



**O ESTADO DA ARTE DA CAPTURA E ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE  
CO<sub>2</sub> COMO FORMA DE MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Flavia Souza da Silveira Cavalcante

Monografia em Engenharia Química.

**Orientador:  
Aline Sarmiento Procópio, DSc.**

Novembro de 2008.

**O ESTADO DA ARTE DA CAPTURA E ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE  
CO<sub>2</sub> COMO FORMA DE MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

*Flavia Souza da Silveira Cavalcante*

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química,  
como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovador por:

Denize Dias de Carvalho, D.Sc.

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Ladimir José de Carvalho, D.Sc.

Orientado por:

Aline Sarmiento Procópio, DSc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Novembro de 2008

Cavalcante, Flavia Souza da Silveira.

O Estado da Arte da Captura e Armazenamento Geológico de CO<sub>2</sub> como forma de Mitigação das Mudanças Climáticas, Flavia Souza da Silveira Cavalcante, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2008

Orientador: Aline Sarmiento Procópio

1. Aquecimento global, 2. Captura e Armazenamento de CO<sub>2</sub>, 3. Sleipner, 4. Monografia-(Graduação UFRJ/EQ) 5. Aline Sarmiento Procópio. O Estado da Arte da Captura e Armazenamento Geológico de CO<sub>2</sub> como forma de Mitigação das Mudanças Climáticas.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus por todas as maravilhas que têm realizado em minha vida, por dar-me saúde, inteligência, sabedoria e força superando novos obstáculos e por me fazer vitoriosa neste desafio que ora se encerra.

“A Deus toda a honra e toda a glória sempre”

Ao meu marido e companheiro Carlos pelo amor, carinho, compreensão, atenção e por estar sempre ao meu lado, não somente nos bons momentos, mas principalmente naqueles de maior dificuldade. Nas noites em claro estudando, onde achava não haver mais saída, você estava lá comigo, me erguendo e não me deixando fraquejar. Agradeço a Deus por ter colocado você em meu caminho e obrigada por você existir em minha vida. Te amo muito!

Aos meus pais Claudia e Jorge, aos meus irmãos Fabiana, Matheus, Thiago e Leik e à minha avó Norma pelos ensinamentos transmitidos que serviram como verdadeiros pilares para a minha vida, me tornando a pessoa que sou hoje. Agradeço pelo amor, carinho e educação, vocês foram a base de tudo. Amo vocês!

À professora Aline por ter me orientado na realização desta monografia, bem como pela sua atenção e apoio no caminhar desta jornada.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos a obtenção de grau de Engenheiro Químico.

## **O ESTADO DA ARTE DA CAPTURA E ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub> COMO FORMA DE MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Flavia Souza da Silveira Cavalcante

Julho, 2008

Orientador responsável: Prof. Aline Sarmiento Procópio, DSc.

A partir das últimas décadas, a questão ambiental tornou-se uma preocupação mundial passando a ser tratada com seriedade a partir do momento que o homem percebe que a sua sobrevivência está em risco. As mudanças globais do clima já estão se manifestando de diferentes formas, destacando-se, principalmente, o aumento da temperatura, maior frequência e intensidade de eventos extremos, retrações de geleiras e o aumento do nível dos oceanos. Um tema atual e de grande importância está centrado na redução das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, pelo fato deste ser o gás que mais contribui para o agravamento das mudanças climáticas, sobretudo para o aumento do aquecimento global. Diante deste cenário, surge o emprego da palavra “mitigação”, a qual deve ser encarada como um investimento para evitar riscos de severas consequências futuras. O armazenamento de dióxido de carbono em formações geológicas profundas através do projeto denominado *Dioxide Carbon Capture and Storage* (CCS) é, no momento, a solução mais promissora para atenuar os problemas climáticos que vêm sendo sentidos e observados bem como reduzir e estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera. O estudo introduz esse tema e apresenta as principais características do Projeto Sleipner, pioneiro mundial em CCS, assim como a posição atual do Brasil sobre essa questão.

## SUMÁRIO

Capítulo I - Introdução.....	1
I.1 O Aquecimento global.....	1
I.2 O Armazenamento Geológico como Mitigação das Mudanças Climáticas.....	4
Capítulo II – Objetivos.....	6
Capítulo III – As Mudanças Climáticas Globais .....	7
III.1 A Importância do IPCC e do Tratado de Quioto.....	7
III.2 Alterações Climáticas Atuais e Projeções de Futuras Alterações.....	11
III.3 A Interferência do Setor Energético.....	13
Capítulo IV - Captura, Transporte, Armazenamento e Monitoramento do CO <sub>2</sub> .....	17
IV.1 Captura.....	18
IV.2 Transporte.....	22
IV.3 Armazenamento.....	24
IV.4 Monitoramento.....	30
Capítulo V - Projetos de Seqüestro de CO <sub>2</sub> no Mundo.....	35
V.1 Pioneirismo Sleipner.....	37
V.2 Principais Projetos e Oportunidades de Implantação da Tecnologia CCS no Brasil.....	41
Capítulo VI - Conclusões.....	44
Referências Bibliográficas.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais gases de efeito estufa e suas respectivas fontes de emissão.....	2
Tabela 2 - Total das emissões de dióxido de carbono das Partes do Anexo I em 1990, para os fins do Artigo 25 do Tratado de Quioto .....	9
Tabela 3 - Valores, referentes às emissões de CO <sub>2</sub> derivadas da queima de combustíveis fósseis, representados em Gg, assim como a variação, em termos %, das emissões de CO <sub>2</sub> originadas em diferentes fontes fósseis, compreendidas no período de 1990-1994.....	14
Tabela 4 - Potencial de seqüestro geológico de carbono em diferentes reservatórios dados em gigatoneladas de carvão.....	26
Tabela 5 - Informações relevantes dos projetos CCS indicando: nome, cidade, ano de início da injeção de CO <sub>2</sub> , taxa diária de injeção, capacidade total de armazenamento.....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação gráfica, em relação à contribuição, por setor, em termos percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> referentes ao ano de 1994.....	3
Figura 2- Variações da temperatura entre 1850 e 2000. ....	4
Figura 3- Proporção das emissões globais de CO <sub>2</sub> por países.....	10
Figura 4- Variação da temperatura na superfície da Terra nos últimos 140 anos .....	12
Figura 5- Emissões mundiais de CO <sub>2</sub> por tipo de Combustível Fóssil considerando o cenário de referência.....	15
Figura 6- Dados históricos e projeções do consumo mundial de energia, em quadrilhões de Btu, referentes ao período de 1980 a 2030. ....	16
Figura 7- Fluxograma representativo do processo de captura pós-combustão.....	21
Figura 8- Fluxograma representativo do processo de captura oxi-combustão.....	21
Figura 9- Fluxograma representativo do processo de captura pré-combustão.....	22
Figura 10- Reservatório típico de petróleo e gás, indicando a localização das substâncias presentes na formação geológica, assim como a presença das camadas de rocha permeável e porosa.....	28
Figura 11- Processo de injeção de CO <sub>2</sub> , em campos de petróleo e gás .....	28
Figura 12- Início dos principais mecanismos de aprisionamento de CO <sub>2</sub> após injeção em formações salinas profundas.....	29



Figura 13- Quantidade estimada de CO <sub>2</sub> injetado na subsuperfície, em milhões de toneladas, até 2010 para os principais projetos CCS.....	35
Figura 14- Foto do Projeto Sleipner.....	38
Figura 15- Técnica de monitoramento do CO <sub>2</sub> injetado na formação UTSIRA.....	40
Figura 16- Projeto Sleipner indicando a localização das plataformas A e T e da formação Utsira.....	41

## Capítulo I – Introdução

### *1.1) O Aquecimento Global*

A Terra, ao longo de sua história evolutiva, sofreu períodos extremos de resfriamento e aquecimento, como as eras glaciais. Essas mudanças podem ser atribuídas à variabilidade natural do clima, variações da radiação solar, às atividades vulcânicas e alterações no balanço de energia do planeta. Porém, sobretudo nos últimos 150 anos, o clima vem sofrendo mudanças nunca antes sentidas, não restando dúvidas da contribuição das atividades antrópicas para o acúmulo de GEE (gases de efeito estufa) na atmosfera (IPCC, 2001; Marini, 2007).

A radiação solar recebida pela Terra no topo da atmosfera terrestre ( $343 \text{ Wm}^{-2}$ ) é absorvida pelas nuvens e pelos gases atmosféricos; cerca de 31% são refletidos de volta para o espaço e 44% são absorvidos na atmosfera pela presença desses gases, aerossóis e pelas nuvens. O restante é absorvido pela superfície da Terra (solos, vegetação e oceanos), sendo transformado em calor e re-irradiado sob a forma de radiação infravermelha. Porém alguns gases conseguem absorver a radiação infravermelha retendo, com isso, o calor na atmosfera. É o chamado efeito estufa, o qual permite que a temperatura global média na superfície do planeta seja, aproximadamente,  $15^{\circ}\text{C}$ . No entanto, as atividades humanas, principalmente a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento têm intensificado consideravelmente o efeito estufa natural, provocando o aquecimento global. O vapor de água é o mais poderoso gás de efeito de estufa, ou seja, absorve uma maior quantidade de radiação infravermelha; porém o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é o mais importante pelo fato deste gás ser emitido em concentrações muito altas na atmosfera (Ribas, 2008; IPCC, 2007).

O efeito estufa é um fenômeno natural observado em todos os planetas do sistema solar, onde os principais gases responsáveis por esse efeito são: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor d'água, metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido de nitrogênio ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ). A Tabela 1 apresenta os principais gases de efeito estufa, suas respectivas origens e o tempo de permanência de cada gás na atmosfera. O aquecimento global surge como uma consequência do efeito estufa, que por si só não constitui um problema, pelo contrário, é essencial para a existência de vida na Terra. Caso estes gases não existissem, estima-se que a temperatura do planeta seria  $33^{\circ}\text{C}$  mais fria, ou seja, ficaria na faixa de  $-18^{\circ}\text{C}$ , não permitindo a

existência de vida humana na Terra. O problema surge com o aumento desenfreado das concentrações desses gases na atmosfera, que está sendo observado desde o último século, causando sérias alterações climáticas, sobretudo uma grande elevação de temperatura na Terra (MCT, 2008a; CEPAC, 2008a).

Qualquer desequilíbrio ou perturbação no balanço de energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera, sendo influenciados principalmente pelo aumento da concentração de GEE e de aerossóis, ocasiona mudanças climáticas como forma de restabelecer o equilíbrio. Essas mudanças podem ser expressas em termo de forçamento radioativo, o qual mede a importância da influência de um fator na alteração do equilíbrio. Esse forçamento, expresso em  $W/m^2$ , pode ser positivo ou negativo, provocando, respectivamente, o aquecimento ou o resfriamento da superfície terrestre (IPCC, 2007).

*Tabela 1 Principais gases de efeito estufa e suas respectivas fontes de emissão.*

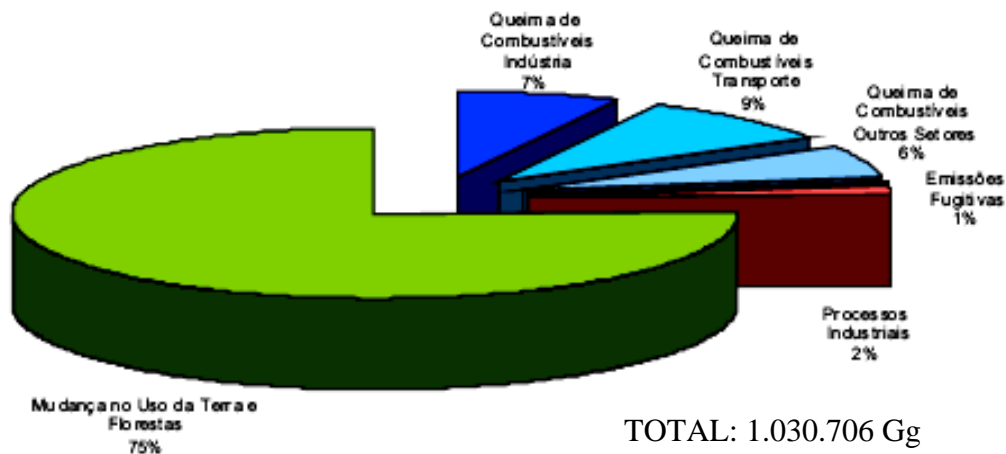
<i>Gás</i>	<i>Origem</i>	<i>Tempo de residência na atmosfera</i>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	<b>Natural:</b> oceanos, decomposição vegetal e respiração animal <b>Humana:</b> combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás)	120 anos
Metano (CH <sub>4</sub> )	<b>Natural:</b> decomposição vegetal e animal <b>Humana:</b> resíduos gasosos, gado e produção de petróleo	10 anos
Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	<b>Natural:</b> decomposição sob a terra. <b>Humana:</b> fabricação de fertilizantes e combustão de petróleo	150 anos

*Fonte: Bassetto et al., 2006.*

A Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra no século XVIII, possibilitou o uso de máquinas em grande escala, sendo a principal responsável pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, sobretudo de CO<sub>2</sub>. Este marco na história está diretamente associado ao aumento do uso de combustíveis fósseis como o carvão, derivados de petróleo e gás natural, sendo estes as principais fontes de energia da época. Este fato mostra, de forma clara, a influência impactante das atividades humanas sobre a mudança do clima (Renner, 2004; Marengo, 2006).

Dentre as várias conseqüências causadas pelo efeito estufa, o IPCC em seu 4º Relatório de Avaliação mostra algumas, tais como: aumento de secas, derretimento das calotas polares com conseqüente aumento do nível do mar e inundação de áreas costeiras; acidificação dos oceanos; aparecimento de doenças transmitidas por mosquitos e por outros vetores como também de doenças cardiorespiratórias; maior freqüência de precipitações pesadas, furacões, ciclones e risco de extinção de 20 a 30% de todas as espécies de animais e plantas. Através do cenário descrito, percebe-se a necessidade de buscar a diminuição das emissões antrópicas dos gases de efeito estufa, pois a maior preocupação reside na acumulação progressiva desses gases, visto que os problemas relacionados às mudanças do clima verificados no presente são a resposta do clima à ação do homem ocorrida há décadas (IPCC, 2007).

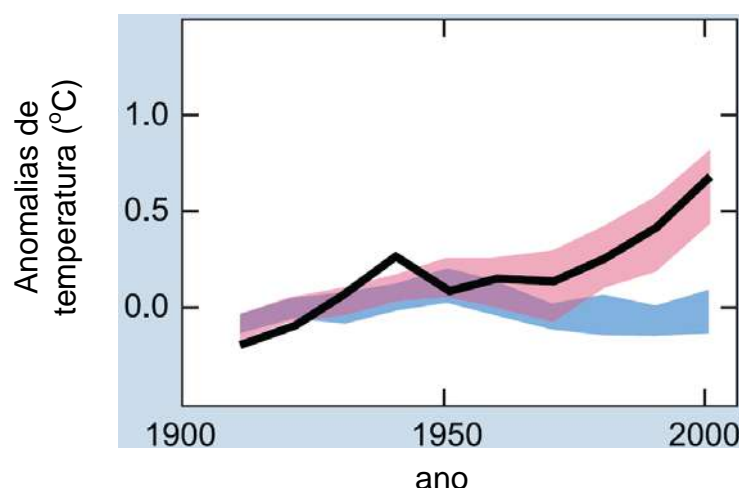
As principais fontes responsáveis pela emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera são as mudanças no uso da terra e florestas (75%), queima de combustíveis no transporte (9%), queima de combustíveis na indústria (7%), queima de combustíveis em outros setores (6%), processos industriais (2%) e emissões fugitivas (1%), conforme apresentado na figura 1.



**Figura 1** Representação gráfica, em relação à contribuição por setor, em termos percentuais, das emissões de CO<sub>2</sub> referentes ao ano de 1994. **Fonte:** Paciornik, 2007.

A identificação da influência humana na mudança do clima foi um dos principais assuntos analisados pelo 3º Relatório de Avaliação do IPCC, em 2001. Neste mesmo relatório foram desenvolvidos cenários com o objetivo de realizar projeções relacionadas às mudanças climáticas. Observou-se que os modelos não conseguem reproduzir o

aquecimento observado quando executado usando apenas os fatores naturais. Porém, ao incluir as forçantes antrópicas, os modelos conseguem simular o ocorrido nas últimas décadas. Segundo Marengo (2007), as mudanças observadas resultantes de combinações de efeitos antropogênicos e forçamentos naturais são consistentes com simulações realizadas e baseadas em princípios físicos, indicando que o forçamento natural, resultante da variação solar e atividades vulcânicas, não pode isoladamente explicar a mudança do clima observada em relação ao substancial aumento de temperatura na atmosfera, conforme pode ser visto na figura 2.



**Figura 2** Anomalias de temperatura entre 1900 e 2000. A linha preta representa observações de mudanças de temperatura médias globais realizadas por instrumentos. O intervalo em rosa representa os resultados de simulações de diversos modelos incluindo as atividades antrópicas e naturais; em azul simulações assumindo apenas variações naturais (atividade solar e vulcões), sem interferência humana. **Fonte:** IPCC, 2007.

