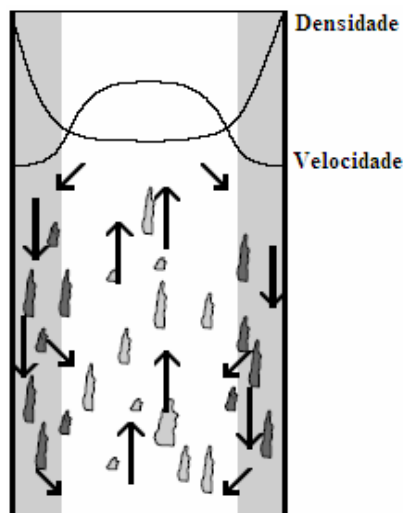


Figura 45: Movimento das Partículas Dentro de um Leito Fluidizado
Fonte: Karppanen (2000)

Na Figura 45 tem-se o movimento das partículas dentro de um reator de leito fluidizado circulante, onde a densidade dos sólidos aumenta próximo às paredes por causa da baixa velocidade do gás. Parte das partículas juntam-se para formar aglomerados de partículas conhecidos como clusters, pois estes estão circulando no sentido descendente e formam circulação de material interno dentro do reator ou fornalha.

6.5 COMBUSTÃO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Um projeto típico se inicia com as especificações do combustível e do vapor e com a regulação ambiental do local. O projetista, então, usa os conhecimentos teóricos e experiência prática para determinar a geometria e tamanho dos vários componentes da caldeira. Uma caldeira, projetada para um carvão específico, pode ser requerida para operar em condições fora de projeto e com outros combustíveis. O operador como o projetista deve, portanto, conhecer o desempenho da caldeira sob estas condições (Basu, 1999).

O desempenho da caldeira, o qual é medido em termos dos parâmetros do vapor, utilização do combustível e geração de poluentes, é obtido por meio da modelagem do desempenho da caldeira. Embora as caldeiras de leito fluidizado sejam flexíveis aos diferentes combustíveis, a composição do combustível exerce alguns efeitos no tamanho da fornalha. O baixo poder calorífico do combustível é o principal parâmetro de influência no tamanho da fornalha (Basu, 1999).

Pontos de alimentação do combustível são projetados para assegurar igual distribuição da combustão das partículas. Um combustível mais reativo (alto conteúdo de voláteis) queima rapidamente próximo do ponto de alimentação. Desta maneira, este pode requerer mais pontos de alimentação do que pode ser requerido para um combustível menos reativo. As indústrias de caldeiras geralmente provêm mais alimentadores do que os necessários. Isso é feito para operações de prontidão (Basu, 1999).

As partículas de carvão injetadas em um leito fluidizado passam pela seguinte seqüência de eventos (Basu, 1999);

- Aquecimento e secagem;
- Desvolatilização e combustão de voláteis;
- Diminuição e fragmentação primária;
- Combustão do carvão com fragmentação secundária e atrito.

Esse processo é mostrado qualitativamente na Figura 46 , a qual mostra a ordem de magnitude do tempo feito em cada passo.

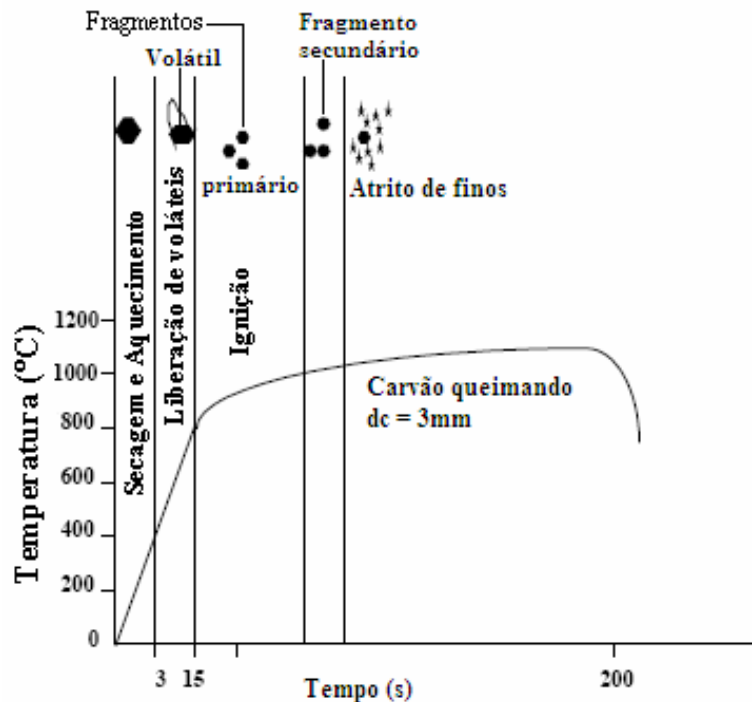
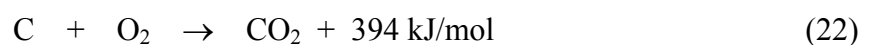


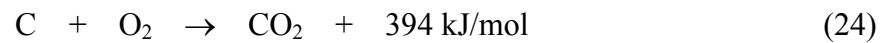
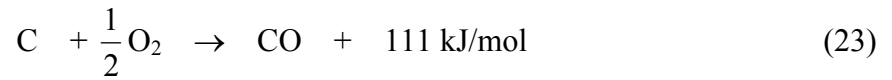
Figura 46: Seqüência de Eventos de Combustão de uma Partícula de Carvão
Fonte: Karppanen (2000)

A combustão do carvão geralmente se inicia após a liberação dos voláteis, as vezes é uma sobreposição dos dois processos. Durante a combustão de uma partícula de carvão, o oxigênio da massa da corrente de ar da câmara de combustão é transportado para a superfície da partícula. O oxigênio entra então em uma reação de oxidação com o carbono na superfície do carvão para produzir CO e CO₂ segundo os três mecanismos de combustão mostrados a seguir (Ross e Davidson, 1982 apud Basu, 1999):

Modelo I: neste modelo prevalece um fluxo com baixo número de Reynolds, grandes partículas de carvão (> 1mm) ou para altas temperaturas (900 a 1300°C), representado conforme a equação abaixo



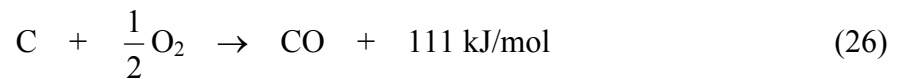
Modelo II: aqui o oxigênio difunde para a superfície do carbono e produz CO e CO₂. CO e CO₂ difundem fora da superfície do carbono. A reação com o CO encontra-se mais em uma fase gás com o oxigênio vindo da massa de gás e forma CO₂. Neste modelo ocorrem as seguintes reações de superfície:



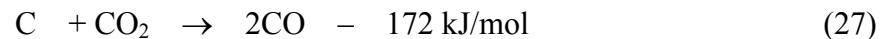
e a seguinte reação na fase gás:



Modelo III: neste modelo o oxigênio não reage na superfície do carbono. Esse reage com o CO em uma fase gás fora da superfície do carbono. Uma parte do CO₂ formado difunde atrás da superfície do carbono para ser reduzido para CO (teoria do duplo filme).



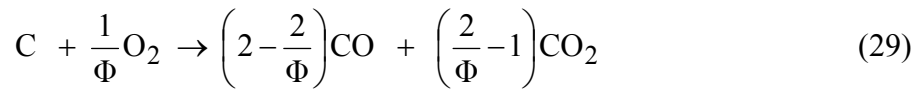
com a seguinte reação na superfície do carvão:



e a seguinte reação na fase gás:



A reação de oxidação do carvão pode ser representada para todos os três mecanismos como:



O fator de mecanismo Φ é igual a 1 para o transporte da superfície (*Modelo I*) e igual a 2 para o transporte de CO (*Modelos II e III*) (Rajan e Wen, 1980 apud Basu, 1999). A Figura 47 representa os três mecanismos de combustão do carvão comentados acima.

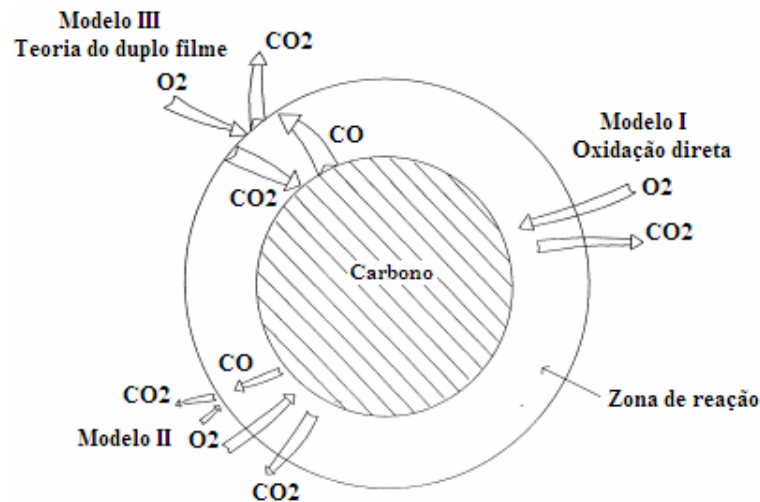


Figura 47: Diferentes Modelos de Mecanismos de Combustão do Carbono
Fonte: Basu (1999)

A câmara de combustão de uma caldeira de leito fluidizado pode ser dividida em três zonas distintas. Essas zonas são a zona de baixo (localizada abaixo do nível de ar secundário), a zona de cima (localizada acima do nível de ar secundário) e o separador de gás/sólidos quente.

A zona de baixo, fluidizada pelo ar primário, recebe o carvão ou mistura de combustíveis do sistema de alimentação juntamente com o carbono e carvão não queimados do ciclone. A desvolatilização e combustão parcial ocorrem nesta zona, a qual é usualmente deficiente em oxigênio. O ar secundário é adicionado na interface entre as zonas superior e inferior da câmara de combustão. Partículas de carvão, transportadas para a zona superior, são expostas a um ambiente rico em oxigênio, onde ocorre a maior parte da combustão. Às vezes, parte da combustão ocorre no ciclone, a qual causa desnecessariamente alta temperatura no mesmo (Basu e Fraser, 1991 apud Karppanen, 2000).

