

# 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

Uma revisão dos processos de captura de CO<sub>2</sub>

## AUTORES:

Talita Odriane Custódio Leite, Elisângela de Souza Costa, Jussara Lopes de Miranda

## INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Rio de Janeiro

*Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.*

## UMA REVISÃO DOS PROCESSOS DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

### Abstract

Global emission of anthropogenic carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) has been cited as the major cause of global warming, concerning the world's population about its long-term results. A very promising strategy to mitigate this problem is the Carbon capture and storage (CCS) technologies in industries, such as power plants, using a variety of processes with different mechanisms. The objective of this paper is to review and discuss the methods used and in study nowadays, with a special focus in research programs in Brazil.

### Introdução

No mundo científico, ainda não há um consenso sobre as causas das mudanças climáticas, porém, a maioria dos pesquisadores acredita que o maior responsável pelo aquecimento global seja o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> antropogênico na atmosfera produzido, principalmente, pela queima de combustíveis (óleo, gás e carvão) utilizados na geração de energia. O CO<sub>2</sub> é produzido e emitido para a atmosfera através de processos naturais, como por exemplo, a respiração celular e ao lado de outros gases de efeito estufa (GEE), tal como o metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), vapor d'água e ozônio (O<sub>3</sub>) formam uma camada protetora, na região da troposfera, que é de vital importância para evitar a perda de calor da Terra para o espaço, fenômeno conhecido como efeito estufa. Porém, com o aumento da utilização dos combustíveis fósseis, desde a revolução industrial, um desequilíbrio entre a produção de CO<sub>2</sub> e sua absorção por processos naturais, como a fotossíntese, foi provocado, uma vez que, a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida à atmosfera é muito maior do que a natureza consegue absorver. O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera intensifica o efeito estufa, principal fator responsável pela elevação não natural da temperatura terrestre (Li, *et al.*, 2011), sendo responsável, por exemplo, pelo derretimento das calotas polares e mudanças climáticas severas, alterando o perfil das regiões costeiras e a intensidade, constância e qualidade das chuvas.

Para continuar a produtividade industrial dos países sem prejudicar sua economia, pode-se interferir na captura e conversão de CO<sub>2</sub> (Li *et al.*, 2011). Esta é a área onde as tecnologias de CCS atuam, e também contribuem para o desenvolvimento de outros setores estratégicos, como os combustíveis renováveis – que favorece o equilíbrio entre a produção de CO<sub>2</sub> e sua absorção natural – e maior eficiência energética. Neste trabalho, os autores pretendem revisar as tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono – do inglês Carbon Capture and Storage (CCS) – em particular o processo de captura de CO<sub>2</sub> de fontes fixas, identificando os avanços na área, além de recuperar as idéias efetivas anteriormente reportadas para a mesma finalidade, porém, com um olhar especial para os processos em andamento no Brasil, um país com grande perspectiva mundial na exploração e no refino do petróleo, principalmente no momento atual com a exploração do pré-sal.

### Metodologia

As informações foram coletadas da literatura com foco nos processos de captura de CO<sub>2</sub> – pós-combustão, pré-combustão, oxi-combustão e o looping químico –, tecnologias de captura – absorção, adsorção, membranas, destilação criogênica –, projetos atuais e também os problemas encontrados para a implementação destas tecnologias. Para a pesquisa de artigos científicos na área, foi utilizado o site “Web of Science”, “Scielo”, “ScienceDirect” e informações divulgadas em congressos recentes

também foram coletadas. Para a busca foram utilizadas as expressões “(CO<sub>2</sub> or carbon dioxide) and capture” e “(CO<sub>2</sub> or carbon dioxide) and capture and review”. Os resultados foram analisados seguindo a seguinte ordem de prioridade: data, autores dos artigos científicos, instituições e países nos quais as pesquisas foram reportadas, tipo de fonte de gás onde o CO<sub>2</sub> é capturado, tipo de processo, detalhes dos componentes e dos processos para cada método de captura, além de outros detalhes.