## *1.2) O armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> como mitigação das mudanças climáticas*

A influência das atividades humanas sobre o aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera é cada vez maior e mais evidente, assim como os conseqüentes danos ambientais gerados. Percebe-se que o mundo ainda está muito longe de alcançar as metas estabelecidas pelo Protocolo de Quioto (redução de 5,2% na emissão de CO<sub>2</sub> em relação aos níveis de 1990), haja vista que de 1990 a 2006 houve um aumento

de cerca de 80% das emissões de CO<sub>2</sub>. Segundo o IPCC (2007), a concentração global de CO<sub>2</sub> aumentou, desde a fase pré-industrial até 2005, de 280 para 379 ppm, excedendo, neste mesmo ano, a faixa natural dos últimos 650.000 anos, que era de 180 a 300 ppm. A taxa de aumento da concentração anual de dióxido de carbono foi a mais elevada durante os últimos 10 anos, apresentando, de 1995 a 2005, uma média de 1,9 ppm por ano, desde o início das medições atmosféricas diretas contínuas. Já a concentração atmosférica de metano (CH<sub>4</sub>) passou de 715 ppb, na era pré-industrial para 1.732 ppb, no início da década de 90 e para 1.774 ppb, em 2005, havendo também uma elevação da concentração de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que passou de 270 ppb, na era pré-industrial, para 319 ppb, em 2005 .

Em relação ao setor energético, as projeções realizadas revelam um aumento na demanda por combustíveis fósseis, ou seja, uma participação cada vez maior das fontes de energia primária na matriz energética mundial, aumentando conseqüentemente as emissões de dióxido de carbono na atmosfera. Dados do IPCC (2005) estimam as futuras emissões de CO<sub>2</sub> variando de 29 a 44 GtCO<sub>2</sub> por ano em 2020 e de 23 a 84 GtCO<sub>2</sub> por ano em 2050. Diante desse cenário percebe-se a necessidade de adoção de medidas urgentes no combate às mudanças climáticas globais através da estabilização das concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> a fim de evitar ou minimizar possíveis catástrofes ambientais.

O projeto de captura e armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> surge como uma tecnologia viável para mitigar as mudanças climáticas, evitando que grandes concentrações de CO<sub>2</sub> sejam emitidas para a atmosfera, principalmente aquelas oriundas de grandes fontes estacionárias, como as centrais de geração de energia, contribuindo para a estabilização dos níveis de CO<sub>2</sub> atmosférico, diminuindo, portanto, os graves impactos ambientais, à economia e à sociedade. De uma forma geral, o CCS (*Dioxide Carbon Capture and Storage*) consiste basicamente em separar o CO<sub>2</sub> emitido nas grandes plantas industriais e centrais energéticas e armazená-lo em subsuperfície, a fim de garantir um armazenamento seguro a longo prazo. Logo, esta tecnologia permitiria a continuação do uso dos combustíveis fósseis, porém, com baixas emissões de gases com efeito de estufa.

## Capítulo II - Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é apresentar como opção de mitigação das mudanças climáticas o projeto de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> em formações geológicas profundas (CCS- *Dioxide Carbon Capture and Storage*), a fim de estabilizar os níveis de gases de efeito estufa na atmosfera. Para isso, serão abordados os seguintes temas:

- Atual situação das alterações climáticas no mundo, o aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera, o agravamento do aquecimento global e suas conseqüências;
- A importância da criação de um órgão governamental mundial (IPCC) para avaliação dos potenciais impactos negativos e fornecimento de opções de adaptação e mitigação mediante as mudanças climáticas;
- A interferência do setor energético no aquecimento global, bem como a evolução das emissões de CO<sub>2</sub> ao longo dos anos e suas projeções futuras;
- Descrição dos processos de captura, transporte, armazenamento e monitoramento do CO<sub>2</sub> injetado em diversos reservatórios geológicos;
- Projetos CCS existentes no mundo, dando ênfase ao projeto Sleipner, pioneiro na área de seqüestro de CO<sub>2</sub>, bem como informar como o Brasil se encontra diante dessa tecnologia.

## Capítulo III – As Mudanças Climáticas Globais

### *III.1) A importância do IPCC e do Tratado de Quioto*

As mudanças climáticas se tornaram uma questão mundial, havendo a necessidade de obtenção de fontes de informações objetivas e confiáveis sobre as causas das alterações climáticas, seu potencial sobre o meio ambiente e suas possíveis conseqüências sócio-econômicas, bem como as opções de mitigação e adaptação a essas transformações. Com isso, em 1988, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O IPCC é o maior órgão científico mundial que fornece informações baseadas em evidências científicas, possuindo o papel de avaliar, de forma objetiva e transparente, as informações técnicas científicas e sócio-econômicas relevantes para a compreensão das mudanças climáticas, bem como fornecer seus potenciais impactos e opções de adaptação e mitigação (UNEP, 2004).

Em 1990, as conclusões do primeiro Relatório de Avaliação do IPCC desempenharam um papel decisivo no processo que conduziu à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC), em 1992. Esta fornece a base de esforços globais a fim de combater o aquecimento global, possuindo como principal objetivo a estabilização das concentrações de GEE na atmosfera a um nível que impeça perigosas interferências antropogênicas no sistema climático (UNEP, 2004; UNFCCC, 2008).

O 2º Relatório de Avaliação do IPCC (1996) apresentou provas científicas de que as atividades humanas já poderiam estar exercendo influência no clima. Este relatório forneceu o principal elemento para as negociações do Tratado de Quioto, em 1997 e para o Terceiro Relatório de Avaliação, em 2001 (Santos, 2000; UNEP, 2004). O Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC baseia-se nas avaliações anteriores e incorpora novos resultados descrevendo o atual estado de compreensão do sistema climático e fornece estimativas de cenários futuros dos efeitos das mudanças climáticas, assim como sua evolução e incertezas. O 4º Relatório possui como principais tópicos das mudanças climáticas observadas, bem como suas causas e efeitos sobre os sistemas naturais e humanos, as projeções de futuras mudanças climáticas, seus impactos em diferentes cenários e as possíveis formas de mitigação e adaptação a estas alterações (UNEP, 2004).



O Tratado de Quioto foi o resultado da 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP-3), realizada no Japão, em 1997. Para o Tratado entrar em vigor era necessário ser ratificado por, pelo menos, cinquenta e cinco países, sendo estes responsáveis por, pelo menos, 55% das emissões globais de GEE. Em fevereiro de 2005, com a adesão da Rússia, o Tratado entrou em vigor. O Tratado consiste num acordo internacional que exige que as Partes incluídas no Anexo I (países industrializados) reduzam em 5,2% suas emissões de gases de efeito estufa em relação aos níveis emitidos em 1990; sendo de 2008 a 2012 o primeiro período de compromisso para os novos limites serem alcançados (MCT, 2008b).

Em 2001 os Estados Unidos, país que mais emite dióxido de carbono na atmosfera, se negou a assinar o referido tratado, alegando que o corte nas emissões provocaria um impacto negativo sobre a economia norte-americana e que o acordo não exigia que países com elevados níveis de crescimento, como Índia e China reduzissem suas emissões. Como solução, os EUA optaram por investir no desenvolvimento de novas fontes de energia não poluentes através da diversificação da sua matriz energética (USEV, 2008; USDS, 2005).

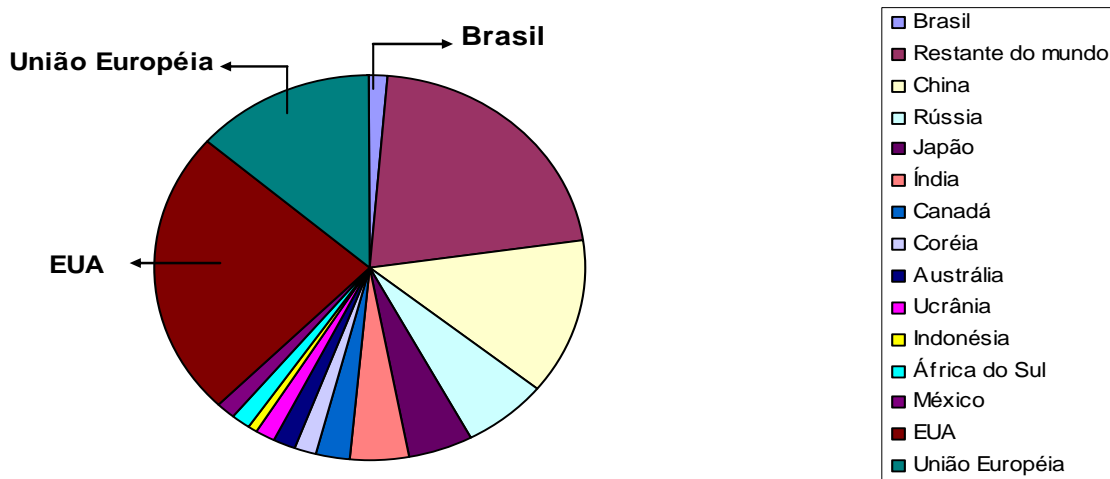
Caso o Tratado obtenha êxito em sua implementação, há uma estimativa que prevê até 2050 uma redução da temperatura global na faixa de 0,02°C e 0,28°C. No Tratado de Quioto não há compromissos adicionais para os países não incluídos no Anexo I, dentre eles o Brasil. Caso todas as concentrações de todos os gases de efeito estufa se mantenham constantes nos níveis das emissões referentes ao ano 2000, prevê-se um aquecimento adicional cerca de 0,1°C por década. Só nos últimos 100 anos, a temperatura média global aumentou mais de 0,7°C (Impactus, 2007; CPTEC, 2008).

A tabela 2 informa os países que fazem parte do Anexo I e suas respectivas emissões de gases de efeito estufa no ano de 1990 servindo de base para a meta estabelecida pelo Tratado de Quioto. Já a figura 3 mostra a proporção das emissões globais de CO<sub>2</sub> por alguns países nos dias atuais (2006), deixando claro que a meta de Quioto está muito distante de ser alcançada.

*Tabela 2 Total das emissões de dióxido de carbono das Partes do Anexo I em 1990, para os fins do Artigo 25 do Tratado de Quioto.*

<b>Partes</b>	<b>Emissões(Gg)</b>	<b>Porcentagem</b>
Alemanha	1.012.443	7,4
Austrália	288.965	2,1
Áustria	59.200	0,4
Bélgica	113.405	0,8
Bulgária	82.990	0,6
Canadá	457.441	3,3
Dinamarca	52.100	0,4
Eslováquia	58.278	0,4
Espanha	260.654	1,9
Estados Unidos da América	4.957.022	36,1
Estônia	37.797	0,3
Federação Russa	2.388.720	17,4
Finlândia	53.900	0,4
França	366.536	2,7
Grécia	82.100	0,6
Hungria	71.673	0,5
Irlanda	30.719	0,2
Islândia	2.172	0
Itália	428.941	3,1
Japão	1.173.360	8,5
Letônia	22.976	0,2
Liechtenstein	208	0
Luxemburgo	11.343	0,1
Mônaco	71	0
Noruega	35.533	0,3
Nova Zelândia	25.530	0,2
Países Baixos	167.600	1,2
Polônia	414.930	3
Portugal	42.148	0,3
Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte	584.078	4,3
República Checa	169.514	1,2
Romênia	171.103	1,2
Suécia	61.256	0,4
Suíça	43.600	0,3
<b>Total</b>	<b>13.728.306</b>	<b>100</b>

*Fonte: MCT, 2008c*



**Figura 3** Proporção das emissões globais de CO<sub>2</sub> por países (Total de 25GtCO<sub>2</sub>/ano em 2006). **Fonte:** Adaptada de Murce et al, 2007.

O Tratado de Quioto prevê três mecanismos de flexibilização a serem utilizados de forma complementar pelos países para o cumprimento das metas de redução das emissões dos GEE: Implementação Conjunta, Comércio de Emissões e o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), onde os dois primeiros são mecanismos que só podem ser utilizados entre os países do Anexo I, ou seja, possuem o compromisso estabelecido por Quioto. A Implementação Conjunta permite um país financiar projetos que visem à redução de emissões em outro país, possibilitando assim o cumprimento da meta do Tratado de Quioto. Esse mecanismo permite que o país financiador tenha o direito de emitir quantidade proporcional àquela reduzida pelo país “beneficiado” (Dantas, 2008; Neto, 2002).

O comércio de emissões é um mecanismo que possibilita que os países industrializados comprem e vendam, entre si, quotas de emissão a fim de cumprirem com as metas estabelecidas pelo Tratado de Quioto. Os países não incluídos no Anexo I, só podem participar do MDL, onde os países desenvolvidos investem na implantação de tecnologias limpas nos países em desenvolvimento, auxiliando com isso esses países à cumprirem suas metas de redução de emissões, contribuindo para as necessidades do desenvolvimento sustentável do país. Dentro desse mecanismo está inserido o mercado de créditos de carbono, o qual permite que cada tonelada de CO<sub>2</sub> retirada da atmosfera ou que deixa de ser emitida em países em desenvolvimento seja comercializada no mercado

mundial, possibilitando os países desenvolvidos emitirem mais dióxido de carbono na atmosfera (IEA, 2007a ; Dantas, 2008).

No ano de 2007 em Bali, Indonésia, os países membros da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática decidiram abrir negociações formais, que deverão ser concluídas até ao final de 2009, culminando num tratado mundial que visará como ponto chave o aquecimento global. Este Tratado surge como uma substituição do Tratado de Quioto, o qual terá sua 1ª fase expirada em 2012 (IPAM, 2008; UNFCCC, 2008b).

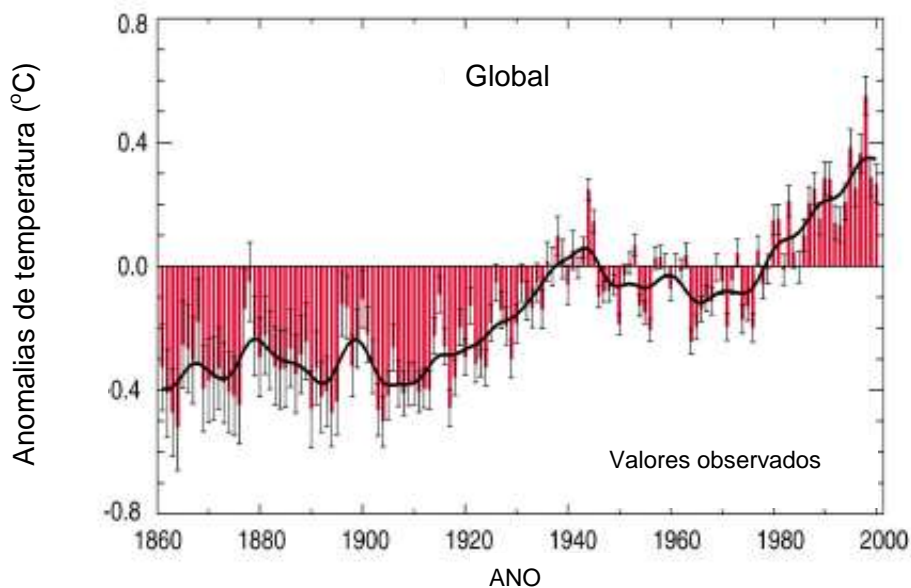
### *III.2) Alterações Climáticas Atuais e Projeções de Futuras Alterações*

Estão se tornando cada vez mais freqüentes, em jornais e TV, notícias a respeito da rapidez com que as mudanças climáticas estão ocorrendo, bem como seus efeitos catastróficos. Desastres ambientais já foram e estão sendo sentidos e observados no mundo todo. Fatos recentes como o derretimento das geleiras: Upsala, na Argentina em 2004, na Antártida e Groelândia; ciclone extratropical Catarina, no sul do Brasil (RS e SC) em 2004; seca na Amazônia, em outubro de 2005; furacão Katrina no sul dos EUA, em 2005; furacão Rita e Wilma, em 2005, no Atlântico Sul e no México, respectivamente; tsunamis na Ásia; ondas de calor de até 40°C na Europa, sobretudo em 2003; todos esses fatos correspondem a impactos ambientais negativos, sentidos de forma diferenciada pelos países, decorrentes do aquecimento global, do aumento das concentrações de gases de efeito estufa e de aerossóis na atmosfera, das mudanças no uso da terra (desmatamento), dentre outros fatores (Marengo *et al* 2007; IPCC, 2001; Magalhães, 2008).

Considerando a temperatura média global da superfície da Terra e dos oceanos no período desde 1850, os dez anos mais quentes da história estão no período de 1995 a 2006 (IPCC, 2007). Dados obtidos desde 1861, quando as primeiras observações foram realizadas, consideram *muito provável*<sup>1</sup> que a década de 90 tenha sido a mais quente, sendo 1998 o ano mais quente. A figura 4 mostra um aumento da temperatura média da superfície da Terra de  $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  entre 1860 e 2000 devido, sobretudo, à acumulação de GEE na atmosfera nos últimos 140 anos (IPCC, 2001).

---

<sup>1</sup> *muito provável*: probabilidade de ocorrer entre 90-99%.



**Figura 4** Anomalias da temperatura na superfície da Terra nos últimos 140 anos, considerando uma média global de 14°C na superfície. **Fonte:** IPCC, 2001; Paciornik, 2006.

Projeções do Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC (2001) revelavam um aumento da temperatura média global de 1,2 a 3,5 °C até 2100 para perfis que consideraram a estabilização da concentração de CO<sub>2</sub> a níveis de 450-1000 ppm; caso permaneça o contínuo crescimento das concentrações de CO<sub>2</sub>, estima-se um aumento de 1,4 a 5,8 °C, no período de 1990 até 2100. Este mesmo relatório afirma a existência de novas e fortes evidências de que a maior parte do aquecimento da Terra dos últimos cinquenta anos seja atribuída às atividades humanas, as quais estão aumentando, substancialmente, as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera e continuarão a mudar a composição atmosférica durante o século XXI.

O Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (2007) considera *muito provável* que o aquecimento global, verificado desde meados do século XX, seja resultado do aumento das emissões antrópicas de GEE. A taxa de aumento entre 1850 e 1899 foi 0,57 °C, enquanto que entre 2001 e 2005 essa taxa passou para 0,95 °C, correspondendo a um aumento médio no período de 0,76 °C. Desde 1961, observações mostraram que a temperatura média dos oceanos aumentou em profundidades de até 3000 m e que estes têm absorvido mais de 80% do calor adicionado ao sistema climático (IPCC, 2007). De acordo com este mesmo relatório, houve uma elevação do nível do mar a uma taxa média anual de 1,8mm por ano, de 1961 a 2003, havendo quase uma duplicação desta taxa para o período

compreendido entre 1993-2003, sendo registrada uma taxa de 3,1 mm/ano. Estima que haja uma elevação do nível do mar de 0,09 a 0,88 metros entre os anos de 1990-2100.

### *III.3) A interferência do setor energético*

O aumento do consumo de energia tem ocasionado um crescimento significativo das emissões de CO<sub>2</sub> devido ao predomínio dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial. As emissões de CO<sub>2</sub>, devido à queima de combustíveis fósseis, são influências dominantes sobre as tendências do aumento da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>, onde o setor energético é o maior emissor de GEE, contribuindo com quase metade (47%) do aumento das emissões de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2005). De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2006), os combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural representam cerca de 80% do consumo mundial de energia sendo responsável pela liberação de mais de 25 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera por ano. Essa alta participação dos combustíveis fósseis ocasionará graves danos ambientais, sendo as mudanças climáticas o de maior magnitude dada às conseqüências que as mesmas possuem sobre o ecossistema terrestre e sua associação direta com a emissão de CO<sub>2</sub> (IEA, 2006; Parson, 2007, Chairman, 2002).

Dados do IPCC (2005) revelam que, de 2000 a 2005, as emissões anuais médias de CO<sub>2</sub> de origem fóssil aumentaram de 23,5 GtCO<sub>2</sub>/ano (6,4 GtC/ano) para 26,4 GtCO<sub>2</sub>/ano (7,2 GtC/ano), onde os países industrializados respondem por 47% destas emissões devido, sobretudo, a utilização de tecnologias mais intensivas em carbono (consumo de combustíveis fósseis e à queima de gás natural).

Pela tabela 3, observa-se que as emissões totais de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis fósseis evoluíram de 203 Mt, em 1990, para 237 Mt, em 1994, representando um aumento de 17%, ou seja, um aumento anual médio de 4%, podendo-se verificar também a predominância das emissões dos derivados do petróleo (77%, em 1994); em segundo lugar encontram-se o carvão e derivados, representando 19,4% das emissões de CO<sub>2</sub>. Observa-se, ao longo dos anos, um contínuo crescimento das emissões originadas do gás natural, porém esta fonte pouco contribui para as emissões totais, representando apenas 4%, em 1994 (MCT, 2008d).

**Tabela 3** Valores referentes às emissões de CO<sub>2</sub> derivadas da queima de combustíveis fósseis, representados em Gg, assim como a variação, em termos %, das emissões de CO<sub>2</sub> originadas em diferentes fontes fósseis, compreendidas no período de 1990-1994.

Setor	1990	1991	1992	1993	1994	Part. 1994	Variação 90/94
	(Gg)					(%)	
Petróleo e Derivados	157.831	162.473	167.163	173.792	182.657	77,2	16
Carvão e Derivados	37.517	43.325	42.263	43.740	45.043	19,0	20
Gás Natural	6.927	6.730	7.303	8.036	8.308	3,5	20
Outras Fontes Fósseis	636	692	736	801	589	0,3	- 7
<b>TOTAL</b>	<b>202.911</b>	<b>213.220</b>	<b>217.465</b>	<b>226.369</b>	<b>236.598</b>	<b>100</b>	<b>17</b>

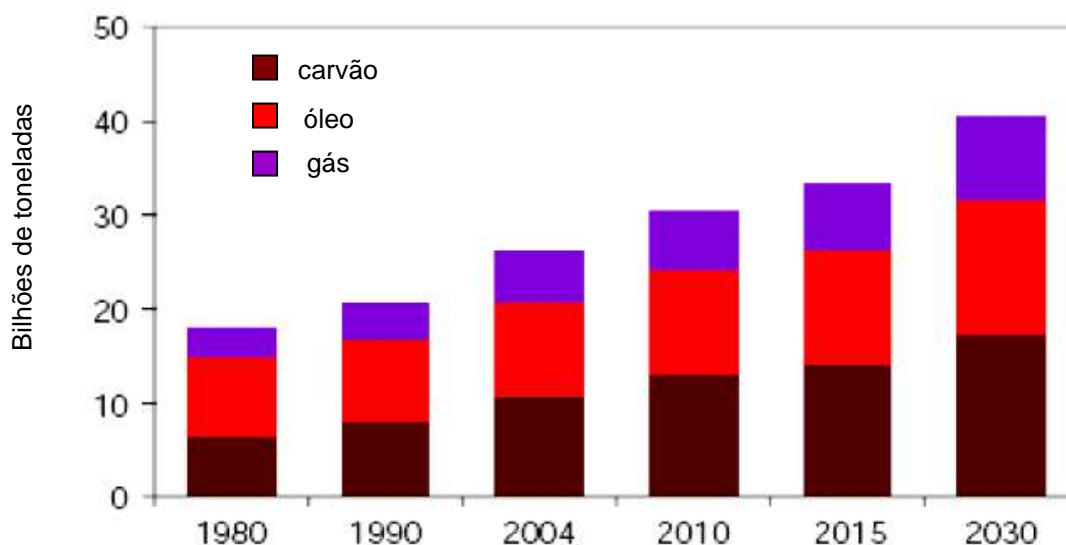
**Fonte:** Inventário Nacional de Emissões de Efeito Estufa (MCT, 2008d)

O cenário de referência para 2030, apresentado pelo IEA (2006), projeta um aumento da demanda global de energia de 53% entre 2004 e 2030, ou seja, uma taxa anual média de 1,6%, onde os combustíveis fósseis continuarão sendo a principal fonte de energia, sendo responsável por 83% do aumento global na demanda. Enquanto a demanda de petróleo cairá, devido a sua vulnerabilidade econômica, outras fontes como carvão e gás aumentarão sua participação e, conseqüentemente, as emissões globais de CO<sub>2</sub> irão aumentar 55%, ao longo do período de projeção, ou seja, 1,7% por ano. As emissões globais de CO<sub>2</sub> poderiam alcançar 40,4 bilhões de toneladas em 2030, onde a China seria responsável por 39% deste aumento, ultrapassando os Estados Unidos e tornando-se o maior emissor do mundo antes de 2010 (IEA, 2006).

As emissões globais de CO<sub>2</sub> originadas da queima de combustíveis fósseis aumentaram quase 28%, passando de 20,8 bilhões de toneladas (Gt), em 1990, para 26,6 Gt em 2004. Destaca-se que, somente em 2004, as emissões mundiais de CO<sub>2</sub> aumentaram 5%. Esse aumento deve-se, em grande parte (86%), à demanda energética dos países em desenvolvimento com uma maior utilização do carvão na geração de eletricidade (IEA, 2007b).

Pela figura 5 observa-se que, dentre todos os combustíveis, o carvão é o principal contribuinte para as emissões globais. Estima-se que as emissões de CO<sub>2</sub>, em 2010, sejam 48% mais altas do que em 1990. Além disso, percebe-se que as emissões globais de CO<sub>2</sub> podem alcançar 40 Gt em 2030, ou seja, um aumento de 14 Gt em relação ao nível de

2004; sendo os países em desenvolvimento representantes de mais de 3/4 do aumento nas emissões globais de CO<sub>2</sub> no período de 2004 e 2030 (IEA, 2007c).

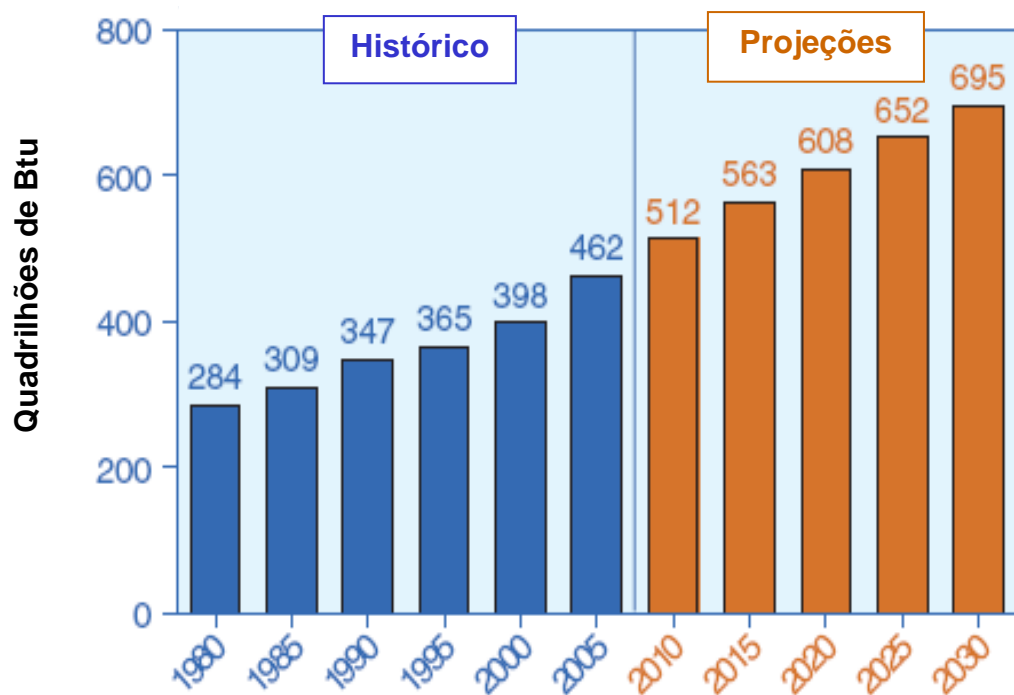


**Figura 5** Emissões mundiais de CO<sub>2</sub> por tipo de Combustível Fóssil, considerando o cenário de referência. **Fonte:** IEA, 2007c.

No cenário de referência considerado pelo *Energy Information Administration* (EIA, 2008), projeta-se um aumento do consumo mundial de energia, para o período de 2005 a 2030 de, aproximadamente 50%. A figura 6 indica que o consumo mundial de energia passará de 462 quadrilhões de BTU (*British Thermal Units*) em 2005 para 563 quadrilhões de BTU em 2015 e, em seguida, para 695 quadrilhões de BTU em 2030.

Com os fatos e dados apresentados, observa-se que a manutenção de uma matriz energética mundial onde os combustíveis fósseis representam cerca de 80% do consumo de energia primária consumida no mundo necessita de mudanças. É necessário “descarbonizar” a matriz energética mundial através de medidas políticas e econômicas que visem o aumento da participação de fontes alternativas e renováveis de energia assim como o aumento da eficiência de recursos que proporcionem uma maior segurança energética visando à estabilização e a redução das emissões de CO<sub>2</sub>. (Dantas, 2008; HDR, 2008). O Projeto de Captura e Armazenamento de Dióxido de Carbono aplica-se bem nesse setor podendo ser uma alternativa para viabilizar a redução dessas emissões.





**Figura 6** Os dados presentes em cada coluna são referentes ao período de 1980 a 2003 e indicam os valores históricos do consumo mundial de energia em quadrilhões de Btu, com base no EIA, 2005. Os dados a partir de 2005 até 2030 representam projeções para o crescimento do consumo mundial de energia com base no EIA. **Fonte:** EIA (2008).

## Capítulo IV – Captura, Transporte, Armazenamento e Monitoramento do CO<sub>2</sub>

Em muitos modelos considerados pelo IPCC a fim de alcançar, em 2100, a estabilização a um nível de 500 ppmv de CO<sub>2</sub> na atmosfera, seria necessário uma redução mundial das emissões de 7-70% em comparação às taxas atuais. Questiona-se a real ocorrência deste fato haja vista as projeções do consumo de combustíveis fósseis para os próximos 20 anos, já mencionadas anteriormente. Deve-se ressaltar que o projeto de armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> ainda não é uma atividade contemplada no Protocolo de Quioto (IPCC, 2005; Ketzer *et al*, 2008).

O Projeto de Captura e Armazenamento de dióxido de carbono, também denominado CCS - do inglês *Carbon Dioxide Capture and Storage* - surge dentro deste contexto como uma opção de mitigação das mudanças climáticas. Entretanto, o potencial papel deste processo no combate às alterações climáticas não foi prontamente reconhecido pelas entidades governamentais, recebendo pouca atenção no Segundo e Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC 1996, IPCC, 2001). O CCS foi analisado com base em alguns processos documentados que já utilizavam esta tecnologia, dentre os quais destacam-se: Sleipner, na Noruega, Weyburn, no Canadá e ECBM- recuperação reforçada de metano em leito de carvão, no Estado do Novo México e Canadá. Esta tecnologia é composta basicamente por três fases principais: captura, transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub>. (IPCC, 2005; Solomon, 2007; Oldenburg *et al*, 2003).

Apesar de o projeto CCS apresentar um ponto positivo, por outro lado ele gera uma série de limitações e preocupações financeiras e ambientais como, por exemplo: processo com elevado dispêndio econômico, provocando um aumento dos custos de geração de energia entre 40 e 80% em comparação às plantas convencionais. De uma forma geral, as desvantagens desse processo incluem a geração de custos adicionais a longo prazo, a necessidade de monitoramento e a verificação ao longo dos anos a fim de garantir a retenção de dióxido de carbono nos locais de armazenamento (IPCC, 2005).

Os vazamentos não apenas representam riscos de danos ambientais, como também podem ameaçar as futuras metas de estabilização quando o sistema de captura e armazenamento é usado excessivamente ou quando o CO<sub>2</sub> é armazenado em locais inadequados. Uma das maiores preocupações do vazamento ocorre na área ambiental, onde pode ocorrer a acidificação das águas subterrâneas, degradação de ecossistemas

marinhos e potencial asfixia de plantas, animais e seres humanos; porém, esses riscos podem ser mantidos baixos se forem selecionados os mais apropriados reservatórios de armazenamento (IPCC, 2007).

#### *IV.1) Captura*

A finalidade da captura de CO<sub>2</sub> é produzir uma corrente concentrada que possa ser facilmente transportada para um local de armazenamento seguro. A captura é aplicável em fontes de emissão amplas e estacionárias tais como as centrais elétricas, plantas de processamento de combustível/gás natural e outras instalações industriais, particularmente na fabricação de ferro, aço e cimento. Espera-se que a captura de CO<sub>2</sub> diretamente de fontes pequenas e móveis, como no transporte e nos setores residenciais e comerciais, apresente uma maior dificuldade e seja cara; já a possibilidade de capturar CO<sub>2</sub> diretamente do ar atmosférico não é viável, haja vista que a concentração de CO<sub>2</sub> presente no ar é muito baixa, em torno de 380 ppm, ou seja, um fator da ordem de 100 vezes ou mais baixos do que nas correntes industriais de gases (IPCC, 2005). A tecnologia disponível permite capturar de 85 a 95% do CO<sub>2</sub> processado em uma planta industrial. Uma central energética equipada com um sistema CCS necessitará de 30 a 40% a mais de energia do que uma planta equivalente sem CCS, fazendo com que ocorra um aumento da produção de CO<sub>2</sub> resultante da perda de eficiência das centrais elétricas (IPCC, 2005).

A minimização das exigências de energia para a captura juntamente com aperfeiçoamento nos processos de conversão de energia continuarão a ter prioridade elevada para futuro do desenvolvimento tecnológico, a fim de minimizar os custos e os impactos ambientais globais.

Existem três abordagens principais para o processo de captura do CO<sub>2</sub> :

- Captura Pós-combustão;
- Captura Oxi-combustão;
- Captura Pré-combustão.