Em um leito fluidizado, transferência de calor para as paredes é o resultado de convecção/condução das partículas caindo ao longo das paredes, radiação térmica e convecção do gás para as áreas de superfície não revestidas. O mecanismo de

convecção/condução de partículas é o processo no qual partículas movem-se para a superfície de transferência de calor como uma consequência do periódico e aleatório movimento no leito (Golriz, 1996 apud Karppanen, 2000).

A superpadronização da transferência de calor em um leito fluidizado está ainda em um estágio de desenvolvimento. Densidade de suspensão parece ser o fator mais significativo, influenciando a transferência de calor. O efeito direto do tamanho da partícula é evidente com curta superfície de transferência de calor, mas este não é significativo com longas superfícies similar a estas usadas em caldeiras comerciais (Basu e Nag, 1996 apud Karppanen, 2000).

6.6 EXEMPLO DE CÁLCULO

Neste item será desenvolvido um exemplo simplificado da modelagem de combustão em leito fluidizado, especialmente com relação à emissão de poluentes. Para iniciar o processo de modelagem são necessários alguns cálculos preliminares para a montagem da equação de combustão, sendo necessário para a mesma a razão de alimentação de sorvente (calcário) segundo as equações abaixo (Leckner, 1998).

$$\varphi = mc \text{ PCI} \quad (30)$$

na qual

φ é o calor disponível no carvão (kJ/s)

PCI é o poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

mc é a razão de alimentação de carvão (kg/s)

$$mf = \frac{\varphi}{\text{PCI}} \left(\frac{Y_S M_{\text{CaCO}_3}}{M_S \frac{\text{Ca}}{s}} \right) \quad (31)$$

na qual

mf é a razão de alimentação de calcário

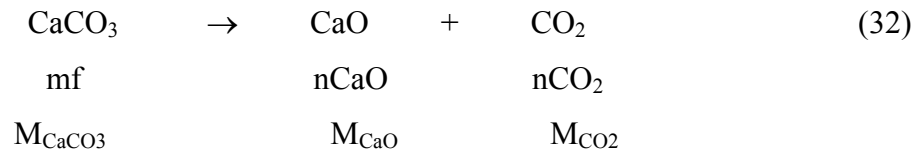
Y_S é a fração em massa de enxofre no carvão em base seca

M_{CaCO_3} é a massa molecular do calcário

M_S é a massa molecular do enxofre

Ca/s é a razão cálcio/enxofre

Para o calcário, o seguinte cálculo deve ser feito, em função da sua razão de alimentação calculada (mf), a qual se decompõe em CaO e CO₂ com a temperatura de calcinação, como mostrado na equação abaixo:



com

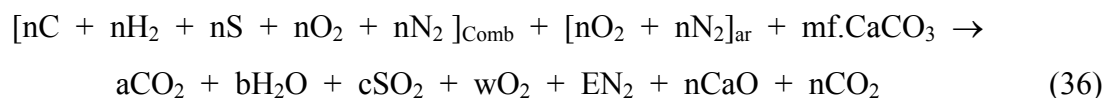
$$n\text{CaO} = \frac{\text{mf } M_{\text{CaO}}}{M_{\text{CaCO}_3}} \quad (33)$$

$$n\text{CO}_2 = \frac{\text{mf } M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaCO}_3}} \quad (34)$$

O cálculo do número de moles para a montagem da equação de combustão é feito segundo a equação geral abaixo:

$$n_{,i} = \frac{Y_{,i} \text{ mC}}{M_{,i}} \quad (35)$$

Com base nestes dados, a equação de combustão toma a seguinte forma, considerando o cálculo estequiométrico ($w = 0$).



sendo

$$a = nC, b = nH_2, c = nS, w = 0, E = nN_{2, \text{comb}} + nN_{2, \text{ar}} \quad (37)$$

sendo

$$nO_{2, \text{ar}} = (a + 0,5.b + c + n\text{CO}_2) - nO_2 \quad (38)$$

$$nN_{2,ar} = 3,76 nO_{2,ar} \quad (39)$$

A Equação 36 está na forma estequiométrica, sendo que para o presente trabalho será feito o cálculo considerando 4% de O₂ livre nos gases da combustão. Para a equação de combustão com O₂ livre segue-se o cálculo do coeficiente “w” da seguinte forma:

$$\text{Soma} = (a + c + E + nCO_2) \quad (40)$$

$$\%O_{2\text{livre}} = \frac{w}{\text{soma} + 4,76 w} \quad (41)$$

Faz-se agora novamente a aplicação das Equações 36 e 37 para calcular novamente a quantidade de oxigênio e de nitrogênio do ar de combustão da seguinte forma:

$$nO_{2,ar} = nO_{2,ar} + w \quad (42)$$

e

$$nN_{2,ar} = 3,76 nO_{2,ar} \quad (43)$$

Para iniciar-mos a modelagem do processo de combustão o procedimento de cálculo seguirá as seguintes etapas:

6.6.1 Desvolatilização e Combustão de Voláteis

Quando carvão é introduzido em uma caldeira de leito fluidizado, esse decompõe-se em duas partes: matéria volátil rica em hidrogênio e char. O char permanece no leito e queima lentamente. Dois passos podem ser considerados, ou seja, decomposição e combustão dos voláteis. Na região densa da caldeira (região localizada abaixo do ponto de injeção do ar secundário) ocorre a liberação dos constituintes do carvão como carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas. Para representar o processo de combustão dos voláteis, três principais reações são consideradas (Legros *et al.*, 1998):





Na reação da Equação 44, uma fração de carbono dos voláteis reage com oxigênio para formar CO apenas durante a combustão de voláteis por causa da redução do oxigênio na região de baixo (região densa) da caldeira. Para a reação da Equação 45, o enxofre no carvão é assumido para ser convertido para SO₂ durante o processo de combustão dos voláteis. Na reação da Equação 46 o hidrogênio é totalmente consumido durante o processo de combustão dos voláteis. A massa de voláteis inicial gerada pelo carvão é calculada da seguinte maneira:

$$m_v = \left(\frac{Y_V}{100} \right) m_C \quad (47)$$

na qual m_C é a massa de carvão sendo alimentada na caldeira.

A volatilização do combustível sólido é presumida para seguir o primeiro passo do mecanismo do tipo reação irreversível da seguinte maneira (Zhubrin, 2001):

$$1 \text{ kg de carvão} = Y_V \text{ kg de voláteis} + (1 - Y_V) \text{ kg de char} \quad (48)$$

na qual Y_V é a fração em massa de voláteis no carvão, normalmente especificado na composição química do carvão.

Para o modelo de desvolatilização, a seguinte equação pode ser usada para expressar a razão de consumo ou emissão de voláteis (Costa, 1998):

$$\frac{dm_v}{dt} = -m_v (0,4 Q_1 + 0,8 Q_2) \quad (49)$$

na qual

$$m_v = \left(\frac{Y_V}{100} \right) \quad (50)$$

$$Q1 = 2.10^5 \exp\left(-\frac{104600}{T_P}\right) \quad (51)$$

$$Q2 = 1,3.10^7 \exp\left(-\frac{167400}{T_P}\right) \quad (52)$$

O valor de dmv/dt pode ser utilizado para estimar a razão de geração de voláteis através da equação (Chen *et al.*, 1997):

$$R_V = \frac{dmv}{dt} \rho_{\text{carvão}} \quad (53)$$

na qual a densidade do carvão é estimada através de dados de outro carvão obtido da literatura (Chirone *et al.*, 1999), levando-se em conta principalmente o conteúdo de carbono do carvão da seguinte forma:

$$\rho_{\text{carvão}} = \frac{\rho_{\text{carvão}1} Y_C}{Y_{C1}} \quad (54)$$

na qual $\rho_{\text{carvão}1}$ e Y_{C1} representam, respectivamente, a densidade e fração em massa de carbono do carvão adotado da literatura e Y_C é a fração em massa de carbono do carvão usado neste trabalho.

A razão de consumo de carvão pode ser calculada da razão de geração de voláteis com a seguinte equação:

$$R_{\text{carvão}} = \frac{R_V}{Y_V} \quad (55)$$

Nas Equações 51 e 52 a temperatura T_P refere-se à temperatura da partícula de carvão no momento da desvolatilização, sendo a mesma adotada com base em dados sugeridos pela literatura.

6.6.2 A Combustão do Char

A partícula de char resultante do processo de desvolatilização consiste de uma fração do permanente carbono ($1 - C_{vol}$) e cinza apenas. Para a combustão do char, dois principais componentes (CO e CO_2) são considerados como produtos principais da combustão do carvão representados pelas equações abaixo (Legros *et al.*, 1998):

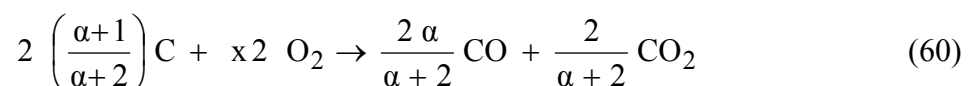


A reação das Equações 56 e 58 é heterogênea, ao passo que da Equação 56 é homogênea. Desde que a temperatura de queima da partícula não é suficientemente alta em uma caldeira de leito fluidizado circulante, o efeito da reação da Equação 58 na razão de combustão é baixo e, portanto, esta reação pode ser negligenciada no modelo. Na Equação 56 tem-se uma reação gás-sólido com uma mudança química feita em ambas as superfícies interna e externa da partícula de char (Legros *et al.*, 1998).

A razão de geração de char pode também ser calculada em função da geração de voláteis e do conteúdo de matéria volátil no carvão pela equação abaixo:

$$R_{char} = \frac{(1 - Y_V) R_V}{Y_V} \quad (59)$$

A partícula de char queima gerando óxidos de carbono segundo a equação geral abaixo (Chen *et al.*, 2001):



com

$$\alpha = 720 \exp\left(\frac{-7200}{T_P}\right) \quad (61)$$

e

$$x_2 = \left(\frac{2\alpha}{\alpha + 2} \right) 0.5 + \left(\frac{2}{\alpha + 2} \right) \quad (62)$$

Com o valor de α , a Equação 60 pode ser balanceada e em seguida adaptada para a situação deste trabalho. A temperatura da partícula de char T_p para o cálculo de α pode ser variada para verificar o comportamento do consumo de oxigênio e a geração de CO e de CO₂ devido à combustão do char.

