

4.

Usos do Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono é atualmente considerado como o maior responsável pelos problemas ambientais da atualidade. Na realidade, ele é essencial para a vida. Sua quantidade na atmosfera é de apenas 0,038%, entretanto executa diversas funções naturais importantes. As plantas respiram dióxido de carbono durante o dia e geram oxigênio. Diversos mecanismos biológicos dependem do CO₂. Esses mecanismos são conhecidos como o Ciclo do Carbono, como demonstrado na Figura 9 (Hoffman, D. 2009)[9]. Ela demonstra os diversos processos onde ocorre a emissão (respiração, emissões de combustíveis fósseis, decomposição) e absorção (fotossíntese, difusão, depósitos marítimos) do CO₂ na Terra.

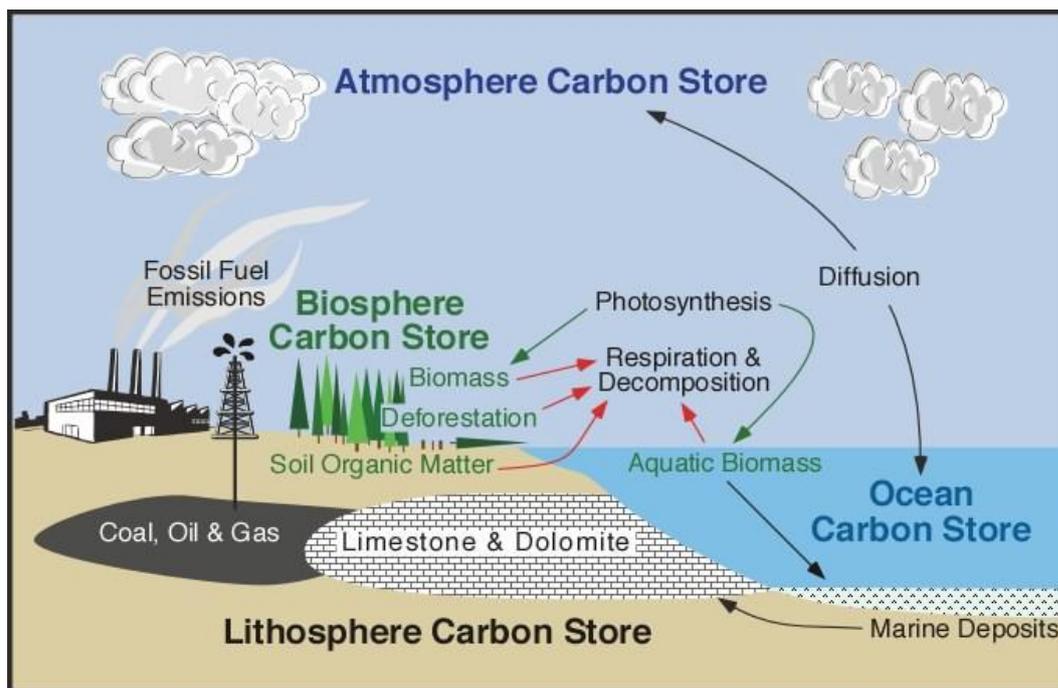


Figura 9 - Ciclo do Carbono

Fora da natureza, no entanto, existem diversos usos para o dióxido de carbono, como uso químico, industrial, farmacêutico, produção de petróleo e alimentício. Há uma grande variedade de aplicações dentro de cada indústria. A seguir serão expostos alguns desses usos. Entretanto, todos esses usos não conseguem utilizar toda a quantidade de CO₂ produzida em excesso pela queima

de combustíveis fósseis. Uma alternativa de médio prazo é, portanto, o armazenamento desse excesso.

4.1.

Indústria Alimentícia

O dióxido de carbono é utilizado na indústria de bebidas para fazer as bebidas gaseificadas. Tradicionalmente, o gás na cerveja e champanhe surgia através da fermentação natural, mas atualmente muito dos fabricantes utilizam o gás injetado artificialmente.

Em uma empresa produtora de bebidas, o processo mais comum para a captura é o uso do CO₂ proveniente da produção da cerveja. O CO₂ é capturado na fermentação ocorrida nas adegas, lavado, comprimido a alta temperatura e pressão e depois resfriado. Após, é desidratado e filtrado para purificar o gás resultante. Após o gás estar na pureza adequada ele é condensado e armazenado para ser utilizado posteriormente. Para ser distribuído para as áreas que o utilizam, ele é de novo tornado gás através de um evaporador. Ele é principalmente utilizado nas bebidas leves (não alcoólicas), cervejas e também como gás refrigerante pela fábrica. A Figura 10 apresenta um esquemático deste processo.