Na pós-combustão, o CO<sub>2</sub> é separado dos outros gases de combustão produzidos pela queima de combustíveis fósseis na presença de ar. Os gases que deixam as centrais elétricas são resfriados e alimentados em um absorvedor, que geralmente consiste de um solvente líquido o qual irá capturar a pequena fração de CO<sub>2</sub> (aproximadamente 3-15%)

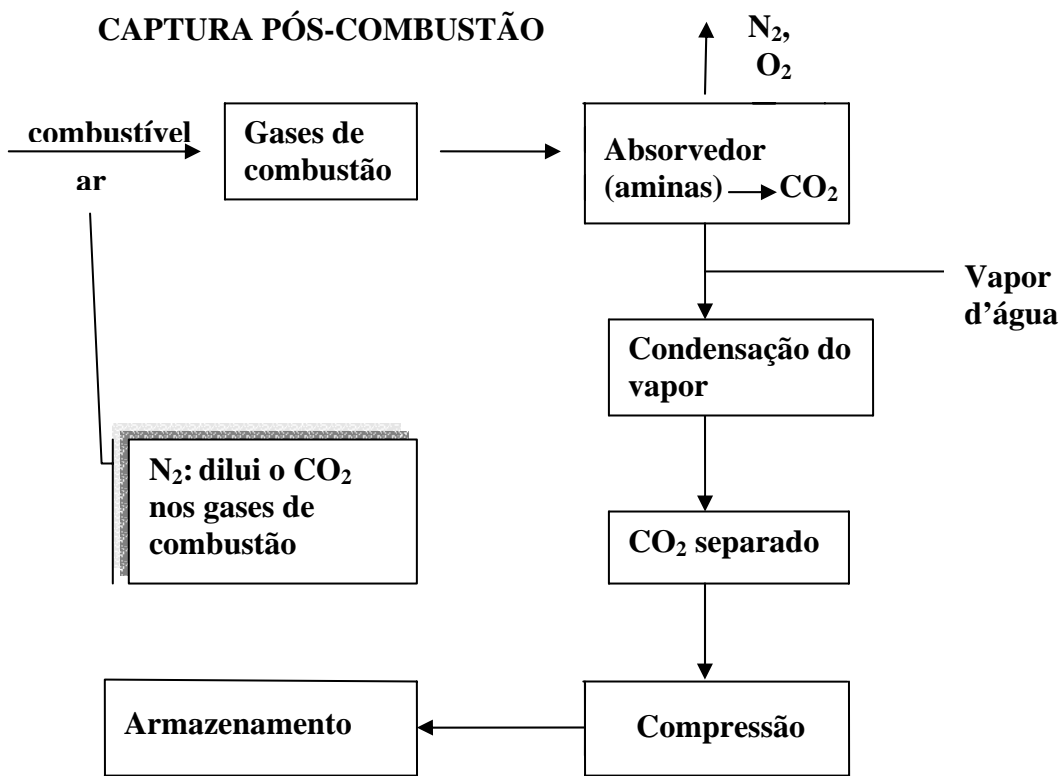
presente na corrente gasosa que possui como principal constituinte o nitrogênio do ar, responsável pela diluição do CO<sub>2</sub> nos gases de combustão. A baixas temperaturas, aproximadamente 40°C, o CO<sub>2</sub> se dissolve fisicamente na água e reage com a amina numa reação exotérmica; onde as aminas mais utilizadas são a monoetanolamina (MEA), a dietanolamina (DEA) e a metildietanolamina (MDEA). Aproximadamente 85% do CO<sub>2</sub> presente na corrente gasosa é capturado pelo absorvedor e o gás limpo é então lançado na atmosfera. O CO<sub>2</sub> é removido da solução absorvedora por vapor d'água, permitindo a reutilização/regeneração do absorvedor. Finalmente, o CO<sub>2</sub> é comprimido e resfriado à forma líquida, operação esta muito custosa, podendo posteriormente ser armazenado em formações geológicas. Outras tecnologias para a captura de CO<sub>2</sub> pós-combustão incluem destilação criogênica, membranas poliméricas, membranas cerâmicas, adsorventes de carbono, hidretos e silicato de lítio (SCIRO, 2008; IPCC, 2005).

Na captura oxi-combustão é usado oxigênio quase puro para queima do combustível ao invés de ar, resultando em uma corrente gasosa composta principalmente por dióxido de carbono e água. Uma parte do CO<sub>2</sub> ou da H<sub>2</sub>O é reciclada e misturada com o oxigênio para absorver calor e manter as condições ótimas para a queima, controlando a temperatura da reação. Pelo fato desse tipo de captura excluir o nitrogênio, o gás de combustão gerado, rico em oxigênio, pode ser capturado pela condensação da água na corrente de escape a um custo relativamente baixo. O uso de oxigênio altamente puro resulta em elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> na corrente de gás e, conseqüentemente, em uma maior facilidade na separação do CO<sub>2</sub> (IPCC, 2005; NETL, 2008).

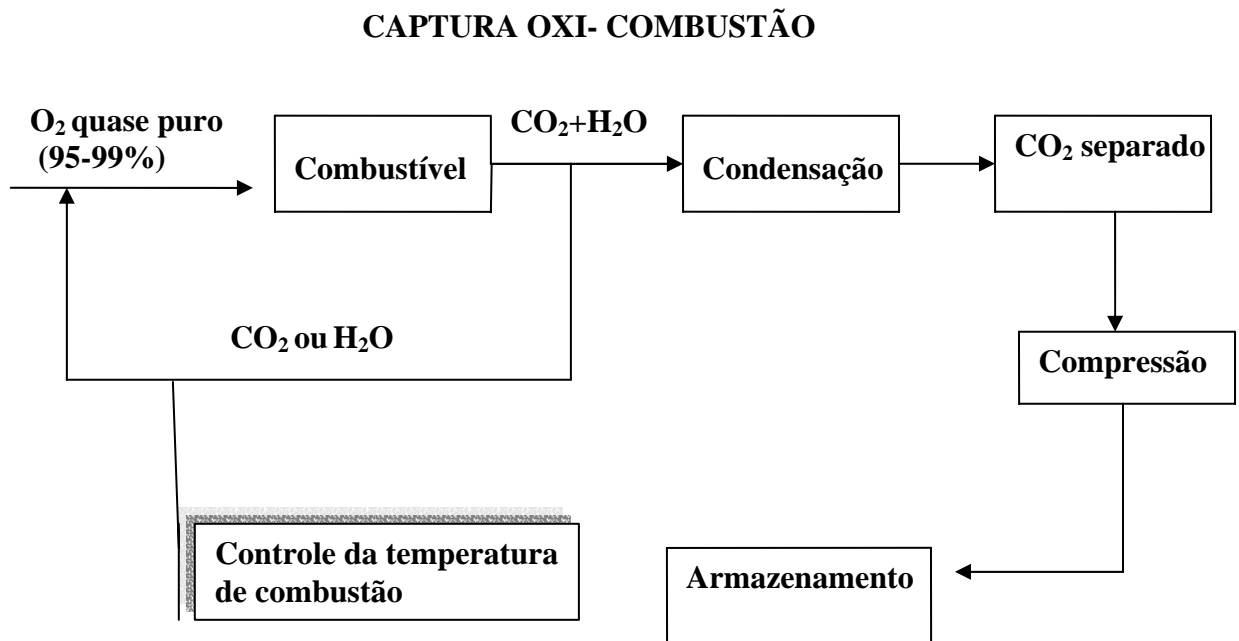
A pré-combustão envolve a reação de um combustível primário/fóssil com vapor e ar ou oxigênio para gerar gás de síntese (syngas), ou seja, uma mistura que consiste basicamente de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H<sub>2</sub>). O monóxido de carbono reage com vapor d'água em um conversor gerando CO<sub>2</sub> e mais H<sub>2</sub>. O CO<sub>2</sub> é separado geralmente por processo de absorção química ou física resultando em um combustível rico em hidrogênio o qual poderá ser utilizado em muitas aplicações como geração de energia ou calor em uma turbina à gás, caldeiras, fornos, motores e células à combustível; já o CO<sub>2</sub> poderá ser armazenado em formações geológicas. Embora as primeiras etapas de conversão do combustível, neste processo, sejam mais elaboradas e mais custosas do que nos sistemas pós-combustão, as altas concentrações de CO<sub>2</sub> produzidas no conversor (15-60% em volume) e as elevadas pressões são mais favoráveis para a separação do CO<sub>2</sub>. (IPCC, 2005).

Um tipo clássico de tecnologia de captura de CO<sub>2</sub> é a utilização de membranas, as quais são especialmente fabricadas para permitirem a permeação seletiva do gás por meio destas. Esses processos são utilizados comercialmente para a remoção de CO<sub>2</sub> a partir do gás natural em alta pressão e em alta concentração de CO<sub>2</sub>. A seletividade da membrana a diferentes gases está diretamente relacionada à natureza do material constituinte da membrana, dentre os quais destacam-se os poliméricos, metálicos, cerâmicos. O fluxo de gás através da membrana é geralmente dirigido pela diferença de pressão existente entre os meios, por esta razão as correntes de alta pressão são preferenciais para separação por membranas. Embora os processos de separação por membranas encontrem diversas aplicações comerciais na indústria (em larga escala, como a separação do CO<sub>2</sub> do gás natural) essas técnicas ainda não têm sido aplicadas em grande escala e demandam condições de confiabilidade e de custos baixos exigidos para sistemas de captura de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2005).

A captura do CO<sub>2</sub> dos processos de combustão é mais cara e requer um maior consumo de energia, enquanto que a separação do CO<sub>2</sub> de poços de gás natural geralmente é mais fácil e mais barata. Hoje em dia, os custos de um processo CCS em uma central energética podem variar de U\$ 30-90/ ton CO<sub>2</sub>. Custos mais altos (até U\$ 160/ ton CO<sub>2</sub>) são registrados, dependendo do tipo da tecnologia e da pureza do CO<sub>2</sub>. Os custos de um processo CCS incluem: captura (\$20-80/ton), transporte (\$1-10/t per 100 km), armazenamento e monitoramento (\$ 2-5/t) (IEA, 2006). Os fluxogramas abaixo (Figuras 7, 8 e 9) mostram os três principais tipos de captura do CO<sub>2</sub>.

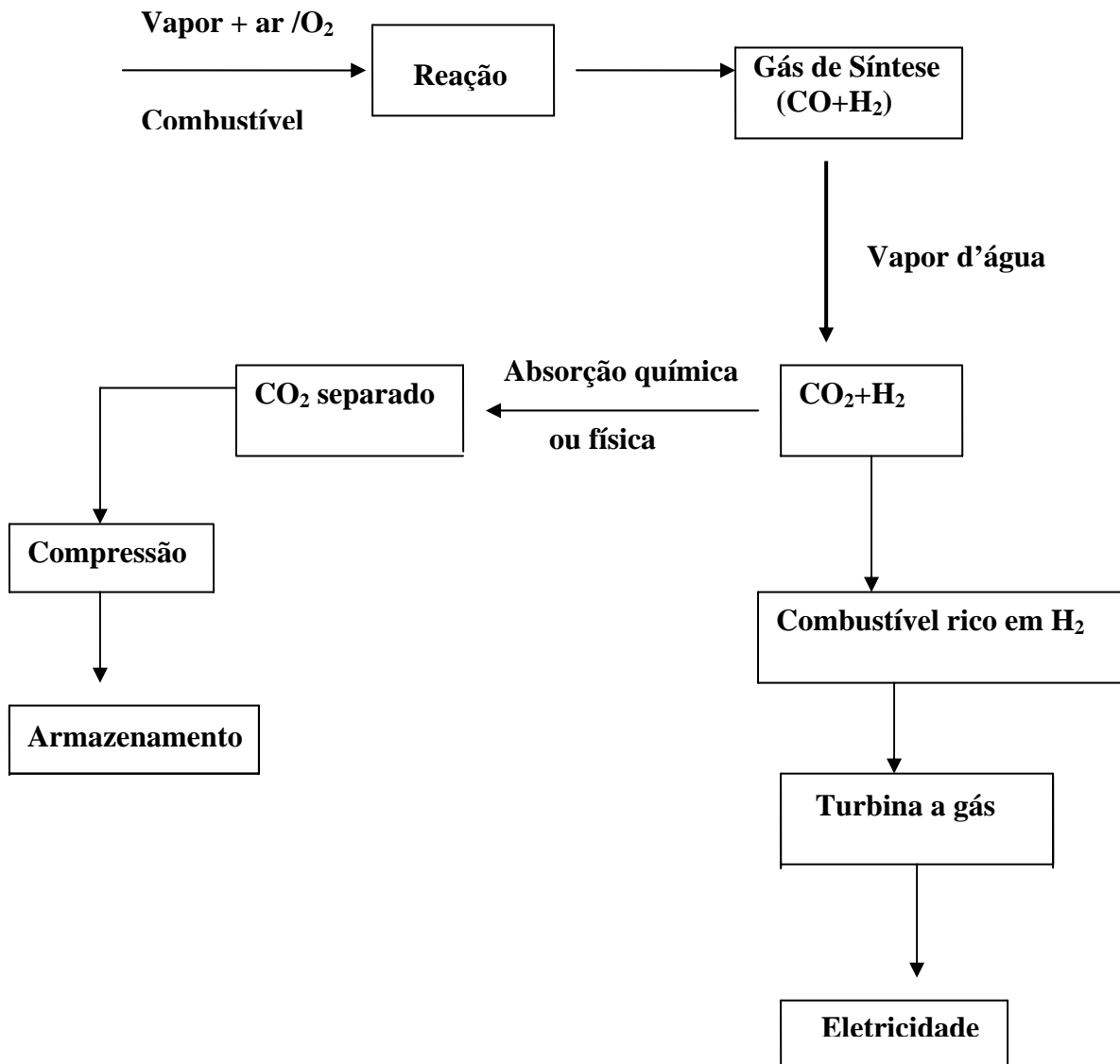


*Figura 7 Fluxograma representativo do processo de captura pós-combustão. Fonte: IPCC, 2005.*



*Figura 8 Fluxograma representativo do processo de captura oxi-combustão. Fonte: IPCC, 2005.*

## CAPTURA PRÉ-COMBUSTÃO



*Figura 9 Fluxograma representativo do processo de captura pré-combustão. Fonte: IPCC, 2005.*

### IV.2) Transporte

O CO<sub>2</sub> pode ser transportado em três estados: sólido, líquido e gasoso. O transporte em escala industrial utiliza tanques, oleodutos e navios para o transporte deste gás na fase gasosa e líquida. O CO<sub>2</sub> transportado a uma pressão próxima da pressão atmosférica ocupa um volume tão grande que seriam necessárias instalações muito grandes; já, se for comprimido, o gás ocupa um volume menor, podendo, portanto, ser transportado via gasoduto. O volume ocupado pode ser ainda mais reduzido através da utilização de

processos como a liquefação, solidificação ou hidratação, porém, a solidificação é a menos vantajosa pelo fato de exigir muito mais energia em comparação às outras opções (IPCC, 2005).

Gasodutos em funcionamento são controlados internamente por dispositivos de inspeção e externamente pelo acompanhamento da corrosão e por sistemas de detecção de fugas. A tecnologia e a experiência já existentes para líquidos podem ser transferidas para o transporte de CO<sub>2</sub> gasoso. Com isso, em alguns lugares, pode ser possível converter oleodutos de hidrocarbonetos, já existentes, em gasodutos de CO<sub>2</sub>. Nos gasodutos, o volume de CO<sub>2</sub> é reduzido sendo transportado a uma pressão elevada, favorecendo a circulação do gás dentro do gasoduto. Este procedimento é feito rotineiramente em gasodutos, onde as pressões de operação estão entre 10 e 80 MPa (IPCC, 2005).

Para transportar o CO<sub>2</sub> em quantidades suficientes, a fim de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, será necessária uma infra-estrutura adequada que exigirá uma grande rede de gasodutos/oleodutos. Os fatores físicos, ambientais e sociais que determinam a construção de um gasoduto são resumidos em um projeto base. Este projeto inclui um sistema de definição para a rota e uma concepção preliminar de aspectos para a estimativa de custos e dos eventuais efeitos potenciais. É necessário, sobretudo, considerar os dados do processo definindo as características físicas da mistura do produto transportado, as pressões e o tamanho do gasoduto; assim como os instrumentos mecânicos como válvulas, bombas, compressores, dentre outros. Os custos materiais do gasoduto dependem do seu comprimento, diâmetro, da quantidade transportada de CO<sub>2</sub> e da sua qualidade, onde estão inseridas as questões de corrosão. No gasoduto, a corrente de CO<sub>2</sub> deve ser preferencialmente seca e livre de H<sub>2</sub>S (sulfeto de hidrogênio), fazendo com que não haja riscos de corrosão do duto ou que estes sejam minimizados (IPCC, 2005).

Estabelecer uma especificação mínima para a qualidade do material usado para a construção do gasoduto, bem como conhecer sua resistência à corrosão, são fatores que funcionam como uma forma de segurança para a passagem de um gás que contenha água, H<sub>2</sub>S e outros contaminantes. Se quantidades substanciais de impurezas, particularmente H<sub>2</sub>S, estiverem presentes no CO<sub>2</sub>, os impactos relacionados ao vazamento ou ruptura do gasoduto poderão aumentar. Vale ressaltar também, que a presença de impurezas como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e H<sub>2</sub>S na corrente gasosa afeta os processos de captura, transporte e a injeção de CO<sub>2</sub>, assim como os mecanismos de aprisionamento e a capacidade de armazenamento geológico (IPCC, 2005).



De acordo com o Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional, o nível de exposição sob o qual o H<sub>2</sub>S é nocivo à saúde humana, é de 100 ppm comparado com 40.000 ppm, referente ao nível de CO<sub>2</sub>. Os riscos associados ao transporte de CO<sub>2</sub> são bem maiores do que aqueles relacionados à captura e ao armazenamento deste gás (IPCC, 2005).

O vazamento do CO<sub>2</sub> de um gasoduto constitui um perigo potencial para os seres humanos e animais. Por esta razão, uma propriedade deste gás, que precisa ser considerada, é o fato do CO<sub>2</sub> ser mais denso do que o ar, podendo acumular-se, em concentrações potencialmente perigosas, em áreas ao nível do mar; com isso, qualquer vazamento fará com que ocorra fuga do CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Com o contínuo crescimento populacional, pode tornar-se mais difícil garantir os direitos de passagem de gasodutos, principalmente em regiões altamente povoadas as quais produzem grandes quantidades de dióxido de carbono. O transporte de CO<sub>2</sub> através de gasodutos por zonas povoadas requer atenção a alguns fatores como proteção à alta pressão e detecção de fugas. Por questões de segurança, experiências existentes têm ocorrido em zonas com baixa densidade populacional, tornando-se mais complexas em zonas povoadas. Os custos dos gasodutos *onshore* podem aumentar de 50 a 100% ou mais, quando a rota do gasoduto está congestionada e encontra-se em áreas densamente povoadas. Os custos também aumentam em regiões montanhosas, em áreas de reserva natural, com “obstáculos” tais como rios e auto-estrada e em áreas fortemente urbanizadas devido à acessibilidade, à construção e às medidas de segurança adicionais exigidas. Gasodutos *offshore* geralmente operam a altas pressões e em temperaturas mais baixas do que os gasodutos *onshore*, e são, muitas vezes, 40 a 70% mais caros (IPCC, 2005).

