



PUCRS

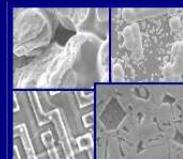
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE CAPTURA DE DIÓXIDO DE
CARBONO POR ABSORÇÃO QUÍMICA VISANDO A APLICAÇÃO EM
TERMELÉTRICAS A CARVÃO NO BRASIL**

LETÍCIA AZAMBUJA DOS SANTOS LICKS

ENGENHEIRA QUÍMICA

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

Março, 2008



PUCRS

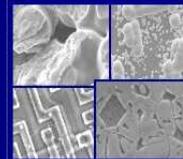
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO POR ABSORÇÃO QUÍMICA, VISANDO A APLICAÇÃO EM TERMELÉTRICAS A CARVÃO NO BRASIL

LETÍCIA AZAMBUJA DOS SANTOS LICKS

Engenheira Química

ORIENTADOR: PROF. DR. MARÇAL PIRES

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Trabalho vinculado ao Projeto 12 – CEPAC - PUCRS

**Porto Alegre
Março, 2008**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marçal Pires

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**

Prof. Dr. Rosane Ligabue

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**

Prof. Dr. Carla Azevedo

Faculdade de Química

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Dr. Miriam Cooper da Silva

**Centro de Excelência em Tecnologias Avançadas
Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial**

Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável e não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto.

Albert Einstein.

DEDICATÓRIA

Pela ajuda incessante, paciência, incentivo e carinho sempre dedicado a mim neste período, ofereço este trabalho ao meu grande amor, Fábio Rodrigo Licks. Além de todo este amor, ele me deu o maior presente da minha vida. A Pietra. Amor obrigado por tudo.

Dedico também a toda a minha família (vovozinha, vovozinho, tiozinho, tiazinha, meus queridos avós, Bentinho e Brisa) que me apoiou não só neste período, mas desde a minha graduação. Pessoal eu amo vocês.

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas, que de uma maneira ou de outra fizeram parte do desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor Marçal Pires pela orientação, paciência, incentivo e oportunidade de aprendizado profissional e pessoal desde a graduação.

Às professoras Rosane Ligabue, Carla Azevedo e a Dr^a. Miriam Cooper pela participação na banca examinadora deste trabalho.

Ao Eng. Francisco Porto da empresa CGTEE pelo auxílio e gentileza na busca de informações.

À Quím. Rita Tissot, Eng. Alexandre Thiele e sua equipe da empresa TRACTEBEL ENERGIA pela gentileza e fornecimento de dados técnicos do complexo Jorge Lacerda.

Ao CEPAC/Petrobrás e a PUCRS pela bolsa concedida para a realização deste trabalho.

Aos colegas do CNTL e do LQAmb principalmente ao mestrando Alexandre Paprocki pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos que entenderam minhas ausências e meu mau humor em alguns dias.

A minha mãe e ao Fábio pela ajuda e incentivo eterno.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	5
AGRADECIMENTOS	6
SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivos Específicos	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Efeito Estufa	19
3.1.1 Dióxido de Carbono	21
3.1.2 Emissões de Carbono.....	22
3.1.3 Inventários de emissões no Brasil.....	24
3.2 Carvão Fóssil.....	24
3.2.1 Carvão Fóssil brasileiro.....	26
3.2.2 Uso energético do carvão brasileiro.....	29
3.2.3 Estimativa do consumo energético mundial de carvão para a geração de energia	31
3.3 Sistemas de combustão e gaseificação do carvão	32
3.3.1 Combustão pulverizada	32
3.3.2 Combustão de Leito Fluidizado (FBC)	34
3.3.3 Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado (IGCC).....	35
3.4 Seqüestro de carbono.....	36
3.4.1 Estocagem de Carbono	37
3.4.2 Estocagem em reservatórios geológicos	38

3.4.2.1	<i>Camadas de Carvão (Coalbed)</i>	38
3.4.2.2	<i>Reservatórios ativos de óleo (EOR)</i>	39
3.4.2.3	<i>Aqüíferos salinos profundos</i>	39
3.4.2.4	<i>Oceanos</i>	39
3.4.3	Formas alternativas de seqüestro	40
3.4.3.1	<i>Fertilização dos Oceanos</i>	40
3.4.3.2	<i>Agricultura</i>	40
3.5	Captura de CO₂	41
3.5.1	Métodos de Captura.....	42
3.5.1.1	<i>Sistemas de membrana</i>	42
3.5.1.2	<i>Destilação Criogênica</i>	43
3.5.1.3	<i>Adsorção</i>	44
3.5.1.4	<i>Absorção</i>	45
3.6	Absorção Química	47
3.7	Estimativa de custos envolvidos no CCS	51
4	ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE CO₂ PELA QUEIMA DE CARVÃO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA	53
4.1	Metodologia para o cálculo de emissões a partir da combustão de carvão no Brasil	53
4.1.1	Estimativa dos parâmetros utilizados nos cálculos de emissão de carbono	54
4.1.2	Cálculo da emissão de Carbono	55
4.1.3	Cálculos específicos para Termelétricas.....	57
4.1.3.1	<i>Cálculo da energia de entrada (input)</i>	57
4.1.3.2	<i>Cálculo de emissões</i>	58
4.1.3.3	<i>Estimativa de eficiência e fatores de emissão</i>	59
4.2	Emissões de carbono	59
5	COMPOSIÇÃO CARACTERÍSTICA DOS GASES DE CHAMINÉ DAS TERMELÉTRICAS BRASILEIRAS	64
5.1	Efeito dos gases e das condições combustão sobre o solvente de absorção	64
5.1.1	Fatores que interferem no processo de captura de CO ₂ por absorção química.....	65
5.1.1.1	<i>SO_x</i>	65

5.1.1.2 NO _x	66
5.1.1.3 Cinzas volantes (<i>leves</i>).....	67
5.1.1.4 Temperatura dos Gases de combustão.....	68
5.1.1.5 Fuligem.....	68
5.1.1.6 Oxigênio.....	68
5.2 Padrões de emissão brasileiros para processos de combustão de carvão	69
5.3 Composição dos gases de chaminé em termelétricas a carvão no Brasil...	71
5.4 Análise dos parâmetros de emissões reais e os padrões de emissão para a captura	74
6 PROPOSTA DE UM SISTEMA DE CAPTURA PARA UMA USINA TERMELÉTRICA BRASILEIRA	75
6.1 Aplicação do método de captura em uma usina térmica a carvão	75
6.2 Avaliação de áreas para o seqüestro de carbono no sul do Brasil	76
6.2.1 Rio Grande do Sul.....	77
6.2.1.1 Região de Candiota:	77
6.2.1.2 Região metropolitana:.....	78
6.2.2 Santa Catarina	79
6.2.2.1 Região de Criciúma:.....	79
6.3 Simulação de um sistema de captura pós-combustão em uma termelétrica brasileira	79
6.3.1 Escolha da localização apropriada para o sistema do seqüestro de CO ₂ ..	80
6.3.2 Detalhamento da adaptação do sistema para o <i>input</i> no sistema de captura de CO ₂ por absorção química	81
7 CONCLUSÕES.....	86
8 REFERÊNCIAS	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Triângulo do desenvolvimento sustentável.	16
Figura 3.1. Representação esquemática do efeito estufa.	19
Figura 3.2. Contribuição dos gases ao efeito estufa.	21
Figura 3.1. Principais bacias Carboníferas do Brasil.	27
Figura 3.2. Estrutura da Oferta Interna de Energia Elétrica, Brasil 2005.	29
Figura 3.3. Usina Termelétrica Presidente Médici – Candiota – RS.	30
Figura 3.4. Sistema de combustão pulverizada.	33
Figura 3.5. Sistema de combustão pulverizada subcrítica 500MW.	33
Figura 3.6. Sistema IGCC.	36
Figura 3.7. Opções para estocagem de CO ₂	38
Figura 3.8. Tecnologias de captura de CO ₂	42
Figura 3.9. Separação com Membrana.	43
Figura 4.1. Fator de emissão de carbono por MWh e eficiência na geração de energia das usinas termelétricas brasileiras a carvão em 2002.	63
Figura 6.1. Sistema simplificado de combustão pulverizada com captura de CO ₂ por absorção química – sistema <i>Retrofit</i>	75
Figura 6.2. Requisitos para seqüestro de CO ₂ em carvão.	77
Figura 6.3. Fluxograma simplificado de equipamentos de uma usina termelétrica com o sistema de captura de CO ₂	83
Figura 6.4. Fluxograma de tomadas de decisões para a implementação de um sistema de captura de CO ₂	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Composição básica da atmosfera terrestre.....	20
Tabela 3.2. Estimativa de emissões mundiais de CO ₂	23
Tabela 3.3. Classificação Norte-Americana do Carvão Fóssil.....	25
Tabela 3.4. Classificação de alguns carvões do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.....	28
Tabela 3.5. Usinas termelétricas brasileiras.....	29
Tabela 3.6. Principais tecnologias de combustão de carvão.....	36
Tabela 3.7. Principais Aminas utilizadas nos processos de absorção de CO ₂	50
Tabela 4.1. Dados de caracterização dos principais carvões energéticos brasileiros conforme diferentes fontes de informação.....	56
Tabela 4.2. Emissão de carbono por usinas termelétricas e fontes industriais que utilizam carvão como combustível primário referentes ao ano de 2002.	60
Tabela 5.1. Limites de emissão de poluentes atmosféricos pela combustão de carvão segundo legislações federal (CONAMA) e estaduais (CONSEMA, SEMA) no Brasil.....	71
Tabela 5.2. Emissão de poluentes atmosféricos pelas Unidades do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda no ano de 1997.....	72
Tabela 5.3. Emissão de poluentes atmosféricos pelas Unidades do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda no ano de 2007.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais, do inglês <i>American Society for Testing and Materials</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
BIRD	Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento
CBI	Candiota Banco Inferior
CBS	Candiota Banco Superior
CBM	Metano nas Camadas de Carvão, do Inglês <i>Coalbed Methane</i>
CE	Carvão energético
CEF	Fatores de Emissão de Carbono, do Inglês <i>Carbon Emission Factors</i>
CEPAC	Centro de Excelência em Pesquisa sobre o Armazenamento de Carbono para Indústria do Petróleo
CCP	Projeto de Captura de Carbono, do inglês <i>Carbon Capture Project</i>
CCS	Processos de Captura e Estocagem de Carbono, do inglês <i>Carbon Capture and Storage Processes</i>
CE	Carvão Energético
CGTEE	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica
CH ₄	Metano
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COS	Sulfureto de Carbonilo
CRM	Companhia Riograndense de Mineração
CS ₂	Dissulfureto de Carbono
DEA	Dietanolamina
DOE	Departamento de Energia do Governo dos Estados Unidos, do inglês <i>Department of Energy</i>
dscf	Pé cúbico de padrão seco
EUA	Estados Unidos da América
IEA	Agência Internacional de Energia, do inglês <i>International Energy Agency</i>
IGCC	Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado, do Inglês <i>Integrated Gasification Combined Cycle</i>
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, do inglês <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
FBC	Combustão em Leito Fluidizado, do inglês <i>Fluidised bed combustion</i>
FGD	Dessulfurização da corrente de gás, do inglês <i>Flue gas desulphurisation</i>
JICA	Agência de Cooperação Internacional do Japão, do inglês <i>Japan International Cooperation Agency</i>
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MEA	Monoetanolamina
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MHI	Mitsubishi Heavy Industries
MIT	Instituto de tecnologia de Massachusetts, do inglês <i>Massachussetts</i>

	<i>Institute of Technology</i>
MP	Material Particulado
MME	Ministério de Minas e Energia
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, do inglês <i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
PC	Combustão pulverizada do carvão, do inglês Pulverized Coal Combustion
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PIB	Produto Interno Bruto
ppm(v)	Parte por milhão em unidades volumétricas
SCR	Redução Catalítica Seletiva, do inglês <i>Selective Catalitic Reduction</i>
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Estado do Paraná
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO ₃	Trióxido de enxofre
RS	Rio Grande do Sul
tep	Toneladas Equivalentes de Petróleo
UTLA	Usina Termelétrica Jorge Lacerda A
UTLB	Usina Termelétrica Jorge Lacerda B
ULTC	Usina Termelétrica Jorge Lacerda C

RESUMO

LICKS, Letícia. **Avaliação do processo de captura de dióxido de carbono por absorção química visando a aplicação em termelétricas a carvão no Brasil.** Porto Alegre. 2008. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Muitos são os esforços de diversos países em desenvolver tecnologias consideradas limpas para que o impacto ambiental das atividades desenvolvidas seja o menor possível. Neste contexto, o presente trabalho pretende contribuir avaliando a metodologia de captura do dióxido de carbono (CO₂) por absorção química em usinas térmicas a carvão fóssil, verificando as potencialidades de aplicação no Brasil com o objetivo de mitigar as emissões antropogênicas deste gás, é um dos responsáveis pelo efeito estufa. Para isto, foi proposta uma metodologia para o cálculo de emissões. Foi realizado um levantamento das potências áreas para o seqüestro de CO₂, bem como um estudo da técnica de captura de CO₂ por absorção química e das demais técnicas. A partir disto verificou-se que os níveis de poluentes contidos nos gases de combustão são superiores aos indicados para o sistema de captura (SO_x ≤ 1ppm; NO_x ≤ 20 ppm e cinzas volantes ≤ 15 mg/Nm³). O Brasil possui como área potencial para a realização do seqüestro de CO₂ a região sul do estado de Santa Catarina, que possui o maior complexo termelétrico da América Latina. Este complexo emite cerca de 940 GgC.ano⁻¹, que corresponde a 52% das emissões de carbono pela combustão de carvão no Brasil. A região possui áreas potenciais para o armazenamento geológico. A técnica de captura a ser indicada de acordo com as condições de processo das termelétricas brasileiras é a absorção química, sendo que adaptações no sistema de combustão existente serão imprescindíveis para a adoção desta técnica.

Palavras-Chaves: Absorção Química; Captura de CO₂; Seqüestro de CO₂; Emissões de Carbono; Carvão.

ABSTRACT

LICKS, Letícia. **Process evaluation of carbon dioxide capture by chemical absorption, focusing the implementation in Coal-fired Power Plant on Brazil.** Porto Alegre. 2008. Dissertation. Pos-Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Many are the efforts of several countries to develop cleaner technologies which are utilized for minimizing the environmental impacts. In this context, the present work aims to evaluate the Carbon Dioxide (CO₂) capture by chemical absorption process into Brazilian coal-fired power plants. It also pretends to verify the mitigation of this anthropogenic gas emission, which is one of the most important gases responsible for greenhouse effect. For this reason, calculation methodology of emissions was proposed. A survey of potential areas of CO₂ sequestration as well as the state-of-art of the CO₂ capture by chemical absorption and other techniques were studied. It was found that the levels of pollutants contained in the combustion gases are higher than those accepted for the capture system (SO_x ≤ 1ppm; ≤ 20 ppm NO_x and fly ash ≤ 15 mg/Nm³). The region has potential areas for geological storage, in Brazil, is the southern Santa Catarina State. In this region, is located the largest coal-fired power plant of Latin America. This power plant is responsible for 940 GgC.ano⁻¹ emission, which corresponds to 52% of carbon emissions by coal-fired power plant in Brazil. In function of that, this region is suitable for CO₂ sequestration. The capture's system indicated for Brazilians Power Plants is chemical absorption process. However, some adaptation must be done in the current combustion process so that the proposed technical can be used.

Key-words: Chemical Absorption; CO₂ Capture; CO₂ Sequestration; Carbon Emissions; Coal.

1 INTRODUÇÃO

O termo “desenvolvimento sustentável”, proferido na Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1987, pela ex-primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, diz respeito à "satisfazer as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades", ou seja, usar de forma racional e eficiente os recursos de forma a não ocorrer sua extinção.

Os pilares do desenvolvimento sustentável estão fundamentados no desenvolvimento econômico, ambiental e social. Quando o triângulo (Figura 1.1) está equilibrado, o desenvolvimento pode ser dito sustentável.

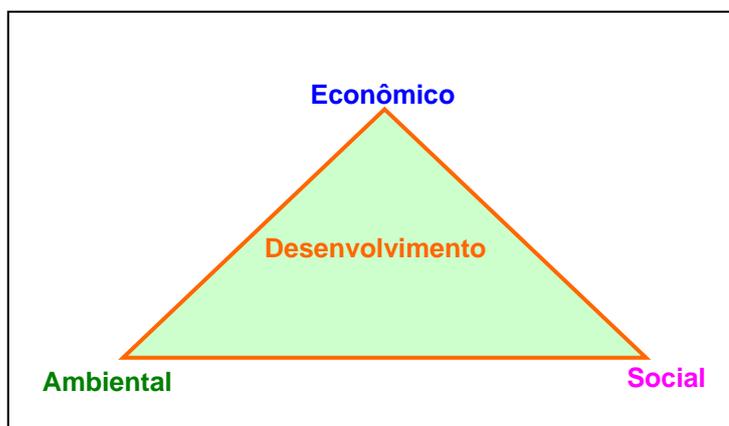


Figura 1.1. Triângulo do desenvolvimento sustentável.

Com a idéia de sustentabilidade, entram em cena outros conceitos como, por exemplo o de ecoeficiência. Existem diversas formas de conceituar ecoeficiência, mas o conceito principal refere-se a produzir de forma eficiente, sem agredir o meio ambiente.

Neste sentido, o desenvolvimento industrial sem levar em conta a ecoeficiência, pode ocasionar grande impacto no meio ambiente, principalmente no clima. O efeito estufa, chuva ácida, *smog*, entre outros, são causados principalmente pelas emissões de poluentes antropogênicos.

Uma das grandes preocupações mundiais referentes ao meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável está relacionada às emissões de carbono, pois a matriz energética mundial depende do carvão e do petróleo. Neste contexto, a utilização racional de combustíveis fósseis e, conseqüente, redução na emissão de CO₂ se torna um tema atual e de grande importância, de modo que a emissão deste gás contribui significativamente no agravamento das características do efeito estufa.

Países da Europa, Estados Unidos da América, Canadá e outros que dependem basicamente da energia gerada em termelétricas vêm desenvolvendo projetos para o controle dos gases causadores do efeito estufa. E mesmo o Brasil, apesar de não contribuir de forma significativa com as emissões de carbono está preocupado com os efeitos destas emissões.

O Brasil vem se destacando em questões relacionadas ao desenvolvimento sustentável. Em 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), também chamada Rio 92 ou Eco 92, realizada no Rio de Janeiro, foi aprovada pela comunidade internacional a Agenda 21, que traduz em ações o conceito de desenvolvimento sustentável (BRASIL, [2006c]). A Eco 92 foi um dos eventos que deram origem ao tratado internacional que visa a redução das emissões dos gases do efeito estufa, o Protocolo de Kyoto. Novamente o Brasil se destaca propondo a criação dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) para constituir este tratado.

Segundo o capítulo 34 da Agenda 21, “As tecnologias ambientalmente saudáveis, no contexto da poluição, são “tecnologias de processos e produtos” que geram pouco ou nenhum resíduo, para a prevenção da poluição. Também compreendem tecnologias de “etapa final” para o tratamento da poluição depois que esta foi produzida”. Ou seja, tecnologias que reduzam ou evitem a degradação ambiental são ditas “Tecnologias Limpas” (BRASIL, [2006d]).

É neste contexto que o presente trabalho pretende contribuir avaliando a metodologia de captura do dióxido de carbono (CO₂) por absorção química em usinas térmicas a carvão fóssil e verificando as potencialidades de aplicação no Brasil com o objetivo de mitigar as emissões antropogênicas deste gás, que possui um impacto direto nos efeitos do efeito estufa.

Este trabalho está integrado ao Centro de Excelência em Pesquisa sobre o Armazenamento de Carbono para a Indústria do Petróleo – Petrobrás/PUCRS.

2 OBJETIVOS

A proposta deste trabalho é a avaliação da técnica de captura do dióxido de carbono (CO₂) por absorção química em sistemas de pós-combustão. Como a captura só é viável para grandes fontes emissoras de carbono, serão utilizadas como base de estudo, as usinas térmicas a carvão fóssil do Brasil.

2.1 Objetivos Específicos

Avaliar a possibilidade de aplicação do processo de captura de CO₂ por absorção química em sistemas de pós-combustão para as termelétricas a carvão do Brasil.

Propor uma metodologia detalhada para cálculos de emissão de CO₂, específica para as termelétricas a carvão, visando subsidiar Inventários de emissão brasileiros.

Verificar a influência da composição e das condições dos gases que entram no sistema de absorção sobre o solvente utilizado. Realizar um estudo sobre a composição real dos gases de saída de chaminé, bem como dos padrões de emissão brasileiros.

Após o desenvolvimento do estudo, se viável, pretende-se propor, um sistema de captura de CO₂ às usinas térmicas a carvão do Brasil. Ao final do trabalho pretende-se apresentar de forma qualitativa, dados que sintetizem as principais etapas para a implementação da técnica de captura de CO₂ em uma determinada localidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Efeito Estufa

O Efeito Estufa é um fenômeno natural em que gases atuam sobre os raios infravermelhos refletidos pela superfície da Terra, reenviando-os de volta para ela, mantendo assim uma temperatura estável no planeta. O fenômeno é semelhante ao ocorrido em uma estufa, que mantém o calor preso dentro de um ambiente específico. Daí o nome de "efeito estufa".

A Figura 3.1 exemplifica o mecanismo de funcionamento do efeito estufa. Uma parte dos raios do sol que irradiam a Terra é absorvida e transformada em calor, outra parte deles é refletida pela superfície da terra de volta para o espaço.

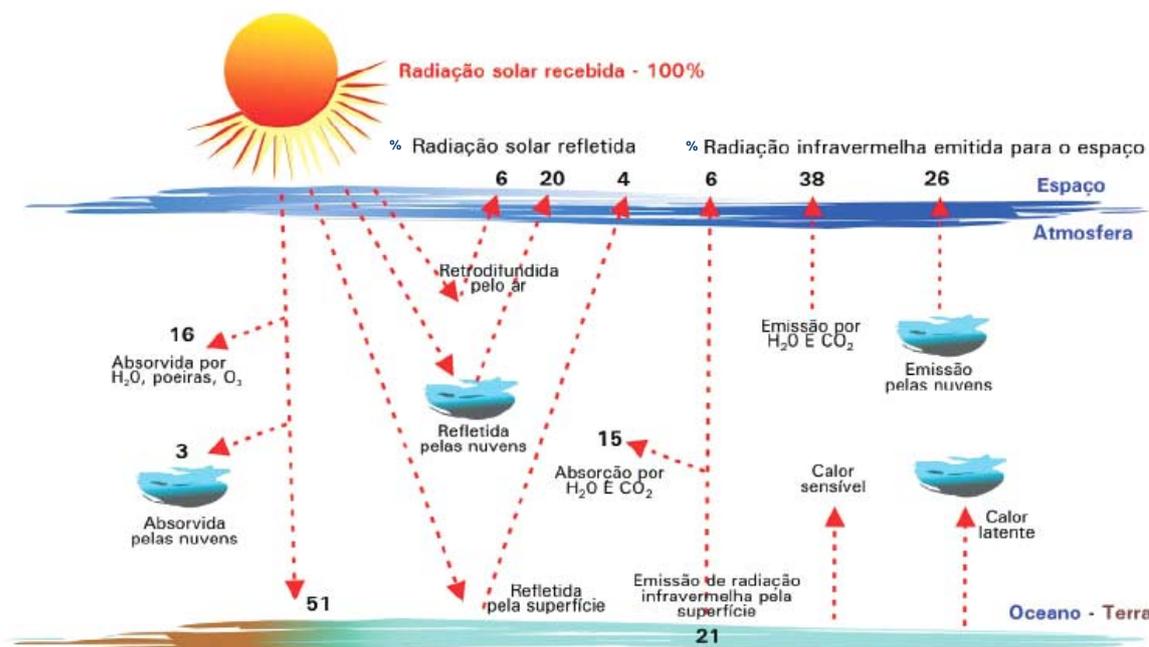


Figura 3.1. Representação esquemática do efeito estufa.