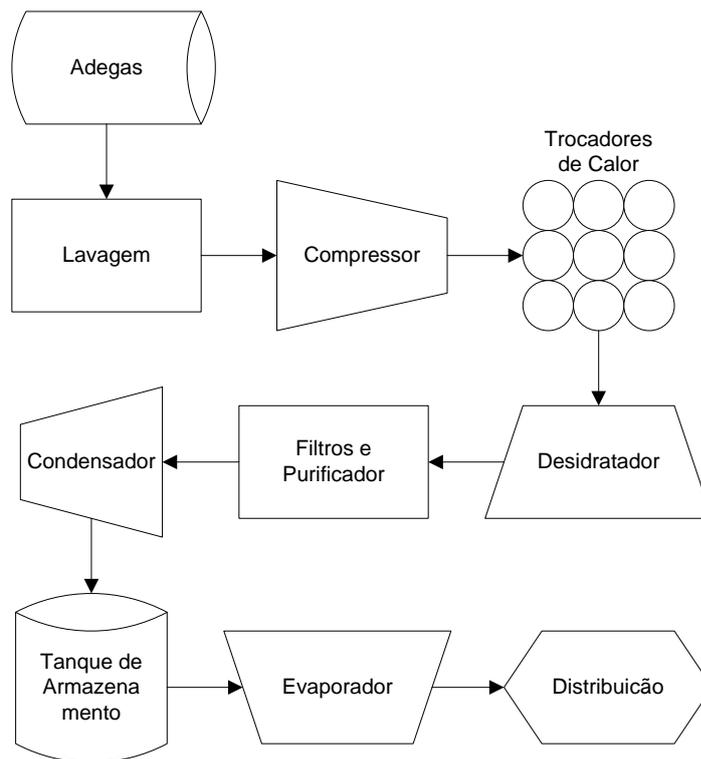


Figura 10 - Esquema de CO₂ em indústria de bebidas

Além da indústria de bebida, o CO₂ é muito utilizado na indústria alimentícia como refrigerante para frigoríficos, criogenia, congelamento de produtos e embalsamento comercial com neve de CO₂. A indústria alimentícia corresponde a 40% do mercado de CO₂ nos Estados Unidos, segundo (Rushing, S. A. - 2008)[12]. Além do grande uso para resfriamento, o CO₂ tem um uso secundário como agente anaeróbico.

O uso da criogenia é muito alto atualmente, devido a sua alta eficiência em comparação com a refrigeração normal. Usualmente o CO₂ é armazenado em tanques e distribuído através de tubos para diversas formas de freezers. Esses freezers geram uma pequena quantidade de neve em forma de névoa a -60°F (-51°C). O objetivo é reduzir a temperatura do produto alimentício, em um tempo determinado no freezer, entregando um produto congelado em uma fração de tempo dos refrigeradores mecânicos (compressores).

Dióxido de carbono líquido também é utilizado como solvente para compostos orgânicos, sendo um dos usos mais comuns a retirada da cafeína do

café. Neste caso, o CO₂ é utilizado em sua forma supercrítica, e sua eficiência é de aproximadamente de 97%, segundo (Jacobs, R – 1999)[13].

Na fabricação de vinhos, o CO₂, em sua forma sólida (gelo seco), é comumente utilizado para resfriar rapidamente as uvas depois de colhidas para evitar a fermentação espontânea por levedos, de acordo com (Ciani, M; Beco, L. e Comitini, F – 2006)[14]. A grande vantagem de utilizar o gelo seco ao invés de gelo normal (H₂O) é que evita a adição de água que diminuiria a concentração de açúcar na uva, o que por sua vez diminuiria o teor alcoólico no vinho.

Gelo seco também é utilizado para prevenir o crescimento de bactérias nas uvas durante a fase de “banho frio” (*cold soak*). Ao ocorrer a sublimação, o dióxido de carbono tende a descer por ser mais denso que o ar, criando assim um ambiente com muito pouco oxigênio. O mesmo princípio é utilizado para fazer o vinho Beaujolais, através do método de *Macération carbonique*, que é a fermentação da uva em um ambiente rico em CO₂ antes de serem esmagadas (Jackson, R. S – 2000)[15].

4.2.

Indústrias Pesadas

O CO₂ também pode ser utilizado em diversos sistemas auxiliares, como sistemas pneumáticos, extintores de incêndio, soldagem, laser industrial, e solvente. Nos sistemas pneumáticos, o CO₂ é usualmente utilizado em sistemas portáteis, que necessitam de pressão. Por ser altamente compressível, inclusive na fase líquida, ele se torna um gás bastante indicado para facilitar o transporte do equipamento. Usualmente o CO₂ fica instalado em um pequeno cilindro que é acoplado à máquina em questão, como furadeiras, além de ser utilizado na área de robótica para a mesma função.

O laser de dióxido de carbono é um dos lasers mais potentes da atualidade. Apesar de sua eficiência ser uma das mais altas entre os laser a gás (cerca de 10 a 20%), uma grande quantidade de calor é gerada que deve ser dissipada. Isso é especialmente importante, pois a potência diminui quando os tubos esquentam. A

radiação produzida possui comprimento de onda de saída de 10600 nm, que se situa no fim do espectro infra-vermelho, tornando o raio completamente invisível a não ser com aparato visual adequado, como pode ser visto na Figura 11.