### Resultados e Discussão

As preocupações acerca dos processos de captura de CO<sub>2</sub> demandam uma compreensão com toda a lógica esquemática de um processo trifásico, envolvendo diferentes tecnologias e conhecimentos. Os processos que envolvem o transporte e o armazenamento de CO<sub>2</sub> são os mais antigos, com grande foco das indústrias petrolíferas no mundo. Já a área de conversão de CO<sub>2</sub>, por ser mais recente, não apresenta ainda estudos completos que consigam ter bom custo-benefício, que ocupem menores áreas de construção – considerando sua localização dentro de uma planta industrial ou até mesmo em plataformas de petróleo, que emitem CO<sub>2</sub> durante a exploração – além de fornecer elevado rendimento, tornando-se assim, um desafio para os pesquisadores. As emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes da queima de combustíveis utilizados nos processos de geração de energia, de certos processos industriais, ou ainda, no processamento de gás natural podem ser reduzidas através dos processos CCS, que tem como objetivo a captura e o armazenamento de CO<sub>2</sub>. A separação do CO<sub>2</sub> de outros gases é a etapa que apresenta maior dificuldade técnica e representa 75% dos custos associados com a sua separação, armazenamento e transporte (Ebner, 2009, Figueroa, 2008, IPCC, 2005). O dióxido de carbono pode ser capturado a partir do fluxo de gases de combustão produzido durante a geração de energia, em três cenários distintos, Pós-combustão, pré-combustão e oxicomustão ou a partir de processos industriais (Damen, *et al.*, 2006; Thiruvengkatachari, *et al.*, 2009).

A separação do CO<sub>2</sub> no cenário de pós-combustão ocorre após a queima do combustível com o ar. Este é o processo mais adotado pelas indústrias que atualmente já realizam processos de CCS, pois a captura na pós-combustão é comparativamente mais viável em curto prazo, uma vez que, a estrutura necessária para este tipo de captação pode ser incorporada às plantas industriais já construídas, além da baixa necessidade energética e da possibilidade de ser retroalimentada. Porém, questões como a baixa pressão parcial de dióxido de carbono na corrente gasosa, aproximadamente 0,15 atm, levam à necessidade de aumento da circulação das substâncias de captura para um maior rendimento. A deficiência de temperatura e eficiência, além do elevado valor agregado levam à busca de alternativas para esses problemas (Choi, 2009; Figueroa *et al.*, 2008).

Na pré-combustão, o combustível é gaseificado, em seguida a reforma do metano leva à formação do gás de síntese (CO + H<sub>2</sub>) – syngas – que através da reação conhecida como deslocamento da água leva à formação do CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>. O CO<sub>2</sub> é, então, capturado através de alguns diferentes processos que serão explicados mais adiante, geralmente por absorção física ou química, resultando em um combustível rico em hidrogênio que pode ser utilizado em caldeiras, fornos, turbinas a gás, motores ou células combustíveis (Choi, 2009; IPCC, 2005). A captura pré-combustão é potencialmente mais vantajosa por produzir um fluxo gasoso rico em CO<sub>2</sub>, diminuindo assim, os custos para pressurização do mesmo. Porém, apresenta dificuldades para ser incorporada em plantas já em atividade torna difícil a sua implantação nas indústrias, além do custo para construção e manutenção serem elevadas e da pequena oferta de materiais comercialmente disponíveis no mercado (Yang, 2008; Blomen *et al.*, 2009).

Na oxicomustão, o oxigênio quase puro, aproximadamente 95%, utilizado na queima dos combustíveis é obtido através da separação do ar. Desta forma, é possível obter uma corrente gasosa com elevada concentração de CO<sub>2</sub>, que pode ser reciclado, sendo misturado ao oxigênio. A principal vantagem nesse processo é a redução do tamanho da câmara de combustão, além da formação de compostos nitrogenados (NO<sub>x</sub>) ser praticamente nula. O custo de uma planta para captação de CO<sub>2</sub> por