Fonte: BIODIESELBR ONLINE, [2006].

Alguns dos gases presentes na atmosfera responsáveis pelo fenômeno do Efeito Estufa são o vapor d'água, o dióxido de carbono, óxido nitroso (N_2O) e o metano (CH_4). Estes gases são capazes de reter as radiações infravermelhas na atmosfera e sem eles a radiação solar se dissiparia no espaço e o planeta seria cerca de $30^\circ C$ mais frio. A Tabela 3.1 exibe a composição básica da atmosfera terrestre onde se observa que os gases CO_2 e o CH_4 apresentam-se em baixas concentrações.

Tabela 3.1 Composição básica da atmosfera terrestre.

Elementos	% Volume
Nitrogênio	78,1%
Oxigênio	21%
Vapor d'água	0 - 4%
Argônio	0,93%
Dióxido de Carbono	$\pm 0,3\%$
Néon	$\leq 0,002\%$
Hélio	0,0005%
Metano	0,0002%

Fonte: ROCCO, [2006].

Segundo Ramos (2001), o Efeito Estufa é importante para a vida terrestre, pois impede o escape, à noite, do calor absorvido pela Terra durante o dia. Porém a intensificação deste fenômeno pode se tornar prejudicial para a vida no Planeta. Este efeito é intensificado pela liberação excessiva de gases do efeito estufa, especialmente pelo dióxido de carbono, que é produzido com a queima de combustíveis fósseis, sobretudo petróleo e carvão.

Os principais gases responsáveis pelo Efeito Estufa estão apresentados na Figura 3.2, pode-se verificar que o CO_2 contribui com cerca de 60% para este fenômeno.

Segundo estudos de Graedel e Allenby (1995), citados por Ramos (2001), a intensificação do Efeito Estufa pode causar um aumento de dois a cinco graus na temperatura média do planeta até o ano de 2050. Com isto, uma elevação de até 45 cm na altura dos oceanos é prevista até 2070, devido à expansão térmica dos oceanos e ao derretimento de geleiras.



Figura 3.2. Contribuição dos gases ao efeito estufa.

Fonte: EMBRAPA, [2006].

Para Barros (2001), o aquecimento global do planeta pode significar o desaparecimento de alguns países insulares e de cidades litorâneas. As regiões hoje cobertas por florestas ficarão mais sujeitas a incêndios de grandes proporções e poderão virar desertos. O aquecimento global terá conseqüências desastrosas, principalmente, para países menos desenvolvidos, que embora não sejam os grandes responsáveis pelo agravamento do efeito estufa, não possuem recursos e tecnologia para enfrentar as adversidades geradas pelas mudanças climáticas.

Conforme Leite (1999), mesmo que ocorra uma transição sem sobressaltos para uma matriz energética baseada no gás natural, em 50 anos, ou para o trinômio sol/ventos/hidrogênio, em 100 anos, o CO₂ já emitido vai continuar afetando o clima por muitas décadas.

3.1.1 Dióxido de Carbono

O Dióxido de Carbono é o principal gás associado ao efeito estufa, conforme exibido na Figura 3.2. O CO₂ é produzido naturalmente através da respiração, pela decomposição de plantas e animais e pelas queimadas naturais em florestas.

Além destas, possui também fontes antropogênicas (produzidas pelo Homem) como: queima de combustíveis fósseis (derivados de petróleo e carvão), mudanças na cobertura vegetal (como o desflorestamento), queima de biomassa.

Conforme comentado anteriormente o aumento da concentração do CO₂ tem como conseqüência mais direta o aumento da temperatura média do planeta, cerca

de 0,4% ao ano. Este aumento se deve principalmente à utilização crescente de combustíveis fósseis, principalmente no que se refere ao carvão, que atualmente é o principal responsável pela emissão de CO₂ na atmosfera.

Devido à contribuição do CO₂ no aquecimento global, tornou-se cada vez mais importante a realização de estudos para a remoção do gás carbônico da atmosfera, conhecidos como seqüestro de carbono, que estão relacionados à captura, transporte e estocagem deste gás.

3.1.2 Emissões de Carbono

Uma das grandes preocupações mundiais referentes ao meio ambiente está relacionada com as emissões de carbono à atmosfera. Entra em cena a necessidade de desenvolvimento de tecnologias limpas e estudos de redução ou mitigação do impacto do uso de combustíveis fósseis.

A matriz energética de muitos países é baseada na queima de combustíveis fósseis destacando-se o carvão de origem fóssil intensamente usado na geração de energia. Em todo o mundo, mais de 4 bilhões de toneladas de carvão são consumidos anualmente como combustíveis em usinas térmicas (CIEN TEC, 2006).

Atualmente 80 % da demanda de energia mundial são advindas de combustíveis fósseis: Carvão (25%), gás natural (21%), petróleo (34%). Nos Estados Unidos cerca de 50% da eletricidade é gerada a partir de usinas termelétricas a carvão, onde cada usina possui em média uma capacidade de geração de energia de 500 MW. Uma termelétrica com estas características é capaz de gerar cerca de 3 milhões de toneladas por ano de Dióxido de Carbono (CO₂). Os EUA produzem aproximadamente 1,5 bilhões de toneladas por ano de CO₂ a partir das termelétricas a carvão (MIT, 2007).

Segundo dados do BIRD, os Estados Unidos é o país que mais emite carbono à atmosfera, equivalendo a 24% do total de gases emitidos. Economias em expansão como China e Índia aumentaram nos últimos anos em 33% e 57% a emissão de gases, respectivamente. A China e a União Européia são responsáveis, respectivamente, por cerca de 15% e 10% do total mundial de gases emitidos. Os países em desenvolvimento também produzem cada vez mais gás carbônico, sendo atualmente responsáveis por aproximadamente dois terços da emissão total (COMPET, 2006).

Apesar de o Brasil possuir uma matriz energética “limpa”, baseada no uso da hidroeletricidade e de biocombustíveis, a utilização de combustíveis fósseis (gás natural, derivados de petróleo e carvão mineral) deve aumentar nas próximas décadas (BRASIL, [2007]). Dentre as fontes não renováveis de energia, o carvão merece destaque especial devido às grandes reservas existentes no país (32×10^9 t; BRASIL, 2006) e ao incremento da geração termelétrica de eletricidade utilizando esse combustível, prevista pelo governo federal para os próximos anos (BRASIL, [2007]).

O Brasil, apesar de não ser um país que contribua significativamente com as emissões de carbono, integra a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, devido a isto foram assumidos compromissos de estudos que visam reduzir os efeitos negativos sobre o clima de diversas atividades, incluindo as referentes à produção e uso da energia (CONSOLIDAÇÃO ..., 2006).

A Tabela 3.2 exibe uma estimativa de emissões mundiais de CO₂. É estimado que em 2030 o Brasil tenha dobrado as emissões de carbono comparadas ao ano de 2000.

Tabela 3.2. Estimativa de emissões mundiais de CO₂.

	1971	2000	%	2030	%
América do Norte	4.769	6.535	29	9.075	24
EUA + Canadá	4.672	6.175	27	8.327	22
União Européia	3.015	3.146	14	3.829	10
Japão/Aústria/Nova Zelândia	900	1.513	7	1.701	4
Europa do Leste	2.281	2.488	11	3.646	10
Rússia	-	1.492	7	2.241	6
Países em desenvolvimento	2.018	7.782	34	18.118	47
China	812	3.052	13	6.718	18
Índia	203	937	4	2.280	6
Brasil	91	303	1	760	2
Oriente Médio	122	978	4	1.879	5
África	266	676	3	1.874	5
Outros	524	1.836	8	4.607	12
Mundo	13.654	22.639		38.161	

Mega toneladas equivalentes de CO₂ (Mt = 1 bilhão t)

Fonte: MEUNIER, 2005 apud PIRES, 2006.

3.1.3 Inventários de emissões no Brasil

O Primeiro Inventário Nacional de Emissão de Carbono produzido pelo Ministério de Ciência e Tecnologia - MCT (BRASIL, 2002) apresenta dados referentes aos anos de 1990-1994 utilizando metodologia recomendada pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC. Estes tipos de inventários normalmente são de difícil validação, pois necessitam de diversas informações que nem sempre são bem quantificadas, gerando algumas imprecisões. No que concerne à emissão pela queima de carvão, várias simplificações foram adotadas em função da dificuldade de obtenção de dados específicos para as condições do país. Cabe salientar que o carvão brasileiro apresenta características bastante singulares, tendo elevados teores de cinzas e baixo poder calorífico, fatores importantes na quantificação do CO₂ gerado durante os processos de combustão.

Entretanto, a quantificação das emissões de CO₂, apesar de não ser uma atividade fácil, é de extrema importância, pois está relacionada à nossa responsabilidade perante o desenvolvimento sustentável mundial. Para a implementação de uma metodologia correta de inventário é necessário ter em mente que os dados utilizados devem ser validados e os resultados obtidos serem de interesse e que atendam as legislações ambientais (XAVIER, 2004).

Neste contexto, cabe destacar o esforço de muitas empresas brasileiras que estão tentando se enquadrar em projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo, cujas metodologias necessitam estimativas precisas do carbono emitido em nível nacional (IPCC, 2007).

3.2 Carvão Fóssil

Segundo a ISO 11760 de 2005, citada por SOUSA; SILVA; RODRIGUES, (2006a), carvão fóssil é uma rocha sedimentar carbonácea fundamentalmente derivada de restos vegetais, com matéria mineral associada correspondendo a um teor em cinzas (base seca) inferior ou igual a 50%.

Por não apresentar uma composição uniforme o carvão não pode ser representado por uma fórmula química (XAVIER, 2004). Ao longo do tempo de formação do carvão ocorrem alterações físicas e químicas que proporcionam um enriquecimento relativo em carbono, pela perda de constituintes voláteis da matéria

orgânica. Este processo denomina-se carbonização (INETI, 2006). Estas alterações atingem graus diferentes devido à decomposição bioquímica por ação de bactérias, calor e da pressão. A partir destas diferenças é possível fazer a classificação do carvão que é dita como o *Rank* do carvão.

A Tabela 3.3 exhibe a classificação do carvão segundo a *American National Standards Institute – ASTM*. Esta classificação é importante não só para determinar o uso industrial do carvão, mas também na determinação da viabilidade da utilização das camadas de carvão como reservatórios geológicos para o seqüestro de CO₂.

Tabela 3.3. Classificação Norte-Americana do Carvão Fóssil.

Classe	Grupo	Carbono Fixo (%)		Matéria Volátil (%)		Poder Calorífico (Btu/lb)	
		≥	<	>	≤	≥	<
I - Antracito	1 - Meta antracito	98	-	-	2	-	-
	2 - Antracito	92	98	2	8	-	-
	3 - Semi-Antracito	86	92	8	14	-	-
II - Betuminoso	1 - Carvão Betuminoso Baixo Volátil	78	86	14	22	-	-
	2 - Carvão Betuminoso Médio Volátil	69	78	22	31	-	-
	3 - Carvão Betuminoso Alto Volátil A	-	69	31	-	14.000	-
	4 - Carvão Betuminoso Alto Volátil B	-	-	-	-	13.000	14.000
	5 - Carvão Betuminoso Alto Volátil C	-	-	-	-	11.500 10.500	13.000 11.500
III - Sub-Betuminoso	1 - Carvão Sub-Betuminoso A	-	-	-	-	10.500	11.500
	2 - Carvão Sub-Betuminoso B	-	-	-	-	9.500	10.000
	3 - Carvão Sub-Betuminoso C	-	-	-	-	8.300	9.500
IV - Linhito	1 - Linhito A	-	-	-	-	6.300	8.300
	2 - Linhito B	-	-	-	-	-	6.300

Fonte: ASTM, 1996.

A ASTM classifica os carvões pelo *Rank*, onde são avaliadas algumas propriedades como o poder calorífico, material volátil e carbono fixo. A partir desta classificação o carvão é dividido em 4 classes: linhito, betuminoso, sub-betuminoso e antracito. Estas classes ainda são divididas em alguns grupos, de acordo com propriedades do carvão.

O antracito corresponde à última variedade de carvão surgida no processo de carbonização e caracteriza-se pelo alto teor de carbono fixo, baixo teor de compostos voláteis conforme explicitado na Tabela 3.3. Tem como características a cor negra brilhante, rigidez e dificuldade com que se queima, dada sua pobreza em elementos

inflamáveis. É usado como redutor em metalurgia, na fabricação de eletrodos e de grafita artificial. Uma de suas principais vantagens consiste em proporcionar chama pura, sem nenhuma fuligem (BORBA, 2001).

Os carvões betuminosos e sub-betuminosos também são conhecidos como hulha. A hulha é composta de carbono, restos vegetais parcialmente conservados, elementos voláteis, detritos minerais e água. É empregada tanto como combustível quanto como redutor de óxidos de ferro e, graças a suas impurezas, na síntese de milhares de substâncias de uso industrial (BORBA, 2001).

O carvão classificado como linhito possui poder calorífico inferior as demais classes de carvão. É utilizado na siderurgia, como redutor, graças a sua capacidade de ceder oxigênio para a combustão, como matéria-prima na carboquímica (CARVÃO MINERAL, [2007]).

3.2.1 Carvão Fóssil brasileiro

Os principais depósitos de carvão brasileiros estão situados nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (GOMES et al., 1998). A maior jazida de carvão brasileira está situada na região de Candiota, no estado do Rio Grande do Sul. A Figura 3.1 exibe as principais bacias carboníferas do Brasil.

Os jazimentos brasileiros mais importantes denominam-se, de Sudoeste para Nordeste, Candiota, Capané, Iruí, Leão, Charqueadas, Morungava/Chico Lomã, Santa Terezinha e a jazida Sul-Catarinense (GOMES et al., 1998). O Rio Grande do Sul possui 89,2% das reservas de carvão mineral nacional, um total de 28,802 milhões de toneladas.

A profundidade das camadas das jazidas varia de nula até cerca de 1.200 m. Na jazida Santa Terezinha tem-se coberturas mínimas ao redor de 500 m, indo até valores máximos por volta de 800 m.

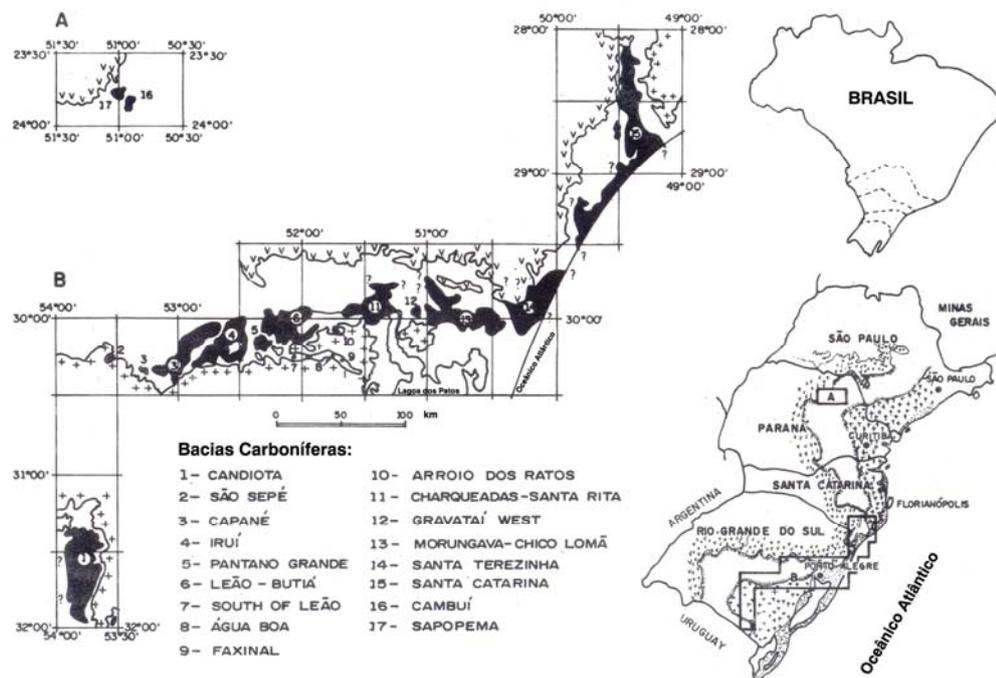


Figura 3.1. Principais bacias Carboníferas do Brasil.

Fonte: SOUSA; SILVA; RODRIGUES, 2006b.

A jazida de Candiota é a maior do país, com cerca de 40% dos recursos totais conhecidos. A área corresponde a cerca de 2 mil quilômetros quadrados e possui 23 camadas. A camada mais importante corresponde a de Candiota que é bipartida em dois bancos, Candiota Banco Superior - CBS e Candiota Banco Inferior – CBI (SÜFFERT, 1997); possui 4,5 m e atualmente é a única camada em lavra.

O carvão da jazida de Candiota apresenta altos teores de cinzas (cerca de 50%) e a matéria orgânica está misturada com o material mineral presente no carvão (SILVA; KALKREUTH, 2005). A mineração é realizada a céu aberto, em profundidades de até 50 metros. A Companhia Riograndense de Mineração - CRM vem minerando nessa região o carvão que tem como sua principal utilização na forma bruta a geração de eletricidade pela Usina Termelétrica Presidente Médici. A produção atual está em torno de 1,7 milhões de toneladas de carvão por ano. Com a implantação da Fase C desta usina (ou Candiota III), a produção da mina quase duplicará (CRM, 2007).

As jazidas do Sul Catarinense são as mais exploradas devido às propriedades coqueificáveis do carvão da camada de barro branco (GOMES et al., 1998) e o consumo nas usinas termelétricas. Neste depósito ocorrem de 10 camadas de

carvão, mas apenas duas têm importância econômica. Os recursos totais da jazida atingem 4.288×10^6 t, dos quais mais de 70% nas camadas de Barro Branco (1.323×10^6 t) e Bonito (1.843×10^6 t). As coberturas vão de camadas aflorantes até mais de 800 m (GOMES, 1998).

Os carvões brasileiros, em função de suas características, são utilizados basicamente para a geração de energia através da combustão. A Tabela 3.4 mostra a classificação dos carvões de algumas jazidas brasileiras conforme a ASTM e alguns parâmetros dos carvões brasileiros.

Tabela 3.4. Classificação de alguns carvões do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

Jazida	Camada	Umidade %	Cinzas %, bs	Matéria Volátil %, bsc	Poder Calorífico cal/g	Classificação	
Candiota ¹	Superior	12,00	11,90	37,80	3208*	Sub-betuminoso A	
	Inferior	15,20	7,60	40,80	3416*		
Capané ¹	Capanezinho	17,43	5,52	34,40	6800**		
Iruí ¹	Superior	8,20	9,40	36,10	-		
Leão ¹	Superior	7,35	6,55	37,70	6000***		
Charqueadas ²	MB	6,60	14,00	36,70*	6579**		
	I1F	10,20	17,50	36,20*	6829**		
	I2B	14,80	19,20	41,90*	5930**		
Faxinal ¹	Superior	5,50	8,80	37,30	-		Betuminoso alto volátil C/B
	Média	9,50	7,70	37,30	-		
	Inferior	5,60	2,30	37,30	-		
Morungava ¹	M1	-	-	-	-	Betuminoso alto volátil B	
	M2	-	-	-	-		
	M3	-	-	-	-		
Chico Lomã ¹	CL2	1,79	4,90	42,50	-	Betuminoso alto volátil B/A	
	CL4	1,75	7,50	37,50	-		
	CL6	1,53	21,50	45,30	-		
Sta. Terezinha ^a	ST4	0,70 ^a	15,40 ^a	36,60 ^a	-	Betuminoso alto volátil A	
Sta. Catarina	Barro Branco	0,70	12,70	37,60	8635	Betuminoso alto volátil A	
	Irapuá	1,10	11,20	37,50	-		

*base seca (bs); **base seca isenta de cinzas (bsic); ***20% de cinzas; ^acarvão flutuado em líquido 1,50

¹Laboratório de Análises de Carvão UFRGS; ²Nahuy, 1967 (carvão flutuado em líquido 1,50)

Fonte: SOUSA; SILVA; RODRIGUES, 2006b.

Segundo o *Rank*, o carvão brasileiro está classificado entre sub-betuminoso A, com poder calorífico baixo, como, por exemplo, 3.028 cal/g em Candiota, e Betuminoso alto volátil A, carvão de melhor qualidade com alto poder calorífico, em torno de 8.635 cal/g, localizado em Santa Catarina.

3.2.2 Uso energético do carvão brasileiro

Segundo dados obtidos através do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2006), o carvão representa 6,4 % da oferta de energia do Brasil em 2005, dado que envolve o carvão metalúrgico e o energético. A oferta interna de energia elétrica a partir do carvão para o mesmo período é de 1,6%. A Figura 3.2 representa a oferta de energia elétrica interna no Brasil com ano base de 2005.

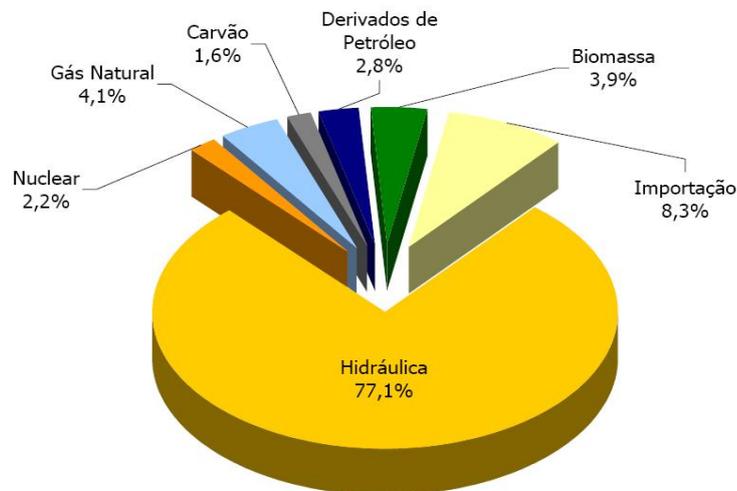


Figura 3.2. Estrutura da Oferta Interna de Energia Elétrica, Brasil 2005.

Fonte: BRASIL, 2006b.

Atualmente no Brasil existem sete usinas térmicas a carvão, a exceção da usina de São Jerônimo, todas as usinas termelétricas utilizam a técnica de combustão pulverizada. A Tabela 3.5 exibe as usinas brasileiras com suas respectivas potências, proprietários e localização.

Tabela 3.5. Usinas termelétricas brasileiras.

