

ECONOMIA DA ENERGIA

CCS/CCUS – Uma visão geral

Mestrado Profissional de Economia e Finanças (FGV)

Leonardo Bettega

1. Introdução

Dado a continua acumulação de gases estufa na atmosfera, nossa sociedade está inevitavelmente tendo que combater as mudanças climáticas com cada vez mais afinco. Segundo Freudenstein et al (2022), desde a publicação do relatório especial de 2018 sobre o aquecimento global de 1,5°C, elaborado pelo Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas (*IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*) tem sido cada vez mais evidente a necessidade de reduzirmos as emissões de gases estufa gerados por nossas atividades e de buscarmos remover gigatoneladas de CO₂ já emitido da atmosfera anualmente. Apenas com a combinação desses dois fatores seria possível atingir as metas estabelecidas no Acordo de Paris.

As diferentes particularidades de cada país em respeito à sua matriz energética atual, nível de desenvolvimento de sua economia e parque industrial sinalizam que a descarbonização de processos e transição energética para fontes mais limpas trarão impactos desiguais entre as nações. Face ao exposto, Zakkour e Heidug (2022) sinalizam a necessidade de implementar a mais ampla variedade de soluções para combater as mudanças climáticas, incluindo neste rol a captura e armazenamento de carbono (*CCS – Carbon capture and storage*) e tecnologias de emissões negativas (*NET – Negative emissions technologies*), como captura direta do ar com armazenamento de carbono (*DACCS – Direct air capture with carbon storage*) e bioenergia com captura e armazenamento de carbono (*BECCS – Bioenergy with carbon capture and storage*). Apesar da existência de caminhos naturais de captura de carbono (como arborização e reflorestamento), a escala necessária de sequestro requer o uso de soluções tecnológicas que podem prover um armazenamento seguro e duradouro.

Antes de entrarmos nos pormenores da tecnologia de captura de carbono que seria escopo do artigo, vale ressaltar a definição de alguns termos que ajudam a entender melhor o seu contexto de aplicação. Segundo Muslemani (2022), os termos “neutralidade de carbono” e “net-zero” são frequentemente usados alternadamente para se referir à mesma coisa. Todavia, existem diferenças. Segundo o IPCC, neutralidade de carbono significa um estado em que nossas atividades resultam em um efeito líquido zero nas emissões. Para uma empresa, significa compensar suas emissões atuais através de investimentos em projetos de redução de carbono, como plantar árvores, por exemplo (inclusive, poderia se manter a neutralidade em carbono até mesmo aumentando suas emissões, desde que aumente os investimentos em compensação, o que não é recomendado). Já o termo net-zero, por outro lado, envolve o estoque geral de CO₂, que vai além do equilíbrio das emissões que emitimos hoje, mas sim tentando removê-las ativamente do sistema. As emissões removidas incluem emissões residuais que não podem ser evitadas usando técnicas convencionais de mitigação, além de emissões que já tínhamos colocado na atmosfera desde a revolução industrial, até que o saldo geral do que emitimos e do que removemos seja zero. Indo além disso, se a quantidade removida de CO₂ da atmosfera exceder o que emitimos, um estado de “emissões negativas” é alcançado.

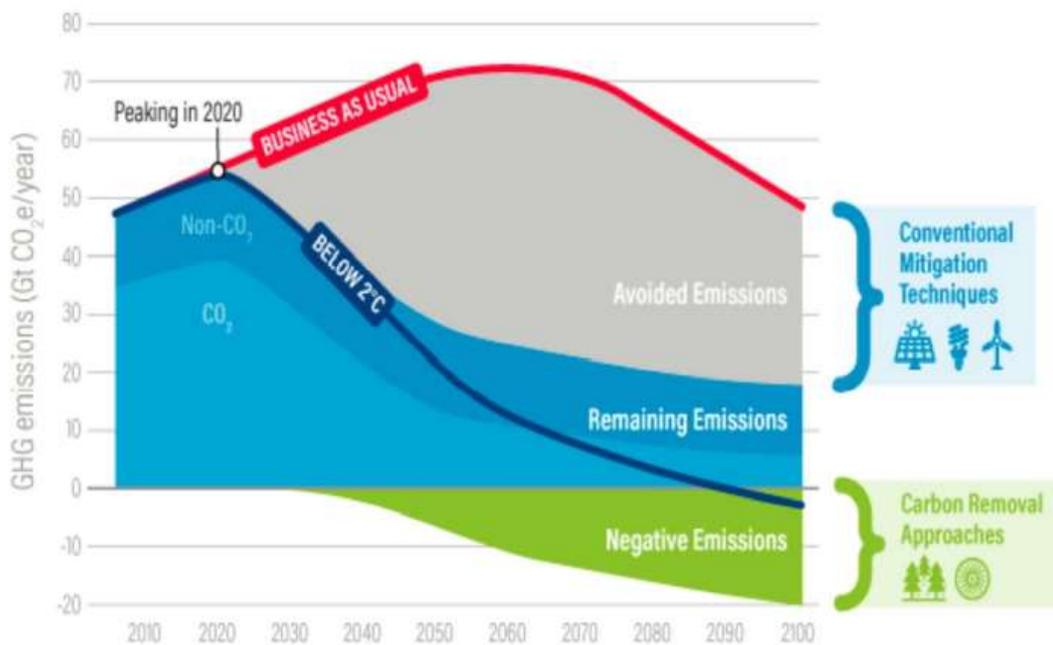


Figura 1 – Caminho para o net-zero
 Fonte: World Resources Institute (2021) – Carbon Removal