oxicombustão deveria ser inferior à planta convencional por pós-combustão, como resultado da diminuição do volume dos gases de combustão e aumento da concentração de CO<sub>2</sub>. Porém, a quantidade de gás oxigênio para gerar energia é grande, especialmente com o aumento das necessidades da estação de energia, e os custos para a produção de O<sub>2</sub> (criogênica) e a recirculação do gás de combustão é elevada; resultando em uma diminuição do custo-benefício (Yang, 2008; Choi, 2009; Blomen, 2009). Na oxicombustão pode-se também aumentar o rendimento utilizando um duplo reator – um de ar e outro de combustível – em processo chamado de Combustão em Looping Químico, no qual se utiliza óxidos metálicos carreadores de oxigênio, como por exemplo, CaO<sub>2</sub>, para aumentar a concentração de oxigênio, diminuindo assim, a quantidade de ar/O<sub>2</sub> puro necessária no processo (Figuerola *et al.*, 2008; Guimarães, *et al.*, 2011).

Nos processos industriais, o CO<sub>2</sub> gerado como subproduto, ou agente contaminante, compõe um quarto cenário de captura de CO<sub>2</sub>. A purificação do gás natural e a produção do gás hidrogênio contido no gás de síntese para a produção de amônia, álcool e combustíveis líquidos sintéticos são exemplos de processos industriais em que ocorre a captura de CO<sub>2</sub> a partir do fluxo gasoso gerado nesses processos. A maioria das técnicas empregadas na captura de CO<sub>2</sub> para os exemplos mencionados são semelhantes aos utilizados na captura pré-combustão. Outros segmentos industriais, tais como, produção de cimento e aço, processos de fermentação de alimentos e bebidas são uma fonte de CO<sub>2</sub> que pode ser capturado por técnicas que são comumente utilizadas tanto na pré-combustão como na pós-combustão e na oxicombustão (IPCC, 2005; Bezerra, 2010).

A tecnologia empregada na unidade de separação/captura de CO<sub>2</sub> nos diferentes cenários de geração de energia deve ser escolhida de acordo com as características do fluxo gasoso produzido e viabilidade de implementação e/ou adaptação em plantas já em operação, juntamente com uma avaliação das vantagens e desvantagens ocasionadas por cada tecnologia. As tecnologias de captura mais comumente utilizadas são absorção química através de aminas, absorção física por solventes e destilação criogênica, porém, são processos de alto custo e/ou pouca eficiência. Atualmente, algumas tecnologias estão sendo disponibilizadas com melhores resultados, maiores rendimentos e ocupando menores espaços, tal como as tecnologias que utilizam membranas e compostos Metalorgânicos – *Metal-Organic Frameworks* (MOFs).

A absorção química por aminas é um processo químico que envolve solventes amino-alcoolados, tais como monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) e metiletanolamina (MDEA). As aminas reagem com o CO<sub>2</sub>, e forma compostos solúveis em água. Este processo permite a captura do CO<sub>2</sub> a partir do fluxo de gasoso gerado na pós-combustão (Damen, *et al.*, 2006; Figuerola, *et al.*, 2008). A capacidade de separação é limitada, captando apenas 50% do CO<sub>2</sub> gerado, além disso, a planta de captura é de grandes dimensões, havendo ainda a necessidade de reciclo do solvente e manutenções periódicas (Olajire, 2010; Kemper *et al.*, 2011). Como uma alternativa para a diminuição das necessidades energéticas, uma mistura de diferentes compostos aminados pode ser realizada, causando um efeito sinérgico. Porém, os custos ainda são muito elevados, necessitando assim, de um estudo aprimorado para encontrar as melhores concentrações para melhores resultados (Idem *et al.*, 2006; Olajire, 2010). O processo químico de absorção por amônia foi desenvolvido para evitar os inconvenientes encontrados nos processos com MEA (Yang, 2008). A reação entre o CO<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub>, forma um composto muito solúvel em água, o carbamato de amônio (NH<sub>2</sub>COONH<sub>4</sub>), que é convertido em carbonato de amônio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) e bicarbonato de amônio (NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>), que são transformados em fertilizantes, como uréia e sulfato de amônio ou, podem ser depositados como minerais de carbono após combinação com metais como o magnésio ou cálcio, economizando até 60% da energia, em comparação com MEA processo (Olajire, 2010; Yang, 2008).