Usina	Potência (MW)	Proprietários	Municípios – Estados
Charqueadas	72	Tractebel Energia S/A	Charqueadas - RS
Figueira	20	Copel Geração S/A	Figueira – PR
Complexo Jorge Lacerda	857	Tractebel Energia S/A	Capivari Baixo – SC
Presidente Médici A/B	446	CGTEE	Candiota – RS
São Jerônimo	20	CGTEE	São Jerônimo – RS
Total	1.415		

Fonte: ANEEL (Banco de Informações de Geração), citado por BRASIL (2006b).

No Rio Grande do Sul, a Usina de Candiota possui potência instalada de 446 MW. A usina foi construída em duas etapas: fase A (inaugurada em 1974, composta de duas unidades de 63 MW) e a fase B (inaugurada em 1986, composta de duas unidades de 160 MW).

A usina encontra-se em fase de ampliação onde será construída a Fase C da usina, que será conhecida como Candiota III. A ampliação prevê o aumento da capacidade produtiva em cerca de 100% (CGTEE, [2005]). A Figura 3.3 exibe uma fotografia da usina Presidente Médici.

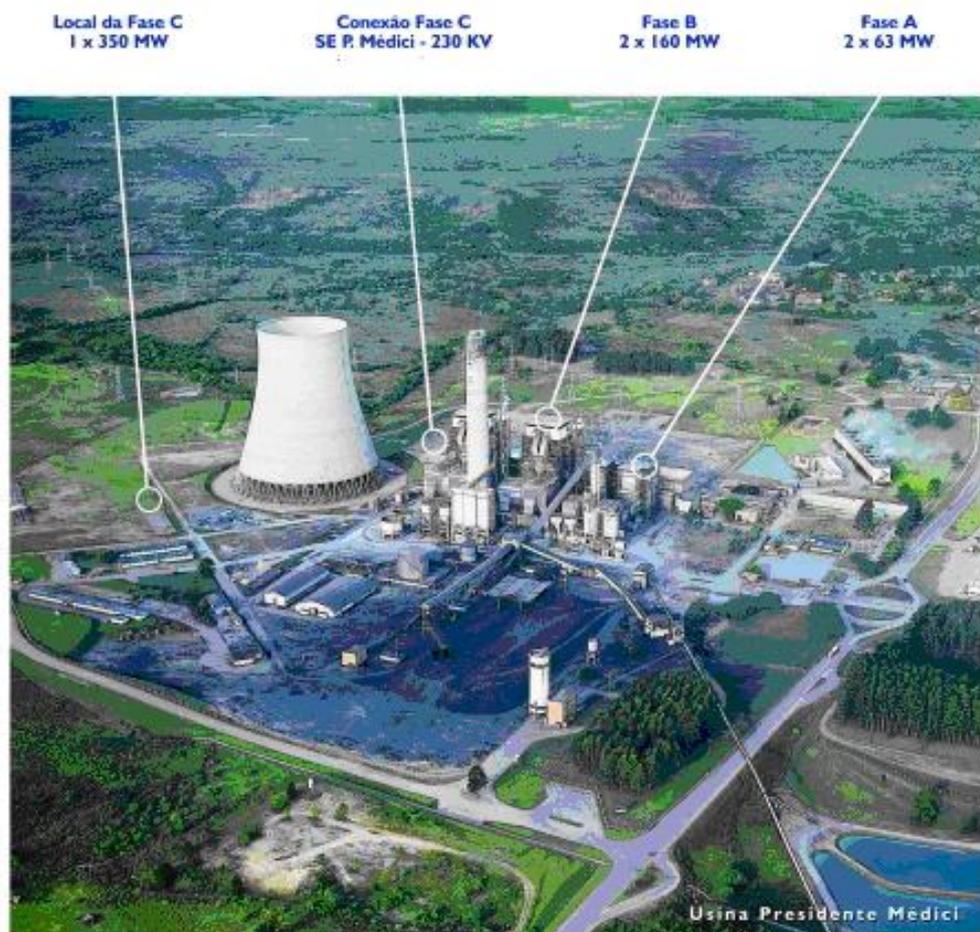


Figura 3.3. Usina Termelétrica Presidente Médici – Candiota – RS.

Fonte: CGTEE, ([2005]).

Em Santa Catarina está situado o Complexo Jorge Lacerda, que possui uma capacidade instalada de 857 MW, produzindo anualmente cerca de 854,78 GWh de energia (TRACTEBEL ENERGIA, [2007a]) que é composto por três usinas térmicas:

-Jorge Lacerda A (UTLA): composta pelas unidades 1, 2, 3 e 4, possuindo uma capacidade para a geração de energia de 232 MW.

-Jorge Lacerda B (UTLB): composta pelas unidades 5 e 6, que possuem cerca de 30 anos e uma capacidade de geração de energia em cerca de 125MW por unidade.

-Jorge Lacerda C (UTLC): é a usina mais moderna atualmente no Brasil (unidade 7), tendo sido inaugurada no ano de 1997, com capacidade de geração de 363 MW de energia.

3.2.3 Estimativa do consumo energético mundial de carvão para a geração de energia

O BEN (2007) baseado em documentos disponibilizados pelo Departamento de Energia do Governo dos Estados Unidos - DOE apresentou dados sobre a evolução mundial de energia para o período de 1970 a 2030. Os dados foram agrupados entre os países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OECD e os não membros da OECD. Segundo os dados, a demanda mundial de energia (Oferta Interna de Energia), chega a $701,6 \times 10^{15}$ BTU, ou 17.681 milhões tep (tonelada equivalente de petróleo) em 2030, apresentando taxa média de crescimento de 1,8% a.a., igual a taxa do período histórico 1990-2004.

A previsão para os países membros da OECD é de 1,2% a.a., contra um valor histórico de 1,4% a.a., enquanto para os países não-OECD a previsão é de 2,8% a.a. até 2030, contra um valor histórico de 2,3% a.a. entre 1990 e 2004.

O Brasil poderá atingir um consumo de energia de 430,9 milhões de tep em 2030, com taxa de crescimento de 3,2% a.a.. No entanto, a intensidade energética mundial, medida pela relação entre a demanda de energia e o PIB, decresce de 0,21 tep/1000 US\$ 2000, considerando conceito de paridade de poder de compra) para 0,11 tep/1000 US\$ em 2030, ou seja, uma redução de 2,2% a.a. no período projetado, percentual que representa um maior esforço de racionalização do uso de energia em relação ao período 1990-2004, quando a redução da intensidade energética foi de 1,5% a.a..

3.3 Sistemas de combustão e gaseificação do carvão

Atualmente existem três tipos de tecnologias de combustão de carvão consideradas eficientes: Pulverizada (PC); em Leito Fluidizado (FBC) e a Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado (IGCC). Estas tecnologias estão disponibilizadas em escalas comerciais e de pesquisa e desenvolvimento (MME, 2006a). Durante a combustão do carvão ocorre a emissão de alguns poluentes como: cinzas volantes, SO_x, NO_x entre outros. Para evitar a emissão acima dos limites impostos pela legislação destes poluentes à atmosfera, as usinas devem adotar sistemas de controle para o abatimento dos poluentes atmosféricos.

3.3.1 Combustão pulverizada

No Brasil, a maioria das termelétricas a carvão utiliza o sistema de combustão pulverizada (*Pulverized Coal* - PC) para a geração de energia. Neste sistema o carvão é moído na forma de um pó (diâmetro da partícula < 7 µm) e juntamente com um fluxo de ar é queimado para fazer o aquecimento de uma caldeira que produzirá vapor em alta pressão.

Este vapor alimentará uma turbina que está acoplada a um gerador que transformará a energia mecânica em energia elétrica. O vapor de pressão baixa que sai da turbina de vapor é condensado e bombeado novamente à caldeira. O funcionamento do ciclo de energia do fluido (vapor) para a conversão da energia térmica do combustível à energia elétrica útil segue o que é chamado o ciclo de Rankine (XAVIER, 2004).

Os gases emitidos na queima do carvão poderão passar por um sistema de remoção de particulados e lavagem de gases. Estes gases após o tratamento serão liberados para a atmosfera e apresentam em sua composição níveis de CO₂ entre 13% - 15% em volume (SEKAR, 2005).

A Figura 3.4 exemplifica o sistema PC acoplado com um sistema de remoção de particulados e gases ácidos, mas sem a captura de CO₂.

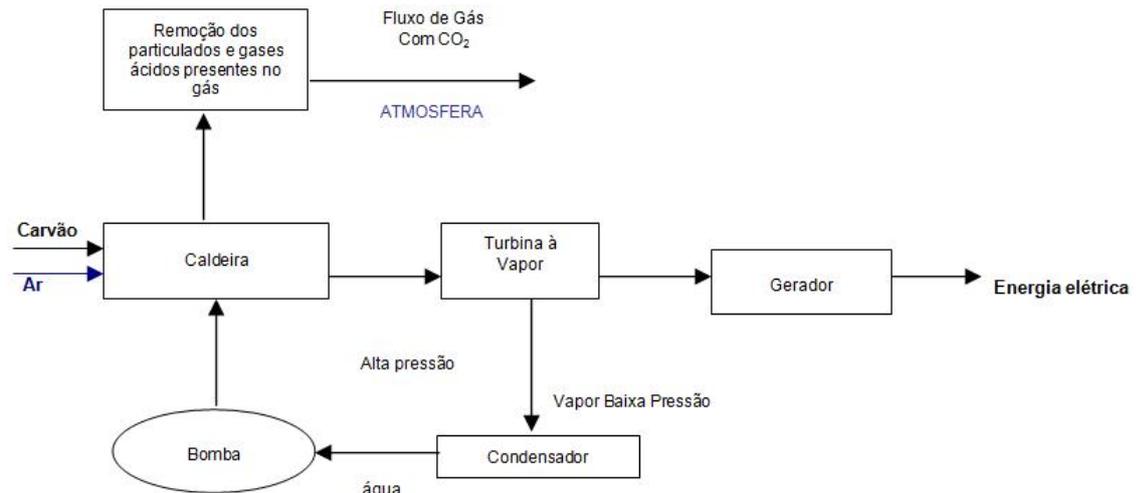


Figura 3.4. Sistema de combustão pulverizada.

Fonte: Adaptado de SEKAR, 2005.

Neste tipo de combustão existem tecnologias de vapor subcrítico, supercrítico ou ultra-supercríticos. As operações subcríticas referem-se a processos onde a pressão de vapor é aproximada de 22 MPa (\pm 217 atm) e temperaturas em torno de 550°C. A eficiência do processo com este tipo de operação varia entre 33 e 37%, dependendo também do tipo de carvão e dos parâmetros de operação (MIT, 2007). A Figura 3.5 mostra um exemplo de uma termelétrica americana que opera em condições subcríticas.

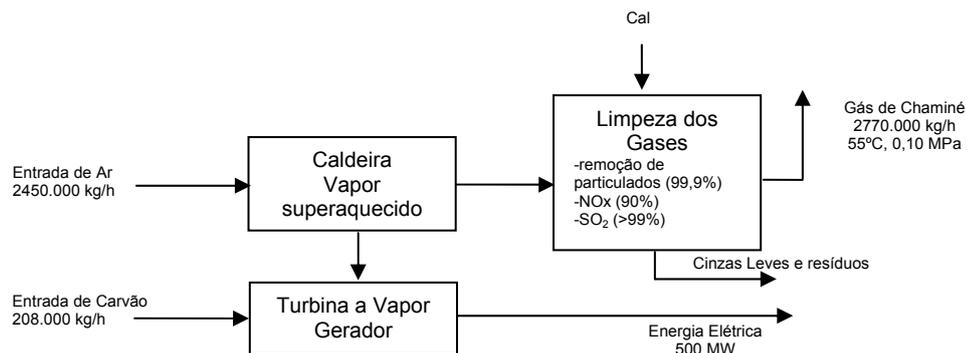


Figura 3.5. Sistema de combustão pulverizada subcrítica 500MW.

FONTE: MIT, 2007.

O sistema exibido na Figura 4.5 mostra que o sistema queima 208.000 kg/h de carvão e requer cerca de 2,5 milhões de quilogramas de ar combustível. O controle de emissões é realizado fazendo a remoção de 99,9% dos materiais particulados,

90% de NO_x e cerca de 99% de SO₂. A pressão e a temperatura do vapor superaquecido são 16,5 MPa e 540°C, respectivamente. Com estas condições o processo terá uma eficiência aproximada de 34,3%. O carvão produzirá cerca de 22.800 kg/h de cinzas. O processo de limpeza do gás gera cerca de 41.000 kg/h de resíduos sólidos.

Os sistemas supercríticos são sistemas onde um fluido supercrítico é expandido através de uma turbina de vapor com estágios de alta pressão gerando assim mais eletricidade. A eficiência deste processo varia de 37 a 40%, dependendo também dos tipos de carvões e dos parâmetros do processo. Segundo MIT (2007), o estado-da-arte para sistemas supercríticos envolve pressões cerca de 24,3 MPa e 565°C, resultando em uma eficiência aproximada de 38%.

Os sistemas ultra-supercríticos operam em temperaturas e pressões ainda mais elevadas que os sistemas supercríticos, cerca de 700 -720°C e 36.5 à 38.5 MPa respectivamente. Nestes sistemas a eficiência do processo que utiliza carvão tipo betuminoso pode chegar à 46%. Para as condições deste tipo de operação, novos materiais estão sendo pesquisados e desenvolvidos (MIT, 2007). Destaca-se que para cada tipo de carvão é exigido um determinado tipo de material.

O sistema sugerido por MIT (2007) para uma termelétrica com capacidade de geração de 500 MW que utiliza a combustão pulverizada com operações e condições supercríticas ou ultra-críticas é similar ao subcrítico. A diferença está apenas nas condições do processo e nos materiais utilizados na construção da usina.

As termelétricas brasileiras operam em condições subcríticas com pressões de vapor bem inferiores ao sistema americano indicado como subcrítico, no entanto, as temperaturas ficam próximas às indicadas. A UTLC opera com pressão de vapor superaquecido aproximada de 1,7 kPa e com temperatura de vapor de 538°C (TRACTEBEL ENERGIA, [2007a]) .

3.3.2 Combustão de Leito Fluidizado (FBC)

Tecnologia comercialmente disponível, realizada em temperaturas inferiores à de combustão convencional, que utiliza partículas calcárias para a remoção de SO_x em seu leito. A técnica consiste na queima de carvão ou outro combustível com granulometria inferior a 8mm em um leito fluidizado pela injeção de ar a uma

velocidade tal que mantenha o leito e o combustível em permanente movimento (XAVIER,2004).

Neste sistema ocorre um intenso contato entre combustível e ar de combustão propiciando altos coeficientes de troca térmica. A operação ocorre em temperaturas na faixa de 850 - 900°C. Sendo assim, uma combustão com alta eficiência e baixa emissão de poluentes (MAGRINI et al., 2001).

Com esta tecnologia é possível reduzir a concentração de SO_x e de NO_x, sem perdas de eficiência térmica. A captura de SO_x é feita na própria caldeira através da injeção de cal na caldeira. Uma das vantagens da aplicação desta tecnologia é possibilidade de utilizar carvão de baixa qualidade, com baixo índice de emissões, sendo, portanto, adequada também a sistemas de incineração (BRASIL, 2005). Como desvantagem principal está a grande quantidade de cinzas geradas, principalmente em relação ao carvão brasileiro.

3.3.3 Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado (IGCC)

A IGCC é uma tecnologia considerada a tendência das novas Tecnologias Limpas para o uso do Carvão (*clean coal technologies*), (MME, 2006a). O IGCC é constituído de um ciclo combinado onde dois ou mais ciclos termodinâmicos estão presentes em uma mesma planta (NETO, 2001).

Neste sistema o carvão reage com os vapores provenientes dos gases obtidos dentro do processo, originando um gás combustível sintético composto principalmente por monóxido de carbono e hidrogênio (BRASIL, 2005).

Este gás passa por um processo de retirada de enxofre (XAVIER, 2004), após é queimado em turbinas a gás para gerar energia. Este ciclo térmico é conhecido como ciclo de Brayton (SEKAR, 2005). Após a geração de energia os gases de exaustão são conectados a outro ciclo térmico para uma nova geração de energia. Os ciclos combinados podem aumentar a eficiência do sistema para até 60%. A Figura 3.6 exibe um esquema simplificado do funcionamento do sistema IGCC.

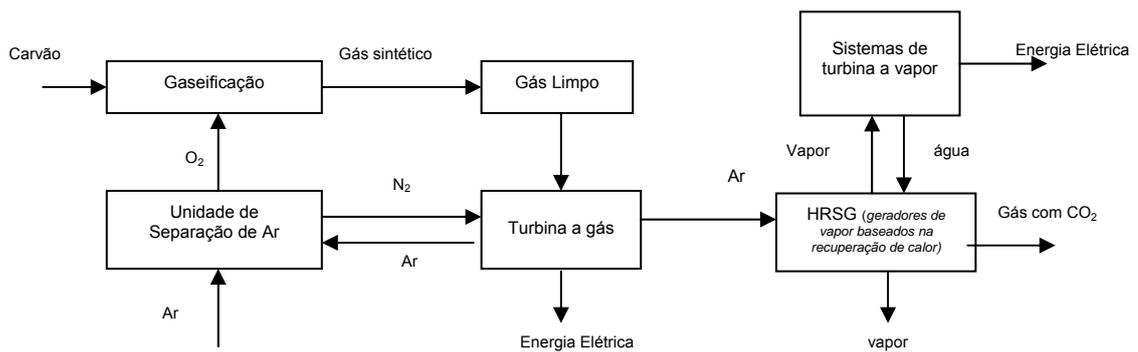


Figura 3.6. Sistema IGCC.

Fonte: Adaptado de SEKAR, 2005.

Estes sistemas permitem incrementar a eficiência pelo uso do calor residual do gás, para produzir vapor para mover uma turbina de vapor adicional na turbina de gás (DE LUCA, 2001). O processo possibilita também a remoção de cerca de 95% de enxofre e a captura de nitrogênio (XAVIER, 2004).

A Tabela 3.6 resume as principais tecnologias de combustão eficiente do carvão. Os sistemas de leito fluidizado e IGCC, dentro de seu processamento, são capazes de reduzir as emissões de SOx e NOx, no entanto, são tecnologias atuais que estão sendo testadas e aplicadas principalmente em projetos pilotos (SEKAR, 2005), além disto, seu custo ainda é superior ao da Combustão pulverizada.

Tabela 3.6. Principais tecnologias de combustão de carvão.

Tecnologia	Situação	Eficiência de Conversão	Custo de capital (US\$/kW)	Redução nas emissões %	
				SOx	NOx
Combustão Pulverizada	Comercial	38 – 47%	1300 - 1500	-	-
Combustão em leito fluidizado	Comercial/ demonstrado	34 – 45%	1450 - 1700	90 – 99	60 – 70
Gaseificação Integrada	P&D/demonstrado	40 – 60%	1450 - 1900	92 – 95	92 - 99

Fonte: Baseado nos dados de MME, (2006a).

3.4 Seqüestro de carbono

O seqüestro de carbono pode ser definido como a captura e a estocagem segura de carbono que de outra forma seria emitido e permaneceria na atmosfera. Ou seja, é o processo de remoção de CO₂ da atmosfera ou a prevenção pela captura na

fonte de emissão. Esses processos são indicados na literatura internacional como *Carbon Capture and Storage Processes* (CCS) e essa abreviatura será utilizada ao longo do texto.

O CCS envolve na realidade três processos seqüenciais distintos:

- 1) Captura do CO₂ contido nos gases de combustão emitidos durante a geração de eletricidade, processos industriais ou o processamento de combustíveis;
- 2) Transporte do CO₂ capturado em dutos (gás/líquido) ou em tanques;
- 3) Estocagem de CO₂ em reservatórios geológicos como: subsolo em aquíferos salinos profundos, reservatórios esgotados de gás e óleo ou em jazidas não mineradas de carvão.

Todos esses três processos têm sido utilizados há várias décadas, não com o propósito de estocar CO₂, necessitando, portanto, de aperfeiçoamentos e adaptações para essa nova aplicação.

Existem diversas formas de realizar o seqüestro de CO₂, no entanto para ser considerado uma alternativa eficaz devem ser atendidos os seguintes aspectos:

- Ser efetivo e economicamente competitivo;
- Ter estabilidade e longo tempo de estocagem;
- Ser benéfico ao meio ambiente.

Para ser economicamente viável, a captura de CO₂ deve ser realizada em locais que contenham fontes emissoras expressivas de dióxido de carbono à atmosfera. As maiores fontes de CO₂ estão relacionadas à utilização de combustíveis fósseis como o carvão na geração de energia elétrica. No entanto, algumas atividades industriais são fontes potenciais de emissão deste gás ao meio ambiente, como por exemplo, na produção da uréia.

3.4.1 Estocagem de Carbono

O CO₂ pode ser armazenado em reservatórios de óleo e gás depletados, camadas de carvão, formações salinas profundas, oceanos, aquíferos, florestas, e em reservatórios ativos de óleo (EOR).

Um dos aspectos importantes a serem considerados é o período de estocagem de carbono, que deve exceder o período estimado de máxima utilização dos combustíveis fósseis, de forma que, se o CO₂ re-emergir na atmosfera isto deve ocorrer após o pico previsto para a concentração de CO₂ na atmosfera (cerca de 50 anos). A Figura 3.7 exhibe algumas opções de estocagem de CO₂.

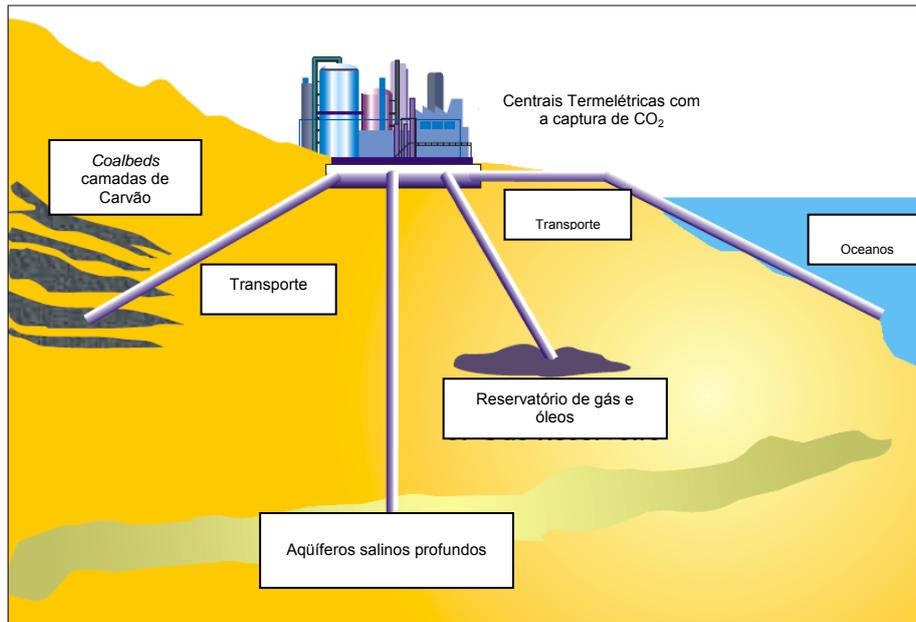


Figura 3.7. Opções para estocagem de CO₂.

Fonte: Adaptado de WALLACE, [2000].