#### *IV.3) Armazenamento*

O armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> na crosta terrestre tem sido um processo natural por centenas de milhares de anos. O dióxido de carbono proveniente de atividades biológica, vulcânicas e de reações químicas entre rochas e fluidos acumula-se no subsolo natural como carbonato mineral, em solução ou nas formas gasosa ou supercrítica, quer como uma mistura gasosa ou como CO<sub>2</sub> puro. O armazenamento de CO<sub>2</sub> pode ser feito em formações geológicas, tais como campos de petróleo e gás maduros, camadas de carvão,

formações salinas profundas, oceanos e por fixação industrial de CO<sub>2</sub> em carbonatos inorgânicos (Klusman, 2003).

A informação e a experiência advindas da injeção e do armazenamento deste gás em um grande número de projetos de recuperação reforçada do petróleo (EOR) e de gás ácido, dentre os principais destacam-se: Sleipner, Weyburn e In Salah, indicam que o CO<sub>2</sub> pode ser injetado e armazenado com segurança em formações geológicas desde que os locais de armazenamento sejam devidamente bem caracterizados (Solomon, 2007). A injeção de CO<sub>2</sub> em formações geológicas cuidadosamente selecionadas assegura a estocagem deste gás por longos períodos de tempo.

Segundo o IPCC (2005), observações da engenharia, assim como modelos, sugerem que a fração de gás retida em reservatórios geológicos propriamente selecionados e gerenciados seja *muito provável*<sup>2</sup> exceder 99%, mais de 100 anos e *provável*<sup>3</sup> exceder 99%, mais de 1000 anos. Fatos estes explicados pelo fato de, ao longo dos anos, aumentarem os mecanismos físicos e geoquímicos de aprisionamento do CO<sub>2</sub>, assim como a sua solubilidade. Com isso, o CO<sub>2</sub> torna-se menos móvel com o passar dos anos, diminuindo, ainda mais, o risco de vazamento. Para evitar ou atenuar os riscos do vazamento, deve-se selecionar cuidadosamente o local de armazenamento, realizar supervisão regulamentar eficaz e um programa de monitoramento adequado que forneça um aviso prévio sobre o funcionamento do local de armazenamento e da execução de métodos de remediação para parar ou controlar as liberações de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2001).

A injeção de CO<sub>2</sub> em formações geológicas utiliza tecnologias já desenvolvidas e aplicadas no campo do petróleo e gás, podendo estas serem adaptadas para atender às necessidades de cada tipo de armazenamento. Provas advindas dos campos de petróleo e gás indicam que os hidrocarbonetos, gases e fluidos, incluindo o CO<sub>2</sub> podem permanecer aprisionados durante milhões de anos (Solomon, 2007).

No armazenamento geológico, o CO<sub>2</sub> é injetado em profundidade superior a 800 metros, sob temperatura e pressão elevadas. Nessas profundidades, entre 800-1000 metros, o CO<sub>2</sub> atinge o estado denominado “supercrítico”, ou seja, possui viscosidade de gás, o que facilita a difusão do CO<sub>2</sub> nos poros das rochas e densidade de líquido (aproximadamente 500-800 Kg/m<sup>3</sup>), o que dificulta a migração do gás em direção à superfície. Essas características permitem o potencial para uma eficiente viabilização do

---

<sup>2</sup> *muito provável*: probabilidade de ocorrer entre 90-99%.

<sup>3</sup> *provável*: probabilidade de ocorrer entre 66-90%.

armazenamento do CO<sub>2</sub> em subsuperfície, aumentando a segurança desta técnica (IPCC, 2005).

A fim de obter uma significativa diferença para a mitigação das mudanças climáticas, faz-se necessário que gigatoneladas (Gt) de CO<sub>2</sub> por ano sejam estocadas. Estudos realizados afirmam que os reservatórios naturais ou formações geológicas são os únicos capazes de alcançarem tal capacidade, conforme pode ser visto na tabela 4. Estima-se que reservatórios maduros de óleo e gás possuam uma capacidade de armazenamento que varia de 675 a 900 GtCO<sub>2</sub>; formações salinas são prováveis de possuírem uma capacidade de, pelo menos, 10.000 GtCO<sub>2</sub>; porém a capacidade dos leitos de carvão não-mináveis ainda é incerta, com estimativas em torno de 3 até 200 GtCO<sub>2</sub> (IPCC, 2005). A tabela 4 informa a faixa de valores referentes à capacidade de armazenamento de CO<sub>2</sub> em cada tipo de reservatório: oceanos, florestas, aquíferos salinos, poços de petróleo e gás e camadas de carvão.

As formações salinas, também denominadas aquíferos salinos, são rochas sedimentares saturadas com água ou salmoura, ou seja, contêm altas concentrações de sais dissolvidos. Acredita-se que os aquíferos salinos possuam a maior capacidade de armazenamento de CO<sub>2</sub>, sendo explorados à medida que possuem uma enorme quantidade de água que são impróprias para a agricultura ou para o consumo humano (IPCC, 2005).

**Tabela 4** Potencial de seqüestro geológico de carbono em diferentes reservatórios dados em gigatoneladas de carvão. Fonte: Murce et al, 2007 .

Reservatórios	Potencial para Seqüestro de Carbono (GtC) <sup>a</sup>
Oceanos	1.000 - 10.000 <sup>+</sup>
Terrestre ( Florestas)	10 - 100
Formações Salinas Profundas	100 - 10.000
Reservatórios de petróleo e gás	100 - 1.000
Camadas de carvão	10 - 1.000

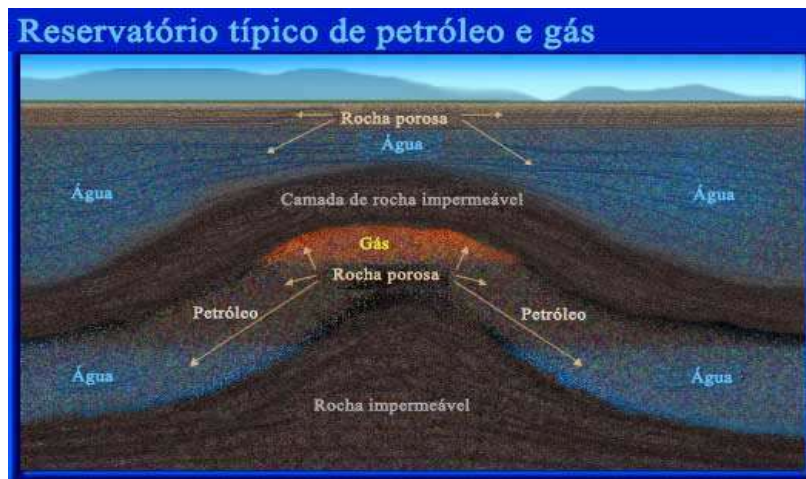
(a) ordem de grandeza

As camadas de carvão contêm fraturas (cunhas) que conferem certa permeabilidade a esses tipos de reservatório. O carvão possui vários microporos em sua superfície onde

moléculas de gases, como metano, são adsorvidas naturalmente; porém, o carvão possui uma maior afinidade para adsorver CO<sub>2</sub> (gasoso) do que metano. O CO<sub>2</sub> gasoso injetado no reservatório irá se difundir e será adsorvido nos microporos na superfície do carvão deslocando o metano, o qual será liberado reforçando assim sua recuperação. O armazenamento de CO<sub>2</sub> em camas de carvão, em conjunto com a recuperação do metano, também conhecido como ECBM, é considerado uma prática atrativa devido principalmente às perspectivas da produção reforçada do metano, podendo aumentar em até 90% a produção deste gás e por este ser o mais “limpo” dos combustíveis fósseis (IPCC, 2005; IEA, 2008d; Dooley et al, 2006). Já os campos de petróleo e gás maduros consistem em um conjunto de reservatórios geológicos que abrigaram óleo e/ou gás natural por milhões de anos. A injeção de CO<sub>2</sub> em campos de petróleo pode resultar em um aumento na produção de hidrocarbonetos, através de uma técnica conhecida como *Enhanced Oil Recovery (EOR)*, o que compensaria os custos desse processo (Klusman, 2003).

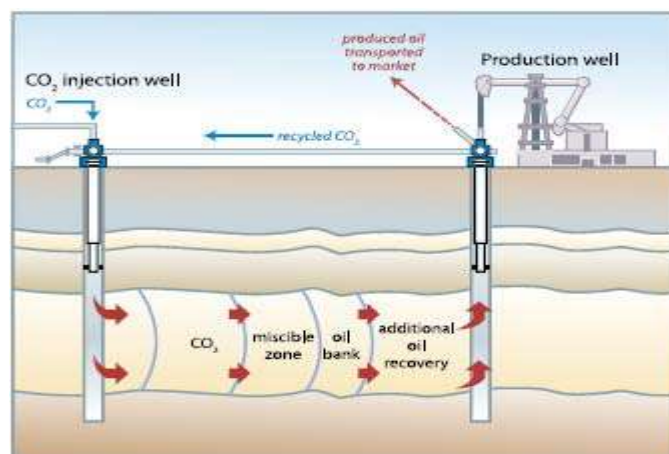
Os hidrocarbonetos, como petróleo e gás, estão presentes em rochas permeáveis e porosas, as quais possuem espaços microscópicos denominados poros que são preenchidos com fluidos *in-situ*, tais como água, petróleo ou gás sob grande pressão. Um campo de petróleo é chamado maduro quando este já foi explorado por um longo período de tempo, resultando em um alto declínio de produção, ou seja, uma boa parte dos hidrocarbonetos presentes no reservatório já foi removida, desocupando os vazios intergranulares das rochas anteriormente ocupados por eles e possibilitando, com isso, o armazenamento do CO<sub>2</sub>. A injeção atua aumentando a pressão dentro do poço, permitindo que o CO<sub>2</sub> entre nos poros; entretanto, nem todos os espaços estarão disponíveis para o CO<sub>2</sub> devido à presença dos fluidos *in-situ* presentes na formação (IPCC, 2005; Price et al, 2008; Câmara et al, 2003).

O fato do petróleo e do gás serem menos densos que a água faz com que haja uma tendência de migração ascendente dos hidrocarbonetos por meio de rocha permeável; porém, essa camada porosa e permeável da rocha que contém esses fluidos é coberta por uma camada de rocha impermeável, denominadas *caprocks*, ou seja, rochas com permeabilidade muito baixa que atuam como um selo superior para evitar o escoamento de fluido para fora do reservatório, impedindo o vazamento de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (IPCC, 2005). A figura 10 apresenta uma ilustração de um reservatório de petróleo e gás natural onde estão indicadas as camadas de água, óleo e gás presentes no interior das rochas.



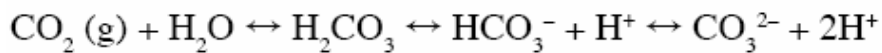
**Figura 10** Reservatório típico de petróleo e gás, indicando a localização das substâncias presentes na formação geológica, assim como a presença das camadas de rocha permeável e porosa. **Fonte:** SEED, 2008.

Quando o CO<sub>2</sub> supercrítico é injetado em um campo de petróleo, este gás se mistura com o óleo existente no reservatório expandido-o para fora dos poros das rochas, e reduzindo, conseqüentemente, sua viscosidade o que ajuda a manter ou a aumentar a pressão dentro do reservatório, conforme verificado na figura 11. Essa combinação de fatores permite que o petróleo flua mais facilmente para os poços de produção e suba à superfície, conseguindo-se, então, separar o petróleo do CO<sub>2</sub>. Esta tecnologia, empregada nos Estados Unidos desde a década de 60, já é usada no Brasil pela Petrobrás desde 1987, na Bahia (IEA, 2008e).

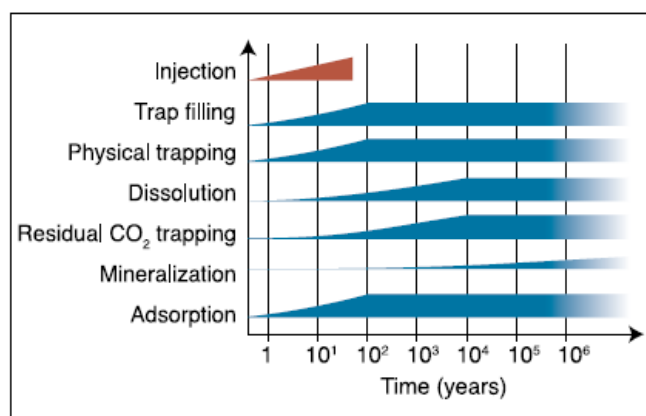


**Figura 11** Ilustração do processo de injeção de CO<sub>2</sub> em campos de petróleo e gás, mostrando a formação da fase “miscível” entre o gás injetado e o petróleo bem como o escoamento desses fluidos até os poços de produção. Ressalta-se que o dióxido de carbono, que é produzido juntamente com o petróleo, é separado e reinjetado no poço de injeção, havendo, portanto, reciclo do CO<sub>2</sub>. **Fonte:** IPCC, 2005.

Quando o CO<sub>2</sub> se dissolve na água presente na formação, ocorre um processo de aprisionamento comumente denominado solubilidade, a qual diminui à medida que a temperatura e a salinidade aumentam. O principal benefício da solubilidade é que uma vez que o CO<sub>2</sub> se dissolve, ele já não mais existirá como uma fase “separada”, eliminando assim as forças dinâmicas que dirigem o CO<sub>2</sub> para a superfície (IPCC, 2005). Uma vez dissolvido, haverá a formação de espécies iônicas como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Finalmente, por aprisionamento mineral, alguma fração poderá ser convertida em carbonato mineral estável, forma mais permanente de armazenamento geológico. Acredita-se que o aprisionamento mineral seja muito lento, podendo levar mil anos ou mais. A dissolução do CO<sub>2</sub> na água de formação do reservatório pode ser representada pela seguinte reação (IPCC, 2005):



Uma vez injetado na formação, os principais mecanismos de fluxo e transporte que controlam a propagação do CO<sub>2</sub> incluem: escoamento do fluido em resposta ao gradiente de pressão criado pelo processo de injeção; escoamento do fluido em resposta aos gradientes hidráulicos naturais; empuxo causado pela diferença de densidade entre o CO<sub>2</sub> e os fluidos presentes na formação geológica; difusão; dispersão e “espalhamento” causados pela heterogeneidade da formação e pelo contraste da mobilidade entre o CO<sub>2</sub> e o fluido in-situ; dissolução dentro dos fluidos da formação; mineralização; aprisionamento nos poros (permeabilidade relativa) e adsorção em materiais orgânicos. A figura 12 revela que a mineralização é o mecanismo de armazenamento que leva mais tempo para ocorrer, podendo levar até 1000 anos para o seu início (IPCC, 2005).



**Figura 12** Esquema mostrando o início dos principais mecanismos de aprisionamento de CO<sub>2</sub> após injeção em formações salinas profundas. **Fonte:** IPCC, 2005.

Os aprisionamentos físicos são apropriados para o armazenamento do CO<sub>2</sub>, embora, deva-se tomado cuidado para não exceder a pressão permitida a fim de se evitar fraturas nas *caprocks* ou a reativação de falhas, as quais podem atuar como barreiras de permeabilidade em algumas circunstâncias e como caminhos preferenciais para o fluxo de fluidos em outras circunstâncias (IPCC, 2005).

Muitos fatores devem ser considerados a fim de determinar o verdadeiro papel do processo de Captura e Armazenamento de CO<sub>2</sub> em relação à atenuação das alterações climáticas. Existem muitos questionamentos em relação aos riscos associados ao CCS, dentre eles: Quanto tempo o CO<sub>2</sub> permanecerá seguramente armazenado na subsuperfície? O que acontecerá se o CO<sub>2</sub> “escapar” de volta para a atmosfera? Como fazer o monitoramento em subsuperfície? Quais são os impactos biológicos e sociais causados pelo vazamento de CO<sub>2</sub> no ambiente? De quem será a futura responsabilidade em manter o monitoramento deste gás, sobretudo quando estudos mostram que os principais mecanismos de aprisionamento do CO<sub>2</sub> iniciam-se não antes de 100 anos após o término da sua injeção? A contribuição potencial dessa tecnologia também será influenciada por diversos fatores, dentre os quais se destacam os custos em relação aos de outras opções de mitigação, os meios responsáveis pelo transporte do CO<sub>2</sub> para os locais de armazenamento, as preocupações ambientais, bem como a aceitabilidade pública desta abordagem.

O custo do armazenamento geológico é altamente específico, dependendo de fatores tais como a profundidade da formação geológica, o número de poços necessários para a injeção e também se o projeto será onshore ou offshore. De uma maneira geral, os custos incluindo o monitoramento variam de 0,6 a 8,3 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> armazenado; esse valor é pequeno se comparado aos custos atuais relacionados à captura de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2005).

#### *IV.4) Monitoramento*

A maioria das técnicas de monitoramento pode ser aplicada para o monitoramento de projetos de armazenamento em todos os tipos de formações geológicas embora muito ainda deva ser aprendido sobre monitoramento em formações de carvão.