Os processos de absorção física encontrados atualmente são: Selexol – dimetil éter de produtos de polietileno glicol, eficaz para captura do CO<sub>2</sub> e também do H<sub>2</sub>S – ; RectiSol – procedimento com base

em metanol a baixas temperaturas – ; e Purisol – carbonato de propileno com N-metil- 2 pyrrolidona –, e são majoritariamente utilizados no cenário de pós-combustão, mas também pode ser usado em pré-combustão (Olajire, 2010).

A adsorção é um fenômeno que ocorre quando um fluido, gás ou líquido, entra em contato com a superfície de um sólido – adsorvente. A adsorção pode ser configurada como o enriquecimento de uma superfície sólida por uma interface de líquido ou gás. O fluido disponível para adsorção é chamado de adsorvente e o da fase adsorvida é denominado adsorvato. As propriedades de adsorção de materiais têm sido estudados com o objetivo de captar gases, especialmente o CO<sub>2</sub> dos efluentes industriais. Para melhorar o desempenho e reduzir custos para os processos, muitos materiais porosos com capacidade de adsorver grandes quantidades de CO<sub>2</sub> têm sido desenvolvidos nos últimos anos.

O carbono ativo, com numerosas aplicações industriais e processos tecnológicos, pode ser usado para captura de CO<sub>2</sub>. A capacidade de adsorção de carvão ativo é devido à presença de grupos funcionais orgânicos ácido, básico ou neutro, e é baseada em adsorção física, podendo ter seu rendimento aumentado pela introdução de grupos funcionais básicos em sua estrutura.

Outro exemplo de compostos utilizados para a captura de CO<sub>2</sub> por adsorção são as membranas, que podem ser empregadas na pré, pós e oxi-combustão. Seu mecanismo de ação depende das interações físicas ou químicas, de acordo com o material – orgânico (polímeros) ou inorgânico (carvão, zeolita, cerâmicos ou metálicos) –, como também da sua porosidade e seletividade (Li *et al.*, 2011). A força motriz para a separação depende da diferença de pressão parcial de CO<sub>2</sub> (Blomen, *et al.*, 2009). Membranas inorgânicas de cerâmicas e membranas orgânicas poliméricas têm sido utilizadas na separação de CO<sub>2</sub> dos gases de combustão de pós-combustão. No entanto, novos materiais para esta tecnologia ainda são necessários para alcançar os resultados desejados de separação de CO<sub>2</sub> (Li *et al.*, 2011).

As zeólitas são materiais amplamente utilizados para separação/purificação de gases e na área de catálise, devido às suas principais características, microporosidade – que permite a troca de materiais entre seu interior e exterior – e cavidades molecularmente dimensionadas – contendo íons catiônicos, água, sal e absorventes. A eficiência das zeólitas é determinada pela área superficial e capacidade de adsorção. As zeólitas possuem estrutura cristalina de poros com dimensões moleculares uniformes, e têm sido usadas para separar CO<sub>2</sub> de CH<sub>4</sub> em processos industriais (Olajire, 2010; Figueroa, 2008).. Como as moléculas de CO<sub>2</sub> (0,33 nm, diâmetro cinético) e de CH<sub>4</sub> (0,38 nm) são menores que os poros das zeólitas de médio e grande porte, a separação nesses materiais ocorre principalmente por adsorção competitiva (Olajire, 2010). Membranas de sílica tem uma grande estabilidade química, térmica e estrutural em ambientes de oxidação ou redução, bem como a fácil modificação das suas estruturas (Yang, 2008). Diversos estudos têm sido realizados a fim de controlar as propriedades dos poros, fator determinante para a diminuição do tempo de captura e deposição de vapor químico (CVD). Métodos sol-gel utilizados na sua preparação têm gerado melhores propriedades de poros que são apropriadas para a separação de gás (Olajire, 2010).