3.4.2 Estocagem em reservatórios geológicos

3.4.2.1 Camadas de Carvão (*Coalbed*)

Neste tipo de sistema o CO₂ é injetado em minas de carvão, podendo realizar-se conjuntamente à recuperação do gás metano. Os gases presentes nas camadas de carvão são chamados na literatura internacional de *Coalbed Methane* (CBM), sendo um gás natural, gerado e/ou armazenado em carvão *in situ* e composto principalmente de gases combustíveis no qual o metano é predominante. Por efetuar a recuperação do metano, este processo proporciona benefícios econômicos, amenizando os custos de implementação da captura de CO₂. Para que a captura seja eficiente, as minas de carvão devem apresentar certas características que serão comentadas posteriormente neste trabalho.

3.4.2.2 Reservatórios ativos de óleo (EOR)

EOR é a prática de injetar o gás CO₂ em reservatórios de óleo subterrâneos esgotados a fim de deslocar e recuperar maior quantidade de óleo do que normalmente seria possível. Nestas formações à altas pressões, o CO₂ e o óleo tornam-se completamente miscíveis, conduzindo à recuperação altamente eficiente do óleo. Injetar CO₂ em reservatórios de óleo poderá aumentar o rendimento da produção de óleo, trazendo benefícios econômicos, o que acarretará na redução dos custos de implementação do sistema de captura.

3.4.2.3 Aqüíferos salinos profundos

Os aqüíferos salinos profundos têm em sua composição basicamente águas salinas e rochas impermeáveis, que se dentro de determinados limites de temperatura e pressão poderiam armazenar CO₂, o qual poderia ser injetado diretamente nos aqüíferos (CIRES, [2006]). Em algumas formações, o CO₂ pode reagir com alguns minerais na água ocorrendo a formação de carbonatos, tornando-se rochas permanentes (WALLACE, [2000]).

3.4.2.4 Oceanos

Estão sendo realizadas pesquisas para saber a viabilidade de injetar CO₂ em altas profundidades no oceano. Ainda não existem conclusões expressivas a respeito da integridade deste tipo de estocagem. Existem modelos computacionais que sugerem que cerca de 80% do CO₂ injetado em profundidades de 3000 metros podem ser conservados por mais de 500 anos. O CO₂ injetado na forma líquida em profundidades superiores a 3000 metros pode ser conservado por mais tempo (WALLACE, [2000]).

3.4.3 Formas alternativas de seqüestro

3.4.3.1 Fertilização dos Oceanos

O fitoplâncton marinho é a base de produção da matéria orgânica no mar e constitui o ponto de partida de todas as cadeias alimentares. O fitoplâncton consegue fixar cerca de 45 Giga toneladas de carbono orgânico por ano (CIRES, [2006]). Um dos nutrientes necessários para o crescimento do fitoplâncton é o ferro, desta forma, existem estudos para fazer uma fertilização com ferro dos oceanos, aumentando assim a produtividade dos fitoplânctons e conseqüentemente utilizá-los como forma de seqüestro de carbono.

Entretanto, os impactos das injeções de CO₂ para ecossistemas marinhos em grandes áreas oceânicas, a longo prazo, ainda são desconhecidos (ESTADÃO, [2006]).

3.4.3.2 Agricultura

O solo é a maior reserva de carbono do sistema terrestre, perdendo apenas para os oceanos. No entanto, as queimadas das florestas e a retirada incorreta da vegetação para as práticas de agricultura, ocasionam perdas significativas de carbono através da exposição ao ar da matéria orgânica do solo. Além disso, a retirada da cobertura vegetal e o manejo incorreto podem ocasionar a perda do solo por erosão.

Para evitar a erosão do solo é realizado o sistema de plantio direto que se caracteriza pela ausência de revolvimento do solo e cobertura de pelo menos 30% de sua superfície com resíduos vegetais (SILVA; RANGEL; GUILHERME, [2006]). Esta atividade contribui para a agregação do carbono no solo, podendo ser considerada uma prática de seqüestro do carbono atmosférico.

Outro fator importante é a redução do tempo de cultivo, que pode impedir a perda de matéria orgânica do solo e diminuir as emissões ocasionadas pela agricultura.

Entretanto, para que no futuro se considere as práticas do campo como uma forma de seqüestro de carbono, ainda é necessária a realização de estudos mais aprofundados.

3.5 Captura de CO₂

Em princípio, o CO₂ pode ser capturado em qualquer instalação que use combustíveis fósseis ou biomassa, desde que a escala de emissões seja grande o suficiente. Na prática, somente três áreas são interessantes: a geração de eletricidade (incluindo co-geração), processos industriais e processamento de combustíveis. Emissões de outras fontes (transporte, agricultura, serviços e residencial) são muito dispersas tornando a captura inviável.

Medidas alternativas tais como aumento de eficiência energética, uso de energias renováveis, e maior uso de hidrogênio (produzido em plantas centralizadas e dotadas de tecnologias de captura de CO₂) podem ser melhores opções para esses setores.

Como a produção de energia é responsável por 29% das emissões globais de CO₂, a captura de carbono nas plantas de geração de eletricidade que utilizam combustíveis fósseis se apresenta inicialmente como o mais promissor setor para a aplicação dessas tecnologias de captura. Em menor extensão, o CO₂ também pode ser capturado durante a produção de ferro, aço, cimento, produtos químicos e papel, e ainda no refino de óleo, processamento do gás natural e produção de combustíveis sintéticos (tais como hidrogênio e no transporte de combustíveis líquidos produzidos a partir de gás, carvão e biomassa).

O CO₂ pode ser capturado antes ou depois da combustão, usando diferentes tecnologias existentes e emergentes. Nos processos convencionais, o CO₂ é capturado a partir dos gases produzidos durante a combustão (captura pós-combustão). Também é possível converter combustíveis hidrocarbonetos em CO₂ e hidrogênio, remover o CO₂ da corrente gasosa e utilizar o hidrogênio como combustível limpo (captura pré-combustão).

Na geração de eletricidade a captura de CO₂ é mais eficiente quando utilizada em combinação com plantas de alta eficiência em larga escala. Para centrais térmicas a carvão, o IGCC associado a tecnologias de absorção física para captura de CO₂ no estágio de pré-combustão é considerado promissor. A queima de carvão em sistemas supercríticos ou ultra-supercríticos associada às tecnologias de captura pós-combustão ou vários tipos de *oxyfueling* (substituição do ar combustível por oxigênio) podem tornar-se alternativas possíveis (IEA, 2004).

3.5.1 Métodos de Captura

Os métodos mais comumente utilizados para a captura de CO₂ são: separação por membranas, destilação criogênica, adsorção, absorção química e física.

A Figura 3.8 exhibe de forma resumida os métodos mais conhecidos de captura e suas técnicas utilizadas, os quais serão discutidos posteriormente:

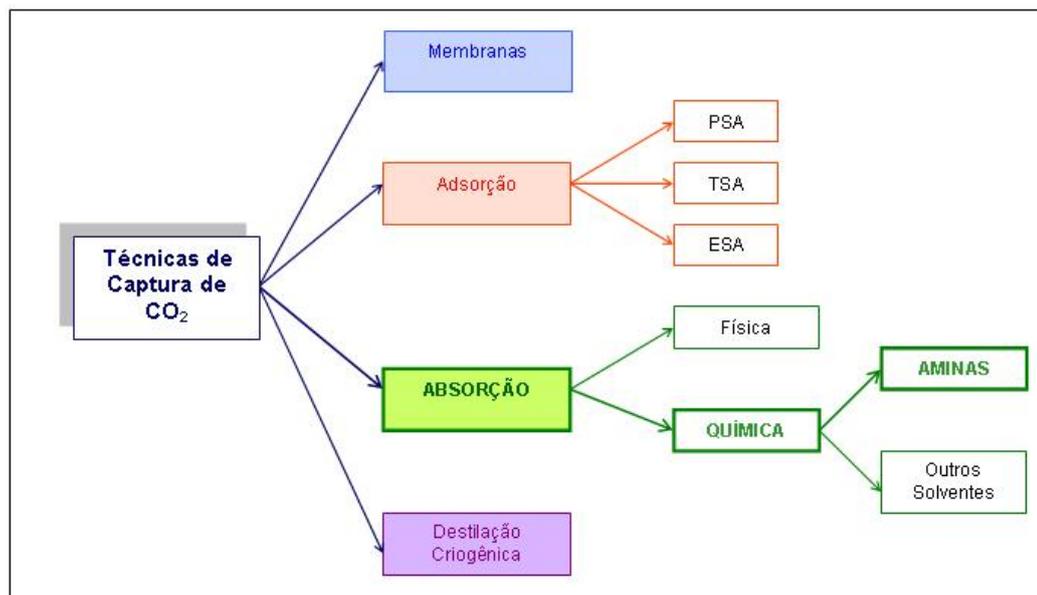


Figura 3.8. Tecnologias de captura de CO₂.

3.5.1.1 Sistemas de membrana

As membranas são estruturas porosas ou semi-porosas, através das quais algumas espécies químicas penetram mais facilmente do que outras. A separação de gases por membrana ocorre a partir das interações físicas ou químicas entre o gás e a membrana, fazendo com que alguns componentes do gás passem através da membrana mais rapidamente do que outros. A Figura 3.9 exhibe um esboço geral do funcionamento do sistema de separação por membrana.

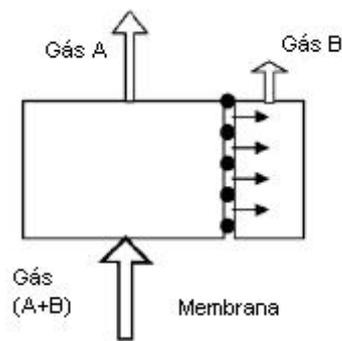


Figura 3.9. Separação com Membrana.

Fonte: Adaptado de IPCC, 2005.

A seletividade da membrana está diretamente relacionada com o tipo de material que a compõe. O fluxo de gás que passa através da membrana é dirigido, geralmente, pela diferença da pressão existente na membrana. Conseqüentemente, para este tipo de separação são utilizadas correntes de ar em alta pressão. Existem diversos tipos de matérias permeáveis de origem polimérica, metálica ou cerâmica que podem ser aplicadas em sistemas de captação do CO_2 . Estas membranas são utilizadas para separar preferencialmente H_2 de gás combustível, CO_2 de processos com altas vazões ou O_2 do ar, o que facilita a formação de um fluxo altamente concentrado do CO_2 .

Para a utilização deste sistema é necessária a realização de múltiplos estágios e/ou reciclo das correntes de gás, o que torna o sistema complexo, pois existe um elevado consumo de energia e conseqüentemente ocorre a elevação dos custos.

3.5.1.2 Destilação Criogênica

Processo no qual o fluxo de gás é liquefeito passando por uma série de compressores onde posteriormente será realizada uma refrigeração a baixa temperatura, onde possa ocorrer a separação por destilação. O CO_2 líquido resultante pode então ser removido.

Processo extensamente utilizado comercialmente para a purificação de CO_2 de fluxos de gás que contenham altas concentrações de CO_2 (> 50%) (GUPTA; COYLE; THAMBIMUTHU, 2003). O processo de refrigeração envolve uma grande quantidade de energia, não sendo viável a aplicação deste sistema a grandes escalas

industriais. A aplicação deste sistema é indicada a gases de alta pressão e concentração, por isso é mais indicado a sistemas de pré-combustão e *oxyfuel* (sistemas onde o combustível é o oxigênio).

3.5.1.3 Adsorção

A adsorção é o processo de concentração de substâncias gasosas ou líquidas em um sólido. Chama-se de adsorvato a substância que é adsorvida e adsorvente ou substrato o material sólido que retém o adsorvato.

O processo de adsorção ocorre devido às forças intermoleculares entre o CO₂ de um determinado fluxo de gás com uma superfície de um material que permite a separação por adsorção. A seletividade de adsorção dos gases está diretamente relacionada com a temperatura do sistema, pressão parcial do gás, forças de superfície, tamanho dos poros do adsorvente.

A superfície adsorvente é composta por moléculas com grandes poros como, por exemplo, carbono ativado e zeolitas e estão normalmente dispostas em formas compactas, como uma esponja (*packet bed*) de partículas esféricas.

O processo de adsorção opera com ciclo repetido de dois estágios:

- 1) O gás entra no sistema e passa nos *packet bed* que adsorvem o CO₂ e permitem que os outros gases continuem a passar;
- 2) Quando o *packet bed* está totalmente preenchido de CO₂ o gás continua a ser alimentado para outros *packet bed* vazios. Os *packet bed* completos vão para a etapa de regeneração para recuperar o CO₂ adsorvido.

Existem três tipos de adsorção aplicáveis para este tipo de captura:

- Adsorção por troca de pressão (PSA) – o adsorvente é regenerado pela redução de pressão.
- Adsorção por troca de temperatura (TSA) - o adsorvente é regenerado com o aumento de temperatura.
- Adsorção por troca elétrica (ESA) - a regeneração do adsorvente é realizada passando uma corrente elétrica de baixa voltagem no adsorvente.

Além destas técnicas, existem estudos em escala de bancada e piloto da combinação das técnicas TSA e PSA, conhecida como PSTA (GUPTA; COYLE; THAMBIMUTHU, 2003). A ESA ainda não é utilizada comercialmente, no entanto, existe interesse neste estudo visto que o consumo de energia é menor quando comparado às outras técnicas.

Os processos de adsorção ainda não são considerados atrativos para a separação em grande escala do CO₂, pois existe um limite de capacidade e seletividade dos adsorventes de CO₂. Entretanto, este processo pode ser bem sucedido quando utilizado em combinação com outras tecnologias de captação (ESRU, 2003).

3.5.1.4 Absorção

A absorção é o processo de concentração de uma substância líquida ou gasosa em um solvente líquido. No sistema de captura, o CO₂ é retido em um determinado solvente. A absorção pode ser um fenômeno puramente físico ou pode envolver a solubilização do componente em um solvente seguida por uma reação com um ou mais constituintes do solvente.

Os processos de absorção química são tecnologias conhecidas. Um exemplo é a gaseificação de refrigerantes, chamada de processo de carbonatação. A recuperação do CO₂ pode ser realizada em correntes onde a pressão parcial do gás é baixa e o solvente pode ser recuperado em uma outra coluna e recirculado no processo. Para a separação do CO₂ da corrente gasosa é necessário o fornecimento de energia, já que há a necessidade de reverter uma reação química, o que pode ocasionar o aumento dos custos do processo. A absorção química será melhor discutida no item 3.6.

No processo de absorção física os solventes possuem afinidades físicas e são comumente chamados na literatura como solventes físicos. Segundo Neves (2007), utiliza-se a absorção física em correntes gasosas que apresentam elevadas pressões parciais de CO₂, por esta condição favorecem a absorção física. Neste processo apenas um vaso de *flash* é necessário para a separação do CO₂ do solvente.

Na absorção física as partículas absorvidas estabelecem interações do tipo Van der Waals, que apesar de serem interações de longo alcance, são fracas, não

formam ligações químicas e estão geralmente associadas a pequenas entalpias de absorção.

As técnicas desenvolvidas para a absorção física são similares as de absorção química, sendo um processo utilizado na separação do CO₂ em gás natural e indústrias químicas. A capacidade do solvente absorver o gás é função da pressão parcial, seguindo a lei de Henry (para misturas de gases ideais). Obtendo-se desta forma, uma dependência linear da concentração na fase líquida com a pressão parcial do gás.

Normalmente os solventes físicos são estáveis tendo uma boa capacidade de absorção de CO₂ e uma baixa capacidade para a remoção de outros constituintes primários do fluxo de gás. Sua origem é preferencialmente orgânica, eles devem ter alto ponto de fusão e baixa pressão de vapor a temperatura ambiente. Além disso, devem possuir baixa viscosidade, baixa ou moderada higroscopicidade e serem pouco corrosivos.

A vantagem da utilização destes solventes é que o CO₂ pode ser separado por uma torre de absorção (*stripper*) somente com a redução da pressão, utilizando pouca energia. O custo de operação é menor quando comparado à absorção química. No entanto, a capacidade de absorção do solvente é inferior aos solventes químicos, fazendo com que a taxa de circulação do solvente seja bem inferior, obtendo assim custos superiores à absorção química (GUPTA; COYLE; THAMBIMUTHU, 2003). O Quadro 3.1 compara resumidamente os solventes físicos e químicos:

Quadro 3.1. Comparação entre solventes físicos e químicos para a absorção do CO₂.

Solventes Físicos	Solventes Químicos
Capacidade proporcional à pressão parcial do CO ₂	Capacidade independente da pressão parcial do CO ₂
Baixo calor de absorção	Alto calor de absorção
Dessorção por <i>flash</i>	Necessita de calor para a dessorção
Dificuldade de remover o CO ₂ completamente	Reduz a baixos níveis o teor de CO ₂ em correntes gasosas

Fonte: Neves, 2007.

3.6 Absorção Química

A absorção química vem sendo extensamente usada para a retirada de CO₂ de correntes gasosas em processos industriais. Desde 1929 já existiam plantas industriais que utilizavam a monoetanolamina (MEA) para capturar CO₂. Apesar de ser um processo relativamente caro, os processos de absorção podem ser lucrativos devido à possibilidade de comercialização do CO₂ capturado.

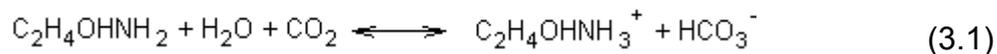
A absorção química refere-se aos processos onde um gás é absorvido em um solvente líquido pela formação de um composto quimicamente ligado. Quando utilizado em usinas térmicas para capturar CO₂ em sistemas de pós-combustão de CO₂, o gás de combustão é borbulhado através do solvente em uma coluna absorvente empacotada. Em seguida o solvente passa através de um regenerador onde o CO₂ absorvido é expulso (*stripped*) do solvente utilizando vapor em contracorrente a 100 - 120°C. O vapor d'água condensa, originando um fluxo de CO₂ de alta concentração (>99%), que pode ser comprimido para utilização comercial ou estocagem. O solvente pobre é refrigerado a 40 – 65 °C e reciclado na coluna absorvente (HERZOG; GOLOMB, 2004).

Segundo Neves (2007), a absorção química também pode ser dividida em duas categorias: a primeira refere-se aos processos de soluções aquosas de alcanolaminas, onde soluções de aminas relativamente concentradas são empregadas durante a absorção; uma segunda categoria é formada por processos que usam soluções de carbonato de potássio, com técnica e equipamentos semelhantes aos utilizados nos processos com soluções de aminas.

Soluções de carbonatos têm sido extensamente usadas na produção de amônia devido à sua baixa exigência de energia para regeneração do absorvente. No entanto, como a concentração do CO₂ na corrente de gás não é suficientemente alta, faz-se necessário outro método complementar para “limpeza” final semelhante às soluções de MEA. Para minimizar este problema foram desenvolvidos aditivos que aumentaram a capacidade de absorção e diminuírem a corrosão.

Iniciou-se utilizando ativadores arsênicos que são altamente tóxicos, mudando mais tarde para ativadores baseados em glicerina, os quais são menos tóxicos. Segundo CULLINANE (2005), os solventes considerados mais efetivos são as aminas aquosas e os carbonatos de potássio conhecidos como *hotpot*. Existem uma grande variedade de alcanolaminas utilizadas como absorvente, algumas inclusive são

especialmente desenvolvidas para esta finalidade. No entanto, a amina mais utilizada em processos com pressões parciais mais baixas para captura de CO₂ é a MEA. Por esta razão, a absorção de CO₂ por MEA (C₂H₄OHNH₂) foi estudada com mais intensidade, abordando aspectos como transferência de massa, termodinâmica, corrosão e degradação de aminas. A reação principal do processo é:



Durante o processo de absorção a reação segue da esquerda para a direita enquanto na regeneração a reação inversa ocorre. O resfriamento e o aquecimento do solvente, o bombeamento e a compressão requerem energia do ciclo térmico da usina, diminuindo a eficiência térmica do sistema.

A principal vantagem deste tipo de solvente é que podem alcançar baixos níveis de gás carbônico residual com uma instalação simples e relativamente barata. A principal desvantagem deste tipo de solução é a formação de carbamato em vez de carbonato (NEVES, 2007). Os carbamatos ou uretanos são um grupo de compostos orgânicos que compartilham de um mesmo grupo funcional, cuja estrutura é NH(CO)O⁻.

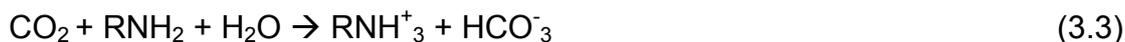
Os carbamatos são ésteres do ácido carbâmico, NH₂COOH, um composto instável, e são altamente corrosivos, sendo esse problema acentuado nas partes mais quentes da unidade. Este fato conduziu ao uso de aminas que formem produtos menos estáveis com gás carbônico, como a dietanolamina (DEA). Devido a isto, o desenvolvimento tecnológico de processos de MEA tem sido relacionado aos aditivos que diminuam seu comportamento corrosivo.

O mecanismo das reações do CO₂ com as aminas é bastante complexo não sendo de fácil compreensão. As reações do CO₂ podem ser representadas pelas Equações 3.2 a 3.4 (ASTARITA et. al apud NEVES, 2007), nas quais as aminas são representadas por RNH₂:

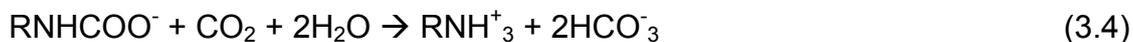
Formação do Carbamato:



Formação do Bicarbonato:



Reversão do Carbamato:



Nestas reações, um dos parâmetros mais importantes a considerar é a estabilidade do íon carbamato formado (RNHCOO^-), onde R no caso da MEA é o radical $\text{HO-CH}_2\text{CH}_2-$. Esta estabilidade é responsável pela alta energia necessária para a regeneração da MEA, com liberação do CO_2 absorvido e, em última instância, pelo alto consumo de energia do processo. Nestes termos, a entalpia da reação é um parâmetro importantíssimo que traduz esta necessidade de energia.

Segundo Neves (2007), a reação de formação do carbamato (Equação 3.2) tem sido bastante estudada. Acredita-se que seu mecanismo dá-se em duas etapas, apresentadas nas Equações 3.5 e 3.6, sendo que a determinante (lenta), (Equação 3.5) é a formação do *zwitterion* ($\text{RN}^+\text{H}_2\text{COO}^-$). A formação do bicarbonato (Equação 3.3) pode ser explicitada apenas pela Equação 3.7. No entanto, a cinética de formação do bicarbonato em presença de MEA sugere ainda que mais de um mecanismo está envolvido (Equação 3.5).



A principal evidência experimental para a existência desta reação é o fato de se obter a absorção de CO_2 em MEA em relações molares CO_2/MEA superiores a 0,5, que é a relação estequiométrica máxima estabelecida pela Equação 3.2 (Neves, 2007).

Existe uma grande variedade de tipos de aminas que podem ser utilizadas nos processos de absorção de CO_2 (CULLINANE, 2005). As aminas mais comumente utilizadas neste processo estão apresentadas na Tabela 3.7.

As aminas são compostos em que um ou mais grupos alquilo ou arilo estão ligados a um átomo de Nitrogênio. De acordo com as ligações as aminas podem ser

primárias: (RNH₂), secundárias: (R₁R₂NH) ou terciárias: (R₁R₂R₃N). Em operações onde a pressão é atmosférica, a MEA (amina primária) é melhor empregada como solvente, devido sua maior afinidade com o CO₂ que as demais aminas.