As tecnologias para o monitoramento das pressões e das taxas de injeção são comuns no campo de petróleo, estando os instrumentos disponíveis comercialmente. As medições são feitas por bitolas, quer na entrada como nas proximidades dos poços de injeção. Típicos sistemas utilizam placas de orifício ou outros dispositivos que relacionam a queda de pressão, no dispositivo, com a taxa de escoamento. Para o CO<sub>2</sub>, a estimativa exata da densidade é o mais importante para uma melhor precisão da medição. Pequenas mudanças de temperatura, pressão e composição podem ter grandes efeitos sobre a densidade. Medições da pressão de injeção na superfície e na formação também são rotina, manômetros são instalados na maioria dos poços através de orifícios, na superfície dos tubos, perto da abertura do poço. Na subsuperfície, as medições das pressões são rotineiras, sendo usadas para testes do poço de injeção ou em circunstâncias especiais em que as medições na superfície não forneçam informações confiáveis sobre a pressão no subsolo. Uma grande variedade de sensores de pressão está disponível e adequada para o monitoramento das pressões no poço ou na formação, onde dados contínuos são disponíveis e geralmente transmitidos a uma sala de controle. Os manômetros na superfície muitas vezes são conectados a uma válvula que irá interromper ou reduzir a injeção caso a pressão ultrapasse um limite predeterminado seguro ou quando houver uma queda na pressão, como resultado de um vazamento. As pressões na superfície podem ser usadas para assegurar e garantir que as pressões na subsuperfície não ultrapassem a pressão de fratura do reservatório. Uma inovação relativamente recente são os sensores de pressão e de temperatura de fibra ótica que já estão comercialmente disponíveis. Cabos de fibra ótica são colocados dentro dos poços, conectados a sensores e fornecem, em tempo real, a pressão e a temperatura dentro da formação onde pressupõe-se que esses novos sistemas forneçam medições mais confiáveis (IPCC, 2005; Solomon, 2007).

A fim de garantir a eficácia do armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>, é realizado o monitoramento dos locais de armazenamento a fim de verificar o escape do CO<sub>2</sub> e sua migração em direção à superfície, alcançando a atmosfera. O monitoramento possui várias finalidades, dentre elas (IPCC, 2005; Solomon, 2007):

- Assegurar e documentar o efetivo controle dos poços de injeção, principalmente monitorar as condições dos poços de injeção;
- Medir a taxa de injeção e as pressões na entrada dos poços e no interior da formação geológica;



- Verificar a quantidade de CO<sub>2</sub> injetado que será estocado por diversos mecanismos;
- Otimizar a eficiência do projeto de estocagem incluindo a utilização do volume de estocagem, da pressão de injeção e da perfuração de novos poços de injeção;
- Demonstrar, com técnicas apropriadas, que o CO<sub>2</sub> permanece armazenado na pretendida formação geológica por longos anos;
- Detectar o vazamento e fornecer um pré-alerta de qualquer vazamento que possa exigir alguma ação de mitigação.

O desafio da verificação do armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> em localidades próximas à superfície é diferenciar um pequeno vazamento de CO<sub>2</sub> de naturais variações de fluxos e concentrações *background*, decorrentes do solo, plantas e de processos na subsuperfície. O fluxo e o transporte de CO<sub>2</sub> em altas concentrações nas proximidades da superfície são controlados pela sua alta densidade, baixa viscosidade e pela sua alta solubilidade na água.

Nos sistemas ecológicos naturais sem fuga de CO<sub>2</sub>, os fluxos e as concentrações de CO<sub>2</sub> próximos à superfície são controlados pela absorção do CO<sub>2</sub> via fotossíntese e por sua produção através da respiração, pela biodegradação da matéria orgânica no solo, pelos fluxos evasivos naturais de CO<sub>2</sub> advindos de fontes profundas e pela troca de CO<sub>2</sub> do solo com a atmosfera (Oldenburg, 2003). As atuais tecnologias disponíveis para o monitoramento de CO<sub>2</sub> em superfície incluem: analisador de gases infravermelho (IRGA) para medir as concentrações pontuais usando absorção infravermelha pela molécula de CO<sub>2</sub>; câmara de acumulação (AC): método de medir o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo em pontos discretos; *Eddy correlation* (EC): torre que mede os fluxos líquidos de CO<sub>2</sub> sobre uma determinada região; e LIDAR: mede as concentrações de CO<sub>2</sub> através de um percurso integrado (Oldenburg *et al*, 2003; Benson, 2007). Estas tecnologias estão disponíveis para medir as concentrações de CO<sub>2</sub> e as composições dos isótopos do carbono no solo, subsolo e na superfície atmosférica, assim como para determinar os fluxos de CO<sub>2</sub> na superfície, sendo capazes de detectar a fuga e anomalias na concentração de CO<sub>2</sub> em diferentes níveis espaciais.

Novas tecnologias que podem ser úteis para medir as concentrações e fluxos de CO<sub>2</sub> incluem sensoriamento remoto do estresse da vegetação como um indicativo da elevação das concentrações de CO<sub>2</sub>; sistemas mecânicos microeletrônicos que podem ser

espalhados a fim de realizar medições em pontos diversos; utilização de animais treinados, como cães, hoje utilizados para detectar minas terrestres, dentre outros (Oldenburg *et al*, 2003).

Várias técnicas são usadas para monitorar a distribuição e a migração do CO<sub>2</sub> na subsuperfície (Best Practice Manual, 2004). Estas técnicas são classificadas em técnicas diretas e indiretas (Solomon, 2007).

As técnicas diretas empregam medição direta do CO<sub>2</sub> injetado, por exemplo, em poços de produção para monitorar a chegada do CO<sub>2</sub>. Em Weyburn, o carbono injetado possui uma composição diferente do carbono pré-existente no reservatório, com isso, a distribuição do CO<sub>2</sub> pode ser determinada pelo acompanhamento da chegada do CO<sub>2</sub> injetado em diferentes poços de produção. Uma abordagem bastante interessante é a utilização de traçadores, isótopos de gases não presentes no reservatório, os quais são injetados dentro de poços específicos. O momento da chegada dos traçadores na produção ou o monitoramento dos poços indicará o caminho que o CO<sub>2</sub> está seguindo dentro do reservatório; fornecendo algumas indicações sobre a distribuição lateral do CO<sub>2</sub> reservatório de armazenamento. Amostras da qualidade da água e/ou da composição isotópica podem ser usadas para diferenciar novas chegadas de CO<sub>2</sub> em locais específicos do CO<sub>2</sub> natural, ou seja, pré-existente no reservatório. As alterações químicas que ocorrem nos fluidos presentes no reservatório indicam o aumento na acidez e os efeitos químicos da presente mudança, em especial os níveis de íons bicarbonato nos fluidos. Os fluxos de CO<sub>2</sub> da superfície também podem ser diretamente mensuráveis por técnicas como a espectroscopia infravermelha (Solomon, 2007).

Uma variedade de técnicas indiretas a fim de se avaliar a distribuição de CO<sub>2</sub> na subsuperfície inclui o uso de técnicas geofísicas sísmicas e não-sísmicas (IPCC, 2005). As técnicas sísmicas basicamente medem a velocidade e a energia de absorção das ondas, geradas artificialmente ou naturalmente, através de rochas, onde a transmissão é modificada pela natureza da rocha e pelos fluidos contidos nelas. O monitoramento através das técnicas de sísmica passiva (microsísmica) detecta eventos microsísmicos induzidos no reservatório por respostas dinâmicas às modificações das pressões dos poros ou a reativação ou criação de pequenas fraturas (IPCC, 2005). Os eventos microsísmicos são extremamente pequenos, porém o monitoramento desses eventos permite o detectar mudanças de pressão e, possivelmente, o movimento do gás no reservatório ou na formação salina (Solomon, 2007). As técnicas geofísicas não-sísmicas incluem o uso de

técnicas elétricas e eletromagnéticas. Embora não comprovadas, as técnicas de gravidade (pelo solo ou ar), podem ser usadas para determinar a migração da pluma de CO<sub>2</sub> na subsuperfície. Por último, os inclinômetros ou métodos remotos (realizados através de aeronaves ou satélites) por medição da distorção do terreno podem ser usados em alguns ambientes para avaliar o movimento de plumas (IPCC, 2005).

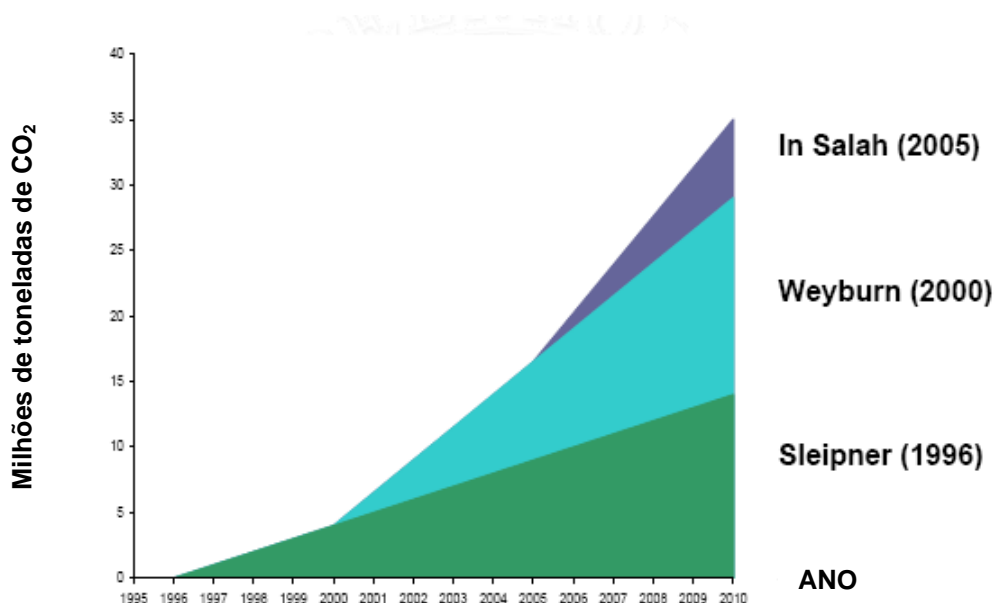
A detecção de anomalias relacionadas ao vazamento de CO<sub>2</sub> em águas subterrâneas e superficiais pode ser realizada por amostragem dessa água e análise por métodos analíticos, onde a dissolução do CO<sub>2</sub> nessas águas faz com que haja um aumento da acidez das águas. Entretanto, no caso de pequenos fluxos de vazamentos, o CO<sub>2</sub> pode estar presente, de forma dominante, na fase aquosa como carbono inorgânico dissolvido (DIC), por exemplo: CO<sub>2</sub>(aq), H<sub>2</sub>CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Com o aumento do vazamento de CO<sub>2</sub> nas águas, há um aumento do DIC, carbono inorgânico dissolvido (Oldenburg, 2003).

O gás natural e o CO<sub>2</sub> são encontrados na natureza em reservatórios geológicos e permanecem retidos nestas formações geológicas há milhões de anos, o que permite dizer que há boas razões para se pensar que é possível selecionar reservatórios geológicos onde o CO<sub>2</sub> capturado possa ser armazenado por períodos de tempo muito longos para efeito de mitigação das mudanças climáticas. Existem algumas questões relativas à integridade dos poços existentes, motivo pelo qual serão necessários estudos para uma melhor avaliação desses riscos. A regulação da atividade do CCS deverá incluir requisitos específicos para monitoramento do local de armazenamento do CO<sub>2</sub> durante, e também após, a fase de injeção. Poderão ser toleradas fugas muito reduzidas tanto em termos de impacto ambiental local como de impactos globais nas mudanças climáticas, mas esta situação depende de cuidadosa avaliação de riscos para a saúde e segurança do Homem e para os ecossistemas devido às fugas de CO<sub>2</sub>.

## Capítulo V - Projetos de seqüestro de CO<sub>2</sub> no mundo

A maioria dos projetos de seqüestro de CO<sub>2</sub> está associada a grandes instalações de gás que possuem uma corrente gasosa contendo CO<sub>2</sub> na faixa de 10-15% em volume, como *Sleipner*, no Mar do Norte; *Snohvit*, no Mar Barents; *In Salah*, na Argélia e *Gorgon*, na Austrália, assim como projetos de injeção de gás ácido no Canadá e nos Estados Unidos (IPCC, 2005).

No projeto *Sleipner*, operado pela empresa *Statoil*, cerca de 10Mt de CO<sub>2</sub> (taxa de injeção de 1MtCO<sub>2</sub> por ano) têm sido injetados, desde 1996, em formações salinas profundas. A *Statoil* está planejando outro projeto no Mar Barents, onde o CO<sub>2</sub> do campo de *Snohvit* será extraído do gás e injetado em formação geológica abaixo do campo de gás. No campo de gás *In Salah*, na Argélia, as empresas *Statoil*, *Sonatrack* e BP injetam CO<sub>2</sub>, extraído do gás natural, em reservatório de gás fora dos limites do campo de gás. A figura 13 mostra a evolução do monitoramento realizado nos três principais projetos de seqüestro de CO<sub>2</sub>, percebendo-se que com o passar dos anos há um aumento da quantidade de CO<sub>2</sub> armazenada (Gale, 2006; Kaarstad, 2004; IPCC, 2005).



**Figura 13** Quantidade estimada do CO<sub>2</sub> injetado na subsuperfície, em milhões de tonelada, até 2010 para os principais projetos CCS, onde as áreas verde, azul e roxo referem-se respectivamente, aos projetos Sleipner, Weyburn e In Salah. **Fonte:** Audus, 2006.

Em curso desde 1990, quarenta e quatro projetos de injeção de gás ácido, rico em CO<sub>2</sub>, estão atualmente operando na região ocidental do Canadá. Embora operem em

pequena escala, estes projetos fornecem informações importantes a respeito da eficácia do gerenciamento da injeção de CO<sub>2</sub> assim como de gases perigosos como o H<sub>2</sub>S. O projeto *SACROC*, no Texas, foi o primeiro projeto de uso de CO<sub>2</sub> visando à recuperação forçada do petróleo, representando um projeto mundial de grande escala comercial durante o período de 1972 a 1995. O projeto *Rangely Weber* injeta CO<sub>2</sub> antropogênico gerado em plantas de processamento de gás em *Wyoming*. O Projeto *American Future Gen* proposto para final desta década será um projeto de armazenamento associado à geração de eletricidade através da queima de carvão. A injeção em pequena escala e o monitoramento estão sendo realizados pela RITE em *Nagoaka*, noroeste de *Honshu*, no Japão (IPCC, 2005).

Além desses, existem muitos projetos anunciados, podendo-se citar o projeto BP para capturar o CO<sub>2</sub> de uma central elétrica em *Peterhead*, na Escócia e transportá-lo ao campo de óleo *Miller*, no Mar do Norte para a recuperação do petróleo (EOR); *Statoil* e *Shell* planejam uma nova planta elétrica, na Noruega, que queimará gás natural com captura de CO<sub>2</sub>. Os projetos de injeção em pequena escala, para testar o armazenamento do CO<sub>2</sub> em camadas de carvão, foram realizados na Europa (RECOPOL) e no Japão. Um projeto de demonstração da injeção de CO<sub>2</sub> visando à recuperação reforçada de metano (ECBM) foi empreendido no norte da Bacia de *San Juan*, no Novo México, EUA. Outros projetos de CO<sub>2</sub>-ECBM têm sido empreendidos na China, Canadá, Itália e Polônia. Ao todo, cinquenta e nove oportunidades para o CO<sub>2</sub>-ECBM foram identificadas no mundo todo, sendo a maior parte na China. A tabela 5 apresenta os projetos já existentes e planejados, a partir de 2005, de captura e seqüestro de CO<sub>2</sub> no mundo (IPCC, 2005).

**Tabelas 5** Informações relevantes dos projetos CCS (existentes e planejados) indicando: nome, cidade, ano de início da injeção de CO<sub>2</sub>, taxa diária de injeção, capacidade total de armazenamento. *Fonte: IPCC, 2005*

Projeto	País	Ano de início da injeção	Aproximada taxa diária de injeção	Capacidade total de armazenamento (planejada)	Tipo de armazenamento
Sleipner	Noruega	1996	3000 ton	20 Mt	Aqüífero
Weyburn	Canadá	2000	3-500 ton	20 Mt	CO <sub>2</sub> -EOR
In Salah	Argélia	2004	3-4000 ton	17 Mt	Reservatórios depletados de hidrocarbonetos
Recopol	Polônia	2003	1 ton	10 ton	CO <sub>2</sub> - ECBM
Minami-Nagoaka	Japão	2002	177 ton	1600 ton	Aqüífero e Campo de gás
Frio	USA	2004	100-1000 ton	8 Mt	Aqüífero salino
Salt Creck	USA	2004	5-6000 ton	27 Mt	CO <sub>2</sub> -EOR
Quinshi Basin	China	2003	30 ton	150 ton	CO <sub>2</sub> - ECBM
Snøhvit	Noruega	2007	2000 ton	---	Aqüífero salino
Ketzin	Alemanha	2006	100 ton	60 Kt	Aqüífero salino
Pembina	Canadá	2005	50 ton	50 Kt	CO <sub>2</sub> -EOR
Teapot Dome	USA	2006	170 ton	10 Kt	Aqüífero salino CO <sub>2</sub> -EOR

### V.1) O Pionerismo Sleipner

O projeto Sleipner (figura 14) foi o 1º projeto *offshore* em escala comercial de armazenamento de CO<sub>2</sub> em formação salina, operado pela empresa *Statoil* no Mar do Norte, sendo criado para monitorar e investigar o armazenamento de CO<sub>2</sub>. A injeção de CO<sub>2</sub> começou em outubro de 1996 e, até 2005, mais de 7 MtCO<sub>2</sub> já foram injetados a uma taxa de 2700 toneladas/dia, esperando-se estocar um total de 20 MtCO<sub>2</sub>. No campo de gás *Sleipner*, o CO<sub>2</sub> é capturado de uma corrente de gás natural contendo 9%, em volume deste gás (este percentual deve ser reduzido a 2,5% para venda comercial), separado e então injetado em uma grande e profunda formação salina, denominada *UTSIRA*, a 800 metros abaixo do nível do mar, onde aproximadamente 1Mt de CO<sub>2</sub> são removidos do gás natural e injetados anualmente na formação (Solomon, 2007; IPCC, 2005; Kaarstad, 2004).