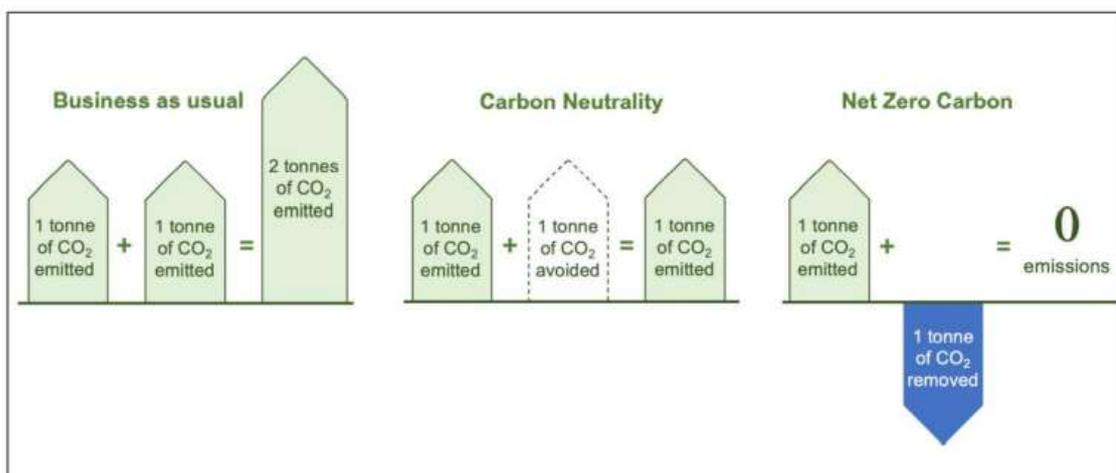


Figura 2 - Neutralidade versus Net-zero
 Fonte: MUSLEMANI, H. (2022). Linking direct air capture (DAC) technology to the voluntary carbon credits market

No que se refere às principais tecnologias de remoção de dióxido de carbono (CDR – Carbon Dioxide Removal) existentes, podemos citar:

- a) **Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS – Carbon Capture, Utilization and Storage):** de acordo com a Agência Internacional de Energia (2021), CCUS envolve a captura de CO₂ de grandes fontes pontuais, incluindo geração de energia ou instalações industriais que usam combustíveis fósseis ou biomassa como combustível. Se não for usado no local, o CO₂ capturado é comprimido e transportado por oleoduto, navio, trem ou caminhão para ser usado em uma variedade de aplicações ou injetado em formações geológicas profundas (incluindo reservatórios de petróleo e gás depletados ou formações salinas) que armazenam o CO₂ permanentemente. Caso o CO₂ não seja utilizado em um processo adicional e apenas armazenado, é possível se referir à essa aplicação como Captura e Armazenamento de Carbono (CCS – Carbon Capture and Storage).