Os compostos metalorgânicos (do inglês Metal Organic Frameworks) ou MOFs são estruturas supramoleculares construídas a partir de íons metálicos e ligantes orgânicos (Rowsell, 2004) e têm surgido como os materiais mais promissores na área de captura de CO<sub>2</sub>, pela alta porosidade e área de superfície elevada, fornecendo uma maior de capacidade potencial de captura de CO<sub>2</sub> do que carbonos ativos ou zeólitas (Guillerm *et al.*, 2010). Estes materiais são particularmente interessantes porque apresentam flexibilidade química permitindo uma otimização em sua capacidade de adsorção de gases através da funcionalização dos ligantes. Estudos recentes mostram que o MOF-177 é uma estrutura muito eficiente para a captura de CO<sub>2</sub>, entre uma série de redes metalo-orgânicas isoreticulares testadas, 33,5mmol CO<sub>2</sub>/g a 35 bar (Millward, 2005). Igualmente promissor é o MIL-101 (MIL –

“*Matériel L’Institute Lavoisier*”, denominação francesa para MOF), que mostrou capacidade semelhante para armazenar o gás carbônico, 40mmol CO<sub>2</sub>/g a 50 bar (Llewellyn, 2008). Estas novas estruturas apresentam uma grande capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> a pressões superiores a 1 atm, além de apresentarem seletividade molecular, o MIL-53 (Al), por exemplo, mostrou-se eficaz na separação de mistura gasosa contendo CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> (Finsky, 2009).

A destilação criogênica é um processo baseado na separação da mistura de gases por condensação e destilação a baixa temperatura. É atualmente o sistema mais utilizado para a produção em larga escala de O<sub>2</sub> da separação de ar, porém os custos operacionais são altos. Esta técnica tem sido utilizada na separação de líquidos e para liquefazer o CO<sub>2</sub> – após a separação, em alta concentração – por um longo tempo (Li, *et al.*, 2011). Entretanto, a separação criogênica de CO<sub>2</sub> é considerada menos efetivo que a absorção (Damen, 2006).

Alguns estudos estão sendo realizados com o objetivo de encontrar microorganismos que possam ser utilizados para a fixação de CO<sub>2</sub>, processo chamado de biofixação. A fixação biológica de CO<sub>2</sub> por algas e microorganismos quimioautotróficos em foto-reatores, por exemplo, utilizando produtos químicos inorgânicos para a remoção do gás também têm sido investigada. Microalgas são utilizadas, devida à sua capacidade de realizar a fotossíntese, além de serem resistentes às alterações ambientais (Li *et al.*, 2011).

O Brasil está seguindo os mesmos passos que o resto do mundo. Recentemente, o país encontrou um desafio para o CCS, com a exploração do pré-sal. A presença de petróleo na camada denominada, geologicamente, pré-sal é uma grande descoberta para as indústrias petrolíferas, especialmente para a brasileira Petrobrás. Este óleo ao ser removido das rochas, que são compostas essencialmente carbonáticas, deverá liberar grandes quantidade de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, a uma taxa de 4% a mais do que o processo regular (Román, 2011). Estas são as razões pelas quais o Brasil vem desenvolvendo e investindo em tecnologias de CCS. A maioria dos resultados foi apresentado no 1º Congresso Brasileiro de CO<sub>2</sub> em Indústrias de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, realizado em abril deste ano, no Rio de Janeiro. Neste evento, o presente e o futuro destas tecnologias no país foram discutidas. Para os cenários de captura, como forma de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, o Instituto Nacional de Pesquisas Especiais de Cachoeira Paulista (INPE) desenvolveu um projeto de demonstração de instalação para a Petrobras de Combustão em Looping Químico, com R\$ 1,7 milhões – cerca de US\$ 1 milhão – dos investimentos (Hatimondi *et al.*, 2011). Já para as tecnologias de captura, a Universidade Federal de Santa Catarina está estudando a absorção de CO<sub>2</sub> através da superfície livre da camada de óleo de éster de polioli em uma célula PVT, experimentalmente, em um sistema fechado. O estudo proposto mostrou boa concordância com os dados experimentais (Neto e Júnior, 2011).