Tabela 3.7. Principais Aminas utilizadas nos processos de absorção de CO₂.

Classe	Nome (Abreviação)	Estrutura
Amina Primária	Monoetanolamina (MEA)	
	Diglycolamina® (DGA)	
Amina Secundária	Dietanolamina (DEA)	
	Diisopropanolamina (DIPA)	
Amina Terciária	Trietanolamina (TEA)	
	Metildietanolamina (MDEA)	
	Isobutanolamina® (AMP)	

Fonte: CULLINANE, 2005.

A escolha do solvente a ser utilizado no sistema de absorção é uma etapa importante na aplicação da técnica de captura, pois o custo de implementação do sistema mais significativo está relacionado com a energia requerida para a regeneração do solvente, que equivale a 49% do custo total (CULLINANE, 2005).

A energia de regeneração pode ser estimada basicamente pelas propriedades dos solventes como a capacidade de absorção, calor de absorção e a taxa de absorção.

A capacidade de absorção é definida como a quantidade de CO₂ absorvida por unidade do solvente. A capacidade de absorção define a concentração total de CO₂ que está dentro das pressões parciais de equilíbrio, refletindo nas características do equilíbrio líquido-vapor do solvente. Uma alta capacidade significa que o CO₂ pode ser absorvido com uma determinada energia.

Quando o CO₂ reage com o solvente de absorção ocorre à liberação de calor. Uma quantidade de calor deve ser aplicada para inverter a reação e para remover o CO₂ da solução após a absorção.

Melhorar a taxa de absorção do CO₂ em um solvente tem um impacto direto no processo. Uma taxa de absorção mais elevada permite a redução do fluxo do

solvente ou uma redução na altura da coluna, ocorrendo uma economia referente ao tempo que o solvente leva para passar, à diminuição da pressão, e ao calor latente.

Um solvente com as suas propriedades modificadas para ser aplicado na captura do CO₂ pode resultar em economias significativas da energia. O desempenho de solventes potenciais deve ser comparado e selecionado de acordo com as melhorias feitas nas propriedades acima mencionadas.

A MEA é um solvente geralmente utilizado, porém muitos aditivos estão sendo estudados para melhorar seu desempenho. Alguns solventes como o carbonato de potássio apresentam menor calor de regeneração e maior razão de absorção de CO₂, no entanto, aspectos como a resistência à degradação, corrosão e volatilidade são inferiores ou ainda não estão com a eficiência totalmente comprovada em relação as aminas (NEVES, 2007).

3.7 Estimativa de custos envolvidos no CCS

A Agência Internacional de Energia (IEA), em 2004, apresentou um extenso relatório indicando que os futuros custos da captura, transporte e estocagem de CO₂ dependem de quais tecnologias serão utilizadas, como será aplicada, com que velocidade os custos caíram em função dos resultados de P&D (inovação) e preço dos combustíveis.

Como a aplicação da captura requer o uso de mais energia, repercutindo em uma maior produção de CO₂, o custo da mitigação por tonelada de CO₂ emitido é maior do que o custo da captura e estocagem. Os custos envolvidos na captura podem ser expressos basicamente pela grande perda de eficiência energética do processo. Se forem adotados sistemas para aumentar a eficiência das usinas, a diferença entre os dois custos diminuirá com o aumento da eficiência energética na captura.

No estágio atual do conhecimento, o custo total da CCS pode variar de US\$ 50 - 100 por tonelada de CO₂ (IEA, 2004). Esses valores podem cair significativamente no futuro, chegando a US\$ 25 - 50 por tonelada de CO₂ em 2030 (IEA, 2004).

O custo da CCS pode ser dividido no custo individual dos processos envolvidos (captura, transporte e estocagem). As estimativas correntes de sistemas de captura em larga escala (incluindo a pressurização de CO₂) estão em torno de US\$ 25-50 por

tonelada de CO₂. Se os ganhos futuros em eficiência forem levados em conta, o custo cai para US\$ 10 - 25/ t CO₂ para plantas a carvão e US\$ 10 - 25/ t CO₂ para plantas a gás, nos próximos 25 anos.

No transporte de CO₂, o custo dos dutos depende fortemente dos volumes transportados e, em menor escala, nas distâncias envolvidas. Em grande escala, estima-se o custo de US\$ 1 - 5/ t CO₂ por 100 km. Se o CO₂ for transportado em tanques (navios/trens) o custo cai para US\$ 15 - 25/ t CO₂ para distância de 5.000 km.

O custo de estocagem de CO₂ depende de sua localização e do método de injeção escolhido. Em geral, US\$ 1 - 2/ t CO₂, custo marginal comparado à captura e transporte. Os ganhos pelo aumento da produção de óleo (até US\$ 55/ t CO₂) e metano podem pagar todos os custos do CCS. Entretanto, esses potenciais são muito variados e não são aplicáveis à maioria dos projetos CCS. Ainda existem os custos associados ao monitoramento e verificação dos locais de estocagem. No entanto, estes custos são bastante inferiores aos demais custos envolvidos (IEA, 2004).

Apesar dos custos envolvidos, a utilização racional dos processos CCS permitirá o uso de combustíveis fósseis com a concomitante redução das emissões de CO₂ e, conseqüentemente, mitigando os efeitos das mudanças climáticas.

4 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE CO₂ PELA QUEIMA DE CARVÃO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA

4.1 Metodologia para o cálculo de emissões a partir da combustão de carvão no Brasil

Uma das grandes dificuldades da realização de inventários de emissão de carbono diz respeito à disponibilidade e à qualidade dos dados necessários para os cálculos. Como a quantificação destes dados é imprescindível para a tomada de decisão referente à implementação de um sistema de captura de CO₂, foi proposta uma metodologia para os cálculos de emissões que contemple de forma mais ampla a quantidade de carbono (ou CO₂) emitido na atmosfera.

Para a realização destes cálculos foram utilizadas diversas fontes de dados referentes às quantidades de combustíveis, primários (carvão) e secundários (óleo combustível e diesel), bem como às características desses combustíveis (umidade, poder calorífico inferior (PCI), teor de carbono, coeficientes de emissão). Além desses parâmetros gerais, para as usinas termelétricas foram também utilizados dados referentes à energia gerada e ao custo dos combustíveis, obtidos junto à Eletrobrás (2007).

Também foi realizado um levantamento detalhado do consumo dos carvões energéticos pelos principais consumidores (termelétricas e indústrias) referente ao ano de 2002, período mais recente para o qual se tem dados detalhados e oficiais. Os resultados obtidos são comparados com a metodologia utilizada pelos Inventários de emissões oficiais brasileiros realizados pelo MCT (BRASIL, 2002). A eficiência do processo de queima utilizado é feita para cada uma das usinas termelétricas estudadas. A emissão de carbono a partir de termelétricas a carvão calculada será comparada com a metodologia do IPCC (2007) que foi utilizada por uma empresa de MDL brasileira.

A emissão de CO₂ por fontes industriais é importante, pois algumas indústrias também utilizam a combustão de carvão para a geração de energia. A comparação com as usinas termelétricas torna-se essencial na etapa de determinação da fonte emissora.

O consumo das fontes industriais é estimado a partir dos dados do Balanço Energético Nacional (2003) e de trabalhos realizados pela Organização Economia e Energia, que realiza estudos relacionados à energia em parceria com órgãos públicos como os Ministérios de Minas e Energia (MME) e de Ciência e Tecnologia (MCT). Dados atualizados relacionados às características do carvão foram obtidos por Pires (2004) junto às empresas consumidoras e produtoras de carvão. Na ausência de dados específicos foram utilizados os dados de enquadramento de alguns carvões energéticos (CE) conforme classificação do DNPM (MÜLLER et al., 1987).

O procedimento geral de cálculo seguiu a metodologia indicada para a construção de inventários nacionais dos gases responsáveis pelo efeito estufa, recomendado pelo IPCC (2000).

4.1.1 Estimativa dos parâmetros utilizados nos cálculos de emissão de carbono

A metodologia proposta adotou algumas premissas importantes para efeito do cálculo das emissões que serão discutidas no decorrer deste item. Segundo as recomendações IPCC (2000) a quantidade de todos os combustíveis consumida deve ser convertida de suas unidades originais (t, m³, kg, etc...) em unidade de energia (Terajoule). Para essa conversão utilizando o Poder Calorífico Inferior (PCI) do carvão, normalmente expresso em base seca, é a quantidade consumida (toneladas) que deve também estar expressa em base seca.

O poder calorífico do combustível (quantidade de calor em unidades de energia que é liberada de um quilograma de combustível) utilizado nos cálculos é o Poder Calorífico Inferior que corresponde aos processos de troca térmica que efetivamente ocorrem durante a combustão. Quando somente o Poder Calorífico Superior (PCS) for conhecido, o IPCC (2000) recomenda utilizar um fator de conversão para combustíveis sólidos, como o carvão (PCI = 0,95 x PCS). Segundo Pires (2004), para os carvões nacionais, a conversão sugerida pelo IPCC pode trazer

erros significativos. Esse autor sugeriu a utilização da seguinte expressão empírica para a estimativa do PCI a partir dos valores de PCS:

$$\text{PCI} = 0,977 \cdot \text{PCS} - 0,22 \quad (4.1)$$

A relação dada pela equação (4.1) foi obtida de maneira experimental por Pires (2004), levando em consideração os diferentes tipos de carvão (95 amostras estudadas dos carvões brasileiros), o que torna os cálculos de emissão mais próximos do real (PIRES, 2004).

Na metodologia adotada no inventário brasileiro de emissões do MCT (BRASIL, 2002), os cálculos foram realizados utilizando valores de consumo de carvão em base úmida. Essa simplificação pode ocasionar erros significativos, pois o carvão utilizado para fins energéticos possui teores de umidade variados, podendo chegar a 20% (MÜLLER et al., 1987). Por isso, para a realização dos cálculos de emissão, é necessária a conversão do consumo de carvão em base úmida (bu) para base seca (bs) que pode ser facilmente realizada, desde que conhecido o teor de umidade da amostra (ASTM, 1996).

4.1.2 Cálculo da emissão de Carbono

As estimativas de emissão de dióxido de carbono pela queima de carvão geralmente são expressas a partir de Fatores de Emissão de Carbono (*Carbon Emission Factors* - CEF). Os CEFs representam a relação entre a quantidade de Carbono (ou CO₂) emitida por unidade de massa de carvão queimado ou por quantidade de energia utilizada ou gerada por essa queima (PIRES, 2004). No inventário nacional, os cálculos de emissão foram realizados utilizando o CEF fixo igual a 25,8 Gg C/TJ, valor recomendado pelo IPCC (2000) para carvões sub-betuminosos quando não são conhecidos os valores específicos para os carvões utilizados. Neste trabalho serão utilizados os CEFs calculados experimentalmente no trabalho de PIRES (2004) para os principais carvões energéticos nacionais, que estão contidos na Tabela 4.1.

Além dos CEFs, a Tabela 4.1 apresenta dados de caracterização dos carvões nacionais, como os teores de umidade, de carbono, PCI e PCS, em relação às diferentes fontes de informação. O carvão é classificado de acordo com o tipo de

utilização e PCS (MÜLLER, 1987). O teor de cinzas é também apresentado como parâmetro auxiliar de verificação da qualidade dos carvões nacionais. Quanto maior o teor de cinzas menores o teor de carbono e poder calorífico do combustível. Portanto, maiores quantidades de carvão de baixa qualidade devem ser utilizadas para gerar a mesma quantidade de energia, o que também afeta a eficiência da combustão e assim por diante.

Tabela 4.1. Dados de caracterização dos principais carvões energéticos brasileiros conforme diferentes fontes de informação.

Carvão	Cinzas (%, bs)	Umidade (%)		C (%,bs)	PCS (kcal/kg, bs)			PCI (kcal/kg, bs)		CEF (GgC/TJ)	
		a	b		a	c	b	d	b	e	b
CE3100	57	15	14,12	34,5	2.950	3.100	3.074	2.945	3.003	25,8	25,32
CE3300	54	17	15,89	37,6	3.150	3.300	3.096	3.135	3.025	25,8	25,07
CE3700	47	15	14	36,4	3.700	3.700	3.750	3.515	3.664	25,8	25,32
CE4200	40	19	15	45,5	4.200	4.200	3.960	3.990	3.869	25,8	24,73
CE4500	43	10	7,06	47,1	4.500	4.500	4.600	4.275	4.494	25,8	24,65
CE4700	35	19		49,6	4.700	4.700	4.186	4.465	4.090	25,8	24,59
CE5200	35	10	4	53,7	5.200	5.200	5.249	4.940	5.128	25,8	24,59
CE5900	22	20			5.900		5.996	5.600	5.935	25,8	24,41
CE6000	25	15		61,6	5.700	6.000	6.075	5.700	5.935	25,8	24,22

*C – teor de carbono orgânico elementar, PCS e PCI – Poder calorífico superior e inferior, respectivamente. CEF – Coeficientes de emissão de carbono.

Fonte: – a: MÜLLER et al. (1987); -b: PIRES, (2004); -c: BRASIL (2003); -d: BRASIL, 2006b; -e: BRASIL, 2002.

No processo de queima existe uma fração de carvão que não é oxidada. O IPCC (2000) indica que a fração oxidada é de aproximadamente 98% para combustíveis sólidos. Esse valor médio proposto certamente não deve ser atingido por usinas termelétricas de tecnologia defasada ou que utilizam carvões de baixa qualidade, como é o caso de algumas usinas brasileiras. Entretanto, como ainda não existem muitos estudos para a determinação experimental deste valor, este trabalho adotará a recomendação do IPCC (2000).

O cálculo de emissão de carbono (equação 4.2), expresso geralmente em Gg C por ano, é realizado pelo produto entre a energia contida no combustível (TJ) pelo CEF, específico para cada tipo de carvão, dividido pela fração oxidada, com as devidas mudanças de unidades.

$$\text{Emissão}_{(\text{Gg C.ano}^{-1})} = \frac{\text{CEF}_{(\text{TC.TJ}^{-1})} \cdot \text{PCI}_{(\text{TJ})}}{1000 \cdot \varphi} \quad (4.2)$$

Onde φ corresponde às frações oxidadas do carvão, igual a 0,98.

Para expressar os resultados em CO₂ ao invés de carbono (C), realiza-se apenas a conversão por meio das massas atômicas moleculares respectivas (44 e 12).

4.1.3 Cálculos específicos para Termelétricas

4.1.3.1 Cálculo da energia de entrada (*input*)

As emissões de carbono ou CO₂ gerados em termelétricas estão relacionadas não somente com a emissão pela queima do carvão, mas também com a emissão pela queima de combustíveis secundários, como óleos combustíveis e diesel, utilizados para dar início ao processo de queima.

A energia que entra (*input*) no sistema é determinada pela relação direta entre o consumo de combustível e seu poder calorífico inferior. Quando se refere ao carvão o consumo deve ser utilizado em base seca. Já os óleos combustíveis e diesel não possuem variações significativas em sua composição, não contendo teores significativos de umidade. Seu poder calorífico não sofre oscilações significativas. O PCI do óleo combustível e do diesel são 41,34 e 42,49 MJ/kg, respectivamente (IPCC, 2000). No entanto, é necessário atentar-se às transformações de unidades. A energia total no sistema é obtida pela soma das entradas individuais de energia dos combustíveis utilizados (equação 4.3):

$$\text{Input energia}_{(\text{Total})} = \Sigma(\text{Carvão} + \text{Diesel} + \text{Óleo}) \quad (4.3)$$

A quantidade de energia que entra (*input*) no sistema de queima das termelétricas a partir do carvão é determinada a partir da equação 4.4:

$$\text{Carvão (Input energia}_{(TJ)}) = \frac{\text{consumo}_{(bs)}(t) \cdot \text{PCI} \left(\frac{10^6 \text{ J}}{\text{kg}} \right)}{10^3} \quad (4.4)$$

O consumo de óleo diesel é obtido em 10^3 L (ELETROBRÁS, 2007) e o óleo combustível em toneladas. A quantidade de energia que entra no sistema de queima a partir do diesel é dada pela equação 4.5:

$$\text{Diesel (Input energia}_{(TJ)}) = \frac{\text{consumo}(10^3 \text{ L}) \cdot 0,852 \left(\frac{\text{kg}}{\text{L}} \right) \cdot 42,49 \left(\frac{10^6 \text{ J}}{\text{kg}} \right)}{10^6} \quad (4.5)$$

Aonde $0,852 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ equivale a densidade do diesel.

Analogamente a quantidade de energia que entra no sistema de queima a partir do óleo combustível é dada pela equação 4.6:

$$\text{Óleo (Input energia}_{(TJ)}) = \frac{\text{consumo}(t) \cdot 1000 \cdot 41,34 \left(\frac{10^6 \text{ J}}{\text{kg}} \right)}{10^6} \quad (4.6)$$

Para relacionar a energia que entra no sistema com a energia que sai (*output*) é necessário realizar a conversão da energia de Terajoule para Megawatt-hora (MWh). Para isto, foi utilizada a relação adotada internacionalmente, a qual o Balanço Energético Nacional, já utiliza desde 2003, que indica que 1 kWh corresponde a 860 cal (BRASIL, 2006b).

4.1.3.2 Cálculo de emissões

O cálculo de emissões de carbono para as termelétricas (Gg C/ano) é obtido pelo somatório das emissões de cada combustível utilizado. As emissões advindas da queima do diesel e do óleo combustível são obtidas de maneira similar a do carvão, descrito pela equação 4.2. No entanto, como as propriedades dos óleos não sofrem grandes variações serão utilizado para o cálculo de emissões os valores dos CEFs,

indicados pelo IPCC (2000), de 21,1 tC/TJ para o óleo combustível e 20,2 tC/TJ para o diesel. Para esses óleos a fração oxidada na reação de combustão corresponde a 99% (IPCC, 2000).

4.1.3.3 Estimativa de eficiência e fatores de emissão

A eficiência das termelétricas está diretamente relacionada com a quantidade de carvão queimada em relação à quantidade de energia gerada, bem como ao tipo de carvão utilizado na queima. Um carvão com maior poder calorífico consegue gerar mais energia do que um carvão com poder calorífico menor. A eficiência pode ser obtida de acordo com a equação 4.7:

$$\text{Eficiência (\%)} = \frac{\text{Energia consumida}}{\text{Energia Gerada}} \times 100 \quad (4.7)$$

Para verificar a eficiência dessas usinas em termos de emissão de carbono pode-se calcular fatores de emissão de carbono, ou seja, a quantidade de carbono ou CO₂ emitidos no processo de combustão em relação à energia gerada. A quantidade de energia gerada foi obtida junto a Eletrobrás (2007). O fator de emissão utilizado nesse trabalho foi calculado de acordo com a equação 4.8:

$$\text{Fator emissão} = \frac{\text{Emissão total de C (Gg C) ou tCO}_2}{\text{Energia Gerada (MWh)}} \quad (4.8)$$

4.2 Emissões de carbono

A Tabela 4.2 exibe o consumo de carvão energético em bases úmida e seca, o *input* total de energia (carvão, óleos diesel e combustível) e a emissão de carbono pelas termelétricas e por fontes industriais no Brasil, que utilizaram carvão como combustível primário, no ano de 2002.

Tabela 4.2. Emissão de carbono por usinas termelétricas e fontes industriais que utilizam carvão como combustível primário referentes ao ano de 2002.

Fonte Emissoras				Carvão			Input Energia		Emissão Carbono		
Nome	UF	Proprietário	Capacidade Instalada (MW)	Tipo ^d	Umidade ^e (%)	Consumo (t/ano, b.s.)	Total (carvão+Oleos) ^b		Este trabalho		Metod. Oficial ^c (Gg C/ano)
							TJ (PCI)	(%) carvão	(Gg C/ano)	% emissão	
Candiota	RS	CGTEE	446	CE3300	15,89	1.385.936	18.326	95,8	447	25	576
Termochar	RS	Tractebel	72	CE3100	14,12	313.139	3.964	99,3	98	5	120
São Jerônimo	RS	CGTEE	20	CE4200	15,00	69.335	1.123	100,0	27	2	36
Jorge Lacerda^a	SC	Tractebel	857	CE4500	7,06	2.058.405	38.925	99,6	940	52	1.055
UTLA	“	“	232	CE4500	7,06	546.434	10.416	98,9	251	15	280
ULTB	“	“	262	CE4500	7,06	908.009	17.152	99,8	414	25	466
UTLC	“	“	363	CE4500	7,06	603.961	11.375	100,0	275	17	310
Figueira	PR	Copel	20	CE6000	15,00	43.809	1.092	100,0	26	1	33
Subtotal Térmicas			1415			3.870.625	63.430	94,7	1.538	86	1.819
Sub-total Outros^f					var.	563,12	10.407	100,0	256	14	325
Total						4.433.745	73.837	98,6	1.794	100	2.144

^a – O complexo Jorge Lacerda é constituído por três sistemas geradores (UTLA, UTLB e UTLC); ^b - Corresponde ao somatório da energia fornecida por todos os combustíveis utilizados (carvão+óleo combustível+diesel) ; ^c - Estimativa efetuada seguindo a metodologia utilizada no 1º Inventário (2002); ^d – Classificado de acordo com o tipo, Carvão e Energético (CE) juntamente com o seu poder calorífico superior teórico; ^e – a umidade de cada carvão, bem como os demais parâmetros de qualidade, foram utilizados para os cálculos (MÜLLER et al., 1987; ECONOMIA ..., 2007), ^f –somatório das emissões de outras fontes industriais, calculadas por tipo de carvão energético consumido.

Fonte: MÜLLER et al.(1987); ECONOMIA... (2007); BRASIL (2002).

A partir da metodologia adotada neste trabalho, constata-se que no Brasil, foram emitidos 1.794 Gg C/ano a partir da queima de carvão em 2002, sendo que destes, 86% são decorrentes das usinas termelétricas. O restante (256 Gg C/ano) é emitido através de outros processos industriais, destacando-se o setor petroquímico e de celulose no RS. Destaca-se a emissão do Complexo Jorge Lacerda que contribui com 52% das emissões brasileiras pela combustão de carvão fóssil. Esse percentual elevado era esperado, pois Jorge Lacerda é atualmente o maior complexo termelétrico a carvão da América Latina, totalizando 857MW de capacidade instalada.

A usina de Candiota destaca-se como a segunda maior fonte, com 25% do total de emissões. Esta contribuição é devida não só as quantidades significativas consumidas (1.385.936 t/ano) de carvão de baixo poder calorífico (CE3300), mas também ao volume significativo de diesel e óleo combustível usados. De fato, Candiota é a usina que apresenta o maior percentual de combustíveis secundários (4,2% do input de energia) no processo de combustão.

A usina da cidade de Figueira no Paraná é a termelétrica que possui o menor percentual de emissão, 1% do total. Isto ocorre devido a pequena capacidade de geração (20 MW) e a utilização de um carvão de melhor qualidade (CE6000), com maior poder calorífico e baixo percentual de umidade. As outras duas usinas gaúchas (Charqueadas e São Jerônimo) emitem juntas os restantes 7% do carbono lançados à atmosfera.