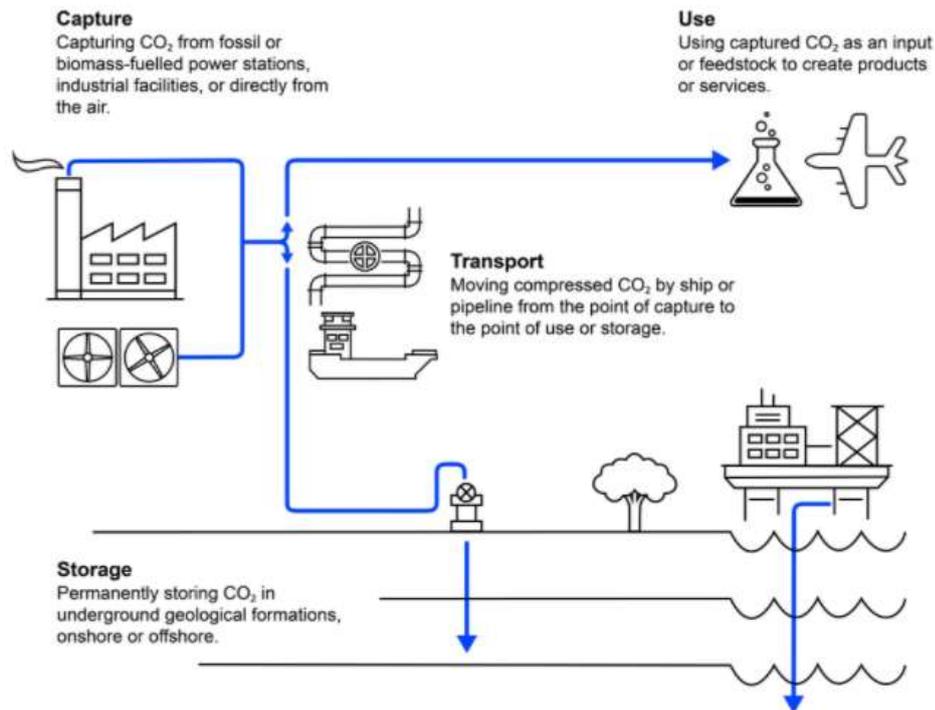


Figura 3 - Fluxo CCUS

Fonte: IEA (2021), *About CCUS*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>

- b) **Captura Direta do Ar com Armazenamento de Carbono (DACCS – Direct air capture with carbon storage):** Gambhir e Tavoni (2019) definem DACCS como tecnologias que permitem remover CO₂ diretamente do ar, colocando o mesmo em contato com químicos que ou dissolvem o CO₂ ou se aderem a ele. Em ambos os casos, os químicos são tratados para que o CO₂ seja separado e posteriormente armazenamento geologicamente ou utilizado em outros processos industriais ou químicos. Apesar dessas plantas terem menos restrições para seu local de instalação, normalmente utilizam mais materiais e energia, dado que a concentração de CO₂ no ar é muito menor do que aquela dos gases de combustão advindos de um processo industrial, como geração de energia a partir da queima de combustíveis fósseis.
- c) **Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS – Bioenergy with carbon capture and storage):** Muslemani (2022) descreve esta alternativa como a geração de energia a partir de biomassa, onde as instalações produtivas são adaptadas com estruturas de captura e armazenamento de carbono. Rørtveit et al (2022) detalham um pouco mais a descrição, explicando o processo como uma melhoria do ciclo natural de captura de carbono feita por árvores ou outra biomassa. Durante seu ciclo de vida e crescimento, a biomassa já extrai naturalmente o CO₂ da atmosfera. Se essa matéria é queimada em um sistema fechado para a geração de energia, o CO₂ que seria liberado na atmosfera através de sua decomposição natural também é capturado.

Dentre as tecnologias acima citadas, o foco principal deste artigo será o CCS/CCUS.

2. Panorama geral CCUS: estágio atual vs projeções

Segundo o Global CCS Institute, em setembro de 2021 existiam 27 plantas de CCUS operacionais no mundo, com a capacidade de captura de cerca de 40 milhões de toneladas

(Mt) anuais de CO₂. Atualmente, essas instalações localizam-se na sua maioria em países desenvolvidos, em especial os Estados Unidos.



Figura 4 - Projetos CCUS no mundo

Fonte: GLOBAL CCS INSTITUTE (2021), *Global Status of CCS 2021: CCS accelerating to net zero*. <https://www.globalccsinstitute.com/>

De acordo com a IEA (2021), a grande maioria das plantas em operação estão vinculadas ao processamento de gás natural, especialmente devido à utilização do CO₂ para aprimorar a recuperação de óleo (*EOR – Enhanced Oil Recovery*). Algumas dessas plantas, inclusive, estão operacionais desde os anos 1970 e 1980. Outros setores vêm apresentando crescimento recente no uso de CCUS, com destaque para fertilizantes, combustíveis sintéticos e hidrogênio.

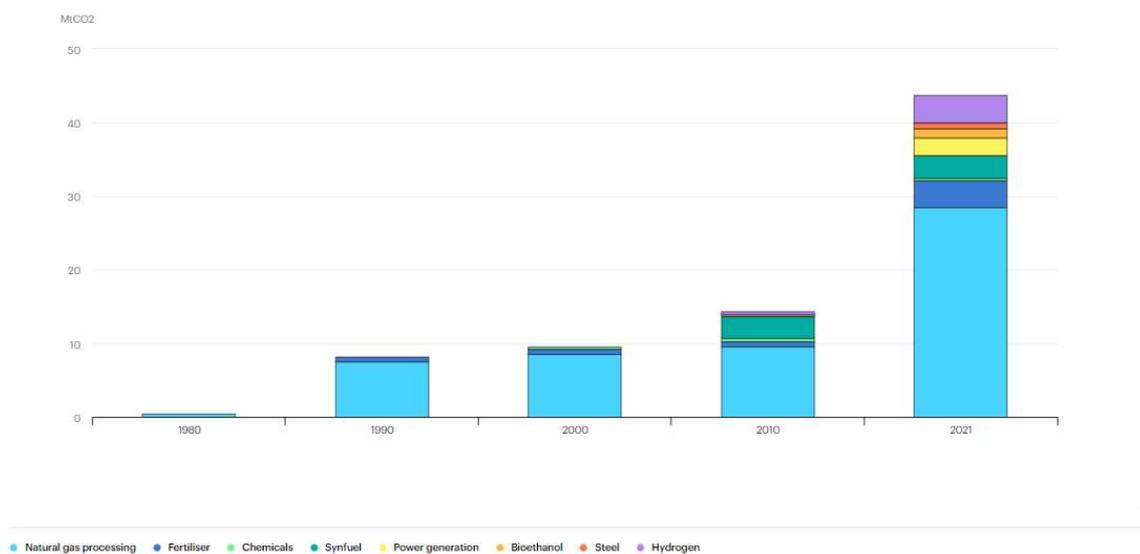


Figura 5 - Plantas de CCUS em operação, por área de aplicação

Fonte: IEA (2021), *About CCUS*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>