Deve-se acrescentar que a temperatura T_p para o cálculo de α é feita como sendo a temperatura do leito acrescida de 100 K, como sugerido pela literatura (Hua *et al.*, 2004). Como exemplo podemos definir que para uma temperatura do leito de 750 °C a temperatura da partícula T_p será igual a 750 + 273 + 100, resultando em uma temperatura T_p de 1123 K.

O consumo de oxigênio e a produção de CO e de CO₂ gerados pela combustão do char são calculados utilizando as equações abaixo (Zhubrin, 2001):

$$R_{G, O_2} = \frac{x_2 nC_{Char} M_{O_2}}{M_C} \quad (63)$$

$$R_{G, CO} = \frac{\left(\frac{2\alpha}{\alpha + 2} \right) nC_{Char} M_{CO}}{M_C} \quad (64)$$

$$R_{G, CO_2} = \frac{\left(\frac{2}{\alpha + 2} \right) nC_{Char} M_{CO_2}}{M_C} \quad (65)$$

O número de moles de carbono na Equação 60 é a quantidade de carbono na massa de char e o mesmo é determinado através de (Legros *et al.*, 1998):

$$C_{Vol} = \frac{Y_V - Y_{H_2} - Y_S}{100} \quad (66)$$

$$C_{\text{Char}} = 1 - C_{\text{Vol}} \quad (67)$$

e assim

$$m_{\text{Char}} = \left(1 - \frac{Y_V}{100} \right) m_C \quad (68)$$

$$nC_{\text{Char}} = C_{\text{Char}} m_{\text{Char}} \quad (69)$$

nas quais C_{Vol} é a fração de carbono na matéria volátil, C_{Char} é a fração de carbono no char e nC_{Char} é o número de moles de carbono na massa de char.

6.6.3 Formação do NO_x

O modelo de emissões de NO_x será desenvolvido considerando-se as emissões de uma forma geral, partindo-se do pressuposto que em leito fluidizado a única fonte das mesmas é o nitrogênio do combustível. O NO_x térmico será negligenciado pelo fato de que a temperatura no leito não favorece a formação do mesmo.

A equação geral a ser usada para avaliar as emissões de NO_x em função da temperatura e razão de ar primário para combustível é a seguinte (Jensen e Johnsson, 1997):

$$\text{NO}_{\text{emissão}} = 9,14 \cdot 10^{-2} \exp\left(\frac{5336}{T_b}\right) (\phi_p 100)^{0,8} U_0^{0,7} Y_N^{0,7} H^{-0,4} C_{\text{SO}_2}^{-0,2} \quad (70)$$

na qual ϕ_p é a razão de ar primário para combustível, U_0 é a velocidade superficial do gás, C_{SO_2} é concentração de SO_2 em ppmv e H é a altura expandida do leito. Estas variáveis para o presente trabalho são estimadas segundo as equações apresentadas abaixo:

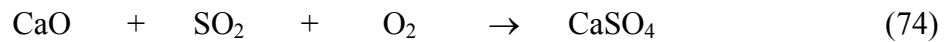
$$\phi_p = \frac{\left(\frac{n\text{O}_{2,\text{ar}}}{32} + \frac{n\text{N}_{2,\text{ar}}}{28} \right) 0,6}{m_C} \quad (71)$$

$$C_{\text{SO}_2} = \frac{c \cdot 10^6}{V_g} \quad (72)$$

A altura expandida do leito H para o caso deste trabalho é definida com base em dados usados na literatura para uma caldeira de 1,6 MW.

6.6.4 A Absorção de Enxofre

Para a absorção do enxofre será assumido que SO_2 é o único produto da combustão dos compostos do enxofre, o qual espalha-se no exterior da frente da combustão e reage com CaO na camada de cinza externa formando CaSO_4 segundo as reações das equações abaixo:



Sendo que a Equação 73 representa a reação de calcinação do calcário, ao passo que a Equação 74 representa a reação de sulfatação.

Para analisar de uma forma mais simplificada a calcinação do calcário, ou seja, a conversão do CaCO_3 para CaO, será feito o cálculo para a Equação 73 através da utilização do método da energia livre de Gibbs para determinação da temperatura para a qual o processo de calcinação ocorre.

Para iniciar o cálculo determina-se primeiramente a variação da energia livre de Gibbs para a reação da Equação 73 que representa a calcinação do CaCO_3 .

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (75)$$

na qual

$$\Delta H = (hf + \Delta h)_i \quad \text{e} \quad \Delta S = (sf + \Delta s)_i \quad (76)$$

sendo que hf_i e sf_i representam a entalpia e entropia de formação de cada componente da reação e são obtidas da literatura (Carvalho *et al.*, 1998). As variações de entalpia e entropia Δh_i e Δs_i são calculadas como segue:

$$\Delta h_i = \int_{T_0}^{T_b} C_p(T)_i \, dT \quad \text{e} \quad \Delta s_i = \int_{T_0}^{T_b} \frac{C_p(T)_i}{T} \, dT \quad (77)$$

As equações para o cálculo do calor específico $C_p(T)_i$ são adotados de acordo com os dados disponíveis na literatura para cada componente na reação (Perry, 1999). Reescrevendo as equações apresentadas acima obtém-se a seguinte equação para a variação da energia livre de Gibbs para a Equação 72:

$$\Delta G_1 = [(hf + \Delta h)_{CaO} + (hf + \Delta h)_{CO_2} - (hf + \Delta h)_{CaCO_3}] - T_b [(sf + \Delta s)_{CaO} + (sf + \Delta s)_{CO_2} - (sf + \Delta s)_{CaCO_3}] \quad (78)$$

A variação da energia livre de Gibbs, ΔG_1 , nos fornece a informação sobre a temperatura que o processo de calcinação ocorre, pois esta temperatura é aquela para a qual a Equação 78 apresenta um valor negativo. Após a obtenção da temperatura de calcinação calcula-se o calor total de reação a ser fornecido para o processo de calcinação, iniciando pelo cálculo do calor de formação padrão para 298 K, como segue:

$$\Delta H_{(298)} = hf_{CaO} + hf_{CO_2} - hf_{CaCO_3} \quad (79)$$

A Equação 79 mostra o calor de reação padrão para a temperatura de 298 K, pois este é calculado a partir da entalpia de formação dos produtos subtraindo a entalpia de formação do reagente para a reação da Equação 73. Deve-se salientar que o valor do calor na equação acima (em kJ / kg) é válido para uma massa de 1 kg de $CaCO_3$, sendo que para a massa de $CaCO_3$ calculada neste trabalho faz-se a conversão como mostrado abaixo:

$$\Delta H_{real} = \frac{\Delta H_{(298)} \text{ mf}}{1} \quad (80)$$

O cálculo do calor total de reação a ser fornecido para o processo de calcinação é feito através da soma do calor de reação padrão e do calor necessário para levar o calcário da temperatura de 298 K até a temperatura de calcinação determinada pela Equação 79. O calor necessário para levar o calcário à temperatura de calcinação é a diferença de entalpia para o mesmo determinada pela Equação 77, dando a seguinte expressão para o calor total:

$$\Delta H_{total} = \Delta H_{real} + \frac{(\Delta h_{CaO} + \Delta h_{CO_2}) - \Delta h_{CaCO_3}}{100} \quad (81)$$

A concentração de SO₂ no fundo da caldeira pode ser calculada da razão de formação de SO₂ da matéria volátil e do fluxo volumétrico dos gases como segue (Shimizu *et al.*, 2002):

$$C_0 = \frac{mC \frac{Y_S}{100} \frac{Y_V}{32}}{V_g} \quad (82)$$

A quantidade de SO₂ gerado de uma forma geral na região densa da caldeira pode também ser calculada pela equação abaixo (Legros *et al.*, 1998):

$$R_0 = \frac{mC \frac{Y_S}{100}}{32 A H_d} \quad (83)$$

na qual H_d representa a altura da região densa da caldeira.

A eficiência de remoção de enxofre para as caldeiras de leito fluidizado circulante pode ser calculada em função da temperatura para vários valores de Ca/S. As equações abaixo foram obtidas através de regressão polinomial feita em função de dados experimentais apresentados pela literatura (Zevenboven, 2004).

$$RS = -1455,225 + 3,7055 T_b - 0,00225 T_b^2 \quad (Ca/S = 1) \quad (84)$$

$$RS = -1680,8 + 4,294 T_b - 0,0026 T_b^2 \quad (Ca/S = 2) \quad (85)$$

$$RS = -1257,9 + 3,292 T_b - 0,002 T_b^2 \quad (Ca/S = 3) \quad (86)$$

Para estimar a conversão do CaCO₃ para CaSO₄ a Equação 73 pode ser trabalhada em função da constante de equilíbrio da reação para as temperaturas de interesse da seguinte forma:

$$K_{eq} = \exp\left(\frac{-\Delta G1}{R T_b}\right) \quad (87)$$

na qual a constante K_{eq} pode ser escrita em termos das frações molares dos reagentes e produtos da reação (CaCO₃, CaO e CO₂) para saber qual a quantidade da massa de CaCO₃ que reage para uma dada temperatura como segue:

$$K_{eq} = \frac{fmolar_{produtos}}{fmolar_{reagentes}} = \frac{fmolar_{CaO} fmolar_{CO_2}}{fmolar_{CaCO_3}} = \frac{\left(\frac{0,56 x}{mf}\right)^{0,56} \left(\frac{0,44 x}{mf}\right)^{0,44}}{\frac{(mf - x)}{mf}} \quad (88)$$

na qual x representa a quantidade de $CaCO_3$ que reage com relação a massa inicial mf , sendo que os valores 0,56 e 0,44 representam as proporções de CaO e de CO_2 com relação a quantidade x com base nas suas respectivas massas moleculares.

Para determinar as quantidades de CaO e CO_2 com relação a quantidade x aplica-se novamente as Equações 33 e 34, e assim a conversão do $CaCO_3$ para $CaSO_4$ é dada pela seguinte expressão (Cheng *et al.*, 2004).

$$X_{CaCO_3} = \frac{\left(x - \frac{x M_{CaO}}{M_{CaCO_3}}\right) \frac{M_{SO_3}}{(\% CaO mf)}}{M_{CaO}} \quad (89)$$

na qual

M é o massa molecular da espécie

$\%CaO$ é o percentual de CaO presente no calcário

mf é a vazão total de calcário alimentada no leito

Para o modelo de cálculo apresentado, a Tabela 12 fornece os parâmetros utilizados para fazer os cálculos com o programa Mathsoft Mathcad, que se encontra discriminado no apêndice A deste trabalho. Neste apêndice também se encontra, além do cálculo, uma breve descrição sobre a obtenção dos dados para fazer o cálculo teórico.