Através dos dados da Tabela 4.2 também se observa que ocorre em determinados casos diferenças significativas (médias - 20%) nos resultados de emissão entre a metodologia proposta e a metodologia do MCT (BRASIL, 2002). Cabe salientar que no 1º Inventário de emissões (2002) foram calculadas as emissões correspondentes aos anos de 1990 a 1994 e que os dados apresentados na Tabela 4.2 foram estimados nesse trabalho utilizando a metodologia proposta no 1º inventário.

A maior diferença verificada nas emissões de 2002 (-23%) corresponde aos cálculos para a termelétrica de São Jerônimo (RS). Os valores superestimados pela metodologia do 1º inventário se devem a diversos fatores. Na metodologia proposta no presente trabalho foi considerado o valor de emissão dos combustíveis primários e também dos secundários, além do teor de umidade; já nos cálculos do Inventário do MCT os combustíveis secundários e o teor de umidade do carvão não foram considerados. Como algumas usinas não utilizam apenas o carvão na combustão,

mas também os óleos combustíveis e diesel para gerar energia, isto pode acarretar erros significativos.

Conforme citado anteriormente, a usina de Candiota utiliza no processo de queima 95,8% de carvão, o restante são combustíveis secundários. Pela metodologia proposta, caso não fossem considerados os combustíveis secundários, a diferença entre os valores encontrados e os da metodologia MCT seria em torno de -23%. Esses valores estão acima das imprecisões dos dados brutos (quantidades e composição dos combustíveis, fatores de emissão entre outros) utilizados. Os erros obtidos a partir da metodologia do 1º inventário podem ser atribuídos principalmente a desconsideração do teor de umidade do carvão, ao uso de CEFs genéricos (valores médios para carvões sub-betuminosos estrangeiros), bem como a valores de PCI calculados de forma pouco precisa e baseados em PCS bastante diferentes dos valores experimentais (PIRES,2004).

A Figura 4.1 exibe a relação entre a emissão de carbono (expressa em tCO₂ por MWh de energia produzida) com a eficiência energética dos processos de combustão das usinas termelétricas brasileiras, a partir de metodologias propostas por este trabalho e da literatura *Ecoinvest, Ecoenergy and Eco securities*, (IPCC, 2007). O estudo de literatura foi realizado por uma empresa nacional, utilizando dados brasileiros do sistema interligado Sul-Sudeste de geração de energia elétrica, visando participação em projetos de MDL (IPCC, 2007).

Comparando as metodologias utilizadas pela empresa para projeto de MDL e a utilizada neste trabalho é possível verificar que a quantidade de emissão é distinta para a maioria das usinas térmicas, sendo similares apenas nas usinas de Candiota e Termochar no Rio Grande do Sul. Nas usinas de São Jerônimo e Figueira, as quantidades de carbono foram maiores pelos cálculos deste trabalho as demais foram inferiores da calculada pelos dados de literatura. As discrepâncias devem ter ocorrido pelo uso indevido de coeficientes de emissão não apropriados nos dados de literatura aos carvões nacionais.

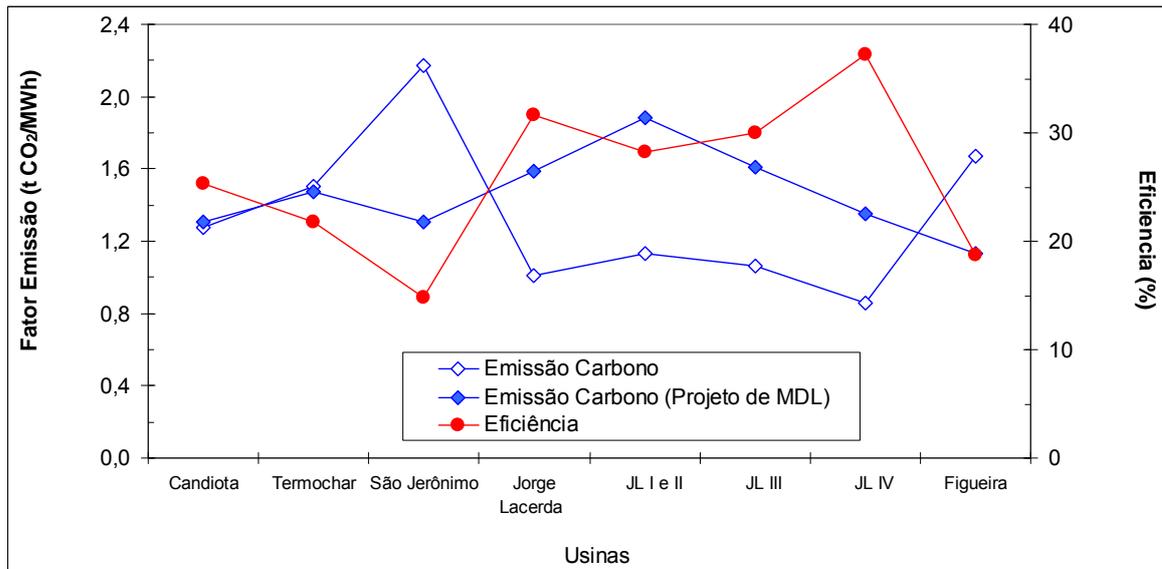


Figura 4.1. Fator de emissão de carbono por MWh e eficiência na geração de energia das usinas termelétricas brasileiras a carvão em 2002.

Quanto à eficiência energética, o complexo Jorge Lacerda apresentou os melhores resultados com as maiores eficiências (37%), tendo sido calculada para a unidade C do complexo Jorge Lacerda, última unidade construída, possuindo processos e controles mais modernos. Na média (32%), as quatro unidades do complexo ainda estão além das usinas mais eficientes estrangeiras (>40%), porém a diferença com as usinas nacionais de pior desempenho é significativa. A usina de São Jerônimo possui uma eficiência inferior a 15%, e seu fator de emissão corresponde a 2,171 tCO₂/MWh, maior fator de emissão de carbono entre as usinas brasileiras. A segunda usina com menor eficiência, conseqüentemente com um fator de emissão alto é a usina Figueira, que tem sua eficiência em torno de 19% e seu fator de emissão é 1,670 tCO₂/MWh. Já a usina de Candiota possui uma eficiência média de 25,3% e a sua emissão está em torno de 1,277 tCO₂/MWh de energia gerada, enquanto Charqueadas apresenta eficiência e emissão intermediárias (22% e 1,502 tCO₂/MWh).

De maneira geral, esses resultados indicam que as usinas mais eficientes são aquelas que utilizam tecnologia mais modernas e carvão de melhor qualidade. Adotadas as premissas do processo de captura verifica-se que a Unidade 7 do Complexo Jorge Lacerda poderia ser indicada para um processo *retrofit* de captura de CO₂, visto possuir maior eficiência que as demais usinas.

5 COMPOSIÇÃO CARACTERÍSTICA DOS GASES DE CHAMINÉ DAS TERMELÉTRICAS BRASILEIRAS

5.1 Efeito dos gases e das condições combustão sobre o solvente de absorção

Os processos de combustão que utilizam carvão para a geração de energia ocorrem normalmente com excesso de ar, que ocasiona a geração de gases de combustão, também conhecidos como gases de exaustão ou gases de chaminé.

A composição destes gases varia de acordo com a eficiência de combustão e também pelas características do carvão queimado e dos processos de controle utilizados. Quando a combustão é completa a composição dos gases, em geral, é constituída de CO_2 , SO_2 , H_2O , N_2 , O_2 (VLASSOV, 2001) e uma quantidade de cinzas volantes que são arrastadas junto com os gases de combustão, também conhecidas como cinzas leves.

Um dos grandes problemas para a escolha do método de captura a ser adotado por uma termelétrica está relacionado com a influência dos gases de combustão no processo de captura.

Conforme descrito no item 3.6, no processo de captura por absorção química, o gás oriundo da combustão passa por torres absorvedoras em contato com um solvente que retira o CO_2 do fluxo de gás. Este solvente deve ser seletivo, de maneira a capturar o CO_2 , e econômico, devendo ser viável e vantajosa sua utilização.

Desta forma, o solvente não deve ser contaminado ou degradado pela ação de outros componentes presentes nos gases de exaustão. Algumas termelétricas estrangeiras mais modernas utilizam tecnologias de dessulfurização da corrente de gás (FGD – *Flue gas desulphurisation*) e processos de redução catalítica seletiva (SCR – *Selective Catalytic Reduction*) para a redução de SO_x e NO_x , respectivamente, no fluxo dos gases de saída da chaminé (DAVISON, 2006). Para o

controle de emissões de particulados a maioria das termelétricas utiliza Precipitadores Eletrostáticos.

O processo Econamine FG da Flúor Daniel foi escolhido pelo IEA/CCP como estado-da-arte para a captura de CO₂ de emissões industriais gasosas. Este processo utiliza uma solução de MEA com inibidor de corrosão como reagente para a absorção química do CO₂. Outro processo utilizado foi desenvolvido pela *Mitsubishi Heavy Industries* (MHI) que utiliza aminas com impedimento espacial como solvente para a absorção de CO₂ (NEVES, 2007).

Os gases provenientes da combustão, em determinadas condições podem reagir com o solvente utilizado causando sua degradação. Segundo Astarita, Savage e Bisio (1983), a MEA reage com alguns gases tais como CO₂, COS, CS₂, SO₂ e SO₃ que podem ser gerados em um processo de queima de carvão, formando produtos de degradação. De acordo com Neves (2007), os processos de degradação em gases oriundos da combustão permanecem mal compreendidos e por esta razão é necessário um estudo específico da composição dos gases para a determinação dos processos de controle de emissão necessários à implementação do sistema de captura por absorção química.

5.1.1 Fatores que interferem no processo de captura de CO₂ por absorção química

5.1.1.1 SO_x

O Carvão desde sua origem apresenta teores de enxofre que estão associados a diferentes minerais e macerais. O enxofre ligado à matriz orgânica apresenta-se na forma de tioésteres, tiofenos e mercaptanos, já o enxofre inorgânico encontra-se principalmente na forma de pirita (PIRES, 1990). Durante a combustão, todas as formas de enxofre contidas no carvão são transformadas em óxidos de enxofre, conhecidos como SO_x.

Estes óxidos são formados por cerca de 99% de SO₂ e o restante de SO₃. Como a oxidação do SO₂ a SO₃ é muito pequena, nas condições de combustão, pode-se expressar todo o SO_x formado como SO₂ (PIRES, 1990). No entanto, cerca de 15% do enxofre contido no carvão capturado pelas cinzas volantes e incrustações

da caldeira transformam-se em sulfatos, diminuindo assim, a quantidade de SOx emitido à atmosfera.

Estes gases reagem irreversivelmente com a MEA, produzindo sais corrosivos. Para não ocorrer perda do solvente, no processo Econamine FG a concentração de SOx na corrente de gás utilizada deve ser inferior a 10 ppm(v) (26 mg/Nm³) em combustão com 6% de O₂ e no processo MHI de 1 ppm(v) (3 mg/Nm³). Estas concentrações são bem inferiores às concentrações reais destes componentes na corrente de gás de exaustão de termelétricas a carvão, mas podem ser obtidas a partir de tecnologias de FGD. A implementação de uma unidade de FGD é utilizada para reduzir SOx a níveis muito baixos (entre 0,01 a 0,03 ppm(v), 6% de O₂), o que minimiza a degradação do solvente pela reação com os SOx (IEA, 2007).

A dessulfurização com cal virgem reduz em cerca de 90 – 95% dos SOx. Para obter concentrações em torno de 10 ppm(v) de SO₂ é necessário utilizar um agente neutralizante alcalino, soda cáustica ou carbonato de sódio, em um lavador de gases (*spray scrubber*). Quando a emissão gasosa for superior a 10 ppm(v) torna-se economicamente interessante instalar uma lavadora de gases de SO₂ do que permitir as prováveis perdas no solvente.

No Brasil, atualmente, nenhuma termelétrica a carvão para a geração de energia possui sistema de abatimento de SOx.

5.1.1.2 NOx

O termo NOx representa o somatório das concentrações dos óxidos NO₂ e NO. Sua formação durante a combustão do carvão não é totalmente compreendida, no entanto, dois mecanismos são propostos: a) através da fixação do nitrogênio do ar (NOx-térmico) e b) através da conversão do nitrogênio contido no carvão (NOx-combustível).

Alguns autores citam como principal fonte de emissão de NOx a oxidação do nitrogênio contido no carvão (HARDING et. al. apud PIRES, 1990). Segundo Pires (1990), dados coletados de diferentes fontes concluíram que entre 60% – 90% do NOx emitido advém do NOx-combustível.

Em altas temperaturas, as moléculas de oxigênio se dissociam em átomos muito reativos que reagem rapidamente com as moléculas de nitrogênio formando os NOx-térmico. Quanto mais elevada for a temperatura do processo e quanto maior for

o volume de excesso de ar empregado, maiores serão os valores de emissão do NO_x. Os NO_x podem causar a corrosão nos equipamentos e degradação da amina.

Dentre os NO_x, o NO₂ é o mais prejudicial, pois reage com a água formando HNO₃ que reage com as aminas, formando um sal termicamente estável. O controle da emissão destes gases pode ser realizado pela regulação da temperatura das chamas nos fornos e caldeiras.

O processo da MHI indica que os NO_x provocam reações de degradação no solvente havendo a necessidade de reduzir as concentrações de NO_x por tratamento catalítico a valores inferiores a 400 ppm(v) (750 mg/Nm³). Ainda, segundo Esber III (2006), as concentrações aceitáveis de NO_x não devem ser superiores a 20 ppm(v) (38 mg/Nm³). A inclusão do processo de redução catalítica na combustão de carvão reduz a concentração de NO₂ em cerca de 5 ppm(v) (10 mg/Nm³) (6% de O₂), valor que está dentro dos limites aceitáveis para o processo de absorção de CO₂ que utiliza aminas como solvente. A redução catalítica utiliza uréia ou amônia para reduzir NO_x à NO₂.

5.1.1.3 Cinzas volantes (leves)

Durante a combustão do carvão são geradas grandes quantidades de cinzas volantes que são carregadas pelos gases de exaustão à atmosfera. Estas cinzas podem provocar a formação de espuma nas torres absorvedoras e regeneradoras, incrustação, erosão e corrosão nos equipamentos.

Com base em processos industriais, para a realização do processo de captura por absorção química a carga de cinzas em suspensão deve ser reduzida a valores inferiores a 0,39 mg/dscf (aproximadamente 15 mg/Nm³), representando uma eficiência do sistema de remoção de 99,7 % (NEVES, 2007).

Para o controle destas cinzas os equipamentos mais utilizados são o filtro manga e precipitadores eletrostáticos. No Brasil, todas as centrais termelétricas utilizam precipitadores eletrostáticos para a coleta das cinzas volantes (PIRES, 1990). Esta remoção também pode ser realizada a partir da lavadora de gases (FGD) utilizada para a remoção de SO₂.

5.1.1.4 Temperatura dos Gases de combustão

Altas temperaturas podem provocar a degradação do solvente e diminuir a eficiência da absorção. Para o sistema de captura, o fluxo de gás deve ser resfriado à 50°C antes de entrar na torre absorvedora. Esse resfriamento pode ser realizado pelo lavador de gases ou por resfriamento de contato direto com a água (*quench*).

5.1.1.5 Fuligem

A fuligem pode ser gerada por influência do carvão incombusto e também pela queima de óleo combustível pesado. Conforme descrito no item 4.1.3.1, algumas termelétricas não queimam apenas carvão, mas também combustíveis secundários, como o óleo combustível e o óleo diesel. Esta fuligem pode estabilizar-se na forma de névoa, acima da zona de absorção de CO₂, sem ser capturada pela zona de lavagem com água. Por isso, deve ser instalado um eliminador de névoa especial na torre absorvedora para a captura de partículas de tamanho micrométrico (NEVES, 2007).

5.1.1.6 Oxigênio

O Oxigênio em excesso utilizado na queima pode causar a corrosão e a degradação do solvente, principalmente as etanolaminas (MEA, DEA). De acordo com processo de combustão a concentração de oxigênio varia podendo chegar, por exemplo, a 16 % aproximadamente na usina de Candiota (JICA, 1996). Na literatura utilizada por este trabalho não foi constatado um limite específico para o O₂ no processo de captura por absorção química. No entanto, os limites estabelecidos como padrões de emissão aceitos ao processo são calculados para uma combustão com 6% de excesso de O₂.

O Quadro 5.1 exhibe de maneira resumida os limites, a influência e o tipo de tratamento para alguns parâmetros e condições do processo que podem influenciar diretamente no processo de absorção.

Quadro 5.1. Limites, influencia e tipo de tratamento para alguns parâmetros e condições do processo para a adoção do processo de captura.

Fatores	Limites	Problema	Tratamento
SOx	1- 10 ppm	Reage com a MEA, produzindo sais corrosivos	Sistema FGD (lavadora de gases)
NOx	20 - 400 ppm	$\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_3$ que reage com as aminas formando um sal termicamente estável	Sistema FGD Inclusão de um sistema de redução catalítica
Cinzas Volantes	15 mg.Nm ⁻³	Formação de espuma nas torres absorvedoras	Sistema FGD Precipitadores eletrostáticos que tenham eficiências superiores à 99,7%
Temperatura	< 50°C	Degradação do solvente e menor eficiência de absorção.	Sistema FGD Resfriamento por contato direto com água.
Oxigênio	6% de O ₂ em excesso	Corrosão e degradação do solvente.	
Fuligem		Formação de uma névoa acima da zona de absorção.	Eliminador de Névoa especial na torre de absorção para partículas de tamanho micrométrico.

5.2 Padrões de emissão brasileiros para processos de combustão de carvão

Para considerar possíveis instalações de processos de captura de CO₂ em outras termelétricas como a Fase C de Candiota, torna-se importante o conhecimento dos padrões de emissão permissíveis pela legislação brasileira. Os padrões de emissão são os limites máximos de emissão permissíveis a serem lançados à

atmosfera por fontes potencialmente poluidoras. Estes podem ser expressos em forma de concentração gravimétrica (mg/Nm^3) aonde se refere às condições 1013 mbar, 0°C e base seca. A concentração medida pode ser expressa pela condição referencial de oxigênio, o que permite estabelecer padrões de emissão independentes do tipo de fonte fixa utilizada na combustão. Esta relação pode ser determinada de acordo com a equação 5.1 (PARANÁ, 2007):

$$C_R = \frac{21 - O_R}{21 - O_M} \cdot C_M \quad (5.1)$$

onde:

CR: concentração do poluente corrigida para condições referenciais em mg/Nm^3 ou $\text{ppm}(\text{v})$

OR: concentração referencial de Oxigênio em % por volume

OM: concentração medida de Oxigênio em % por volume

CM: concentração medida em mg/Nm^3 ou $\text{ppm}(\text{v})$

Os padrões de emissão brasileiros para atividades que envolvam combustão externa utilizando como combustível carvão mineral são determinados pela Resolução Conama nº 008 de 1990. Esta resolução trata apenas de partículas totais, SO e SO_2 . Entretanto, os padrões poderão ser definidos caso a caso no processo de licenciamento, de acordo com os estudos ambientais desenvolvidos, podendo variar de região para região e de projeto para projeto. No entanto, a tendência é a de fixação de padrões na ordem de $400 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para SO_x e NO_x e de 50 à $80 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para material particulado (PORTO, 2007).

No Rio Grande do Sul, o Conselho Estadual de Meio Ambiente – CONSEMA está criando uma resolução que irá contemplar os padrões de emissão para o Estado. Essa resolução trará os limites máximos permitidos para termelétricas com potência térmica nominal inferior ou igual a 70MW são: $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para materiais particulados, $400 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para NO_x como NO_2 e $400 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para SO_x como SO_2 e para potências térmicas superiores a 70 MW são: $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para materiais particulados, $200 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para NO_x como NO_2 e $400 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para SO_x como SO_2 .

O Estado do Paraná criou uma resolução específica para o controle da qualidade do ar. A resolução SEMA nº 054 de 2006 determina os parâmetros de

emissão de SOx, NOx, CO e Material particulado total para a combustão de carvão. A resolução mostra a tendência atual para as novas termelétricas. A Tabela 5.1 mostra um resumo das legislações brasileira e estaduais.

Tabela 5.1. Limites de emissão de poluentes atmosféricos pela combustão de carvão segundo legislações federal (CONAMA) e estaduais (CONSEMA, SEMA) no Brasil.

Potência MW	CONAMA (1990) ^a		CONSEMA-RS(2008) ^b			SEMA-PR(2006) ^c		
	MP g/10 ⁶ kcal	SOx g/10 ⁶ kcal	MP mg/Nm ³	SOx mg/Nm ³	NOx mg/Nm ³	MP mg/Nm ³	SOx mg/Nm ³	NOx mg/Nm ³
10 a 50						250	3.000	500
< 70	1.500	5.000	50	400	400			
50 a 100						250	1.300	500
>70	800	2.000	50	400	200			
>100						60	1.300	400

Obs.: MP representa o material particulado, SOx expresso como SO₂ e NOx expresso como NO₂; Valores corrigidos para 6% de O₂.

a - valores para as Áreas II e III, para MP e SOx.

b - proposta de resolução CONSEMA-RS.

c – Resolução SEMA- PR.

Fonte: Adaptado de PARANÁ ([2007]); RS (2008); BRASIL (1990).

Ao comparar a resolução que está sendo estudada pelo CONSEMA-RS em relação a SEMA-PR, é possível verificar que os padrões de emissão do Rio Grande do Sul serão mais restritivos que os do estado do Paraná. Conforme verificado no item 5.1, mesmo os limites de emissão estipulados pelo CONSEMA-RS ainda são muito superiores aos recomendados para o sistema de captura.

5.3 Composição dos gases de chaminé em termelétricas a carvão no Brasil

No Brasil existem poucas referências relativas aos gases da saída de chaminé. Para a verificação destes dados foi utilizado o relatório elaborado pela *Japan International Cooperation Agency* - JICA que refere-se às condições de chaminé das usinas térmicas a carvão brasileiras no ano de 1996. Apesar de ser uma referência antiga, se apresenta ainda como uma referência válida, pois foi o maior levantamento de dados realizado para o setor.

Também foram consultados diretamente dados junto ao Complexo Jorge Lacerda. A Tabela 5.2 exibe valores de emissão do complexo Jorge Lacerda. Para a unidade 7 são apresentados valores estimados no relatório visto que esta unidade não encontrava-se em funcionamento na época da realização do relatório JICA. As termelétricas brasileiras possuem para o controle dos gases de saída apenas precipitadores eletrostáticos com até 99% de eficiência, no entanto esta eficiência não foi constatada pelos resultados apresentados no relatório (JICA, 1996).

Tabela 5.2. Emissão de poluentes atmosféricos pelas Unidades do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda no ano de 1997.