De acordo com dados do Global CCS Institute, além das 27 plantas atualmente em operação, existem diversos projetos em implementação, sendo 4 em construção, 58 em desenvolvimento avançado, 44 em desenvolvimento inicial e 2 que tiveram suas operações suspensas, com os Estados Unidos, mais uma vez, apresentando o status de líder na sede de novos projetos. Considerando todas essas plantas, em operação e em implementação, o potencial de captura de CO₂ no mundo pode subir para cerca de 150 Mt por ano.

Apesar de significativo, este patamar ainda não é suficiente para atingir as metas propostas em diversos cenários de transição energética e descarbonização (incluindo os cenários de Desenvolvimento Sustentável 2020-2070 e Net-Zero até 2050, ambos elaborados pela IEA), os quais requerem captura anual na ordem de bilhões de toneladas (Gt – Gigatoneladas), conforme ilustrado abaixo. Ademais, de acordo com McCulloch (2022), é quase uma certeza de que nem todos os projetos planejados serão implantados, dado que muitos precisam de apoio governamental ou estão em competição pelos mesmos programas de financiamento, como o Fundo de Inovação da União Europeia (*EU Innovation Fund*) ou o Fundo para Infraestrutura em CCS do Reino Unido (*UK CCS Infrastructure Fund*).

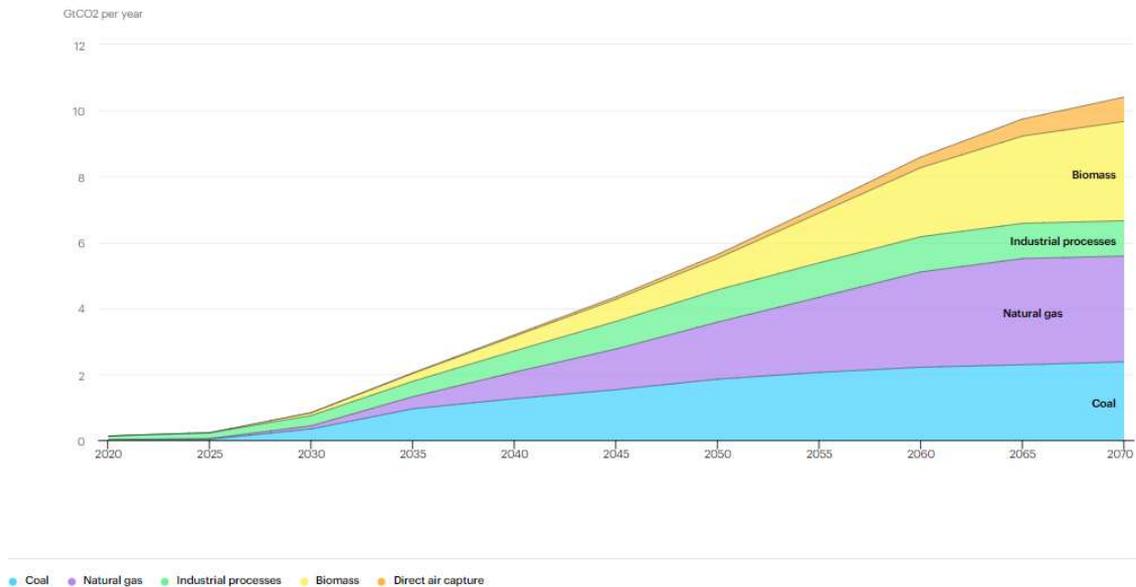


Figura 6 – Necessidade de captura anual: Cenário de Desenvolvimento Sustentável IEA
 Fonte: IEA (2021), *About CCUS*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>