Entretanto, não é apenas a captura o foco do país. A Petrobrás tem estudando desde 1987 a injeção de CO<sub>2</sub> em poços de petróleo, porém, até agora muitas das pesquisas estão na fase I do estudo, com demonstração potencial para os próximos anos (Cunha *et al.*, 2007). O Projeto denominado Carbometano, por exemplo, realizado pelo Centro de Excelência em Pesquisa Sobre Armazenamento de Carbono (CEPAC), com sede na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PucRS) e com o financiamento da Petrobrás, tem sido desenvolvido para a injeção de CO<sub>2</sub> em jazidas de carvão para a expulsão do metano, por outro poço paralelo, com o objetivo de produzir energia térmica ou elétrica, além de evitar a liberação de gases do efeito estufa para a atmosfera. O CO<sub>2</sub> injetado se liga, quimicamente, ao carvão, evitando assim, a sua emissão. Atualmente, localiza-se na jazida de Charqueadas, da Empresa Copelmi, na Cidade de Triunfo, RS.

## Conclusões

Esta é uma visão geral da situação atual e promissoras tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>. Pesquisas de curto prazo em recente realização focará em melhorias nos processos atuais de absorção e adsorção, enquanto que a investigação de longo prazo incidirá sobre outras opções de captura de gases de combustão.

A principal problemática nos procedimentos de CCS é o custo, principalmente nas tecnologias de captura, representando 60-80% do custo total, com um aumento de 50% do consumo de energia (Feron e Hendriks, 2005). Considerando sua aplicação em grande escala, como em usinas termoeletricas e indústrias de grande porte (refinaria, cimenteira e metalúrgica), investigações detalhadas são necessária para um melhor desempenho dos solventes, sistemas de membranas ou qualquer outro processo químico ou físico a ser empregado. Outro problema relacionado às tecnologias de captura é o rendimento de cada processo. O grande desafio no desenvolvimento de materiais e técnicas para captura de CO<sub>2</sub>, também reside na capacidade de transferir a tecnologia do laboratório, com estudos teóricos, para a indústria, onde as condições são muito diferentes das reproduzidas na bancada.

Todos os cenários (pós-combustão, pré-combustão e combustão oxi-combustível) e as tecnologias têm suas vantagens e desvantagens, e mais estudos devem ser planejados e incentivados para serem aplicados em grandes fontes emissoras de CO<sub>2</sub> e fornecerem bons resultados, e maiores investimentos neste setor são necessários, especialmente no contexto do pré-sal em território brasileiro.

### Agradecimentos

As autoras agradecem à Agência Nacional do Petróleo e à Petrobras.

### Referências Bibliográficas

Bezerra, Diogo P. **Captura de CO<sub>2</sub> – Estudo do Equilíbrio de Adsorção por Técnica Gravimétrica com Adsorventes Comerciais e Modificados**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Blomen, E.; Hendriks, C.; Neele, F. **Capture technologies: improvements and promising developments**. Energy Procedia 1: 1505 – 1512, 2009.

Choi, S.; Drese, J. H.; Jones, C. W. **Adsorbent Materials for Carbon Dioxide Capture from Large Anthropogenic Point Sources**. Chem Sus Chem, 2: 796–854, 2009.

Cunha, P., *et al.* **Carbon Sequestration Technological Development in Brazil**. Disponível em <<http://ebookbrowse.com/c/cunha-presentation?match=on>>. Acesso em: 23 mai. 2011.

Damen, K., *et al.* **A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO<sub>2</sub> capture and storage Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies**. Prog. Energ. Combust., 32: 215–246, 2006.

Damen, K., *et al.* **A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO<sub>2</sub> capture and storage – Part B: Chain analysis of promising CCS options**. Prog. Energ. Combust., 33: 580–609, 2007.