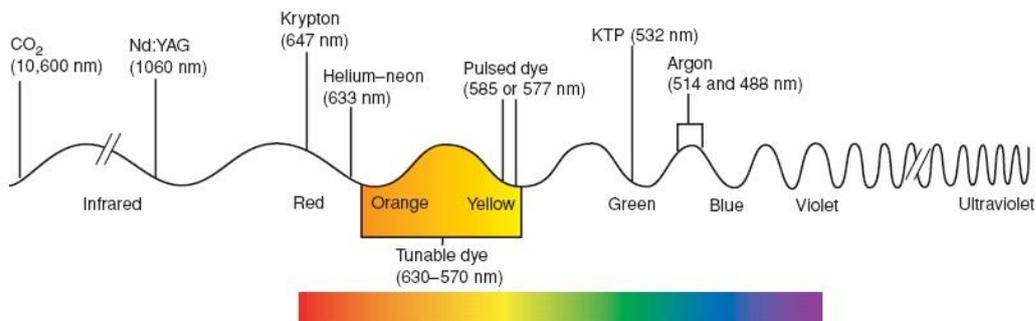


Figura 11 - Posição relativa dos lasers de acordo com espectro eletromagnético

Os usos mais comuns são para o corte de materiais como papel, plástico, vidro, quartzo, madeira (“cirurgia” em árvores, para prolongar a vida útil das mesmas, remover trechos contaminados), carne, pele (cirurgias sem sangue), como descrito por (Wright – 1982)[20], metal e pedra.. No metal, a absorção depende das condições da superfície, e a habilidade de corte depende fortemente do tamanho e condutividade térmica do material. O uso de laser de CO₂ na soldagem de metais tem sido bastante estudado na indústria automobilística (Ghoo, B.y. et al. – 2001)[21]. Nas pedras, foi descoberto que a irradiação de pedras duras com 200 W/cm² causa a incandescência da rocha. A tensão mecânica resulta em um enfraquecimento geral na rocha, podendo levar à sua fragmentação, o que pode ser usado como um mecanismo de perfuração de rochas. Um estudo feito por (Miranda, R.M. – 2004)[22] estudou a variação do uso de laser de CO₂ no corte de pedras nobres, como mármore e granito, onde há grande dependência da composição química e mineralógica das mesmas na qualidade do corte.

Os extintores de incêndio de CO₂ fazem parte de duas das classes de extintores. A Classe B, para líquidos inflamáveis, como álcool, querosene, combustíveis e óleo e a Classe C, para equipamentos elétricos, como transformadores, fios e cabos, de acordo com o Inmetro[23]. Esses extintores possuem dióxido de carbono líquido sobre pressão. Existem também sistemas de supressão de incêndio de CO₂ para lugares com servidores, equipamentos eletrônicos e elétricos em geral. Uma das grandes vantagens do CO₂ nesses

ambientes é que ele não danifica o equipamento, garantindo assim uma maior recuperação dos equipamentos.

Além desses ambientes, as indústrias de aço e alumínio possuem uma grande dependência dos sistemas de extintores a base de CO₂. Na indústria do alumínio, por exemplo, há um alto uso de lubrificantes e refrigerantes similares a querosene. Nessas localidades, incêndios ocorrem com frequência, cerca de um por semana, de acordo com um relatório da (EPA- 2000)[24]. O sistema também é utilizado em ambientes comuns, como na *Opera House* de Sidney.

Na área de soldagem, o CO₂ é muito utilizado como gás de mistura para o tipo de solda MIG e MAG. Esse tipo de soldagem é muito mais eficiente que os processos normalmente utilizados nas oficinas, como eletrodo revestido, arco submerso e TIG. O CO₂ é utilizado como gás de solda primariamente porque é um gás inerte muito mais barato que os outros gases utilizados na soldagem, como argônio ou hélio. Entretanto, o uso do CO₂ também acarreta diferenças na qualidade da solda, pois o CO₂ não mantém o arco de solda tão bem quanto a mistura com argônio, de acordo com site Mig Welding[25].

4.3.

Indústrias Químicas e Farmacêuticas

Além de ser utilizado como um substituto mais benigno para solventes tradicionais para extração e purificação de compostos orgânicos, o dióxido de carbono vem sendo cada vez mais usado na mediação de reações químicas, como agente na Expansão Rápida num processo de Solução Supercrítica (RESS – *Rapid Expansion of Supercritical Solution*), anti-solvente para cristalização no processo de Gás Anti-Solvente (GAS) e solvente para a deposição de materiais em uma matriz sólida (Marentis, R e James, K – 2001)[26]. Na indústria química, ele é muito utilizado para a produção de uréia, carbonatos e bicarbonatos.

Além disso, O CO₂ supercrítico também pode ser utilizado na área produção e processamento de polímeros e na área de processamento de semicondutores, principalmente na parte da limpeza, apesar do alto custo. Como a maioria dos polímeros não são muito solúveis em CO₂ fora da fase supercrítica, é necessário

que este esteja a altas pressões. De acordo com (Korzenski, M.B.)[27], a remoção de resíduos é extremamente eficiente, como pode ser visto na Figura 12.

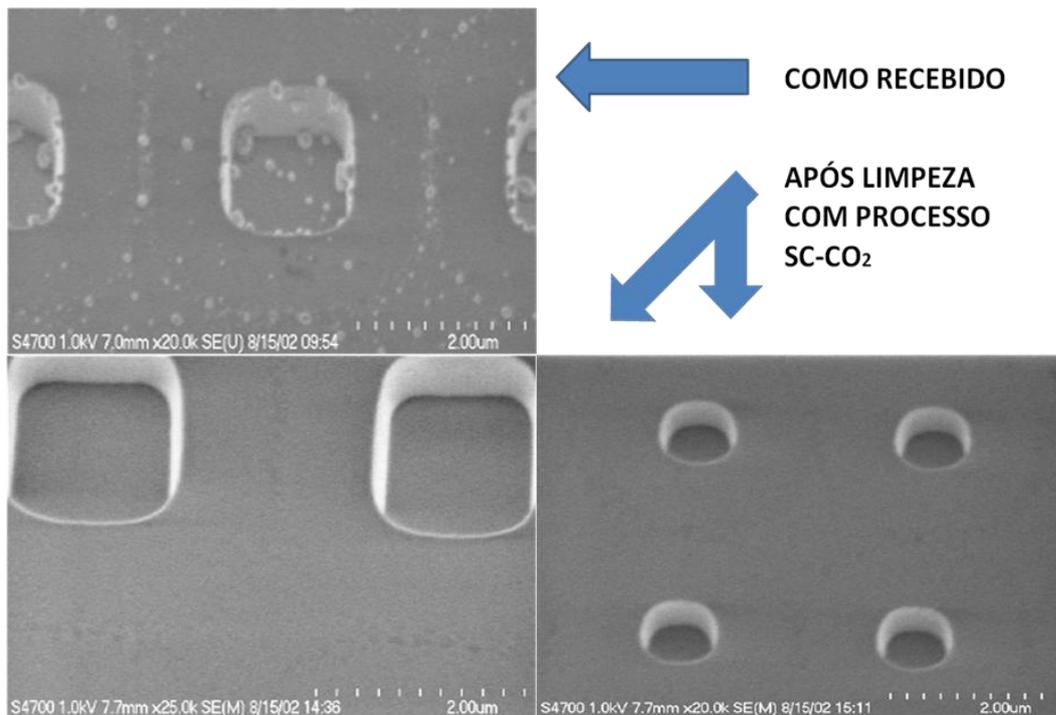


Figura 12 - Limpeza de supercondutores

4.4.