Unidade	Potência MW	MP		SOx			NOx		
		mg/Nm ^{3a}	g/10 ⁶ kcal	mg/Nm ^{3a}	g/10 ⁶ kcal	ppm	mg/Nm ^{3a}	g/10 ⁶ kcal	ppm
1	50	<i>608</i>	<i>1.228</i>	<i>5.104</i>	<i>11.243</i>	1950	<i>528</i>	<i>746</i>	<i>281</i>
2	50	<i>309</i>	<i>725</i>	<i>4.973</i>	<i>12.860</i>	1900	<i>495</i>	<i>835</i>	<i>263</i>
3	66	<i>768</i>	<i>6.101</i>	<i>4.659</i>	<i>9.864</i>	1780	<i>373</i>	<i>579</i>	<i>198</i>
4	66	<i>232</i>	<i>12.128</i>	<i>4.476</i>	<i>9.179</i>	1710	<i>602</i>	<i>761</i>	<i>320</i>
5	125	<i>758</i>	<i>1.737</i>	<i>4.555</i>	<i>11.755</i>	1740	<i>759</i>	<i>1.737</i>	<i>403</i>
6	125	<i>131</i>	<i>232</i>	<i>4.371</i>	<i>12.410</i>	1670	<i>753</i>	<i>927</i>	<i>400</i>
7 ^c	350	<i>960</i>	NI ^b	<i>5.533</i>	NI ^b	2114	<i>966</i>	NI ^b	<i>513</i>

Obs.: Em *itálico*, valores que ultrapassam os padrões de emissão segundo as legislações (Tab. 5.1).

a - Considerando 6% de O₂.

b - NI – Não Informado.

c - valores estimados pelo relatório JICA.

Fonte: JICA, 1996.

A concentração de SOx e NOx dos gases de chaminé também são superiores ao recomendado para um sistema de captura de CO₂ por absorção química, o que torna necessário medidas de redução destes compostos nos gases de chaminé.

A Tabela 5.3 exibe os valores de emissão apresentados em um relatório da Jorge Lacerda entregue à Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina – FATMA no ano 2007. Apesar destes dados representarem um mês específico de emissão do complexo, torna-se possível comparar os valores atuais com os determinados pelo relatório JICA.

Tabela 5.3. Emissão de poluentes atmosféricos pelas Unidades do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda no ano de 2007.

Unidade	Potência MW	MP		SOx			NOx		
		mg/Nm ^{3a}	g/10 ⁶ kcal	mg/Nm ^{3a}	g/10 ⁶ kcal	ppm	mg/Nm ^{3a}	g/10 ⁶ kcal	ppm
1	50	567	872	5.816	7.954	2222	856	763	455
2	50	435	674	6.233	9.494	2381	899	892	478
3	66	41	63	5.625	8.390	2149	702	682	373
4	66	352	NI ^b	5.320	NI ^b	2032	853	NI ^b	453
5	125	1.395	349	5.130	7.161	1960	1.090	991	579
6	125	42	57	5.171	7.608	1976	1.188	1.139	632
7	350	55	77	5.711	7.554	2182	916	790	487

Obs.: Em itálico valores que ultrapassam os padrões de emissão segundo a legislação (Tab. 5.1).

a - Calculado a partir da equação 5.1 considerando 6% de O₂.

b - NI – Não Informado.

Fonte: TRACTEBEL ENERGIA, 2007a e b.

Ao comparar as emissões dos gases de chaminé no ano de 1997 às atuais percebe-se que não houve um aumento significativo na concentração de SOx e NOx, mas demonstra que o processo utilizado ainda não passou por uma modernização para a redução de emissões destes poluentes. Apesar disto, a quantidade de SOx emitida em relação ao carvão utilizado no processo de combustão diminuiu, podendo significar a utilização de carvão com melhor qualidade.

A concentração de material particulado também aumentou, com exceção das unidades 6 e 3, que apresentaram uma redução expressiva em torno de 70% e 95%. Assim como o SOx, a quantidade de material particulado emitido em relação ao carvão consumido diminuiu. Este fato também pode estar relacionado com a utilização de um carvão com menor teor de cinzas.

Os valores de emissão estimados pelo relatório JICA para a unidade 7 foram superestimados para as concentrações de Material Particulado (cerca de 95%). A emissões de SOx e NOx estão próximas às projetadas em 1997.

Quando comparados aos padrões de emissão, verifica-se que a concentração de Material Particulado atualmente obedece a legislação CONAMA de 1990. No entanto, a concentração de SOx é superior ao limite máximo permitido, mostrando a necessidade de adaptação de um sistema de limpeza de gases.

Em relação às legislações estaduais, as concentrações de SO_x são superiores aos limites estabelecidos, chegando a ser 15 vezes maior que o permitido pelo CONSEMA. As concentrações de NO_x também são superiores aos limites da SEMA-PR e do CONSEMA-RS. As emissões de materiais particulados, com exceção das unidades 4 e 5, estão todas dentro dos padrões estabelecidos pelo SEMA-PR. Pela resolução do CONSEMA-RS, apenas as unidades 3 e 6 enquadram-se nos limites de emissão.

Outro parâmetro importante a ser analisado é a temperatura de saída dos gases da chaminé. No Complexo Jorge Lacerda as temperaturas atuais apresentam variação entre 136 – 189°C. Nessa gama de temperatura verifica-se a necessidade de realizar-se um resfriamento dos gases antes de entrarem no processo de captura.

5.4 Análise dos parâmetros de emissões reais e os padrões de emissão para a captura

De acordo com os valores de emissão dos gases de chaminé, bem como com as legislações brasileiras existentes, atualmente verifica-se que para a implementação do sistema de captura é necessário a adoção de equipamentos limpeza dos gases de chaminé e de resfriamento para adequar o processo a um sistema de absorção de CO₂. No entanto, como as termelétricas a carvão do Brasil não possuem um sistema de FGD, só é possível realizar a análise de quais equipamentos serão necessários após a implementação deste sistema. O FGD deve ser incluído no processo antes da adoção da captura e ele é capaz de reduzir, além das concentrações de SO_x, as concentrações de NO_x, Material particulado e também alterar a temperatura final dos gases de exaustão.

A unidade 7 do complexo Jorge Lacerda, apesar de apresentar concentrações elevadas de SO_x, NO_x e Material Particulado, possui capacidade de geração superior às demais unidades. Isso a torna mais eficiente e, conseqüentemente, uma usina com potencial a adotar a técnica de captura de CO₂. A eficiência e os cálculos de emissão já foram discutidos com mais detalhe no capítulo 4.

6 PROPOSTA DE UM SISTEMA DE CAPTURA PARA UMA USINA TERMELÉTRICA BRASILEIRA

6.1 Aplicação do método de captura em uma usina térmica a carvão

Um dos aspectos mais importantes na implementação de um sistema de captura é o custo envolvido em todo o sistema. Atualmente a captura diminui o rendimento energético das plantas industriais, visto que é necessário o consumo de energia para o funcionamento do sistema de captura de CO₂.

Um sistema que está sendo testado em diversos países para a captura de CO₂ em termelétricas de combustão pulverizada já existentes, é a absorção química por aminas. O esquema, representado pela Figura 6.1, é conhecido como *Retrofit*, pois o sistema de captura é acoplado a uma usina já instalada.

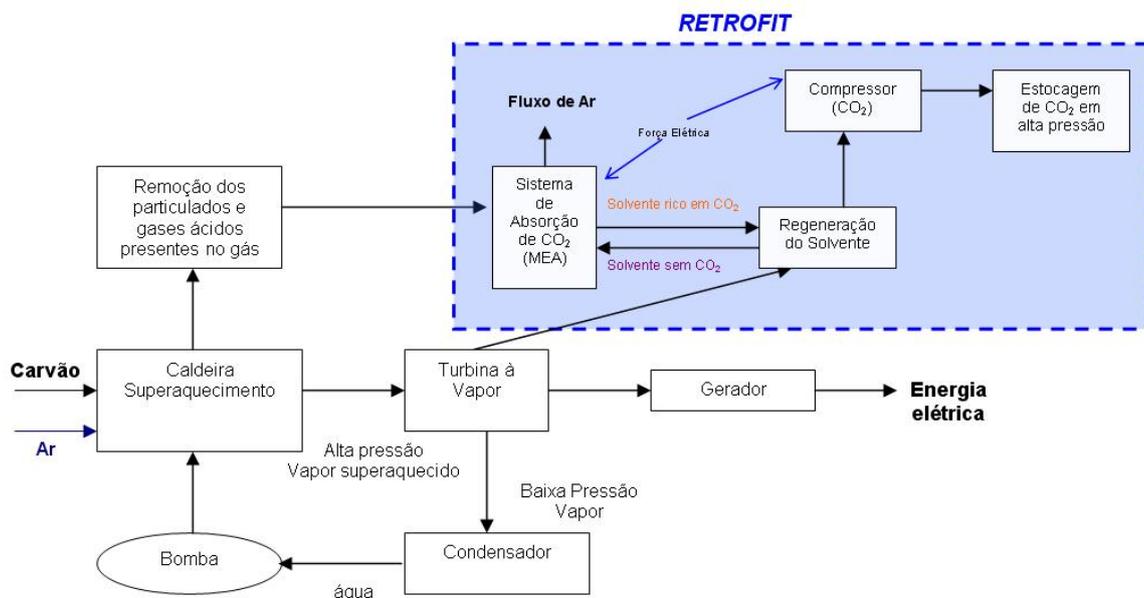


Figura 6.1. Sistema simplificado de combustão pulverizada com captura de CO₂ por absorção química – sistema *Retrofit*.

Fonte: Adaptado de SEKAR, 2005.

O sistema de captura é adicionado no fluxo dos gases que seriam enviados à atmosfera após a realização da remoção do material particulado e dos gases ácidos. Como observado pela Figura 6.1, para a regeneração do solvente é necessária a utilização da energia, que antes seria enviada diretamente para o gerador. Assim, ocorre a necessidade de geração de mais energia para manter a eficiência do processo.

Segundo pesquisa realizada por ESBER III (2006), uma termelétrica que opere em condições subcríticas, com uma eficiência de 34,3%, após a implementação do sistema de captura ela terá uma eficiência de 25,1%, ou seja, perderá aproximadamente 9% de eficiência.

Sistemas de combustão pulverizada quando acoplados a uma caldeira em condições supercríticas minimizam significativamente o custo com a captura de CO₂, em relação a termelétricas que trabalham em sistemas subcríticos simples com baixa eficiência (IEA, 2007).

6.2 Avaliação de áreas para o seqüestro de carbono no sul do Brasil

Existem dois pontos fundamentais para a escolha da área a ser realizado o seqüestro de carbono:

- 1) As fontes emissoras devem ter grandes concentrações de carbono a serem captados e posteriormente estocados.
- 2) O local de captura deve ser próximo ao de armazenamento. Isto facilitará o transporte, o que será menos oneroso, tornando o processo viável.

O armazenamento de CO₂ em carvão fóssil é um dos métodos mais promissores das várias alternativas de seqüestros geológicos atualmente investigados (OBERZINER; SOARES; MOREIRA, 2005). Segundo Sousa; Silva; Rodrigues (2006c), para a estocagem de CO₂ a mina deve ser subterrânea, com, no mínimo, 400 metros de profundidade. A Figura 6.2 exhibe resumidamente os critérios para a estocagem geológica em carvão do CO₂. Estes aspectos devem ser analisados criteriosamente para que se constate o potencial de seqüestro real de uma determinada jazida de carvão. Esta análise está fora do escopo deste trabalho, visto

que o objetivo é a análise de uma técnica de captura de CO₂ a partir das usinas termelétricas brasileiras. Pretende-se apenas indicar uma área potencial para futuros estudos geológicos.

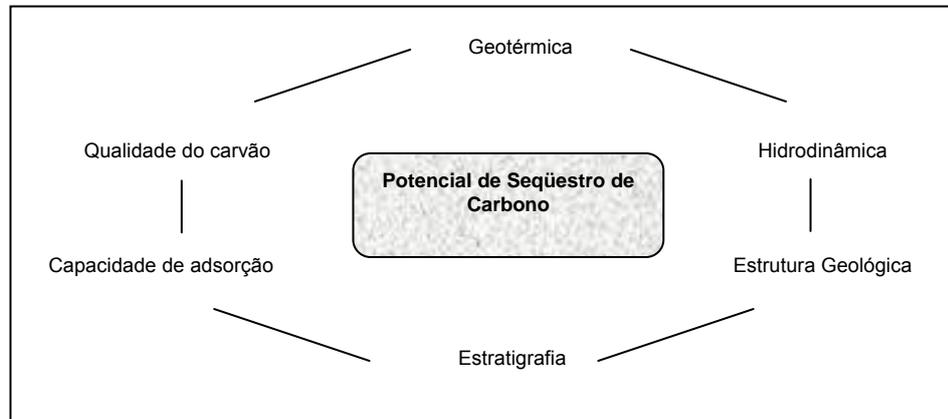


Figura 6.2. Requisitos para sequestro de CO₂ em carvão.

Fonte: Adaptado de SOUSA; SILVA; RODRIGUES, 2006c.

No Brasil, as áreas potenciais para a estocagem geológica do CO₂ em camadas de carvão, bem como as áreas de aplicação da técnica de captura, localizam-se na região sul. O carvão brasileiro, conforme anteriormente comentado, está distribuído geograficamente na região sul.

6.2.1 Rio Grande do Sul

6.2.1.1 Região de Candiota:

No município de Candiota, RS, localizado a 400 km de Porto Alegre, está situada a Usina Termelétrica Presidente Médici – Candiota II, que possui capacidade instalada de 446 MW. Conforme descrito no item 3.2.2 a usina de Candiota encontra-se em fase de ampliação onde será construída a Fase C. Esta ampliação prevê o aumento da capacidade produtiva em cerca de 100%.

Como descrito no item 3.2.1 Candiota abriga a maior jazida de carvão do país possuindo reservas de 1.363×10^6 toneladas de carvão mineral, e produz cerca de $1,7 \times 10^6$ toneladas de carvão ao ano (TEIXEIRA; PIRES, 2002). No entanto, a mina de Candiota não tem a profundidade necessária para a estocagem de CO₂, havendo a

necessidade de transporte para posterior armazenamento. Com isto, ocorre o aumento dos custos envolvidos.

Além da termelétrica existem duas empresas cimenteiras, que a partir de seus processos produtivos também contribuem para as emissões de CO₂.

Segundo reportagem do Jornal Zero Hora (2007), novos caminhos para a geração de energia estão sendo criados. Além da Fase C de Candiota, as termelétricas Seival e Seival II, com empreendimentos da Tractebel Energia e a MPX, respectivamente, estão sendo projetadas para futura utilização.

A Seival tem previsão de início das obras para o ano de 2008, onde possuirá uma capacidade de geração de 500 MW sendo que 68% desta geração já está vendida ao Uruguai. A Seival II terá capacidade de geração de 600 MW, sendo a previsão do início das obras para 2009 com conclusão para 2014. Seus consumidores serão o mercado interno e consumidores livres como as indústrias ou outros estabelecimentos que possuam demandas de energia superiores a 3 MW.

6.2.1.2 Região metropolitana:

As fontes mais prováveis desta região são as usinas de Charqueadas, São Jerônimo e Jacuí I que se encontra em fase de construção. Além disto, existem algumas indústrias de grande porte que geram grandes quantidades de CO₂ devido a utilização de caldeira a carvão e a gás. Alguns exemplos são:

A Companhia Petroquímica do Sul – Copesul, empresa de grande porte localizada no Pólo Petroquímico de Triunfo. Seus produtos são as matérias-primas para as indústrias de 2ª geração do complexo, e o mercado brasileiro e externo.

A Refinaria Alberto Pasqualini – Refap S/A e a Aracruz Celulose, também são indústrias que emitem quantidades significativas de CO₂.

Um dos locais passíveis para a utilização como depósito geológico de CO₂ seria a Mina de Chico Lomã. Esta mina tem uma área de 1200 km², com sete camadas (GOMES et al., 1998), tendo carvão a 600 metros de profundidade (BUNSE, 1984).

6.2.2 Santa Catarina

6.2.2.1 Região de Criciúma:

A fonte de emissão de carbono mais importante é o complexo Jorge Lacerda, localizado na região de Capivari de Baixo localizada a cerca de 63 km de Criciúma (MAPA..., [2007]). Conforme descrito no item 3.2.2 o complexo possui uma capacidade instalada de 857 MW, produzindo anualmente cerca de 854,78 GWh de energia, e atualmente é a maior termelétrica América Latina.

No sul do estado de Santa Catarina existem diversas jazidas. Os recursos totais destas jazidas atingem 4.288×10^6 toneladas, que possuem profundidade de até 800 metros (GOMES et al., 1998). Adaptar o sistema de captura em um local onde há a possibilidade de estoque de CO₂ é uma vantagem, pois reduz o custo de transporte.

6.3 Simulação de um sistema de captura pós-combustão em uma termelétrica brasileira

A partir do estudo realizado é possível fazer uma proposta teórica de um sistema de captura de CO₂ para as usinas termelétricas brasileiras.

Para as usinas novas que ainda estão na fase de projeto a melhor alternativa é estudar detalhadamente o processo de combustão. Operações em condições supercríticas trariam maior eficiência ao processo, o que no futuro ocasionaria menores custos com processos de captura.

Sistemas de captura de pré-combustão como o IGCC são alternativas a serem estudadas, visto sua prevenção na geração de gases provenientes da combustão. Conforme verificado no item 3.3.3 a tecnologia de Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado é considerada a alternativa mais adequada para novos processos, visto sua maior eficiência de conversão de energia e a maior redução na emissão de SO_x e NO_x.

Tecnologias como *Oxyfuel* que utilizam apenas o oxigênio na hora da queima também merecem estudos mais detalhados para a verificação de sua implementação. Este tipo de tecnologia reduz, assim como o IGCC, previamente, a concentração de gases poluentes emitidos após a combustão.

Para sistemas *retrofit*, ou seja, para usinas já projetadas ou em funcionamento, o sistema de captura de CO₂ que mais se adapta às condições reais dos processos de combustão das termelétricas brasileiras é a captura de CO₂ por absorção química. Neste sistema o solvente que comprovadamente possui melhor desempenho em pressões e temperatura similar aos sistemas termelétricos brasileiros é a MEA.

6.3.1 Escolha da localização apropriada para o sistema do seqüestro de CO₂

A Usina de Candiota é uma fonte emissora potencial de CO₂ visto sua grande capacidade de geração de energia e também seu projeto de ampliação. No entanto, sua eficiência de geração é cerca de 25%, o que ainda seria reduzida no processo de captura. Sua localização não permite o armazenamento geológico de CO₂, o que impossibilita o seqüestro de carbono conforme os requisitos básicos necessários para a implementação deste sistema.

Outra fonte emissora potencial é o Complexo Jorge Lacerda. A Unidade 7 do Complexo é a termelétrica brasileira mais atual possuindo maior eficiência energética (cerca de 37%). Esta eficiência se aproxima as termelétricas estrangeiras que estão projetando os processos de captura, o que significa que a perda da eficiência estaria próxima aos processos existentes atualmente. Sua localização favorece o armazenamento geológico de CO₂, pois conforme descrito no item 6.2.2.1, na sua região existem jazidas com profundidades de 800 metros, o que tornaria possível este armazenamento.

Uma outra questão importante é a capacidade de geração. Todas as literaturas encontradas levam em consideração uma usina termelétrica com capacidade de geração de 500 MW. Para sistemas subcríticos estas termelétricas apresentam eficiências em torno de 35%. Apesar da UTLC possuir uma capacidade de geração inferior a 500 MW (363MW), ela faz parte de um complexo de usinas que totalizam 857 MW, e ainda possui as demais características necessárias para o sistema de captura. No que se refere aos custos, como sua geração é menor, equipamentos menores serão necessários para a implementação de um sistema de captura.

6.3.2 Detalhamento da adaptação do sistema para o *input* no sistema de captura de CO₂ por absorção química

Para a utilização da unidade 7 do Complexo Jorge Lacerda como base para a implementação do sistema de captura, faz-se necessário algumas adaptações em seu sistema atual, que serão discutidas neste item.

A escolha do sistema de captura por absorção química se deve ao fato das condições do processo (pressão, vazão entre outros) serem próprias para este tipo de sistema. A escolha da MEA como solvente se dá, pois nestas condições ele apresenta um desempenho até o momento estudado, superior aos demais solventes para as condições do processo (ver item 6.3).

As concentrações de SO_x e NO_x são superiores aos limites suportados no processo de captura. Para a redução a concentrações aceitáveis de SO_x e NO_x faz-se necessário a utilização de tecnologias de dessulfurização de gás (FGD), como uma lavagem de gases. Ainda para chegar a concentrações mais baixas de NO_x também podem ser adotados processos de redução catalítica seletiva (SCR), no entanto, como estes processos possuem custos elevados, então após a inclusão do sistema FGD, deve ser realizado um estudo detalhado de sua real necessidade.

A temperatura dos gases que saem da chaminé da UTLC, conforme informações obtidas junto a Tractebel, ficam em torno de 150°C. Como já visto no item 5.1.4, o fluxo de gás deve ser resfriado à 50°C para entrar no sistema de captura a temperatura. Para isto, faz-se necessário a aquisição de um equipamento que reduza a temperatura. Segundo a literatura consultada, o próprio lavador de gases inserido para a redução de SO_x e NO_x é também responsável pela redução de temperatura. Ainda pode ser realizado o resfriamento através de um trocador de calor tubular com contato direto com o fluxo de água. Para verificar com exatidão o equipamento necessário é importante um estudo direcionado, caso haja interesse da usina implementar o sistema de captura.

Para a redução de materiais particulados as usinas brasileiras já utilizam precipitadores eletrostáticos com eficiência em torno de 98%. Esta eficiência não foi observada nos estudos da JICA em 1996, o que torna necessário um estudo real da eficiência dos precipitadores eletrostáticos. Com a inclusão de um sistema FGD para a redução dos gases emitidos seria necessário um novo estudo para verificar se a

eficiência atual dos precipitadores eletrostáticos já seria suficiente para reduzir as concentrações dos materiais particulados a valores adequados ao sistema de captura

Além das adaptações necessárias do sistema de combustão, ainda é necessário a aquisição do sistema de captura. Este sistema envolve diversos equipamentos como torre de absorção, torre de regeneração do solvente, bombas, compressor, filtros, trocador de calor, tanque de estocagem, tubos e conexões adequados e etc.

O Fluxograma apresentado na Figura 6.3 mostra um esquema básico do sistema de combustão acoplado ao sistema de captura. Neste fluxograma são exibidos os equipamentos necessários para a realização deste processo de acordo com o processo de absorção sugerido por ESBER III (2006), bem como os sistemas que deverão ser estudados para verificar a real necessidade e adaptação.

Todos os equipamentos sugeridos devem ser analisados futuramente de acordo com as condições reais do processo no momento da implementação do sistema. A quantidade de bombas e compressores irá alterar de acordo com as condições com que o gás entrará no sistema de captura.