Ebner, Armin D.; Ritter, James A. **State-of-the-art Adsorption and Membrane Separation Processes for Carbon Dioxide Production from Carbon Dioxide Emitting Industries**. Separation Science and Technology, 44: 1273–1421, 2009.

Feron, Paul H. M., Hendriks, C. A. **CO<sub>2</sub> capture process principles and costs**. Oil and Gas Science and Technology Rev., IFP 60 (3): 451–459, 2005.

- Figuerola, J. D., *et al.* **Advances in CO<sub>2</sub> capture technology – The U.S. Department of Energy’s Carbon Sequestration Program.** Int J Greenh Gas Contr, 2: 9 – 20, 2008.
- Finsky, V., *et al.* **Separation of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mixtures with the MIL-53(Al) metal-organic framework.** Micropor Mesopor Mater, 120 (3): 221-227, 2009.
- Guillerm, V., *et al.* **A zirconium methacrylate oxocluster as precursor for the low temperature synthesis of porous zirconium(IV) dicarboxylates.** Chem. Commun., 46 (5), 767-769, 2010.
- Guimarães, R. C. O., *et al.* **Influência do tipo de reator nos processos de combustão via recirculação química.** Pôster do 1º Congresso Brasileiro de CO<sub>2</sub> na Indústria de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2011.
- Hatimondi, S. A., *et al.* **Initiatives in Carbon Capture and Storage at PETROBRAS Research and Development Center.** Energy Procedia 4: 6099–6103, 2011.
- Idem, R., *et al.* **Pilot plant studies of the CO<sub>2</sub> capture performance of aqueous MEA and mixed MEA/MDEA solvents at the University of Regina CO<sub>2</sub> capture technology development plant and the boundary dam CO<sub>2</sub> capture demonstration plant.** Ind. Eng. Chem. Res., 45(8): 2414–2420, 2006.
- Kemper, J.; Ewert, G.; Grünewald, M. **Absorption and regeneration performance of novel reactive amine solvents for post-combustion CO<sub>2</sub> capture.** Energy Procedia, 4: 232-239, 2011.
- Llewellyn, P. L. *et al.* **High uptakes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in mesoporous metals organic frameworks MIL-100 and MIL-101.** Langmuir, v. 24, no. 14, pp. 7245-7250, 2008.
- Li, J.-R., *et al.* **Carbon dioxide capture-related gas adsorption and separation in metal-organic frameworks.** Coord. Chem. Rev. (2011), doi:10.1016/j.ccr.2011.02.012.
- Millward, Andrew R.; Yagui, Omar M. **Metal-Organic Frameworks with Exceptionally High Capacity for Storage of Carbon Dioxide at Room Temperature.** J. Am. Chem. Soc., 127 (51): 17998-17999, 2005.
- Moss, Hamilton. Apresentação no Seminário Internacional de Eficiência Energética, Maceió, Brasil, 2009. Disponível em <http://www.cbcme.org.br/documentos/HMS01.pdf>. Acessado em 23 maio 2011.
- Neto, Moisés A. M.; Junior, Jader R. B. **Absorption of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in oil.** Poster of 1º Congresso Brasileiro de CO<sub>2</sub> na Indústria de Petróleo, Gás e Biocombustível, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- Olajire, Abass A. **CO<sub>2</sub> capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review.** Energy, 35: 2610-2628, 2010.
- Román, Mikael. **CCS in developing countries: a comparison of Brazil, South Africa and India.** Global Environmental Change (2011). Doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.01.018.
- Rowell, Jesse L. C.; Yagui, Omar M. **Metal-organic frameworks: a new class of porous materials.** Micropor Mesopor Mater, 73: 3–14, 2004.
- Thiruvengkatachari, R., *et al.* **Post combustion CO<sub>2</sub> capture by carbon fibre monolithic adsorbents.** Prog Energ Combust, 35: 438–455, 2009.
- Yang, H., *et al.* **Progress in carbon dioxide separation and capture: A review.** Journal of Environmental Sciences, 20 (1): 14–27, 2008.