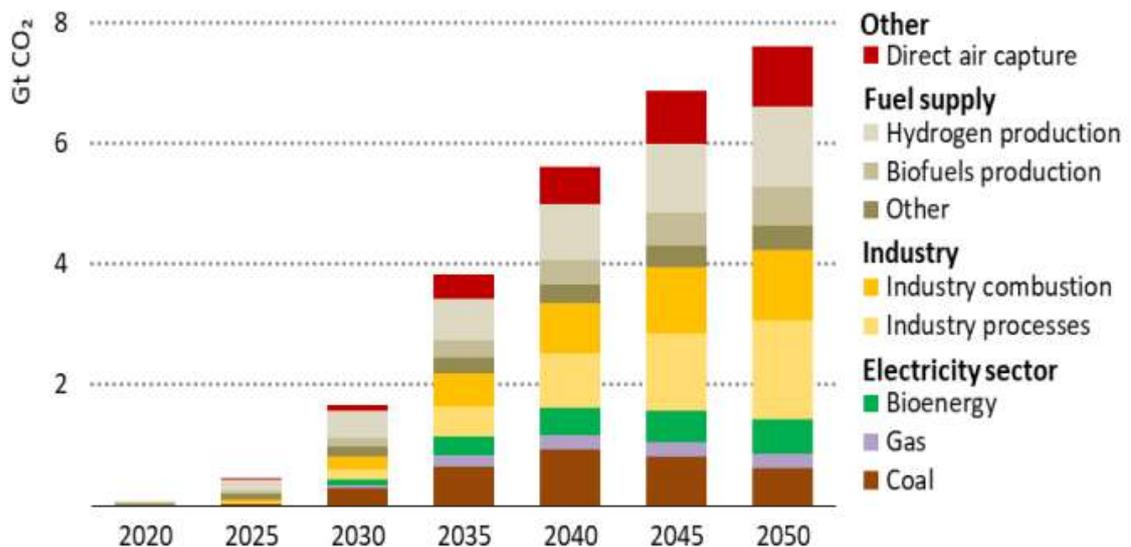


Figura 7 – Necessidade de captura anual: Cenário Net-Zero até 2050 IEA
 Fonte: MCCULLOCH, S. (2022). *Scaling CCUS to meet net-zero goals*. OIES Forum.

3. Características básicas

Custos

Conforme abordado por Fattouh (2022), os principais fatores que contribuem para a falta de implementação de projetos CCS em larga escala são a ausência de uma estrutura regulatória

de apoio e esquemas de incentivos e a falta de modelos de negócio adequados para que os desenvolvedores recuperem seus custos iniciais e operacionais de forma estável.

Fattouh (2022) também apresenta uma visão geral sobre a estrutura típica de custos de projetos CCS, entre os quais podemos citar:

- Custo de captura e condicionamento do CO₂;
- Custo de compressão/liquefação do CO₂ para transporte;
- Custo de transportar o CO₂ via gasodutos ou navios (ou até mesmo caminhões em caso de curtas distâncias e pequenos volumes);
- Custo de injeção do CO₂ em locais de armazenamento e
- Custo de monitoramento e verificação da quantidade de CO₂ armazenado no subsolo.

A magnitude desses montantes tende a variar dependendo dos fatores específicos de cada projeto, sendo o custo da captura e condicionamento geralmente o mais significativo de todos (podendo representar mais de 50%). É possível categorizar iniciativas CCS com base no processo de captura (pós-combustão, pré-combustão e oxi-combustão) e na tecnologia de separação utilizada (absorção, membranas, separação direta e loop químico). O processo de separação mais comumente utilizado é a absorção com químicos, onde o CO₂ presente em uma corrente gasosa reage com um solvente de base amina. Este sistema usa uma coluna de absorção, na qual o CO₂ reage com os químicos, e uma coluna de separação, onde o CO₂ puro é liberado e o solvente regenerado para futura reutilização. Essas colunas geralmente apresentam custos elevados e constituem parte relevante dos investimentos de capital da planta.

Outro fator que influencia muito o custo da captura é a concentração de CO₂ na corrente de origem, sendo mais barato trabalhar com maiores concentrações. Em aplicações como a produção de etanol ou processamento de gás natural, a concentração de CO₂ é alta, todavia, em processos como geração de energia e na captura direta do ar, o CO₂ é bem diluído e, portanto, mais caro e desafiador de se aprisionar. Ademais, também vale ressaltar a importância da quantidade e do custo da energia utilizada no processo.

As tecnologias utilizadas no transporte e armazenamento do CO₂ já são maduras, especialmente no uso de gasodutos. Existe espaço para ampliar o uso do transporte de CO₂ através de navios, especialmente se determinado arranjo de projeto exigir flexibilidade, no entanto este crescimento não deve apresentar uma barreira técnica, dado que a indústria de óleo e gás tem vasta experiência no transporte de combustíveis gasosos e outros líquidos, como GLP e GNL.

Riscos e benefícios

Evensen (2022) realizou um grande apanhado de estudos sobre CCUS e identificou os principais riscos e benefícios desta tecnologia. Entre os riscos, foram identificados: (i) aborda apenas os sintomas de emissões de carbono e não as suas causas; (ii) reduz incentivos para mitigar ainda mais as emissões de carbono; (iii) segurança em relação a vazamentos ou explosões devido ao excesso de pressurização; (iv) custo da tecnologia; (v) a tecnologia não é completamente controlável e (vi) incerteza científica e desconhecimento do grande público. Fattouh et al (2021) complementa essa visão, informando também que o CCUS perpetua o uso de combustíveis fósseis, pode desencorajar mudanças no comportamento da sociedade e reforça dependências existentes.