Tabela 12: Dados Utilizados para o Modelo

A	29,26 m ²
H _d	3 m
H	1,15 m
mC	5,20 kg/s
PCI	23735,61 kJ/kg
Ca / S	2
%O ₂ livre	4%
R	8,314 kJ/kmol.K
P	101325 Pa
T _b	1123 K
U ₀	3,5 m/s
V _{cal}	731,5 m ³
Y _c	61,92
Y _{H2}	3,00
Y _S	0,1
Y _{O2}	15,08
Y _{N2}	0,98
Y _V	41,59
Y _W	17,42
Y _A	1,50

6.6.5 Resultados

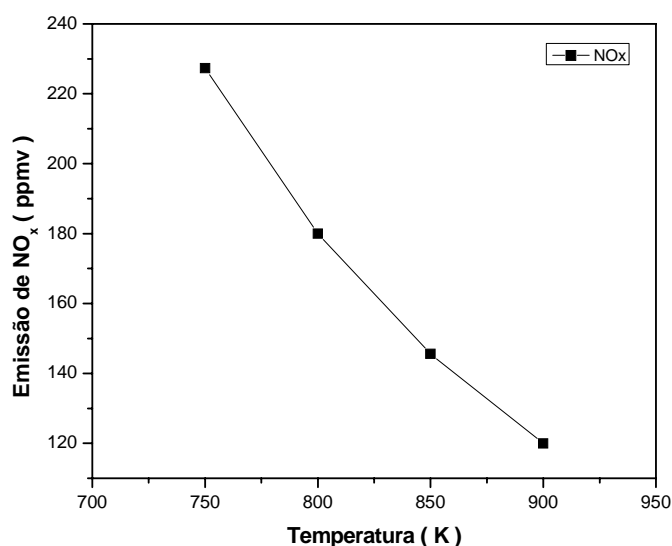
Para os resultados obtidos, mencionam-se alguns aspectos observados, iniciando-se pelo processo de combustão do char a partir dos resultados apresentados na Tabela 12:

Tabela 13: Resultados para a combustão do char

Temperatura K (°C)	Consumo de O ₂ (kmol / s)	Geração de CO (kmol / s)	Geração de CO ₂ (kmol / s)
1123 (750)	0,415168	0,269995	0,358717
1173 (800)	0,415168	0,31774	0,321203
1223 (850)	0,415168	0,36308	0,285579
1273 (900)	0,415168	0,404896	0,252723

Pelos resultados da tabela acima pode-se observar que o consumo de oxigênio permanece constante devido ao balanço da equação. A geração de CO e de CO₂ varia com a temperatura da partícula, sendo que a quantidade de CO gerada cresce à medida que a temperatura sobe e a quantidade de CO₂ diminui. Em temperaturas mais baixas a quantidade de CO₂ cresce enquanto a quantidade de CO diminui.

Para as emissões de NO_x, pode-se confirmar alguns resultados obtidos pela literatura para as emissões de uma maneira geral para as caldeiras de leito fluidizado. O gráfico mostrado na Figura 48 mostra o comportamento geral das emissões com a temperatura.

**Figura 48:** Comportamento das Emissões de NO_x com a Temperatura

Os resultados apresentados na Figura 48 mostram que com o aumento da temperatura as emissões de NO_x diminuem. Esse fato pode parecer estranho mas, segundo Jensen e Johnsson (1997) a diminuição das emissões com o aumento da temperatura foi observada em experimentos feitos para altas razões de ar primário/combustível, como é o caso do exemplo de cálculo deste trabalho.

A influência da razão de ar primário/combustível para quatro temperaturas testadas também pode ser analisada através da Figura 49. Como pode ser observada no gráfico desta Figura, a diminuição da razão ar primário/combustível resulta em uma diminuição das emissões de NO_x . Pode ser observado que para a temperatura mais comum em leito fluidizado ($850\text{ }^\circ\text{C}$) a emissão de NO_x fica em torno de 145 ppmv para a razão de ar primário para combustível deste trabalho.

As emissões de NO_x mostradas aqui podem apresentar variações dependendo de outros fatores, tais como excesso de ar e o diâmetro de partículas, pois a intenção aqui é mostrar que, independentemente das condições a serem usadas, as emissões de NO_x em caldeiras de leito fluidizado ficam muito abaixo de padrões definidos por legislações ambientais, o que reforça a tendência para o aumento do uso da tecnologia de leito fluidizado.

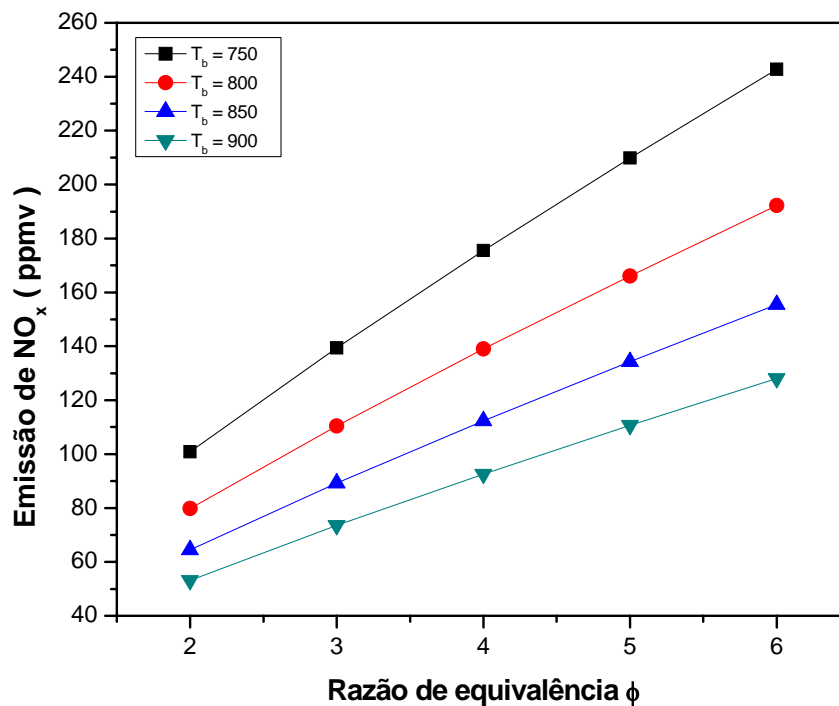


Figura 49: Influência da Razão de ar Primário para Combustível nas Emissões de NO_x

Com a eficiência de remoção de SO_2 para as caldeiras de leito fluidizado circulante obtida através da regressão linear pela aplicação das Equações 84, 85 e 86, pode-se confirmar os resultados obtidos para as três situações analisadas através da Figura 50.

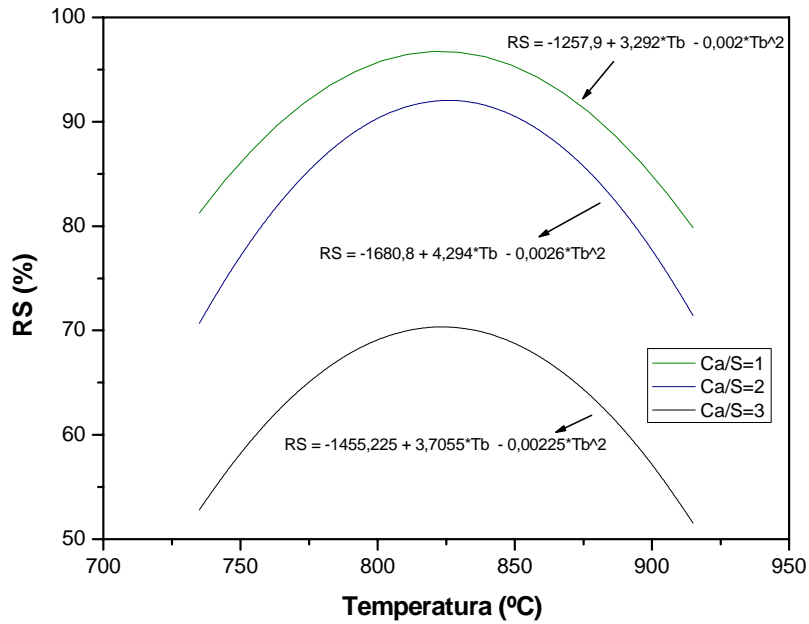


Figura 50: Eficiência de Remoção de SO_2

Da Figura 50 pode-se observar que para a razão Ca/S de 2 (a mais utilizada em leito fluidizado) tem-se uma eficiência de remoção de aproximadamente 90% para uma temperatura característica de 850 °C.

Para a conversão do CaCO_3 , os resultados estão mostrados na Figura 51, pois pode ser observado que a conversão aumenta com a temperatura, atingindo um valor de aproximadamente 55% para uma temperatura típica de leito fluidizado de 850°C.