Agricultura

O dióxido de carbono é um componente essencial da fotossíntese (também conhecido como assimilação de carbono). Fotossíntese é um processo químico que utiliza a energia luminosa para converter o CO_2 e água em açúcares nas plantas. Esses açúcares então são utilizados para o crescimento dentro da planta através da respiração.



Figura 13 - Exemplo de Estufas ao redor do mundo

Para a maioria das plantações em estufas, a taxa de fotossíntese aumenta quando os níveis de CO_2 são elevados de 340 a 1000 ppm. A maioria das plantações mostram que, ao se elevar os níveis de CO_2 na sua atmosfera para 1000 ppm se tem um aumento de 50% na taxa de fotossíntese se comparado aos níveis normais de CO_2 , se as condições luminosas forem suficientes. Outras plantações, como tulipas e lírios, não tiveram resposta a esse aumento, de acordo com o estudo feito pela OMAFRA[28]. Entretanto, o aumento abusivo dessa concentração pode se tornar prejudicial ao crescimento das plantas, se tornando tóxico a concentrações muito altas, como demonstrado na Figura 14 por (Tayer, R. H.)[29].

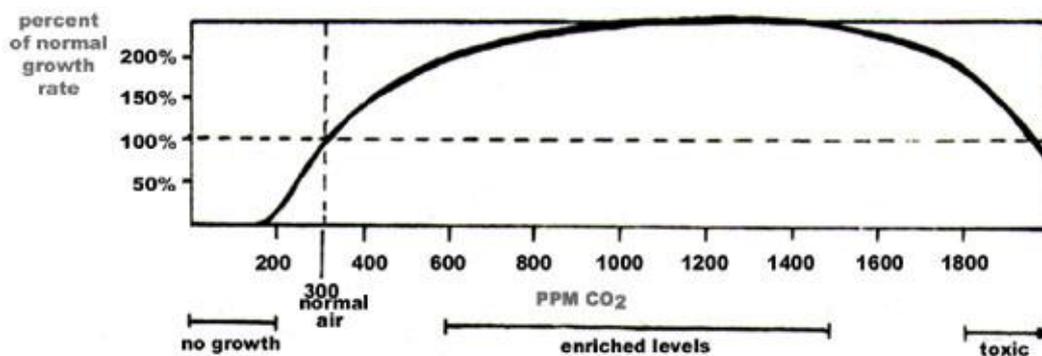


Figura 14 - Variação do crescimento das plantas de acordo com a quantidade de CO_2

Esses valores tóxicos, entretanto, se utilizados controladamente e por um curto espaço de tempo, podem ser utilizados para eliminar diversos tipos de pragas, sem, no entanto, afetar a plantação. Deve-se, porém, tomar cuidado com a presença humana, já que o dióxido de carbono também é altamente tóxico para o ser humano em altas concentrações.

Para obter o dióxido de carbono, muitas estufas acabam utilizando a queima de gás natural, ou outros meio de queima para gerar o CO_2 necessário. Entretanto, já existem diversos projetos para aproveitar a captura de CO_2 de refinarias e usinas de energia para prover as estufas sem a necessidade da queima, garantindo assim o melhor resultado de seqüestro de carbono. Uma refinaria nos arredores de Rotterdam, na Holanda, seqüestra parte do CO_2 emitido e os distribui a 400

estufas, economizando grandes quantidades de gás natural e reaproveitando cerca de 170000 toneladas de CO₂ anuais, de acordo com (Randerson, J. – 2006)[31].

O uso do CO₂ no aumento da fotossíntese também é empregado no processo de geração de biodiesel proveniente das algas. Este processo pode funcionar diretamente do gás de exaustão de usinas de energia, onde o gás passa por cilindros cheios de água com algas. As algas absorvem o CO₂ da exaustão para fazer a fotossíntese. Diversos subprodutos são produzidos, como o biodiesel, o metano, e o etanol, como demonstrado na Figura 15 (Safe Environment. 2009) [30].