Já como principais benefícios, Evensen (2022) cita: (i) reduções nas emissões de carbono, mitigando as mudanças climáticas e (ii) investimentos na geração de empregos e nas comunidades onde os projetos ocorrem. A IEA (2021) também apresenta uma visão dos possíveis benefícios, mostrando que existem diversas aplicações para o CO₂, tanto como uso

direto (sem alteração química) quanto para a sua transformação em insumo através de processos biológicos e químicos.

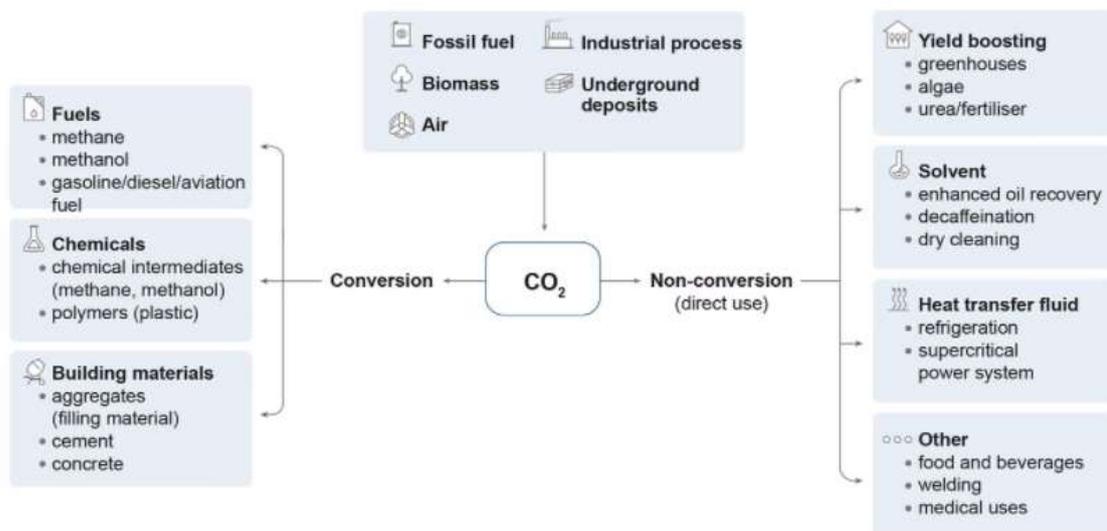


Figura 8 - Uso do CO₂

Fonte: IEA (2021), About CCUS, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>

Ademais, a IEA (2021) também afirma que as tecnologias CCUS podem apresentar papéis estratégicos. O primeiro deles seria lidar com as emissões advindas da infraestrutura existente de plantas industriais e de geração de energia, as quais poderiam ser adaptadas para inserir a tecnologia CCUS e evitar emissões que podem somar 600 bilhões de toneladas nos próximos cinquenta anos.

Em segundo lugar, encontra-se o uso de CCUS como alternativa economicamente viável para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono (hidrogênio azul). De acordo com o Cenário de Desenvolvimento Sustentável da IEA, o uso de hidrogênio no mundo aumenta cerca de 7 vezes até 2070, atingindo um patamar de 520 milhões de toneladas por ano.

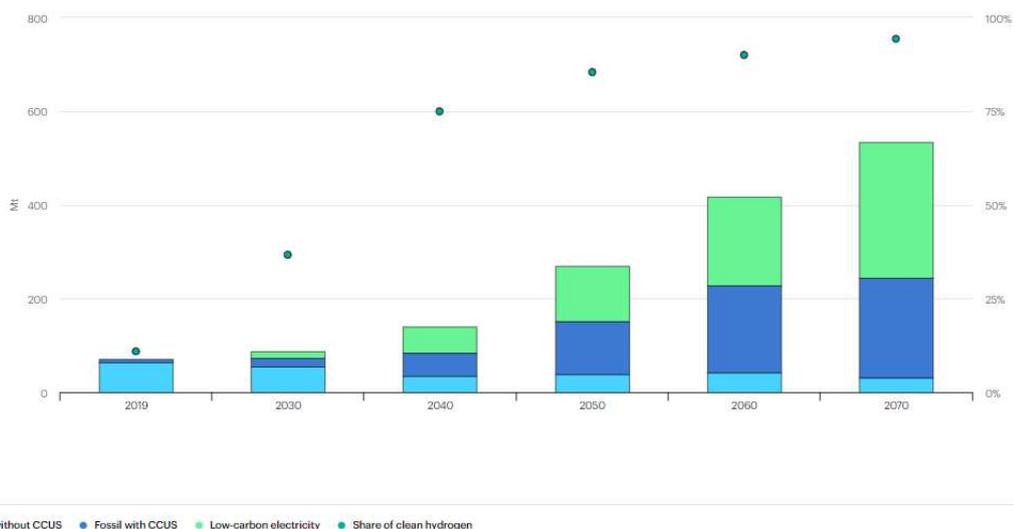


Figura 9 - Produção global de hidrogênio: Cenário de Desenvolvimento Sustentável, IEA
 Fonte: IEA (2021), About CCUS, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>

É possível verificar no gráfico acima que a maior parte do hidrogênio atualmente produzido no mundo usa como matéria prima combustíveis fósseis (como gás natural e carvão) e não aplica CCUS em seu processo. Fattouh (2022) complementa essa análise, informando que o grande desafio é que cada tonelada de hidrogênio produzido a partir de gás natural é

associada à emissão de 9 toneladas de CO₂. No caso do uso de carvão, relação é ainda mais alta, representando 20 toneladas de CO₂ emitidas para cada tonelada de hidrogênio produzida.