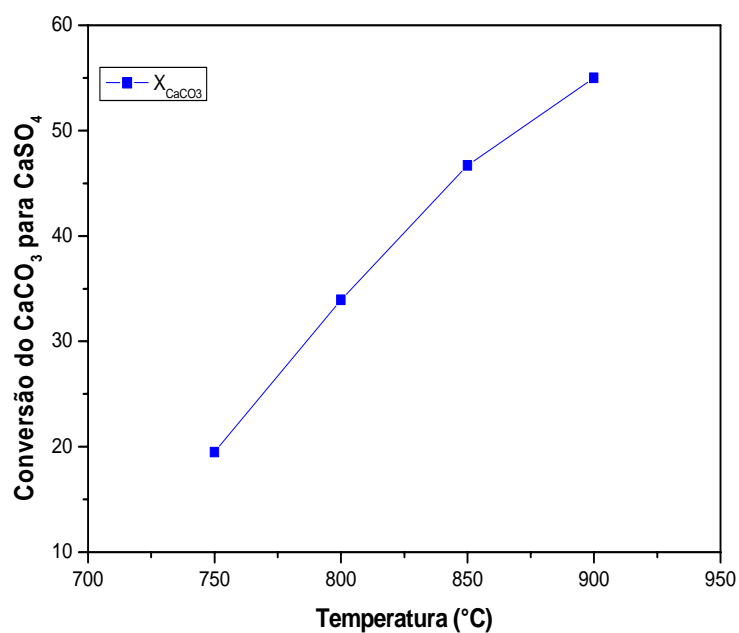


Figura 51: Conversão do CaO com a Temperatura

Capítulo 7

CONCLUSÕES

Com base na pesquisa desenvolvida, e considerando que o uso do carvão mineral é um assunto complexo, pode-se destacar as seguintes conclusões principais:

- A combustão do carvão, objeto de muitas críticas, não representa mais uma grande ameaça para o mundo, devido às tecnologias avançadas empregadas atualmente por países desenvolvidos que dependem do mesmo como fonte de energia. Essas tecnologias podem controlar as emissões de poluentes até mesmo abaixo dos padrões definidos.
- Embora tendo algumas contradições, o uso do carvão mineral apresenta uma forte tendência para continuar, pois existem grandes reservas e muitos países desenvolvidos que dependem do mesmo para sua sobrevivência, principalmente na América do Norte, Europa e Ásia.
- Tecnologias mais antigas, como a combustão do carvão pulverizado, ainda são responsáveis por mais de 90% da energia gerada a partir do carvão. Apesar da sua grande eficiência e de muitas décadas de experiência, a mesma apresenta a tendência de ser substituída por tecnologias mais avançadas em função das várias vantagens destas.
- A combustão em leito fluidizado e a gaseificação são as duas principais tecnologias que estão atualmente conquistando espaço. A combustão em leito fluidizado vem sendo a opção mais viável para substituir principalmente a combustão de carvão pulverizado, pois a mesma

apresenta vantagens com relação a custo, requerimento de espaço, flexibilidade de combustíveis e emissão de poluentes.

- A combustão em leito fluidizado é uma excelente tecnologia aplicada para a repotenciação de antigas caldeiras de carvão pulverizado que se encontram deterioradas pelo tempo devido à baixa qualidade do carvão. Como um exemplo típico desta realidade pode citar a situação da Rússia e da Ucrânia, onde esta prática se faz necessário em função dos altos custos e dificuldades para o controle das emissões de poluentes de suas caldeiras.
- Além da grande eficiência para a queima de carvões e outros resíduos de baixa qualidade a combustão em leito fluidizado está surgindo como a melhor alternativa para a queima de resíduos com alto teor de enxofre como é o caso do coque originado da destilação de petróleos pesados.
- Todas as tecnologias para combustão ou para controle de poluentes descritas neste trabalho foram apresentadas de uma maneira geral. Em função da complexidade das mesmas, recomenda-se o estudo aprofundado e isolado de cada uma delas em dissertações de mestrado ou até mesmo teses de doutorado.
- Todos os avanços em tecnologias para a combustão e para controle de emissões são o resultado de um grande esforço e muitos investimentos de parcerias de governos e setor privado em programas de pesquisas e desenvolvimento.
- O objetivo do exemplo de cálculo apresentado não é analisar quantitativamente os resultados apresentados. O principal objetivo é apresentar equações que possam servir de base para o desenvolvimento de modelagens mais complexas em trabalhos futuros.
- Os resultados apresentados confirmam a grande tendência à utilização da tecnologia de leito fluidizado em função da ausência de NO_x térmico e do controle de SO_x dentro do próprio leito, tendo como principal atrativo uma significativa redução de custos e dos níveis de emissões.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Levando em consideração que a combustão do carvão mineral é um assunto muito amplo e complexo, sendo que muitos dos mecanismos envolvidos na mesma ainda permanecem indefinidos podem ser feitas algumas sugestões para trabalhos futuros:

Como um primeiro trabalho sugere-se um estudo para o desenvolvimento de um programa computacional para simular o processo de combustão em uma caldeira de leito fluidizado, envolvendo no mesmo a combustão, transferência de calor e emissão de poluentes.

Como uma segunda sugestão coloca-se o estudo detalhado de qualquer uma das tecnologias para o controle de poluentes apresentadas neste trabalho, podendo também envolver a modelagem de tais processos usando simulação computacional.

Como outra sugestão menciona-se o estudo para avaliação ou quantificação dos principais metais pesados presentes na combustão do carvão, pois os mesmos representam um problema do ponto de vista ambiental.

Apêndice A

DESCRIÇÃO DOS DADOS E CÁLCULO

A.1 DESCRIÇÃO DOS DADOS

Com o objetivo de esclarecer melhor os dados adotados para o exemplo de cálculo será feito uma breve descrição sobre a obtenção dos mesmos. Os dados foram obtidos de publicações científicas sobre a tecnologia de leito fluidizado ao longo de uma grande pesquisa durante o desenvolvimento deste trabalho. A elaboração do cálculo se torna bastante difícil devido à dificuldade de se obter os dados necessários para aplicação das equações, considerando que aqui o cálculo é teórico em função da ausência de estrutura para obtenção de dados experimentais.

O cálculo desenvolvido busca dar uma visão mais geral do processo de combustão do carvão em leito fluidizado, com atenção voltada principalmente para a emissão de poluentes. Através do cálculo pretende-se confirmar as imensas vantagens da combustão em leito fluidizado sobre outros sistemas de combustão.

Os dados da caldeira foram obtidos da literatura (Meng *et al.*,2002) a qual tratava sobre o experimento em uma caldeira de leito fluidizado circulante para a queima de uma mistura de carvão com lodo de uma fábrica de papel. Esta caldeira apresentava um dado base de 450t/dia

para utilização de apenas carvão como combustível, a qual apresentava uma razão de alimentação de carvão de aproximadamente 5,20 kg/s.

Dentre outros dados desta caldeira estavam a altura total, altura de injeção de ar secundário e área da seção transversal, sendo que para aproveitar os dados também foram utilizados os dados do carvão que a mesma trazia (composição química e poder calorífico). A Figura 52 mostra um simples esquema da caldeira de onde foram adotados os dados para o cálculo.

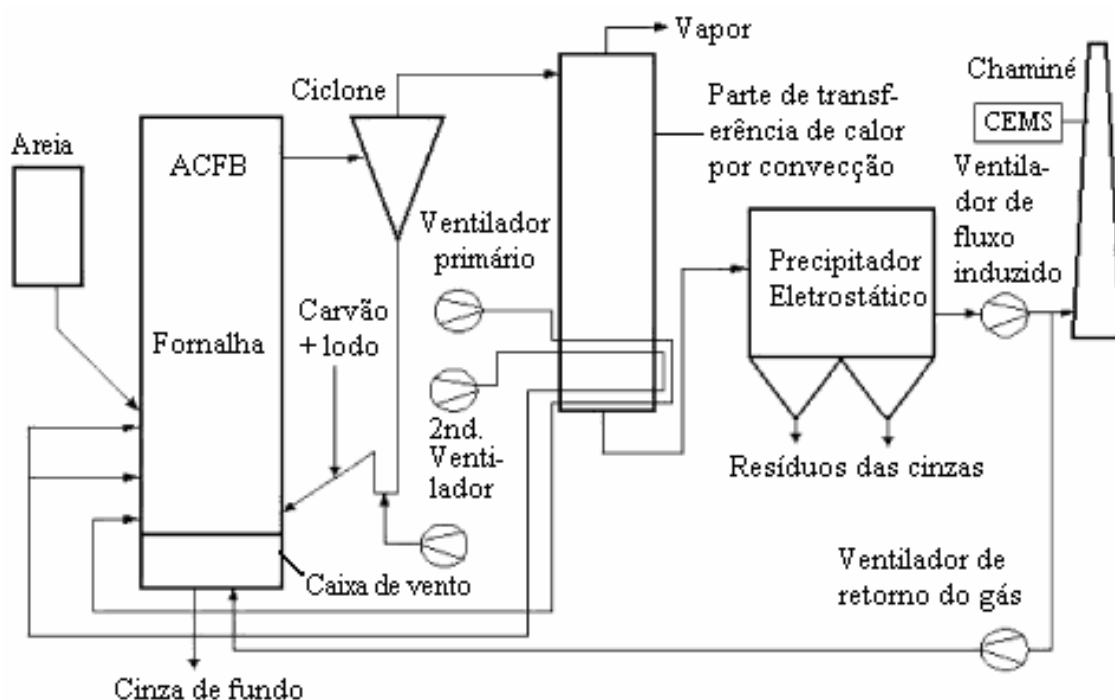


Figura 52: Configuração da Caldeira de onde Foram Obtidos os Dados
Fonte: Meng et al. (2002)

Os outros dados referentes ao carvão e ao sorvente utilizado (calcário) foram obtidos de valores sugeridos e usados por vários autores em modelagem de leito fluidizado. Os dados referentes ao calcário CaCO_3 e do produto CaO resultante da sua calcinação não apresentam variações significantes entre vários autores pesquisados, pois na maioria dos casos estes valores são iguais.

A.2 LISTAGEM DO CÁLCULO FEITO NO MATHCAD

Dados de entrada

A - Área da seção transversal da caldeira (m²)

$$A := 29.26$$

mC - Razão de alimentação de carvão na caldeira (kg / s)

$$mC := 5.20$$

PCI - Poder calorífico inferior do carvão (kJ / kg)

$$PCI := 23735.61$$

Y_i - Termo que define a percentagem em peso de cada componente presente na composição química do carvão, isto é, i = (C, H₂, N₂, S e O₂) (%). Os índices A, v e w referem-se as percentagens em peso de cinzas, matéria volátil e umidade respectivamente.

$$\begin{aligned} Y_C &:= 61.92 & Y_S &:= 0.10 & Y_v &:= 41.59 \\ Y_{H_2} &:= 3.00 & Y_{N_2} &:= 0.98 & Y_w &:= 17.42 & (\% \text{ em peso}) \\ Y_{O_2} &:= 15.08 & Y_A &:= 1.50 \end{aligned}$$

H_d - Altura da região densa da caldeira, ou seja, altura que fica abaixo da injeção do ar secundário (m).