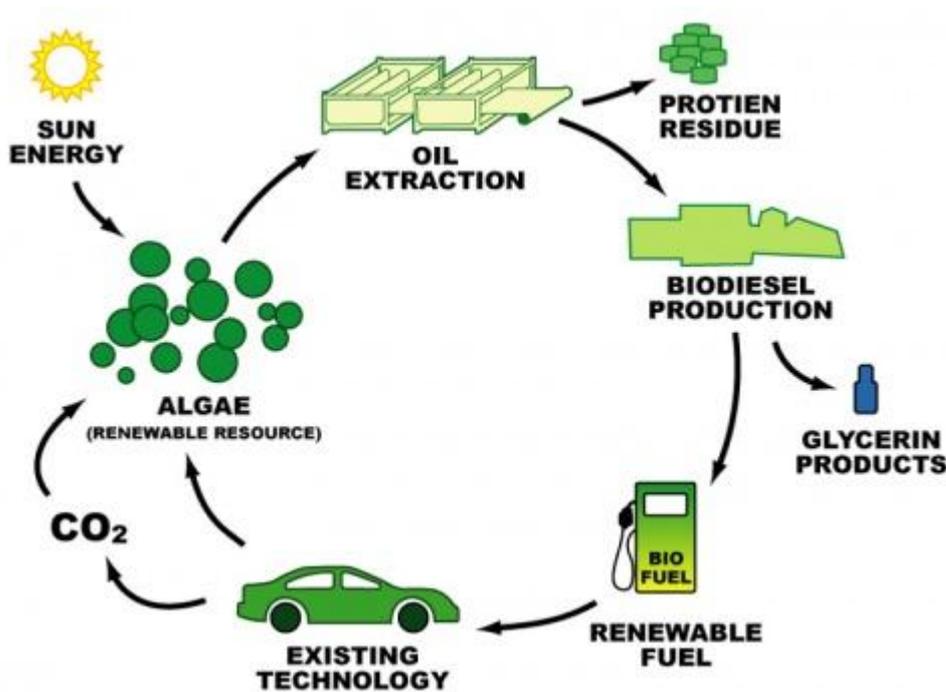


Figura 15 - Processo de fotossíntese das algas

A grande maioria das microalgas para essa finalidade é cultivada em piscinas abertas. Elas podem ser construídas e operadas em baixo custo, com baixa manutenção. A grande desvantagem desses sistemas abertos é que há uma grande perda de água por evaporação e também uma grande suscetibilidade de contaminação por elementos externos.

A criação de microalgas em sistemas fechados, chamados de bioreatores, possui diversas vantagens. Além da economia de água, energia e substâncias químicas (para o combate de pragas), esse sistema possui uma produtividade

muito mais alta. Entretanto esse sistema ainda é muito caro, dificultando a sua viabilidade, como mencionado por (Schenk, P. M. et AL – 2008)[32]. A Figura 16 mostra o maior bioreator de microalgas do mundo, em Klötze, na Alemanha.



Figura 16 - O maior bioreator de micro-alga no mundo

4.5.

Recuperação Avançada de Petróleo - EOR

Dá-se o nome de Recuperação Avançada de Petróleo (EOR – *Enhance Oil Recovery*) à recuperação de petróleo adicional àquele produzido normalmente, ou seja, o petróleo é recuperado por mecanismos de recuperação terciária, onde a recuperação primária provém da própria pressão do poço e a secundária da injeção de água para manter a pressão do poço em níveis de produção. Tal recuperação se dá por meio da injeção de fluidos ou por outros métodos. Há vários processos de EOR: químicos, térmicos ou aqueles baseados na injeção de gás.

Na medida que os campos de óleo se aproximam de um estágio de maturidade, a recuperação avançada de óleo deve ser considerada para recuperar mais óleo dos reservatórios, estendendo a vida útil do campo. Estes métodos de EOR devem ser eficientes e econômicos, pois de outra forma não compensaria a extração do petróleo. De acordo com (Bradley, R.T. - 2001)[33], pode ser mais lucrativo recuperar um barril de óleo utilizando a injeção de CO₂ do que explorar e perfurar um novo poço.

A injeção de dióxido de carbono em formações geológicas para recuperação melhorada de óleo é uma tecnologia madura comprovada comercialmente. O CO₂ nas operações de EOR tem sido usado pela indústria de petróleo há mais de 40

anos, mas só recentemente mostrou seu potencial como método de seqüestro de carbono (Ravagnani, G. et al. – 2009)[34].

A recuperação avançada de óleo pode combinar, em algumas situações, objetivos econômicos e ambientais. Considerando-se somente a perspectiva do retorno econômico, a EOR tende a ser uma opção atrativa de armazenamento geológico de CO₂. Porém, existem algumas barreiras para implementar a operação como um meio de seqüestro de CO₂, tais como: a) compreensão detalhada dos processos do reservatório (avaliação dos efeitos do CO₂ no reservatório no longo prazo), b) altos custos de captura, processamento e transporte de CO₂ antropogênico, particularmente de instalações de geração de energia, c) desenvolvimento de tecnologias de monitoração e verificação e d) maior clareza das normas e leis internacionais referentes a emissões.