Interessante ressaltar que Fattouh (2022) também mostra que o custo entre produzir hidrogênio usando como base combustíveis fósseis e aplicando CCS não é tão diferente do custo da mesma produção sem aplicar CCS. Utilizando CCS, o custo de produção é de USD 2,27/kg, já sem utilizar CCS o custo de produção é de USD 2,08/kg, uma diferença de cerca de 9%. Todavia, mesmo assim, a adoção de CCS na cadeia de produção não tem se desenvolvido rapidamente, o que sugere que outros fatores também impactam essas decisões, como por exemplo: a imprecisão na estimativa dos custos; os riscos envolvidos na coordenação das inúmeras atividades da cadeia do CCS e os cenários de demanda para hidrogênio azul frente ao desenvolvimento e escalabilidade da produção de hidrogênio verde (gerado a partir do uso de eletrólise), o que pode contribuir para tornar o hidrogênio azul uma tecnologia de curta transição, trazendo incertezas para esse modelo de negócio.

A terceira aplicação estratégica para CCUS sugerida pela IEA é como solução para os setores de difícil mitigação de emissões, como por exemplo indústrias pesadas, produção de cimento, ferro, aço e químicos. De acordo com o Global CCS Institute, a economia e a geração de empregos de muitas comunidades locais dependem desses tipos de indústria, que se instados a encerrar suas atividades, trariam consigo impactos severos. O uso de CCS pode levar as emissões desses setores a quase zero, preservando empregos, mas também ajudando a atingir metas climáticas.

Neste prisma, é interessante ressaltar as implicações no setor de óleo e gás, conforme abordado por Fattouh et al (2021). O cenário de transição energética e descarbonização irá gerar impactos desiguais entre os países do globo. Países dependentes da exploração de hidrocarbonetos terão de passar por ajustes e transformações mais profundas para reduzir as suas emissões. Nesta trajetória, enfrentarão um dilema entre diversificar sua economia ou aumentar a resiliência de seu setor energético.

A diversificação completa exige grande esforço fiscal e tecnológico, através da ampliação do capital humano, melhoria do sistema educacional, melhoria do ambiente de negócios e de sua governança, maior transparência e remoção de barreiras para participação da iniciativa privada. Ademais, a sociedade parece estar entrando em um período de redução dos fluxos de investimento no setor de óleo e gás e maior pressão de acionistas, financiadores e governos para a redução do uso de combustíveis fósseis. No entanto, como a velocidade da transição energética varia de país a país, sair muito cedo de um setor estratégico já estabelecido pode privar o país de uma importante fonte de renda.

Tais aspectos apontam para a alternativa de aumentar a resiliência do setor energético através da redução das suas emissões, com o CCUS assumindo papel estratégico neste sentido. Fattouh et al (2021) apontam algumas razões que justificam essa abordagem. Em primeiro lugar, como pode ser verificado abaixo, existe grande incerteza sobre as projeções da demanda futura de petróleo no mundo. Todavia, mesmo nos cenários de transição energética mais agressivos, este insumo ainda permanece como fonte importante da energia consumida.