**Figura 14** Foto do Projeto Sleipner. **Fonte:** IEA, 2008f.

A *UTSIRA* é um aquífero salino profundo, não contém petróleo ou gás natural, apenas água salgada, sendo formada por uma camada muito permeável de areia/arenito (70%), sobreposta por uma camada de xisto que funciona como um “selo” que possui uma espessura que varia de 500 a 1500 metros. Este aquífero possui de 200-250 metros de espessura e 27-31% de porosidade, podendo alcançar até 42%. Abaixo de 800m de profundidade, estima-se que a capacidade total desse aquífero seja de, aproximadamente, 42.356 MtCO<sub>2</sub> e que apenas a formação *UTSIRA* possua um volume equivalente a 918 Km<sup>3</sup>, com uma capacidade de armazenamento de 847 MtCO<sub>2</sub>. A formação *UTSIRA* foi bem pré-caracterizada em relação à porosidade e permeabilidade, apresentando boa mineralogia, profundidade, capacidade de armazenamento e de injeção, pressão e temperatura. Informações geológicas disponíveis revelam ausência de grandes eventos tectônicos na formação *UTSIRA*, significando que o ambiente geológico é tectonicamente estável, indicando que o local é apropriado para o armazenamento de CO<sub>2</sub>. As bacias formadas em áreas continentais ou próximas às extremidades das plataformas continentais são excelentes locais de armazenamento de CO<sub>2</sub> a longo prazo devido à sua estabilidade e estrutura (Solomon, 2007).

O Projeto Sleipner de armazenamento de CO<sub>2</sub> em aquífero salino denominado SACS foi desenvolvido para pesquisa e demonstração do monitoramento e acompanhando da operação de armazenamento de CO<sub>2</sub> na subsuperfície. Durante 1998, um grupo de empresas energéticas juntamente com autoridades ambientais na Noruega, Dinamarca,

Holanda, França e Reino Unido formaram esse Projeto e começaram a coletar informações sobre o CO<sub>2</sub> injetado na formação UTSIRA, assim como de estruturas subterrâneas similares nas proximidades do Mar do Norte. Este projeto inclui diferentes disciplinas científicas, dentre elas a geologia, a geoquímica, a geofísica, a engenharia e simulação do reservatório. Em 1999, a primeira fase deste projeto iniciou sua prática através do monitoramento do comportamento do CO<sub>2</sub> e estabelecendo uma “linha de base” através da realização da primeira amostragem sísmica 3-D (Solomon, 2007).

A segunda fase do projeto SACS, também denominada SACS 2, teve início em 2000, estendendo-se até 2003, onde continuaram-se os trabalhos iniciados na 1ª fase, porém com repetidas amostragens sísmicas 3D a fim de acompanhar a migração do CO<sub>2</sub> injetado dentro do reservatório. Além disso, também estão sendo usados dados sísmicos para verificar a disponibilidade dos modelos e ferramentas originalmente desenvolvidos para campos de hidrocarbonetos, onde a maior diferença reside no fato do CO<sub>2</sub> ser solúvel em água e o metano não (Solomon, 2007). O objetivo do SACS 2 era desenvolver um consenso entre os resultados do monitoramento e a validade de modelos e ferramentas disponíveis, para isso, era preciso uma estreita coordenação entre os institutos científicos envolvidos no projeto. As experiências acumuladas e adquiridas nos projetos de armazenamento de CO<sub>2</sub> em aquíferos salinos foram apresentadas em um Manual de Boas Práticas para auxiliar outras organizações que planejavam desenvolver projetos de injeção de CO<sub>2</sub> aproveitando do aprendizado adquirido no Sleipner, assim como facilitar a realização de novos projetos deste tipo.

Segundo *Solomon* (2007), o armazenamento de CO<sub>2</sub> em aquíferos salinos profundos possui uma alta probabilidade de ser seguro, caso esses aquíferos possuam as seguintes características:

- 1) possuir alta capacidade de armazenamento e alta injetividade;
- 2) possuir selo eficiente (*caprock*);
- 3) estar localizado em ambiente geológico estável a fim de evitar o comprometimento da integridade do local de armazenamento.

De uma forma geral, todos os reservatórios geológicos devem satisfazer essas condições; porém, dentre os critérios mais importantes para um armazenamento seguro, os que mais se destacam são a verificação das características das bacias sedimentares (relacionadas às atividades tectônicas e ao tipo de sedimento); os recursos das bacias



(hidrocarbonetos, carvão, sal); a maturidade e infra-estruturas da empresa e as questões sociais quanto ao nível de desenvolvimento, economia, questões ambientais e educação pública.

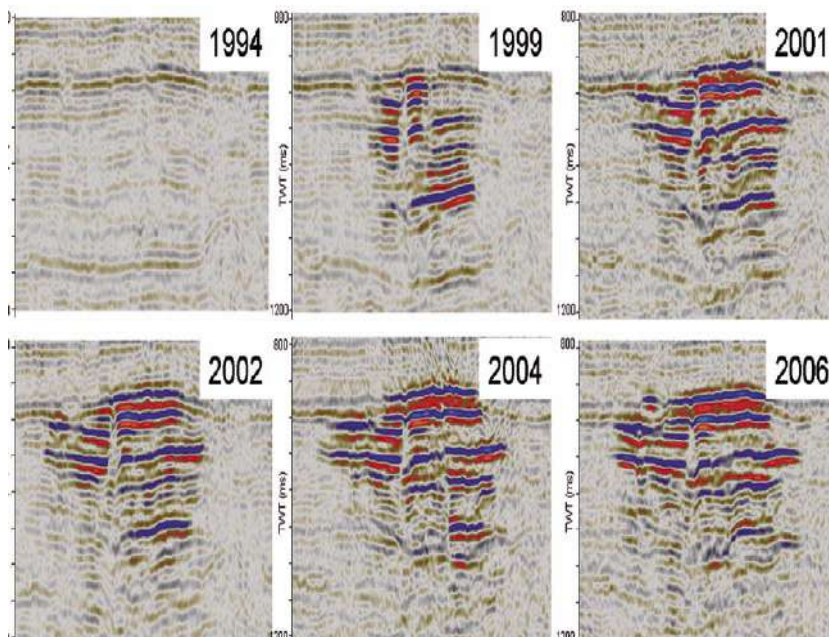
A figura 15 mostra que o processo de injeção de CO<sub>2</sub> foi monitorado, medido e verificado periodicamente através de métodos sísmicos que permitem a visualização e o deslocamento do CO<sub>2</sub> injetado, possibilitando também antever o comportamento do gás dentro da formação geológica (Kaarstad, 2004; Arts *et al*, 2008). Alguns dados obtidos através do monitoramento do Projeto Sleipner (Kaarstad, 2004; Arts *et al*, 2008):

**- Sondagens:**

- 1994: realizadas antes da injeção;
- 1999: mostraram 2,35 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> in situ;
- 2001: mostraram 4,26 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> in situ;
- 2002: mostraram 4,97 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> in situ.

**- Sísmicos:**

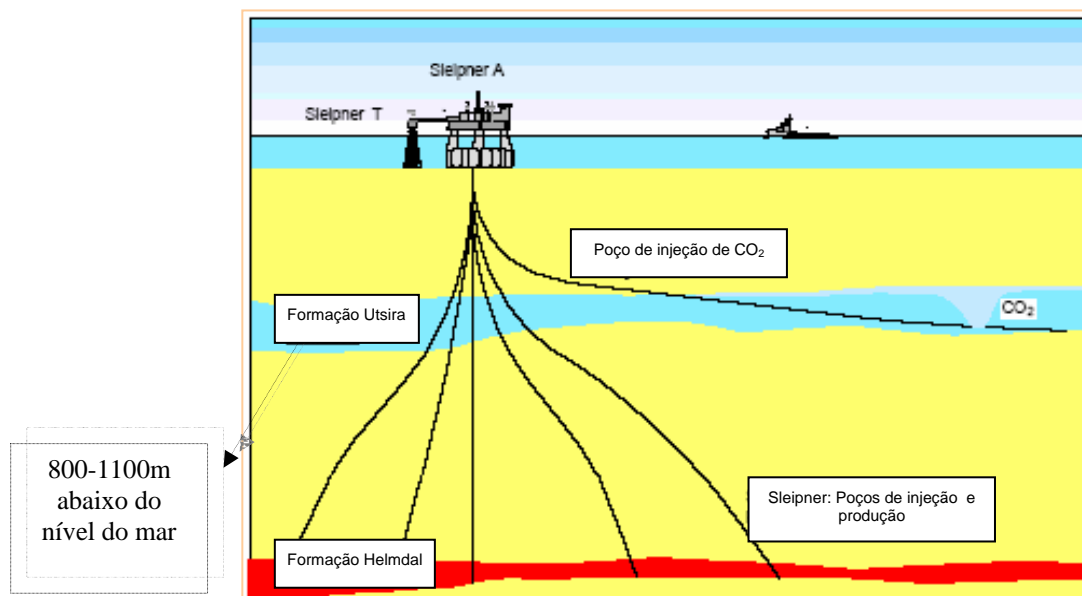
- o CO<sub>2</sub> é claramente observado dentro do reservatório;
- grande parte do CO<sub>2</sub> acumula-se abaixo da caprock;
- orientação da plumagem claramente definida;
- não há migração do CO<sub>2</sub> para fora da formação.



**Figura 15** Técnica de monitoramento do CO<sub>2</sub> injetado na formação UTSIRA, observando-se claramente a presença do gás dentro do reservatório (cores mais fortes). **Fonte:** Kaarstad, 2004; Arts *et al*, 2008.

Estudos recentes realizados no *Sleipner* mostram a segurança do armazenamento, revelando um baixo impacto ambiental e a integridade da *caprock*, a qual possui uma eficiente capacidade de impermeabilização; com isso, esse projeto vem provando que os métodos de captura e o armazenamento de CO<sub>2</sub> são técnicas viáveis e eficazes de mitigação do efeito estufa. (Solomon, 2007).

A figura 16 mostra a plataforma *Sleipner T* (Tratamento), onde ocorrem os processos de captura e compressão do CO<sub>2</sub>. O poço de injeção de CO<sub>2</sub> é desviado e perfurado nas proximidades da plataforma A, apoiada aproximadamente a 82 metros de profundidade do fundo do mar, a qual produz petróleo e gás natural no Mar do Norte (Solomon, 2007; IPCC, 2005).



**Figura 16** Figura ilustrativa do Projeto Sleipner com a localização das plataformas A e T e da formação UTSIRA, bem como os canais de injeção de CO<sub>2</sub>. **Fonte:** Solomon, 2007; IPCC, 2005.

## V.2) Principais projetos e oportunidades de implantação da tecnologia CCS no Brasil

A Petrobrás saiu à frente na pesquisa e desenvolvimento de projetos de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>. Desde 1987, na Bahia, a empresa utiliza a técnica de CO<sub>2</sub>-EOR onde captura o CO<sub>2</sub> de sua fábrica de fertilizantes (Fafen) e o injeta em campos de petróleo maduros, conseguindo recuperar mais de 70% do petróleo no campo; o que não era

possível anteriormente conseguindo-se extrair apenas de 30-40% (CEPAC, 2008b; Petrobrás, 2008; PUCRS, 2007).

Em outubro de 2007, a PUCRS em parceria com a Petrobrás criou o primeiro núcleo no Brasil na área de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>, o Centro de Excelência em Pesquisa sobre Armazenamento de Carbono para a Indústria de Petróleo, denominado CEPAC, tendo como principal objetivo P&D na área de armazenamento de CO<sub>2</sub>, focando-se em temas como corrosão de estruturas de poços de petróleo, cimento e aço geradas pela injeção de CO<sub>2</sub> e os impactos ambientais devido ao armazenamento de CO<sub>2</sub> em camadas de carvão e campos de petróleo ( PUCRS, 2007).

Segundo Ketzer (PUCRS, 2007), as pesquisas realizadas na PUCRS revelaram que o Brasil possui uma grande capacidade de armazenamento de dióxido de carbono, onde se estima uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de, aproximadamente, 2000 Gt. Outro importante projeto da PUCRS em parceria com a Petrobrás é o Mapa Brasileiro de Seqüestro de Carbono (CarbMap) que consiste de um mapeamento das principais fontes estacionárias emissoras de CO<sub>2</sub> e dos potenciais locais de armazenamento deste gás (PUCRS, 2007; Ketzer et al, 2008). Estudos realizados pelo CarbMap, através de coleta de dados e informações, permitiram a localização de diversas bacias em diferentes áreas brasileiras, bem como as capacidades de armazenamento de CO<sub>2</sub> em cada Bacia sedimentar mapeada, servindo como ponto de partida para a implantação de novos projetos CCS no Brasil. Várias oportunidades foram encontradas, podendo citar: a Bacia de Santos (*offshore*), onde existem campos de petróleo e gás natural com capacidade de 167 Mt (reservas), e aquíferos salinos com capacidade de 148.000 Mt; a Bacia de Campos (*offshore*) com presença de campos de petróleo e gás natural, com capacidade de 1800 Mt (reservas), e de aquíferos salinos com capacidade efetiva de 480 Mt; a Bacia do São Francisco (*onshore*), onde há a presença de aquíferos salinos; a Bacia do Recôncavo (*onshore*), onde estão presentes campos de petróleo e gás natural como também de aquíferos salinos; e, por último, a Bacia do Paraná (*onshore*), onde existem aquíferos salinos com capacidade de 462.000Mt e de camadas de carvão com capacidade de 200Mt (Ketzer et al, 2007).

Em setembro de 2007, a Petrobrás criou o Programa Estratégico e Tecnológico de Mitigação das Mudanças Climáticas (PROCLIMA) com foco no projeto CCS. Os projetos de CCS propostos que serão implementados até 2014 na Bacia do Recôncavo, Bacia de Campos, Bacia Potiguar e Bacia do Paraná, irão permitir que aproximadamente 9 milhões

de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano não sejam emitidos para a atmosfera, correspondente a 18% das emissões da Petrobrás em 2006 (Cunha *et al*, 2007). Em relação à captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>, o PROCLIMA possui como principais metas (Ketzer *et al*, 2007):

I. Desenvolvimento de tecnologias de separação e captura que permitam uma significativa redução de 50% dos custos relacionados à captura de CO<sub>2</sub> possibilitando, portanto, uma redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Está previsto, para 2009, a demonstração dessa técnica com uma produção de 250 tons CO<sub>2</sub>/dia alcançando em 2012 a escala industrial (900 tons CO<sub>2</sub>/dia);

II. Desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de CO<sub>2</sub>, avaliação de riscos e monitoramento a fim de garantir a segurança do armazenamento geológico. Esta técnica estava prevista para ser praticada em 2008 em escala piloto (350 tons CO<sub>2</sub>/dia), com demonstração para 2012 (produção de 900 tons CO<sub>2</sub>/dia).

Além disso, o Brasil encontra-se no seguinte estágio de desenvolvimento tecnológico em relação ao projeto CCS (Cunha *et al*, 2007; Ketzer *et al*, 2007):

- ✓ Projeto Miranga, 2008, pela Petrobrás com demonstração em larga escala (1,9 mil tons/ano);
- ✓ Aquífero Rio-Pojuca, 2009, pela Petrobrás em escala piloto;
- ✓ UCG (Underground Coal Gaseification) + CCS, 2011, pela Petrobrás & LLNL NETL na Bacia do Paraná em escala piloto;
- ✓ Capture Project Phase 2(CCP2), projeto de P&D da Petrobrás em parceria com British Petroleum, ChevronTexaco, Shell, ENI, Suncor, Norsk Hydro e ConocoPhilips.

A Petrobrás investiu, no período de 2003-2008, 25 milhões de dólares em pesquisa e desenvolvimento na área de seqüestro de carbono e pretende investir, de 2008-2014, 65 milhões de dólares em demonstração e escala piloto (Ketzer *et al*, 2007).

## Capítulo VI - Conclusões

As projeções no setor energético, apresentadas neste trabalho, indicam um aumento contínuo na demanda por energia e uma maior participação dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial, o que conseqüentemente tem contribuído para uma emissão cada vez maior de gases de efeito estufa na atmosfera, sobretudo de CO<sub>2</sub>. Este fato pode explicar o que foi verificado na medição dos níveis de CO<sub>2</sub> emitidos em 2006, em comparação àqueles emitidos em 1990, sendo observado, neste período, um aumento de aproximadamente 9 Gt de CO<sub>2</sub>. Diante destes resultados, observa-se claramente que a meta estabelecida pelo Tratado de Quioto está muito longe de ser alcançada. Porém, não se deve esquecer que sua implementação foi de extrema importância na tentativa de mudar o atual cenário ambiental e o seu sucesso na redução das emissões de GEE depende do comprometimento de todos os países que o ratificaram. Neste cenário, o planejamento energético se apresenta como um instrumento capaz de promover a diversificação da matriz energética mundial, investindo, sobretudo, em fontes renováveis de energia como, por exemplo, a eólica e a solar, as quais não emitem GEE, garantindo, desta forma, o desenvolvimento sustentável.

É preciso que novas metas de redução de emissões sejam estabelecidas dando continuidade ao compromisso de preservar o meio ambiente. O Tratado de Bali já está em negociação, onde possíveis compromissos serão firmados visando à conservação e à preservação do meio ambiente pós-Quioto. Este tratado será de extrema importância para o Brasil ao abordar temas como a redução do desmatamento e das queimadas, atividades responsáveis por 75% das emissões brasileiras de CO<sub>2</sub>.