$$H_d := 3$$

H_t - Altura total da câmara de combustão da caldeira (m)

$$H_t := 25$$

H - Altura expandida do leito fluidizado (m)

$$H := 1.15$$

P - Pressão na câmara de combustão (Pa)

$$P := 101325$$

%O₂livre - Percentagem de oxigênio livre utilizada para o cálculo

$$\%O_{2\text{livre}} := \frac{4}{100}$$

R - Constante universal dos gases (kJ / kmol . K)

$$R := 8.314$$

U_0 - Velocidade superficial do gás m / s

$$U_0 := 3.5$$

T_b - Temperatura do leito fluidizado (K)

$$T_b := 1123$$

M_i - O termo M representa o peso molecular de qualquer espécie i (kg / kmol)

$$M_C := 12 \quad M_{N_2} := 28 \quad M_{CO_2} := 44 \quad M_{CaCO_3} := 100 \quad M_{O_2} := 32$$

$$M_{CaO} := 56 \quad M_{SO_2} := 64 \quad M_{CO} := 28 \quad M_{CaSO_4} := 136 \quad M_S := 32$$

$$M_{H_2O} := 18 \quad M_{SO_3} := 80$$

%CaO - fração em massa de CaO presente no calcário

$$\%CaO := 0.475$$

V_{cal} - Volume da caldeira (m³)

$$V_{cal} := 731.5$$

Ca/S - Razão cálcio para enxofre usada para o cálculo. Essa razão é assumida para um valor, mas pode ser variada para fins de analisar os resultados.

$$Ca_S := 2$$

Cálculo para a equação de combustão

Cálculo do calor requerido pela caldeira

$$\phi := mC \cdot PCI$$

$$\phi = 123425.172 \quad (\text{kJ/s})$$

Cálculo da vazão de calcário necessária

$$mf := \frac{\phi}{PCI} \cdot \left(\frac{\frac{Y_S}{100} \cdot M_{CaCO_3}}{M_S \cdot Ca_S} \right)$$

$$mf = 0.000081 \quad (\text{kg/s})$$

Cálculo das quantidades de CaO e de CO₂ gerados pelo processo de calcinação:

$$n_{CaO} := \frac{mf \cdot M_{CaO}}{M_{CaCO_3}} \quad n_{CO_2} := \frac{mf \cdot M_{CO_2}}{M_{CaCO_3}}$$

$$n_{CaO} = 0.000046 \quad n_{CO_2} = 0.000036 \quad (\text{kg/s})$$

Equação de combustão Estequiométrica

Para a montagem da equação de combustão calcula-se primeiramente o número de moles de cada um dos componentes da composição química do carvão através das equações abaixo:

$$n_C := \frac{Y_C \cdot mC}{100 \cdot 12} \quad n_{H_2} := \frac{Y_{H_2} \cdot mC}{100 \cdot 2} \quad n_S := \frac{Y_S \cdot mC}{100 \cdot 32} \quad n_{N_2} := \frac{Y_{N_2} \cdot mC}{100 \cdot 28}$$

$$n_{O_2} := \frac{Y_{O_2} \cdot mC}{100 \cdot 32}$$

$$n_C = 0.26832 \quad n_{H_2} = 0.078 \quad n_S = 0.000163 \quad n_{O_2} = 0.024505$$

$$n_{N_2} = 0.00182 \quad (\text{kmol/s})$$

Com estes coeficientes a equação de combustão toma a seguinte forma:

$$[(n_C + n_{H_2} + n_S + n_{O_2} + n_{N_2})_{comb} + (n_{O_2} + n_{N_2})_{ar} + mfCaCO_3] \quad =====>$$

$$aCO_2 + bH_2O + cSO_2 + wO_2 + EN_2 + \frac{n_{CO_2}}{44} + \frac{n_{CaO}}{56}$$

$$a := n_C + \frac{n_{CO_2}}{44} \quad b := n_{H_2} \quad c := n_S \quad w := 0$$

$$a = 0.268321 \quad b = 0.078 \quad c = 0.000163 \quad (\text{kmol/s})$$

$$nO_{2,ar} := \left(a + \frac{b}{2} + c + nCO_2 \right) - nO_2$$

$$nO_{2,ar} = 0.283014 \quad (\text{kmol} / \text{s})$$

$$nN_{2,ar} := 3.76 \cdot nO_{2,ar}$$

$$nN_{2,ar} = 1.064133 \quad (\text{kmol} / \text{s})$$

$$E := nN_2 + nN_{2,ar}$$

$$E = 1.06595 \quad (\text{kmol} / \text{s})$$

Equação de combustão com 4% de O₂ livre

A equação com O₂ livre é feita considerando 4% de O₂ livre nos gases da combustão.

$$[(nC + nH_2 + nS + nO_2 + nN_2)_{comb} + (nO_2 + nN_2)_{ar} + mfCaCO_3] \quad =====>$$

$$(aCO_2 + bH_2O + cSO_2 + wO_2 + EN_2) + \frac{nCO_2}{44} + \frac{nCaO}{56}$$

$$a := nC + \frac{nCO_2}{44} \quad b := nH_2 \quad c := nS$$

$$a = 0.268321 \quad b = 0.078 \quad c = 0.000163 \quad (\text{kmol} / \text{s})$$

$$soma := a + c + E$$

$$soma = 1.334436 \quad (\text{kmol} / \text{s})$$

$$w := \frac{\%O_{2,livre} \cdot soma}{1 - \%O_{2,livre} \cdot 4.76}$$

$$w = 0.065931 \quad (\text{kmol} / \text{s})$$

$$nO_{2,ar} := nO_{2,ar} + w$$

$$nO_{2,ar} = 0.348945 \quad (\text{kmol} / \text{s})$$

$$nN_{2,ar} := 3.76 \cdot nO_{2,ar}$$

$$nN_{2,ar} = 1.312032 \quad (\text{kmol} / \text{s})$$

$$E := nN_2 + nN_{2,ar}$$

$$E = 1.313852 \quad (\text{kmol} / \text{s})$$

Cálculo para o processo de desvolatilização

A razão de consumo da massa de voláteis pode ser calculada segundo a equação abaixo, onde a temperatura de devolatilização é adotada como sendo 600 K.

$$T_p := 600 \quad F = dm_v / dt$$

$$F = m_v \cdot (0.4 \cdot Q_1 + 0.8 \cdot Q_2) \quad m_v := \frac{Y_v}{100}$$

$$m_v = 0.4159 \quad \text{kg de voláteis / kg de carvão}$$

$$Q_1 := 2 \cdot 10^5 \cdot e^{-\frac{104600}{R \cdot T_p}} \quad Q_2 := 1.3 \cdot 10^7 \cdot e^{-\frac{167400}{R \cdot T_p}}$$

$$Q_1 = 0.000156 \quad (1/s) \quad Q_2 = 0 \quad (1/s)$$

$$F = dm_v / dt \quad \rho_{\text{carvão}} := \frac{1467.532468 \cdot 61.92}{78.9}$$

$$F := -m_v \cdot (0.4 \cdot Q_1 + 0.8 \cdot Q_2)$$

$$F = -0.000026 \quad (\text{kg} / \text{s})$$

Razão de consumo de carvão

$$\rho_{\text{carvão}} = 1151.706089 \quad \text{kg} / \text{m}^3$$

$$R_v := -F \cdot \rho_{\text{carvão}}$$

$$R_v = 0.029995 \quad (\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{s})$$

$$R_{\text{carvão}} := \frac{R_v}{Y_v}$$

$$R_{\text{carvão}} = 0.000721 \quad (\text{kmol} / \text{m}^3 \cdot \text{s})$$

Cálculo para o processo de combustão do char

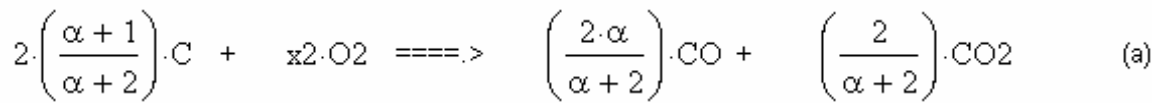
Razão de geração de char

$$R_{\text{char}} := \frac{\left(1 - \frac{Y_v}{100}\right) \cdot R_v}{\frac{Y_v}{100}} \quad R_{\text{char}} = 0.042125 \quad (\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{s})$$

Cálculo para a equação (a)

A temperatura de queima da partícula de char T_p pode ser mudada para vários valores para verificação do comportamento do consumo de oxigênio e da geração de CO e de CO₂ causados pela combustão do char.

$$T_p := T_b + 100$$



$$\alpha := 720 \cdot e^{-\frac{7200}{T_p}} \quad x_1 := 2 \cdot \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha + 2} \right) \quad x_3 := \left(\frac{2 \cdot \alpha}{\alpha + 2} \right) \quad x_4 := \left(\frac{2}{\alpha + 2} \right)$$

$$x_2 := \frac{x_3}{2} + x_4$$

$$\alpha = 1.997884 \quad x_1 = 1.499735 \quad x_2 = 1 \quad x_3 = 0.999471 \quad x_4 = 0.500265$$

A partir da equação acima se faz o balanço agora para a situação deste trabalho, calculando primeiramente o número de moles do carbono presente na massa de char para o caso deste trabalho seguindo o seguinte esquema:

Determinação da fração de carbono na matéria volátil

$$C_{vol} := \left(\frac{Y_v - Y_S - Y_{H_2}}{100} \right)$$

$$C_{vol} = 0.3849$$

Determinação da fração de carbono na massa de char

$$C_{char} := 1 - C_{vol}$$

$$C_{char} = 0.6151$$

Determinação da massa de Char

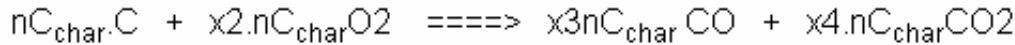
$$m_{Char} := \left(1 - \frac{Y_v}{100} \right) \cdot m_C \quad m_{Char} = 3.03732 \quad (\text{kg/s})$$

Determinação do número de moles de carbono presente na massa de char

$$n_{C_{char}} := \frac{C_{char} \cdot m_{Char}}{12}$$

$$n_{C_{char}} = 0.155688 \quad (\text{kmol/s})$$

Seguindo as mesmas proporções da equação (a) tem-se o seguinte:



E assim calcula-se o consumo de oxigênio e a geração de CO e de CO₂ devido à combustão do char como mostrado abaixo:

$$R_{GO_2} := \left(\frac{x_2 \cdot n_{C_{char}} \cdot M_{O_2}}{M_C} \right) \quad R_{GCO} := \left(\frac{x_3 \cdot n_{C_{char}} \cdot M_{CO}}{M_C} \right)$$

$$R_{GCO_2} := \left(\frac{x_4 \cdot n_{C_{char}} \cdot M_{CO_2}}{M_C} \right)$$

$$R_{GO_2} = 0.415168 \quad R_{GCO} = 0.36308 \quad R_{GCO_2} = 0.285579 \quad (\text{kmol/s})$$

Cálculo para a emissão de NO_x

$$\phi := \frac{(n_{O_2_{ar}} \cdot 32 + n_{N_2_{ar}} \cdot 28) \cdot 0.6}{m_C} \quad V_g := \frac{(a + c + w + E) \cdot 8314 \cdot T_b}{P}$$

$$C_{SO_2} := \frac{n_S \cdot 10^6}{V_g} \quad C_{SO_2} = 1.069924 \quad (\text{ppmv})$$

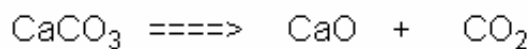
Cálculo da emissão de NO_x

$$NO_{\text{emissão}} := 9.14 \cdot 10^{-2} \cdot e^{\frac{5336}{T_b}} \cdot (\phi \cdot 100)^{0.8} \cdot U_0^{0.7} \cdot \left(\frac{Y_{N_2}}{100} \right)^{0.7} \cdot H^{-0.4} \cdot C_{SO_2}^{-0.2}$$

$$NO_{\text{emissão}} = 145.575187 \quad (\text{ppmv})$$

Cálculo para o processo de absorção de enxofre

Cálculo de todas as variáveis necessárias para a determinação da temperatura de calcinação do calcário (CaCO₃) e do calor necessário para a mesma:



Para o cálculo das variações de entalpia e entropia dos componentes da reação a temperatura do leito T_b deve ser testada com vários valores para verificação da inversão de sinal na equação da variação da energia livre de Gibbs.