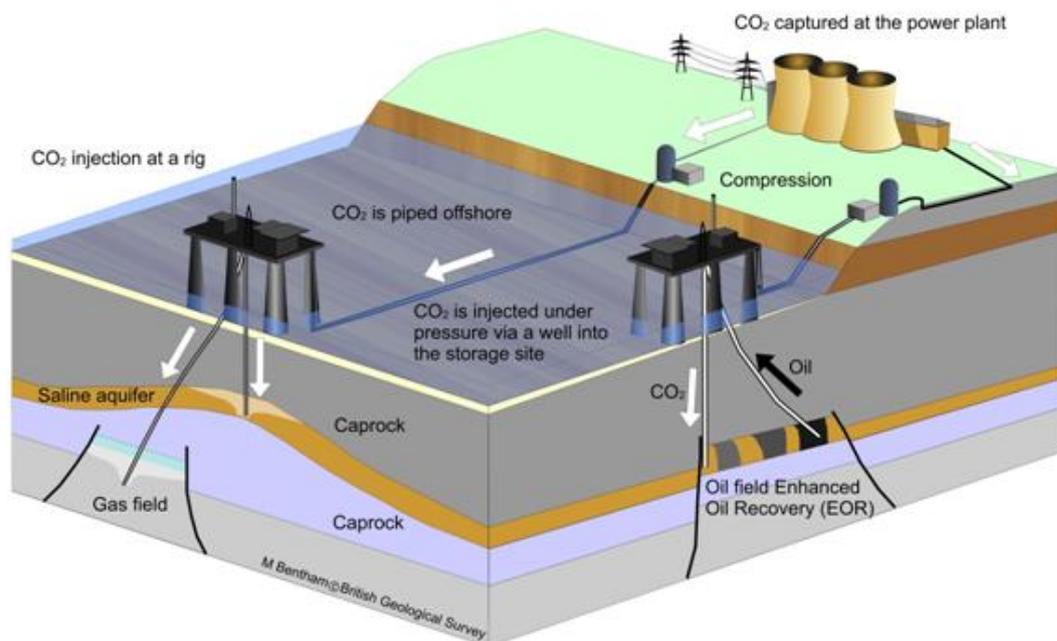


Figura 17 - Esquema simplificado de EOR

O líder mundial de projetos de EOR são os Estados Unidos, com cerca de 96% dos projetos de EOR de CO₂, onde o CO₂ é proveniente em grande parte de fontes naturais, e não do seqüestro em si. Em 2006, esses projetos produziram um total de 650000 barris de petróleo por dia, quase 13% do total da produção americana, de acordo com a NETL (*National Energy Technology Laboratory*)[35]. O processo de EOR é relativamente simples, como pode ser

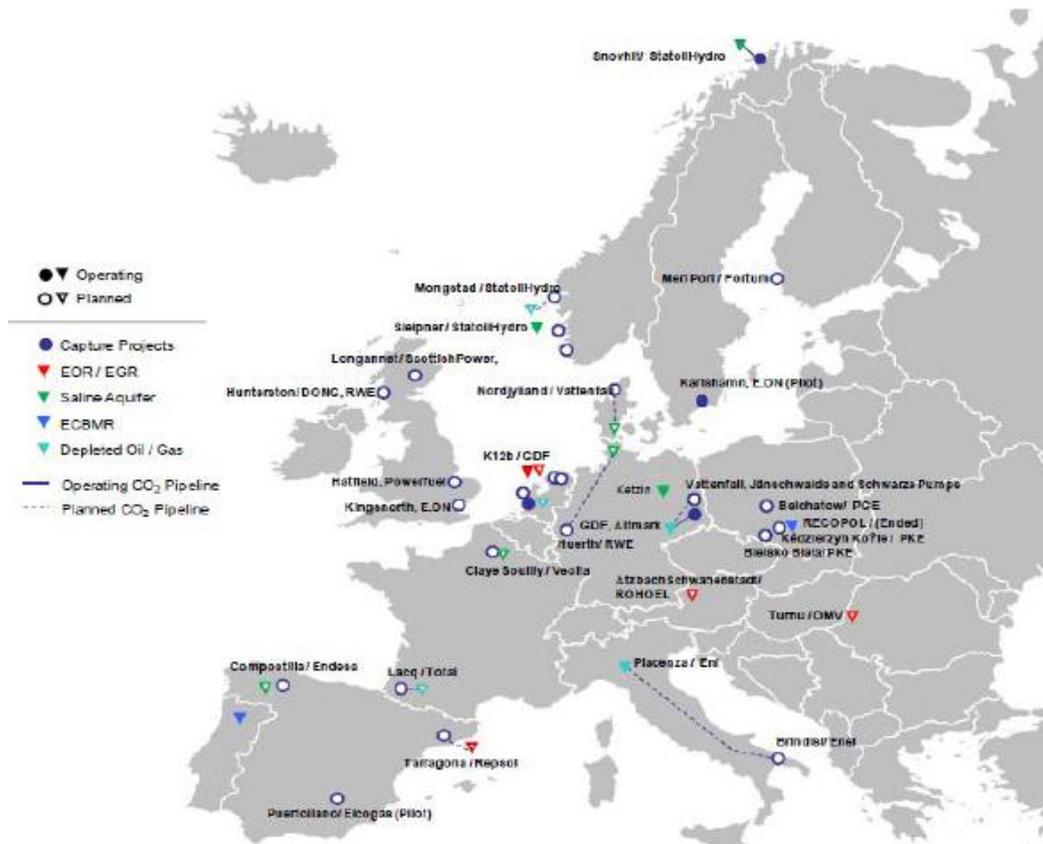


Figura 19 - Atividades de CCS na Europa

Aproximadamente 7 milhões de toneladas de CO₂ antropogênico são utilizadas anualmente nos campos de óleo americanos para projetos de EOR. Aproximadamente 3 milhões de toneladas de CO₂ são seqüestradas (armazenadas permanentemente) por ano em campos de óleo esgotados no oeste dos Estados Unidos, embora, dados de volumes específicos e vazões de CO₂ injetado em campos de óleo esgotado geralmente não sejam de domínio público.