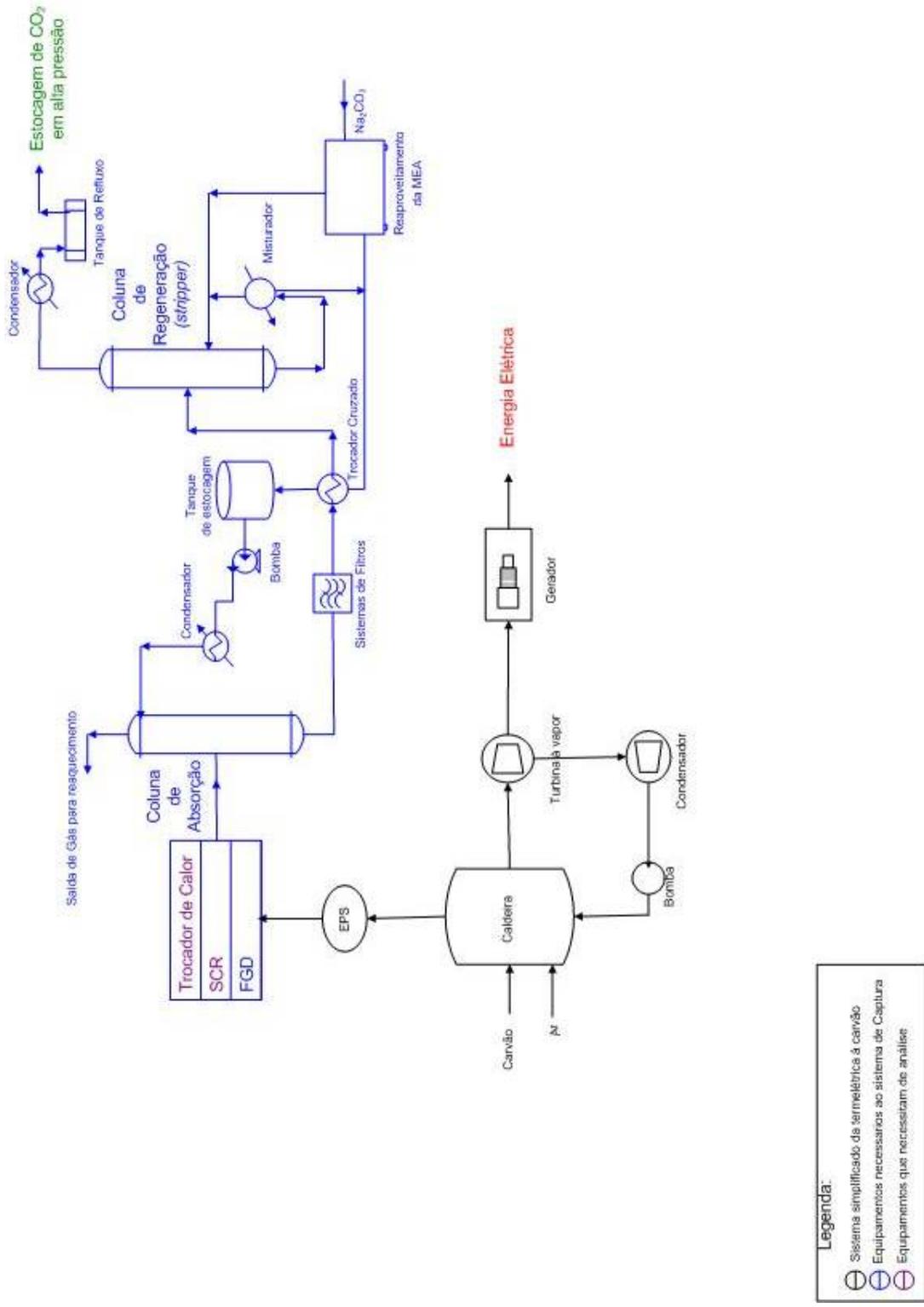


Figura 6.3. Fluxograma simplificado de equipamentos de uma usina termelétrica com o sistema de captura de CO₂.

Para a implementação de um sistema de captura, muitas etapas devem ser executadas. Para sintetizar estas etapas, este trabalho apresenta uma proposta teórica e simplificada de um fluxograma de tomadas de decisões (Figura 6.4) que resume as etapas que devem ser cumpridas para que seja avaliada corretamente a adaptação do sistema de captura para termelétricas já existentes.

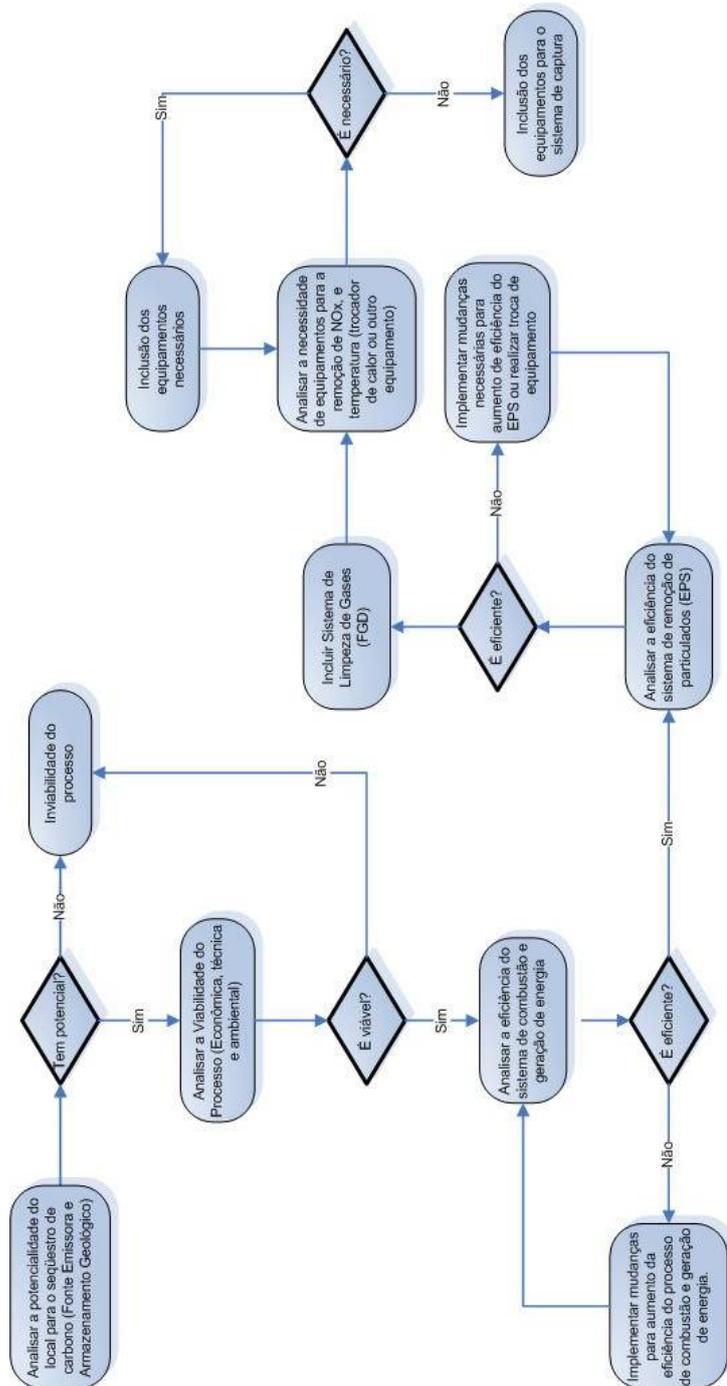


Figura 6.4. Fluxograma de tomadas de decisões para a implementação de um sistema de captura de CO_2 .

Cada etapa apresentada irá envolver uma série de atividades. A pesquisa realizada por este trabalho está inserida em diversas etapas do fluxograma. A partir da pesquisa pode-se concluir que existe um local potencial para o seqüestro de carbono. A técnica de captura a ser utilizada até este momento é por absorção química utilizando como solvente a MEA. Adaptações ao sistema de combustão serão necessárias, pois na remoção de gases é indispensável uma técnica de FGD para reduzir as concentrações dos gases. Após esta implementação, deve ser realizado um estudo para análise da real necessidade de outros equipamentos, para só então passar ao estudo da técnica de captura. Análises mais criteriosas junto às termelétricas são imprescindíveis para concluir se o processo de captura é realmente viável.

7 CONCLUSÕES

Como foi verificado, a combustão de carvão para a geração de energia é uma atividade potencialmente emissora de carbono à atmosfera. Para o ano de 2002, a emissão de carbono atmosférica calculada pela metodologia proposta por este trabalho foi de 1.794 Gg C/ano enquanto a calculada utilizando a metodologia oficial dos inventários de emissão brasileiros foi de 2.144 Gg C/ano.

Esta diferença (aproximadamente 20%) é significativa e deve-se principalmente pela não utilização de critérios mais específicos do carvão brasileiro para o cálculo de emissões pela metodologia oficial. As emissões calculadas neste trabalho também apresentaram diferença da metodologia adotada pela empresa de MDL, que seguiu as orientações do IPCC. Estas diferenças mostram que tais arredondamentos podem causar alterações na linha de base de projetos de MDL. Para saber o quanto é necessário reduzir a emissão para chegar a limites mínimos de CO₂ emitidos, deverão ser adotadas metodologias mais precisas para os cálculos de emissões.

Usinas que estão em fase de projeto devem procurar inserir em sua planta sistemas mais eficientes na remoção de poluentes dos gases de combustão. A utilização de precipitadores eletrostáticos mais eficientes acrescido de um sistema para a limpeza de gases é uma alternativa interessante para o controle de emissões.

Termelétricas que ainda não foram projetadas, devem analisar o sistema a ser adotado para a geração de energia. Tecnologias como a Gaseificação Integrada com Ciclos Combinados (IGCC) estão sendo indicadas, pois a emissão dos gases poluentes é reduzida. Além disto, a eficiência do processo é superior ao sistema de combustão pulverizada.

As usinas térmicas brasileiras em sua maioria são muito antigas, existindo usinas com mais de 50 anos de funcionamento (JICA, 1996). Modernizar os sistemas de combustão para que seja possível aumentar a eficiência do processo e

conseqüentemente reduzir as emissões de CO₂ e outros gases como SO_x e NO_x é uma alternativa para manter de forma sustentável o funcionamento destas usinas.

Não é possível indicar atualmente qual a melhor tecnologia a ser aplicada na captura de CO₂ e acredita-se que várias serão utilizadas no futuro. Para as termelétricas a carvão do Brasil, de acordo com a pesquisa realizada, foi verificado que a sistema de captura que se adapta às condições reais dos processos é a captura por absorção química utilizando a MEA como solvente. A partir dos critérios do sistema de captura, bem como os do seqüestro de carbono, foi constatado que a Unidade 7 do Complexo Jorge Lacerda poderia adaptar um sistema *retrofit* de captura.

Para isto são necessárias adaptações ou mudanças no sistema de combustão atual. Como é premissa do processo de captura, a usina deverá incluir em sua planta um sistema FGD para a remoção de gases, como o SO_x. A partir deste sistema se iniciaria uma análise para ver a necessidade de outros equipamentos para a adaptação em níveis aceitáveis de NO_x, Material Particulado, temperatura.

As concentrações de NO_x, SO_x e Material Particulado contidos nos gases de chaminé são muito superiores às indicadas para o sistema de captura o que indica que possivelmente será necessário a inclusão de outros equipamentos para a remoção destes compostos até o limite aceito para o sistema de captura.

Além disto, os padrões de emissões brasileiros para as termelétricas a carvão ainda estão sendo discutidos, mas já pode ser verificado que estes limites serão bem superiores aos indicados para o sistema de captura de CO₂. Significa dizer que para as usinas adotarem o sistema terão de ir além da legislação em termos de redução de emissões de SO_x, NO_x e Material Particulado. Este esforço deve ser analisado com cautela em um estudo detalhado sobre a viabilidade econômica deste projeto.

8 REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. Annual Books of ASTM Standards: **D 388-95: Standards Classification of Coals by Rank**. Easton, 1996. 166 p.

ASTARITA, Giovanni; SAVAGE, David W.; BISIO, Attilio. **Gas Treating With Chemical Solvents**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

BARROS, Jaime. **Alternativas para o projeto ecológico de produtos**. 2001. 166p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BIODIESELBR ONLINE. **Representação esquemática do efeito estufa**. [2006]. Boletim de Notícias on line Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/i/credito-de-carbono/efeito-estufa.jpg>>. Acesso em: 02 de set. 2006.

BORBA, F. Roberto. **Carvão Mineral**. Balanço Mineral Brasileiro - DNPM. 2001

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Capítulo 8: Carvão Mineral. 2º Ed. Brasília, 2005. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf)>. Acesso em: 07 de out. 2006.

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 8 de 1990. Brasília, 1990. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=105>>. Acesso em: 10 nov. 2007.

_____. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação - COPPE. **First Brazilian Inventory of Anthropogenic Greenhouse gas emissions: Carbon Dioxide emissions from fuel burning: Top-Down Approach**. Rio de Janeiro, 2002. 168 p.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2003: Ano base 2002**. Brasília, 2003. 168 p.

_____. Ministério de Minas e Energia. [2007]. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 15 de mar. 2007.

_____. Ministério de Minas e Energia. **PNE 2030 – Plano Nacional energético nacional 2030: Carvão Mineral**. Brasília, 2006a. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=8213> Acesso em: 19 de set. 2006.

_____. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2006: Ano base 2005**. Rio de Janeiro, 2006b. 188 p.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **O que é Agenda 21**. [2006c]. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=18&idConteudo=597>>. Acesso em: 14 ago. 2006.

_____. **Capítulo 34: Transferência de Tecnologia Ambientalmente Saudável, cooperação e fortalecimento institucional**. [2006d]. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=18&idConteudo=877>>. Acesso em: 20 nov. 2006.

BUNSE, Heinrich A. W.. **A mineração de Carvão no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria de Energia, Minas e Comunicações, 1984. 111p.

CARBON Dioxide Capture and Storage. In: Intergovernmental Panel on Climate. Geneva, [2005]. Disponível em: < <http://www.ipcc.ch/> >. Acesso em: 14 de jun. 2006.

CARVÃO MINERAL. Disponível em: <<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/carvao.html>>. Acesso em: 10 ago. 2006.

CIENTEC (Brasil). Geraldo Mario Rohde (Org.). **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: Aspectos Técnicos e Ambientais**. Porto Alegre, 2006. 1 v.

CIRES. ***Carbon Cycle Science Supply Side Sector: Sequestration Technologies***. [2006]. Disponível em: <http://sciencepolicy.colorado.edu/carboncycle/supply/sequestration.html> >. Acesso em: 10 de ago. 2006.

COMPET. [2006]. Disponível em: <http://200.179.65.50/noticias/noticia.php?segmento=estudantes&id_noticia=792>. Acesso: 04 de jan. 2008.

COMPANHIA DE GERAÇÃO TÉRMICA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Fase C Candiota**. Rio Grande do Sul, [2005]. Disponível em: <http://www.cgtee.gov.br/content/desenvolvimento/fase_candiota.php>. Acesso em: 14 de out. 2006.

CONSOLIDAÇÃO do Balanço de Carbono. In: Economia e Energia. Ano X N°56, jun./jul. 2006. Disponível em: <http://ecen.com/eee56/eee56p/ecen_56p.htm>. Acesso em: 14 de ago. 2006.

CULLINANE, T. John. ***Thermodynamics and Kinetics of Aqueous Piperazine with Potassium Carbonate for Carbon Dioxide Absorption***. 2005. 318p. Tese para o título de PhD - The University of Texas at Austin, Texas, EUA, 2005.

DAVISON, John. Performance and costs of power plants with capture and storage of CO₂. UK: **Energy: Science Direct**. Fevereiro, 2006

DE LUCA, J. Francisco. **Modelo Cluster Eco-industrial de Desenvolvimento Regional: O Pólo da Mineração do Carvão no Sul de Santa Catarina**. 2001. 328p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

ECONOMIA & Energia Disponível em: <<http://www.ecen.com>>. Acesso em: 10 fev. 2007.

ELETROBRÁS (Brasil). **Acesso as Contas Públicas**. Disponível em: <<http://www.eletronbras.gov.br/elb/portal/data/Pages/LUMISF909823AITEMIDPTBRIE.htm>>. Acesso em: 01 ago. 2007.

EMBRAPA. **Efeito Estufa: Contribuições dos gases ao efeito estufa**. [2006]. Disponível em: <<http://www.cnpma.embrapa.br/projetos/index.php3?sec=agrog:::81>>. Acesso em 01 de set. 2006.

ESBER III George Salem. **Carbon Dioxide Capture Technology for the Coal-Powered Electricity Industry: A Systematic Prioritization of Research Needs**. Master of Science, Massachusetts Institute of Technology June 2006.

ESRU - *Strathclyde University Business School*. **The Capture and Sequestration of Carbon Dioxide**. Inglaterra, [2003]. Disponível em: <http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/0203/carbon_sequestration/Carbon%20Sequestration-424.htm>. Acesso em: 17 de set. 2006.

ESTADÃO. **Florestas invisíveis sustentam a vida nos oceanos**. [2006]. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/ext/ciencia/oceanos/biodiversidade/biodiversidade9.htm>>. Acesso em: 14 de nov. 2006.

GOMES, et. al. Carvão Fóssil. **Estudos Avançados**, São Paulo v. 12, nº.33, Maio/ago. 1998.

GUPTA, Murlidhar; COYLE, Irene; THAMBIMUTHU, Kelly. **CO₂ Capture technologies and Opportunities in Canada** In: 1st Canadian CC&S Technology Roadmap Workshop, 2003, Calgary, Alberta, Canadá.

HERZOG H.; GOLOMB B. **Carbon capture and storage from fossil fuel use**, Encyclopedia of Energy, 2004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Clean Development Mechanism ([2007]): Emission factor for the Brazilian South-Southeast-Midwest interconnected grid**. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/>>. Acesso em: 15 mar. 2007.

_____. **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization, May, 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE ENGENHARIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Base de Dados de Rochas do Museu Geológico**. Rio de Janeiro, [2006]. Disponível em: <<http://e-Geo.ineti.pt/bds/geobases/petrografia/rochas.aspx?id=43&Grupo=0&PesqLivre=>>>. Acesso em: 25 de out. 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO₂ Capture Ready Plants**: Technical Study Report Number 2007/4. UK, 2007.

_____. **Prospects for CO₂ Capture and Storage**, OECD/IEA, Paris, 2004

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (Japão). *The Study on Evaluation of Environmental Quality in Regions under Influence of Coal Steam Power Plants in the Federal Republic of Brazil*: Final Report. Tokyo, 1997.

LEITE, Marcelo. **6 bilhões de pessoas. Será demais?** Jornal Folha de São Paulo. São Paulo 02 julho 1999. Caderno Especial.

MAGRINI, Alessandra et al. **Monitoração de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Usinas Termelétricas no Brasil – Fase de Diagnóstico**. Programa de Planejamento Energético - PPE/COPPE/UFRJ. Relatório Síntese. Rio de Janeiro, Dezembro, 2001.

MAPA interativo de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www.mapainterativo.ciasc.gov.br/pontoaponto.phtml>> Acesso em: 27 de Out. 2007.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *The Future of coal: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts, 2007. 175p.

MÜLLER, Alberto Antônio et al. **Perfil analítico do carvão**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 1987.

NETO, Vicente Corrêa. **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-açúcar**. 2001. 174f. Tese (Mestrado em Engenharia) – Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

NEVES, Sérgio Bello. Captura de CO₂: Tecnologias para a separação de CO₂ de correntes industriais gasosas. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE SEQUESTRO DE CARBONO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 1., 2007, Natal. **Mini-Curso**. p. 1 - 96.

OBERZINER, André L B; SOARES, José L.; MOREIRA, Regina. **Seqüestro de CO₂ em carvão mineral catarinense**. In: VI COBEQ – Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 6., 2005, Campinas. Resumos aceitos Campinas: UNICAMP, 2005.

PARANÁ. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Resolução SEMA 054/06. Disponível em: http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/meioambiente/res_054_06.pdf. Acesso em: out. 2007.

PENSA ENERGIA (Brasil). Consumo de energia vai crescer 71% até 2030. Disponível em: <http://pensaenergia.blogspot.com/2006/06/consumo-de-energia-vai-crescer-71-at.html>. Acesso em: 20 jun. 2006.

PIRES, Marçal. **Caracterização e modelamento das emissões atmosféricas da Termelétrica Jacuí I**, Dissertação, (PPGEMM/UFRGS), Porto Alegre, 1990.

_____. **Estimativa dos coeficientes de emissão de carbono para o carvão mineral brasileiro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 10. Rio de Janeiro: 2004. p. 239 - 247.

_____. **Efeito Estufa**. Porto Alegre, 2006. Material didático: 1 Slide de Power Point

PORTO, Francisco Nelson. Informação. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <le.ticia@terra.com.br>. em: 11 out. 2007.

RAMOS, Jaime. **Alternativas para o projeto ecológico de produtos**. 2001. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Pós Graduação em Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

RIO GRANDE DO SUL. Minuta de Norma: Limites máximos de emissão para poluentes atmosféricos gerados por fontes novas fixas - caldeiras com queima de

carvão mineral para geração de vapor de processo e/ou de energia elétrica. Porto Alegre, 2008. 5 p.

ROCCO, Marcel Ricardo. **Gases do efeito estufa**. [2006] Disponível em: <<http://www.geocities.com/Augusta/7135/estufagasesde.htm>>. Acesso em: 02 de set. 2006.

SILVA, Carlos Alberto; RANGEL, Otacílio José Passos; GUILHERME, Luis Roberto. **Sistema de Plantio direto e seqüestro de carbono**. [2006]. Disponível em: <<http://www.dcs.ufla.br/Lemos/pdf/DBO%20Agrotecnologia.pdf>>. Acesso em: 15 de nov. 2006.

SILVA, M.B.; KALKREUTH, W. Petrological and geochemical characterization of Candiota coal seams, Brazil — Implication for coal facies interpretations and coal rank. **International Journal of Coal Geology: Science Direct**, v. 64, p 217– 238, 2005.

SEKAR, Ram C. **Carbón Dioxide Capture from Coal-Fired Power Plants: A Real Options Analysis**. Massachusetts Institute of Technology, Relatório MIT LFEE 2005-002 RP, 67f., Maio 2005.

_____. **Carvão: enquadramento no conjunto dos caustobiólitos e definição**. In: Reunião de Armazenamento de CO₂ em camada de Carvão – Seminário Internacional Sobre Seqüestro de Carbono e Mudanças Climáticas. PUCRS, 2006a

_____. **Carvões Brasileiros**. Reunião de Armazenamento de CO₂ em camada de Carvão – Seminário Internacional Sobre Seqüestro de Carbono e Mudanças Climáticas. PUCRS, 2006b.

_____. **CO₂ sequestration in coal seams**. Reunião de Armazenamento de CO₂ em camada de Carvão – Seminário Internacional Sobre Seqüestro de Carbono e Mudanças Climáticas. PUCRS, 2006c.

SÜFFERT, T.. **Carvão nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre : CPRM, 1997. 39 p. : il. - (Informe de Recursos Minerais, Série Oportunidades Minerais - Exame Atualizado de Projetos, n.º 21)

TEIXEIRA, Elba Calessio; PIRES, Marçal José Rodrigues (Org.). **Meio Ambiente e Carvão: Impactos da Exploração e Utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002. 498 p.

TRACTEBEL ENERGIA. [2007a]. Disponível em: <<http://www.tractebelenergia.com.br/>>. Acesso em: 10 de ago. 2007.

_____. CEUT/Meio Ambiente (Brasil). **Monitoramento das Emissões Atmosféricas: Complexo Termelétrico Jorge Lacerda - CTJL**. Capivari de Baixo, 2007b. 31 p.

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

XAVIER, E. Edina. **Termeletricidade no Brasil – Proposta metodológica para inventário das emissões aéreas e sua aplicação para o caso do CO₂**. 2004. 335p. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ZERO HORA (Jornal). Porto Alegre, 28 dez. 2007.

WALLACE, David. **Capture and storage of CO₂: What needs to be done?** [2000]. Disponível em: < <http://www.earthscope.org/r1/iea05/iea05.html> >. Acesso em: 20 de ago. 2006.