$T_b := 1123$ Temperatura de calcinação = 1107,3 K = 834,3 C

$$\Delta h_{\text{CaCO}_3} := 4.1868 \cdot \int_{298.15}^{T_b} \left(19.68 + 0.01189 \cdot T - \frac{307600}{T^2} \right) dT$$

$$\Delta h_{\text{CaCO}_3} = 93969.385875 \quad (\text{kJ} / \text{kmol})$$

$$\Delta s_{\text{CaCO}_3} := 4.1868 \int_{298.15}^{T_b} \frac{19.68 + 0.01189 \cdot T - \frac{307600}{T^2}}{T} dT$$

$$\Delta s_{\text{CaCO}_3} = 143.599418 \quad (\text{kJ} / \text{kmol.K})$$

$$\Delta h_{\text{CaO}} := 4.1868 \cdot \int_{298.15}^{T_b} 10 + 0.00484 \cdot T - \frac{108000}{T^2} dT$$

$$\Delta h_{\text{CaO}} = 45298.024567 \quad (\text{kJ} / \text{kmol})$$

$$\Delta s_{\text{CaO}} := 4.1868 \cdot \int_{298.15}^{T_b} \frac{10 + 0.00484 \cdot T - \frac{108000}{T^2}}{T} dT$$

$$\Delta s_{\text{CaO}} = 69.874536 \quad (\text{kJ} / \text{kmol.K})$$

$$\Delta h_{\text{CO}_2} := 4.1868 \cdot \int_{298.15}^{T_b} 10.34 + 0.00274 \cdot T - \frac{195500}{T^2} dT$$

$$\Delta h_{\text{CO}_2} = 40416.389525 \quad (\text{kJ} / \text{kmol})$$

$$\Delta s_{\text{CO}_2} := 4.1868 \cdot \int_{298.15}^{T_b} \frac{10.34 + 0.00274 \cdot T - \frac{195500}{T^2}}{T} dT$$

$$\Delta s_{\text{CO}_2} = 62.594691 \quad (\text{kJ} / \text{kmol.K})$$

Cálculo da variação da energia livre de Guibbs para a reação de calcinação utilizando os seguintes dados:

$$hfCaCO_3 := -1207682.46 \quad hfCaO := -635514.372$$

$$hfCO_2 := -393772.7268 \quad (\text{kJ/kmol})$$

$$sfCaCO_3 := 88.76016 \quad sfCaO := 39.7746 \quad sfCO_2 := 213.7780$$

$$hfO_2 := 0 \quad sfO_2 := 29.3745 \quad (\text{kJ/kmol.K})$$

$$\Delta G_1 := (hfCaO + hfCO_2 - hfCaCO_3) + (\Delta h_{CaO} + \Delta h_{CO_2} - \Delta h_{CaCO_3}) \dots \\ + -T_b \cdot \left[(sfCaO + \Delta s_{CaO}) + (sfCO_2 + \Delta s_{CO_2}) - (sfCaCO_3 + \Delta s_{CaCO_3}) \right]$$

$$\Delta G_1 = -2422.315378 \quad (\text{kJ/kmol})$$

Cálculo do calor de reação padrão a 298 K para a reação de calcinação

$$\Delta H_{298} := \frac{hfCaO + hfCO_2 - hfCaCO_3}{100} \quad \Delta H_{298} = 1783.953612 \quad (\text{kJ/kg})$$

O cálculo acima é válido para 1 kg de CaCO₃, pois deve ser calculado para a massa de calcário deste trabalho como segue:

$$\Delta H_{real} := \frac{\Delta H_{298} \cdot mf}{1}$$

$$\Delta H_{real} = 0.144946 \quad (\text{kJ/kg})$$

Cálculo do calor total a ser fornecido para o processo de calcinação

$$\Delta H_{Total} := \Delta H_{real} + \frac{\Delta h_{CaCO_3}}{100}$$

$$\Delta H_{Total} = 939.838805 \quad (\text{kJ/kg})$$

Cálculo da concentração de SO₂ no fundo da caldeira dada pelo enxofre alimentado no carvão e o fluxo volumétrico dos gases.

$$C_0 := \frac{mC \cdot \frac{Y_S}{32 \cdot 100} \cdot \frac{Y_v}{100}}{V_g}$$

$$C_0 = 0 \quad (\text{kmol/m}^3)$$

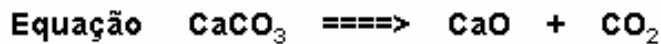
Cálculo da geração de SO₂ na região densa da caldeira

$$R_0 := \frac{\frac{Y_S}{100} \cdot mC}{32 \cdot A \cdot H_d}$$

$$R_0 = 0.000002$$

$$(\text{kmol/m}^3 \cdot \text{s})$$

Cálculo da conversão de CaCO_3 para CaSO_4



$$K1 := e^{-\frac{\Delta G1}{R \cdot T_b}}$$

$$K1 = 1.296207$$

$$p := K1 = \frac{\left(\frac{0.56x}{mf}\right)^{0.56} \cdot \left(\frac{0.44x}{mf}\right)^{0.44}}{\frac{mf-x}{mf}} \text{ solve, } x \rightarrow 5.8514912075365871866 \cdot 10^{-5}$$

$$x := p$$

$$x = 0.000059$$

$$X_{\text{sulfation}} := \frac{\frac{x - (0.56 \cdot x)}{80}}{\frac{\% \text{CaO} \cdot mf}{56}} \cdot 100$$

$$X_{\text{sulfation}} = 46.698216 \quad \%$$

Cálculo da Eficiência de retenção de enxofre para várias razões Ca / S

$$T_b := T_b - 273$$

$$RS := -1455.225 + 3.7055 \cdot T_b - 0.00225 \cdot T_b^2 \quad \text{Ca} / \text{S} = 1$$

$$RS = 68.825 \quad (\%)$$

$$RS := -1680.8 + 4.294 \cdot T_b - 0.0026 \cdot T_b^2 \quad \text{Ca} / \text{S} = 2$$

$$RS = 90.6 \quad (\%)$$

$$RS := -1257.9 + 3.292 \cdot T_b - 0.002 \cdot T_b^2 \quad \text{Ca} / \text{S} = 3$$

$$RS = 95.3 \quad (\%)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Australian COAL Association. **Clean coal Technologies**.2004. Disponível em:

<http://www.Australian_coal.com.au/cleanTech.html>. Acesso em: 20 jun. 2004.

BAJAY, S. V., BADANHAN, L. F. **Energia no Brasil: Os próximos dez anos**. Disponível em: <http://www.cgu.unicamp.br/energia2020/papers/paper_Bajay.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2004.

BASU, P. **Combustion of Coal in circulatin Fluidized – bed Boilers: a review**. Chemical Engeneering Science., v.54, pp. 5547–5557, 1999.

BEÉR, J.M. **Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges**. Progress in Energy and Combustion Science, v.26, pp.301-327, 2000.

BELIN, F., MARYAMCHIK, M., WALKER, D.J., WIETZKE, D.L. **Babcock & Wilcox CFB Boilers – Design and Experience**. In: 16th International Conference on FBC, Reno., U.S.A., 2001.

BELIN, F., BABICHEV, L.A., LEVIN, M.M., MAYSTRENKO, A.Y. **CFB Combustion of High - Ash Ukranian Antracito - Test Results and Design Implications**. In: Ukraine/U.S. Joint Conference on Ukraine Clean Coal Power Plant Upgrade Opportunities, Kiev, Ukraine, 1998.

BORBA, R.F. **Carvão Mineral**. BMB 2001. Disponível em:

<<http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/BalancoMineral2001/carvao.pdf>>.

Acesso em: 16 mai. 2004.

CARVALHO, J. L. R, et al. **Dados termodinâmicos para metalurgistas**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1977.

CHEN, Z., LIN, M., IGNOWSKI, J., KELLY, B., LINJEWILE, T.M., AGARWAL, P.K. **Mathematical Modeling of Fluidized bed Combustion.4: N₂O and NO_x Emissions from the Combustion of Char.** Fuel, v.80, pp.1259-1272, 2001.

CHEN, C., KOJIMA, T. **Modeling of Sulfur Retention by Limestone in Coal Briquette.** Fuel Processing Technology, v.53, pp. 49-67, 1997.

CHENG, L., CHEN, B., LIU, N., LUO, Z., CEN, K. Effect of characteristic of sorbents on their sulfur capture capability at a fluidized bed condition. Fuel, v.83, pp.925-932, 2004.

CHIRONE, R., MARZOCHELLA, A., SALATINO, P., SCALA, F. **Fluidized bed Combustion of High – Volatile Solid Fuels: An Assessment of Char Attrition and Volatile Matter Segregation.** In: Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized bed Combustion, Savannah, Georgia, 1999.

Coal Utilization Research Council. **Pollution Controls for Existing Power Plants**, 2004. Disponível em: <<http://www.coal.org/facts/pollution.htm>> Acesso em: 15 jul. 2004.

Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEN). ABINEE TEC SUL. **Painel: Soluções em Energia – CARVÃO.**, 2004. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/192.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2004.

COSTA, V. J. **Modelo matemático para combustão do carvão pulverizado.** 1998. 156 p. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Faculdade de Matemática, Universidade de Ijuí, Ijuí.

CRIEPI News. **Advanced Coal Combustion Technology**, v.396, pp.1-3, 2004.

Eastman Gasification Services Company. **Coal Gasification – Today's Technology of Choice and Tomorrow's Bright Promise – AIChE East TN Section**, 2003. Disponível em: <<http://www.tnengineering.net/AICHE/coalgas1003.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2004.

Energy Information Administration / International Energy Outlook (EIA/EIO). **Coal.**, pp.75-100, 2004.

Energy Information Administration/Electric Power Monthly (EIA/EPM). **Reducing Nitrogen Oxide Emissions**, pp.11-19, 1998.

GOODGER, A. M. **Formation of Nitrogen Oxides in a Pulverized Coal Boiler**. 2004. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia e Levantamento – Universidade do Sul de Queensland, Queensland.

GOMES, A. P. **Pílulas energéticas sobre carvão mineral**. Disponível em:

<<http://www.geologo.com.br/pilulasdecarvao.asp>>. Acesso em: 23 jan. 2004.

HAN, K., LU, C., CHENG, S., ZHAO, G., WANG, Y., ZHAO, J. **Effect of characteristics of calcium-based sorbents on the sulfation kinetics**. Fuel, v.84, pp.1933-1939, 2005.

heat and power. Disponível em:

<http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/heat_and_power.html>. Acesso em: 13 set. 2004.

HENDERSON, C. **Clean Coal Technologies and Clean Coal Technologies Roadmaps**. Book Reviews, v.74, pp.270-271, 2003.

HUA, Y., FLAMANT, G., LU, J., GAUTHIER, D. **Modelling of axial and radial solid segregation in a CFB boiler**. Chemical Engineering and Processing, v.43, pp.971-978, 2004.

ILUMINA – Instituto de Desenvolvimento Estratégico do Setor Energético, 2005. Disponível em: <<http://www.ilumina.org.br/zpublisher/materias/default.asp?id=18235>>. Acesso em: 20 dez. 2005.

International Energy Agency (IEA). **Coal information**. IEA Statistics, pp.1-718, 2003a.

International Energy Agency. **International Coal Information**, 2003b. Disponível em:

<<http://www.eia.doe.gov/emeu/international/coal.html>>. Acesso em: 12 ago. 2004.

IEA Clean Coal Centre. **Pulverised coal combustion**. 2004. Disponível em: <<http://www.iea-coal.co.uk/site/database/cct%20databases/pcc.html>>. Acesso em: 20 mai. 2004.

JENSEN, A., JOHANSSON, J.E., ANDRIES, J., LAUGHLIN, K., READ, G., MAYER, M., BAUMANN, H., BONN, B. **Formation and reduction of NO_x in pressurized fluidized bed combustion of coal**. Fuel, v.74, pp.1555-1569, 1995.

JENSEN, A., JOHANSSON, J. E. **Modelling of NO_x emissions from pressurized fluidized bed combustion – a parameter study**. Chemical Engineering Science. v.52, pp.1715-1731, 1997.

JOSÉ, H.J. **Combustão e Combustíveis**. Florianópolis, 2004. 45p. Apostila (Química Tecnológica Geral) – Engenharia Química e de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina.

KARPPANEN, E. **Advanced control of Industrial Circulating Fluidized bed Boiler Using Fuzzi Logic**. 2000. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de processos) – Faculdade de Tecnologia – University de Oulu, Oulu.

KAVIDASS, S., ANDERSON, G.L., NORTON, G.S. **Why Build a Circulating Fluidized bed Boiler to Generate Steam and Electric Power**. In: POWER – GEN, Bangkok, Thailand, 2000.

KAVIDASS, S., WALKER, D.J., NORTON, G.S. **IR – CFB Repowering: A Cost Effective Option for Older PC – Fired Boilers**. In: POWER – GEN International, New Orleans, U.S.A., 1999.

KITTO, J.B. **Air Pollution Control for Industrial Boiler Systems**. In: ABMA Industrial Boiler Systems Conference, West Palm Beach, U.S.A.;1996.

KRAFT, D. L. **Bubbling Fluid Bed Boiler Emissions Firing Bark & Sludge**. In: 1998 TAPPI Engineering Conference, Atlanta, U. S. A, 1998.

LECKNER, B. **Fluidized bed Combustion: Mixing and Poluttant Limitation**. Prog. Energy Combust Sci, v.24, pp.31-61, 1998.

LEGROS, R., GHAREBAAGH, R.S., CHAOUKI, J., PARIS, J. **Simulation of Circulating Fluidized bed Reactors Using ASPEN PLUS**. Fuel, v.77, p.327-337, 1998.

MAKINO, K. Technologies for NO_x Redution in PC Fired Utility Boilers – A Manufacturers Perspective. IFRF Combustion Journal, v.200007, pp.1-14, 2000.

MAO, D., EDWARDS, J.R., KUZNETSOV, A.V., SRIVASTAVA, R.K. **Three-dimensional numerical simulation of a circulating fluidized bed reactor for multi-pollutant control**. Chemical Engineering Science, v.59, pp.4279-4289, 2004.

MENG, Y. T., WU, K.T., HUANG, C.C., LEE, H.T. **Co-firing of paper mill sludge and coal in an industrial circulating fluidized bed boiler**. Wast Management, v.22, pp.439-442, 2002.

MOORE, K. **Fuel Rich combustion: A low Cost NO_x Control Means for Coal-Fired Plants**. In: 25th International technical conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Sheraton Sand Key, U.S.A, 2000.

National Energy Technology Laboratory. **Combustion**, 2004. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/coalpower/combustion/index.html>>. Acesso em: 17 jun. 2004

National Mining Association (NMA). **Clen Coal Technology**, 2003. Disponível em: <http://www.nma.org/pdf/clean_coal_a.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2004.

NOWAK, W. **Clean Coal Fluidized – bed Tecnology in Poland**. Applied Energy. v.74, pp. 405 – 413, 2003.

OSBORNE, D.G., GRAHAM, J.M., ELLIOTT, L.K. **New Coal Utilization Tecnologies**. Minerals Engeneering, v.9, pp. 215-233, 1996.

Parivesh. **Clean Coal Combustion Technologies**, 2002. Disponível em:

<<http://www.cpcb.nic.in/jun2000coal4.html>>. Acesso em: 30 set. 2004.

PERRY, J. H. **Chemical Engineering Handbook**. Mc Gran Hill Book Company. Versão Eletrônica 1999.

PPE/COPPE/UFRJ. **Monitoração de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Usinas Termelétricas no Brasil** – Fase de Diagnóstico. Programa de planejamento Energético, p.1-210, 2001.

RADOJEVIC, M. **Reduction of nitrogen óxides in flue gases**. *Enviromental Pollution*, v.102, pp. 685-689, 1998.

RAJARAN, S. **Design Features and Operating Experience of Circulating Fluidized bed Boilers firing High Ash Coals in Índia**. In: *Proceedings of the 15th International Conference Fluidized bed Combustion*, ASME, Savannah., U.S.A., 1999.

RYABOV, G.A, NADIROV, I.I. **The Implication of CFB Technology for Repowering of Old Pulverized Coal Boiler in Russia**. In: *Proceedings of the 15th International Conference Fluidized bed Combustion*, ASME, Savannah., U.S.A., 1999.

SHIMIZU, T., PEGLOW, M., YAMAGIWA, K., TANAKA, M., SAKUNO, S., MISAWA, N., SUZUKI, N., UEDA, H., SASATSU, H., GOTOU, H. **A simplified model of SO₂ capture by limestone in 71 MWe pressurized fluidized bed combustor**. *Chemical Engineering Science*. v.57, pp.1117-1128, 2002.

SOUZA, F. M., MOREIRA, F. J. **Tecnologias de Mitigação em Centrais Térmicas**. *Produção e Planejamento de Energia Elétrica*., p.1-28, 2002.

The World Bank Group. **Sorbent Injection Technology**, 2004. Disponível em

<<http://www.worldbank.org/html/fpd/em/power/EA/mitigatn/aqsosoj.htm>> Acesso em: 27 ago. 2004.

U.S Department of Energy. **Coal**, 2004. Disponível em:

<<http://www.energy.gov/energysources/coal.htm>>. Acesso em: 09 jun. 2004.

U.S Department of Energy. **Reducing Emissions of Nitrogen Oxides via Low-NO_x Burners technologies**. Topical Report Number 5, pp. 1-26, 1996.

U.S Environmental Protection Agency. **Coal-Fired Power Plants: Opportunities For Better Pollutant Control**, 2003. Disponível em:

<http://www.engr.pitt.edu/pcc/2003%20Plenary/Princiotta.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2004.

UND University of North Dakota. **Pulverized Coal Combustion System**, 2004. Disponível em: <<http://www.undeerc.org/carrc/html/CoalCombustion.html#>>. Acesso em: 15 set. 2004.

U.S Environmental Protection Agency. **Controlling Power plant Emissions: Control Technology**, 2004. Disponível em:

<http://www.epa.gov/mercury/control_emissions/tecnology.htm>. Acesso em: 12 jan. 2005.

VAN der LANS, R.P., GLARBORG, P., JOHANSEN, K.D., KNUDSEN, P., HESSELMANN, G. HEPBURN, P. **Influence of coal quality on combustion performance**. Fuel, v.77, pp.1317-1328, 1998.

VAN Der LANS, R.P., GLARBORG, P., DAN-JOHANSEN, K. **Influence of processes Parameters on Nitrogen Oxide Formation in Pulverized Coal Burners**. Prog. Energy Combust. Sci, v.23, pp.349-377, 1997

World Coal Institute. **What is Coal?**. Disponível em:

<<http://www.solidenergy.co.nz/download/WhatIsCoal.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2004.

ZEVENBOVEN. **Sulfur**. Disponível em <http://www.abo.fi/~rzevenho/sulphur_2.PDF>. Acesso em: 23 out. 2005.

ZHUBRIN, S. V. **Fuel-Dust Flames in a Furnace**, 2001. Disponível em:

<<http://www.simuserve.com/cfd-shop/uslibr/reactive/fur-sing.htm>>. Acesso em: 12 Jul. 2005.