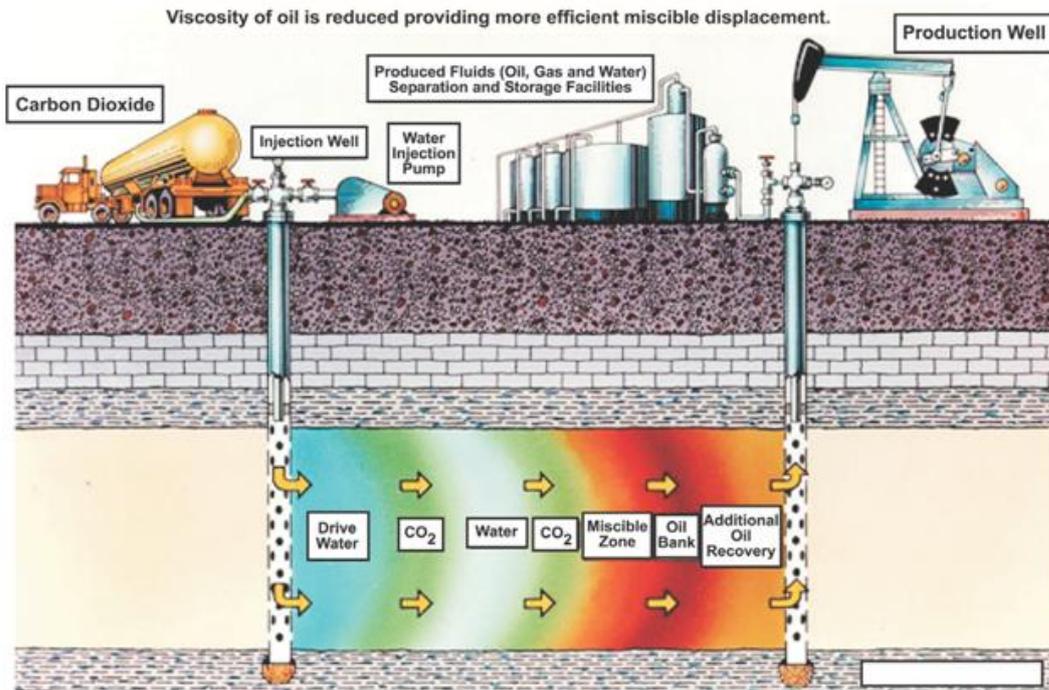


Figura 20 - Esquema simplificado do EOR de CO₂

A Figura 20 (Rocha, P.S. 2009)[37] detalha uma estratégia de injeção de CO₂ nos poços para a recuperação avançada. O CO₂ é injetado intermitentemente com a água (processo comum de injeção em poços) para que possa ser misturado com o petróleo e reduzir sua viscosidade, facilitando assim sua extração e melhorando a qualidade do mesmo.

Devido aos grandes volumes utilizados, o melhor método de transporte de CO₂ para os poços terrestres (*on-shore*) e alguns marítimos (*off-shore*) é por meio de dutos, tendo em vista a capacidade de transporte deste modal. Entretanto, locais de difícil acessibilidade, como plataformas longe da costa, tornam este tipo de transporte caro e nesse caso, o único método é pelo meio marítimo ou, em casos onde os poços possuem grande quantidade de CO₂, como os poços do pré-sal na região de Tupi (Schüffner, C. – 2009)[36], possuir um separador de gás na própria plataforma para injetá-lo novamente no poço.

4.5.1

Recuperação Avançada de Petróleo no Brasil

A Bacia do Recôncavo foi uma das primeiras explorações de petróleo no Brasil. Seu primeiro campo comercial data de 1941. Ela ocupa uma área de cerca

de 10 mil km² e possui em torno de 80 campos e aproximadamente 5300 poços. Muito explorada, todos seus campos já estão maduros e a produção de petróleo encontra-se em declínio, como pode ser observado na Figura 21 onde os dados de produção indicam um declínio constante a partir de 1970 (Dino, R.; Le Gallo, Y. – 2009)[38].

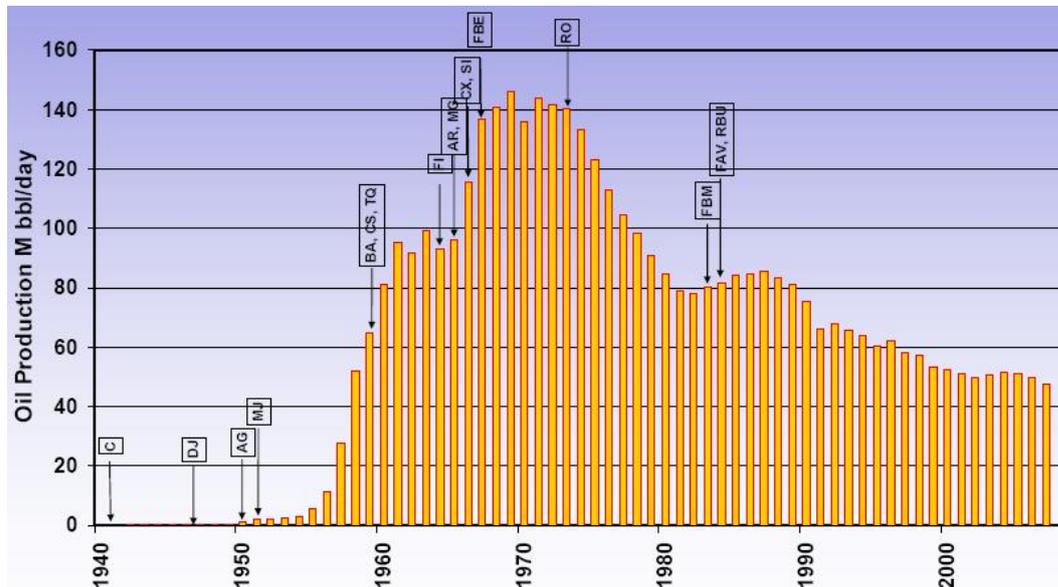


Figura 21 - Produção de Petróleo na Bacia do Recôncavo

Há cerca de 20 anos atrás, a Petrobras procurou utilizar a injeção de CO₂ em altas pressões no campo de Araças, na Bacia do Recôncavo. Em 1991, na mesma Bacia, a empresa iniciou um processo de injeção no campo de Buracica a baixas pressões. Esse processo foi muito bem sucedido, e continua operando até hoje.