A tecnologia de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> em formações geológicas apresenta-se como uma opção bastante viável para contribuir com a estabilização dos níveis de CO<sub>2</sub> atmosférico. Destaca-se o Projeto Sleipner, o qual é, até hoje, um projeto muito bem sucedido, onde não foram constatados vazamentos de CO<sub>2</sub>. A importância de selecionar, cuidadosamente, um local de armazenamento adequado, principalmente a escolha de locais com elevada estabilidade geológica, é imprescindível para a segurança do armazenamento. Porém, um fator limitante à aplicabilidade desta tecnologia está relacionado aos custos da captura do CO<sub>2</sub>, onde se percebe a necessidade de avanços tecnológicos que possibilitem a redução destes.

O Brasil já começou a investir nesta tecnologia, tendo a Petrobrás um papel de destaque, investindo, desde 2005, em pesquisa e no desenvolvimento das principais rotas tecnológicas de captura de carbono, assim como em projetos de captura, transporte e armazenamento em reservatórios geológicos. Estudos comprovam a existência de oportunidades para a sua implantação em inúmeras bacias sedimentares, apresentando uma enorme capacidade para armazenamento geológico (da ordem de 2 trilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>). Num futuro próximo o Brasil poderá fazer parte de um seleto grupo de países que detêm esta tecnologia, contribuindo significativamente para o desenvolvimento sustentável do planeta.

## Referências Bibliográficas

- Arts, R. *et al.*, Ten years' experience of monitoring CO<sub>2</sub> injection in the Utsira Sand at Sleipner, offshore Norway, 2008. <http://www.tbm.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=95ebf155-9796-4156-ad00-dc5a3becd101&lang.../artikel%20Arts%20fbjan08> (acessada em 07 de agosto de 2008)
- Audus, H., An update on CCS: Recent Development, 2<sup>nd</sup> IEA Workshop on Legal Aspects of storing CO<sub>2</sub>, Paris, French, 2006. <http://www.iea.org/Textbase/work/2006/carbon/4.pdf> (acessada em 04 de outubro de 2008)
- Bassetto, L.I. *et al.*, Crédito de carbono: uma moeda ambiental como fator de motivação econômica. XXVI ENEGEP, 2006. <http://www.pg.cefetpr.br/ppgep/Ebook/e-book2006/Artigos/16.pdf> (acessado em 13 de abril)
- Benson, S.M., Monitoring Carbon Dioxide Storage in Deep Geological Formations. Stanford University. Global Climate & Energy Project. Staff Workshop on Technical Papers for AB1925 Report to the Legislature, 2007. [http://www.westcarb.org/pdfs\\_ab1925/Benson\\_Monitoring.pdf](http://www.westcarb.org/pdfs_ab1925/Benson_Monitoring.pdf) (acessado em 17 de maio de 2008)
- CEPAC (Centro de Excelência em Pesquisa sobre Armazenamento de Carbono), Efeito Estufa e Mudanças Climáticas, 2008<sup>a</sup>. [http://www.pucrs.br/cepac/?p=efeito\\_estufa](http://www.pucrs.br/cepac/?p=efeito_estufa) (acessado em 15 de maio de 2008)
- Câmara, R.J.B. *et al.*, Campos Maduros de Petróleo – Definição para Efeitos Regulatórios, 2003. [http://www.recam.org.br/projetos/projeto-1/publicacoes/artigo\\_abar.pdf](http://www.recam.org.br/projetos/projeto-1/publicacoes/artigo_abar.pdf) (acessado 12 de outubro de 2008)
- Chairman, B.M, International Energy Agency Working Party on Fossil Fuels: Solutions for the 21<sup>st</sup> Century. Zero Emissions Technologies for Fossil Fuels, 2002. <http://www.csforum.org/documents/TSRMAY2002.pdf> (acessado em 10 de maio de 2008).
- CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos). Mudanças Climáticas, 2008. [http://www.cptec.inpe.br/mudancas\\_climaticas](http://www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas) (acessado em 14 de agosto de 2008)
- CSIRO. Post-combustion capture of CO<sub>2</sub> emissions from power stations. <http://www.csiro.au/science/PostCombustionCaptureProject.html> (acessada em 20 de setembro de 2008)
- Cunha, P. *et al.*, Carbon Sequestration Technological Development in Petrobras. Business Perspectives on CO<sub>2</sub> Capture and Geological Storage (CCS) Enabling Widespread Application – IPIECA Side Event/ COP 13 – UNFCCC Bali, December 10th, 2007. [http://www.ipieca.org/activities/climate\\_change/downloads/workshops/dec\\_07/Paulo.pdf](http://www.ipieca.org/activities/climate_change/downloads/workshops/dec_07/Paulo.pdf) (acessado em 09 de outubro de 2008)
- CEPAC (Centro de Excelência em Pesquisa sobre Armazenamento de Carbono). O que é Sequestro de Carbono? 2008b. [http://www.pucrs.br/cepac/?p=sequestro\\_carbono](http://www.pucrs.br/cepac/?p=sequestro_carbono) (acessado em 17 de setembro de 2008)
- Dantas, G.A., O Impacto dos Créditos de Carbono na Rentabilidade da Co-Geração Sucroalcooleira Brasileira, 2008. [http://www.nuca.ie.ufrrj.br/infosucro/biblioteca/inf\\_Dantas\\_CreditosCarbono.pdf](http://www.nuca.ie.ufrrj.br/infosucro/biblioteca/inf_Dantas_CreditosCarbono.pdf) (acessada em 01 de junho de 2008)

Dooley, J.J. *et al.*, Carbon Dioxide Capture and Geologic Storage. A Core Element of a Global Energy Technology Strategy To Address Climate Change, 2006. [http://www.pnl.gov/gtsp/docs/ccs\\_report.pdf](http://www.pnl.gov/gtsp/docs/ccs_report.pdf) (acessada em 10 de julho de 2008)

EIA (Energy Information Administration). International Energy Outlook 2008. [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2008\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2008).pdf) (acessada em 06 de novembro de 2008)

Gale, J., The Sleipner Project and Monitoring Experiences, 2<sup>nd</sup> Nova Scotia Energy Research and Development Forum, 2006. [http://ns.energyresearch.ca/files/John\\_Gale.Sleipner.pdf](http://ns.energyresearch.ca/files/John_Gale.Sleipner.pdf) (acessada em 25 de setembro de 2008)

HDR - Relatório de Desenvolvimento Humano 2007/2008. O Desafio Climático do Século XXI. [http://hdr.undp.org/en/media/HDR\\_20072008\\_PT\\_chapter1.pdf](http://hdr.undp.org/en/media/HDR_20072008_PT_chapter1.pdf) (acessada em 16 de outubro de 2008)

IEA (International Energy Agency) Near- Term Opportunities For Carbon Dioxide Capture And Storage. Issues Identification Workshop In Support of the G8 Plan of Action. Summary Report, 2007a. [http://www.iea.org/textbase/work/2007/oslo/summary\\_report.pdf](http://www.iea.org/textbase/work/2007/oslo/summary_report.pdf) (acessada em 21 de agosto de 2008)

IEA (International Energy Agency) Findings of Recent. IEA WORK, 2007b. <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/findings.pdf> (acessado em 23 de setembro de 2008)

IEA (International Energy Agency). World Energy Outlook - Sumário e Conclusões, 2006. [http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2006/portuguese\\_sum\\_06.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2006/portuguese_sum_06.pdf) (acessado em 21 de agosto de 2008)

IEA (International Energy Agency). Technology Penetration and Capital Stock Turnover: Lessons From IEA Scenario Analysis, 2007c. [http://www.iea.org/textbase/papers/2007/capital\\_stock.pdf](http://www.iea.org/textbase/papers/2007/capital_stock.pdf) (acessada em 25 de setembro de 2008).

IEA Greenhouse Gas R&D Programme. Storing CO<sub>2</sub> in Unminable Coal Seams, 2008d. <http://www.ieagreen.org.uk/8.pdf> (acessado em 09 de outubro de 2008)

IEA Greenhouse Gas R&D Programme. Depleted Oil & Gas Fields for CO<sub>2</sub> Storage, 2008e. <http://www.ieagreen.org.uk/7.pdf> (acessada em 09 de outubro de 2008))

IEA Greenhouse Gas R&D Programme. CO<sub>2</sub> Storage in Deep Salt Water Reservoirs, 2008f. <http://www.ieagreen.org.uk/6.pdf> (acessado em 09 de outubro de 2008)

Impactus Empresa sustentável, N° 10, Janeiro/Março, 2007. <http://ww.impactus.org/PDF/impactus10.pdf> (acessado em 15 de outubro de 2008)

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC 1996: Climate Change 1995: The Science of Climate Change-Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report. *Cambridge Univ. Press*. 1996. 56 pp.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC 2001: Climate Change 2001: the Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T.Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson, (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/?src=/climate/ipcc\\_tar/wg1/index.htm](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm) (acessado em 03 de outubro de 2008)



INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

International Panel on Climate Change. About IPCC, 2008. <http://www.ipcc.ch/about/index.htm> (acessado em 29 de junho de 2008)

IPAM (Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia). Mudança Climática. Clima em revista/Fevereiro de 2008. <http://www.climaedesmatamento.org.br/revista/ver/14> (acessada em 25 de outubro de 2008)

Kaarstad, O., The Sleipner Project. Statoil New Energy. IEA Asia Pacific Conference on Zero Emissions Technologies, 2004. <http://www.iea.org/Textbase/work/2004/zets/conference/presentations/kaarstad.pdf> (acessada em 25 de setembro de 2008)

Ketzer, J.M., Villwock, J.A., O Desafio Quioto e a Indústria do Carbono. [http://www.britcham.com.br/download/100806rs/Prof.%20Jo%C3%A3o%20Marcelo%20Ketzer\\_PUCRS.pdf](http://www.britcham.com.br/download/100806rs/Prof.%20Jo%C3%A3o%20Marcelo%20Ketzer_PUCRS.pdf) (acessado em 14 de março de 2008)

Ketzer, J. M. *et al.*, Carbon Sequestration Technological Development in Brazil. United Nations Expert Group Meeting on Carbon Dioxide Capture and Storage and Sustainable Development, New York, September 10 to 11th, 2007. [http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/energy/op/ccs\\_egm/presentations\\_papers/cunha\\_presentation.pdf](http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/energy/op/ccs_egm/presentations_papers/cunha_presentation.pdf) (acessado em 09 de outubro de 2008)

Klusman, R.W., Evaluation of leakage potential from a carbon dioxide EOR/sequestration project Energy Conversion and Management 44 (2003) 1921–1940, Department of Chemistry and Geochemistry, Colorado School of Mines, Golden, CO 80401, USA

Magalhães, G.F., Catástrofes Climáticas Mundiais: Contra-indicações das ações humanas ou ordem natural?, 2008. <http://gedi.objectis.net/ilsabrazil2008/artigos/dema/ferreiramagalhaes.pdf> (acessado em 23 de setembro de 2008)

Marengo, J.A., Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI (Série Biodiversidade, v. 26), 2006. [http://www6.cptec.inpe.br/mudancas\\_climaticas/apres\\_eventos.shtml](http://www6.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas/apres_eventos.shtml) (acessado em 22 de agosto de 2008)

Marengo, J.A. *et al.*, Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório nº 5, 2007. [http://www6.cptec.inpe.br/mudancas\\_climaticas/prod\\_probio/Relatorio\\_5.pdf](http://www6.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas/prod_probio/Relatorio_5.pdf) (acessado em 22 de agosto de 2008)

Marini, A., Mudanças Climáticas, Escola Agrotécnica Federal de Castanhal-PA, 2007. [http://www.eafc-pa.gov.br/professores/mat\\_didático/Adriano/Mudanças\\_Climat.pdf](http://www.eafc-pa.gov.br/professores/mat_didático/Adriano/Mudanças_Climat.pdf) (acessado em 13 de abril de 2008)

MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia) Texto do Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, 2008a. <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/28817.html> (acessado em 11 de maio de 2008)

MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia) Protocolo de Quioto, 2008b. [http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0012/12425.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0012/12425.pdf) (acessada em 11 de maio de 2008)

MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia) Compromissos quantificados de limitação ou redução de emissões por Parte, 2008c. <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/28821.html> (acessado em 11 de maio de 2008)

MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia). Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal, 2008d. <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/57270.html> (acessado em 23 de agosto de 2008)

MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia). Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Não Controlados pelo Protocolo de Montreal. Comunicação Inicial do Brasil, 2008d. [http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0004/4199.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0004/4199.pdf) (acessado em 4 de agosto de 2008)

Murce, T. *et al.*, Desenvolvimento Tecnológico em Mudanças Climáticas no Centro de Pesquisas da Petrobras. 1º Congresso do Centro-Oeste Brasileiro sobre Mudanças Climáticas e Redução de Gases do Efeito Estufa, 2007. [http://www.ecowood.com.br/evento/palestras/07-08/10-07\\_08-Thais\\_Murce-CENPES\\_PETROBRAS.pdf](http://www.ecowood.com.br/evento/palestras/07-08/10-07_08-Thais_Murce-CENPES_PETROBRAS.pdf) (acessado em 12 de agosto de 2008)

NETL (National Energy Technology Laboratory). R&D Facts, U.S. Department of Energy Carbon Sequestration, Oxy-Fuel Combustion, 2008. <http://www.netl.doe.gov/publications/factsheets/rd/R&D127.pdf> (acessada em 17 de setembro de 2008)

Neto, C.C., Modelo de Compensação de CO<sub>2</sub> para Empresas Poluidoras do Ar: Um Estudo de Caso no Vale do Itapocu, Região Norte de Santa Catarina, 2002. <http://teses.eps.ufsc.br/defesa/pdf/8895.pdf> (acessada em 24 de outubro de 2008)

Oldenburg, C.M. *et al.*, Near-surface monitoring strategies for geologic carbon dioxide storage verification. Lawrence Berkeley National Laboratory (University of California, University of California), 2003.

Paciornik, N., O Papel do Governo Brasileiro. Ministério da Ciência e Tecnologia Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, 2006. <http://www.camaraespanhola.org.br/1-%20Newton%20-%20Comiss%E3o.pdf> (acessado em 24 de setembro de 2008)

Paciornik, N., O Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, 2007. <http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/np.ppt> (acessado em 24 de setembro de 2008)

Parson, I., Elements an International Magazine of Mineralogy, Geochemistry and Petrology Volume 3, Number 3, 2007. <http://www.elementsmagazine.org> (acessado em 10 de setembro de 2008)

Petrobrás, 2008. Seqüestro de Carbono. <http://www2.petrobras.com.br/AtuacaoInternacional/PetrobrasMagazine/pm50/port/carbono.html> (acessado em 20 de agosto de 2008)

- Price, J. *et al.*, Geological Storage of Carbon Dioxide. Staying Safely Underground, 2008. <http://www.ieagreen.org.uk/glossies/geostoragesfty.pdf> (acessado em 21 de agosto de 2008)
- USEV (U.S. Embassy Vienna), Fact Sheet: United States Policy on the Kyoto Protocol, 2008. <http://vienna.usembassy.gov/en/download/pdf/kyoto.pdf> (acessada em 04 de outubro de 2008)
- PUCRS Informação. Revista da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Assessoria de Comunicação Social, Ano XXX,Nº 137. Novembro/Dezembro/2007. <http://www.pucrs.br/revista/pdf/0137.pdf> (acessado em 16 de outubro de 2008)
- Renner, R.M., Seqüestro de Carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil, 2004. [http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf\\_ms/2004/d387\\_0560-M.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_ms/2004/d387_0560-M.pdf) (acessado em 14 de julho de 2008)
- Ribas, R.P., Estratégias das Empresas de Petróleo no Cenário de Mudanças Climáticas Globais, 2008. <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/rodrigop.pdf> (acessado em 10 de junho de 2008)
- Santos, M.A., Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa Derivadas da Hidrelétricas, 2000. <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/masantos.pdf> (acessada em 23 de setembro de 2008)
- SEED (Schlumberger Excellence in Educational Development). Mudança no Clima Global e Energia. Captura e Armazenamento de Carbono. [http://www.seed.slb.com/pt/scictr/watch/climate\\_change/capture.htm](http://www.seed.slb.com/pt/scictr/watch/climate_change/capture.htm) (acessada em 23 de julho de 2008)
- Solomon, S., Carbon Dioxide Storage: Geological Security and Environmental Issues – Case Study on the Sleipner Gas field in Norway. Bellona Report, 2007.
- UNEP, Intergovernmental Panel on Climate Change. 16 Years of Scientific Assessment in Support of the Climate Convention, 2004. <http://www.ipcc.ch/pdf/10th-anniversary/anniversary-brochure.pdf> (acessada em 10 de junho de 2008)
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). Greenhouse Gas Inventory Data, 2008a. [http://unfccc.int/ghg\\_data/items/3800.php](http://unfccc.int/ghg_data/items/3800.php) (acessado em 01 de junho de 2008)
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). The United Nations Climate Change Conference in Bali, 2008b. [http://unfccc.int/meetings/cop\\_13/items/4049.php](http://unfccc.int/meetings/cop_13/items/4049.php) (acessada em 01 de junho de 2008)
- USDS (U. S. Department of State), Telling America's Story. Bush Explains U.S. Positions on Kyoto Protocol, Iraq War, 2005. <http://www.america.gov/st/washfileenglish/2005/July/200507011349191CJsamohT0.4202474.html> (acessada em 04 de outubro de 2008)