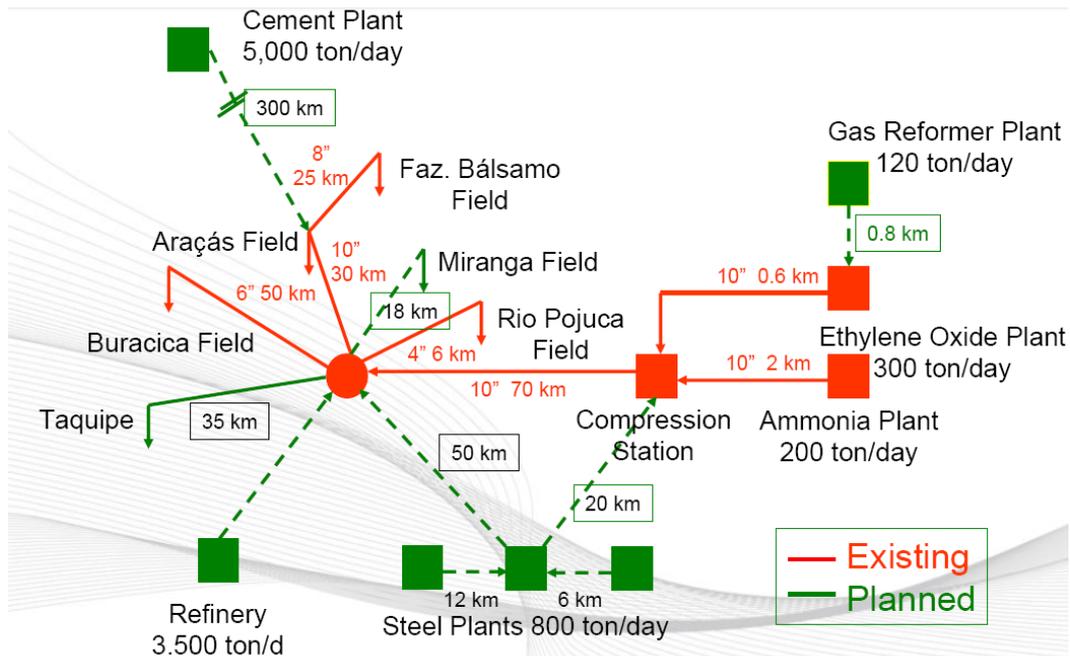


Figura 22 - Fluxograma do EOR da Petrobras na bacia do Recôncavo

A Figura 22 apresenta a configuração atual do projeto de EOR e as perspectivas futuras na bacia do Recôncavo onde é possível observar as instalações da malha de CO₂ na bacia do Recôncavo. Existentes atualmente há duas fontes de CO₂ somando 500 ton/dia em pontos distintos, uma estação de compressão e 4 campos podendo receber o CO₂. Existe um planejamento futuro de adicionar a malha mais 5 fontes com 9420 ton/d adicionais e atendendo além dos campos mencionados o campo de Miranga (Rocha, P.S. 2009)[37].

O CO₂ no campo de Buracica é injetado através de 7 poços distribuídos ao longo do campo. O impacto na produção devido a adoção deste processo pode ser medida pela quantidade de petróleo recuperado com o uso de CO₂ neste campo indicado pelo aumento no fator de recuperação do campo. Em 1991, quando se iniciou o projeto, esse fator era de 29,4%. Após a injeção, houve um aumento de 9,5 pontos percentuais no fator de recuperação. A Figura 23 apresenta o aumento de vazão de petróleo produzida no campo de Buracica e a vazão de injeção de CO₂ (Dino, R.; Le Gallo, Y. – 2009)[38].

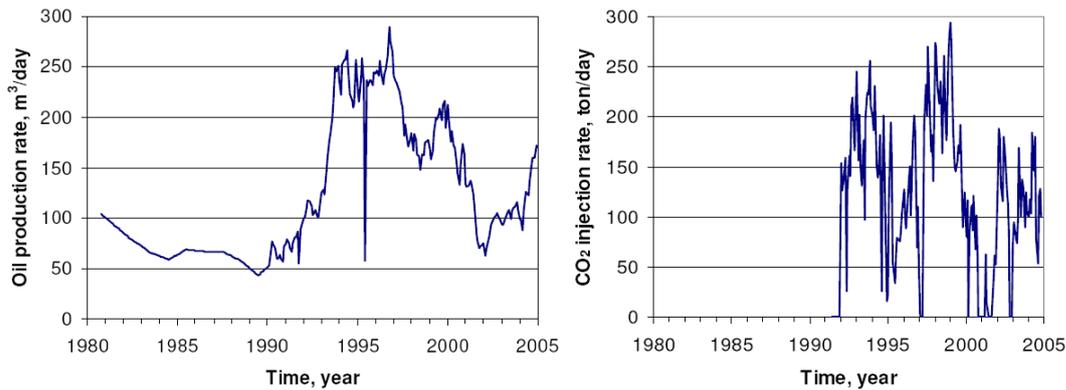


Figura 23 - Produção de petróleo e injeção de CO₂ no campo de Buracica

Por ter passado pelo processo de injeção de CO₂ por todo esse longo período, o campo de Buracica representa uma ótima oportunidade para investigação do impacto desta técnica na estrutura do campo e nas interações com a rocha e o fluido, funcionando como um experimento em escala real. Em agosto de 2007, a Petrobras iniciou um projeto de pesquisa de Seqüestro e Armazenagem de Carbono para determinar a viabilidade de injeção de CO₂ e armazenamento em um campo de petróleo na Bacia do Recôncavo, além do projeto de recuperação avançada já existente. A Petrobras possuía 15 anos de experiência com utilização de CO₂ no local, desde a captura em plantas industriais, a compressão e transporte, até a injeção com o propósito de recuperação avançada no campo (Dino, R.; Le Gallo, Y. – 2009)[38]. No Capítulo 5 será discutido mais profundamente o seqüestro de carbono.