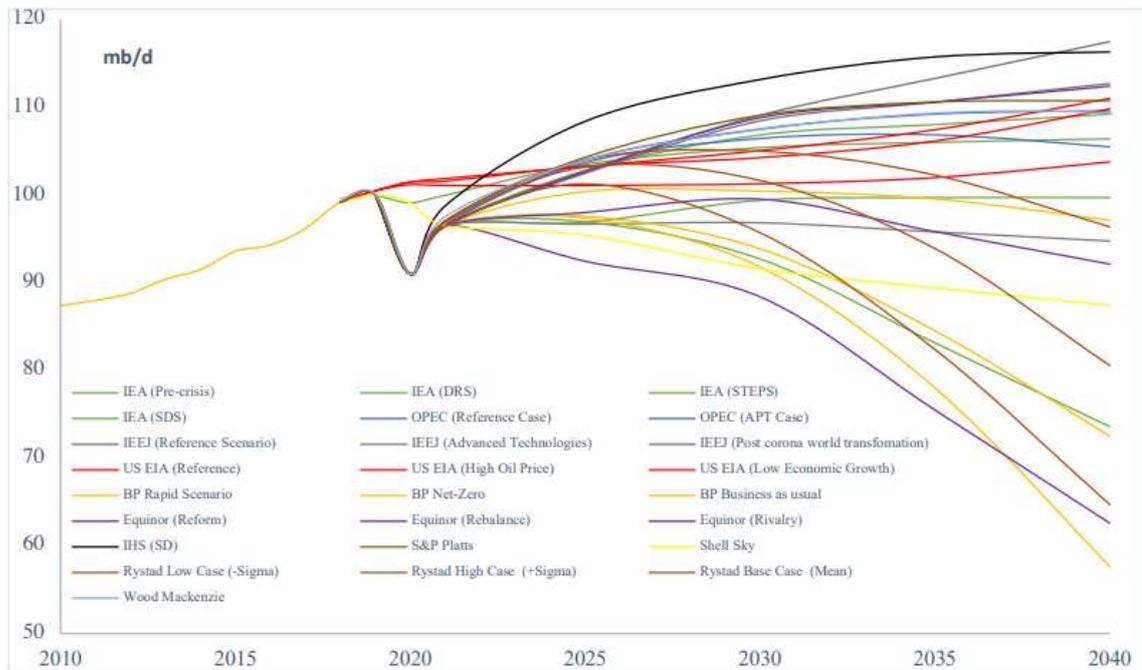


Figura 10 - Demanda projetada de petróleo, em milhões de barris/dia

Fonte: Fattouh et al (2021), *Transitioning to Net-Zero: CCUS and the Role of Oil and Gas Producing Countries*

Em segundo lugar, o uso do CCUS pode reduzir o custo de cumprir metas climáticas, dado que determinados setores intensivos em energia (*hard to abate*) terão que perseguir opções mais caras de mitigação e o CCUS permite um acesso contínuo a combustíveis baixo custo, sem prejuízo ao desenvolvimento e mantendo a competitividade desses setores em um mundo com possíveis impostos sobre o carbono.

Outra razão abordada é que os cenários de descarbonização previstos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*) dependem de sumidouros de carbono, tanto biológicos quanto geológicos, para atingir emissões negativas e a meta de 1,5º grau. O CCS pode complementar soluções naturais, fornecendo armazenamento de longo prazo.

Em quarto lugar, esta é uma tecnologia em que os países produtores de óleo e gás podem estabelecer uma clara vantagem comparativa, dada sua capacidade de armazenamento geológico, acesso à reservatórios depletados, expertise acumulada e acesso à infraestrutura existente, tudo isso contribuindo também para a diversificação para novos setores e identificação de novos usos para o carbono.

Por fim, ao contrário de medidas de restrição de demanda e oferta de combustíveis fósseis, as quais são intrusivas para certas economias (especialmente países em desenvolvimento e exportadores de óleo e gás), o uso do CCUS não interrompe a monetização e permite a exploração sustentável das reservas atuais.

4. Modelos de negócio e soluções propostas

Apesar dos avanços recentes e benefícios identificados, muito ainda é necessário para que o uso de CCUS chegue à escala devida para contribuir efetivamente com o atingimento das metas climáticas mundiais. Basicamente, as ações prioritárias para o desenvolvimento e expansão de projetos de CCUS consistem em um mix de políticas públicas direcionadas e mecanismos de mercado que provejam modelos de negócios sustentáveis e menor incerteza para os investimentos.

Belani e Gerard (2022) nos mostram que, diferentemente das energias renováveis, o CCS não consiste em um negócio por só, dado que não gera energia e nem cria um produto para ser vendido. Na verdade, consiste numa tecnologia de mitigação de mudanças climáticas que nos permite continuar produzindo e consumindo as commodities atuais, mas reduzindo significativamente a pegada de carbono desses processos. Face ao exposto, para justificar investimentos em CCS é necessário criar mecanismos que atribuam valor para a descarbonização. Diante desse cenário, a seguir será apresentado um apanhado das principais soluções atualmente levantadas que podem contribuir para desbloquear o uso mais amplo desta tecnologia.

Políticas públicas e subsídios

Por não existir uma abordagem que sirva para todos os casos, o desenho dessas políticas e regulações devem levar em consideração diversos aspectos, como aplicações, maturidade da tecnologia, custos e preferências regionais (McCulloch, 2022). Por exemplo, o nível de suporte necessário para equipar uma planta de fabricação de cimento com CCUS é mais alto do que para fazer o mesmo com uma planta de processamento de gás, o qual consistem em um processo mais maduro e possui um custo de captura menor (cerca de USD 15 por tonelada de CO₂, versus USD 60 por tonelada no caso da usina de cimento).

Ainda de acordo com McCulloch (2022), no âmbito das políticas públicas, destacam-se a ampliação de financiamentos subsidiados e/ou isenções fiscais para suportar aplicações de CCUS menos maduras e mais caras, bem como para as fases de transporte de CO₂ e infraestruturas de armazenamento. Esses financiamentos, apesar de terem seu peso nos orçamentos públicos de cada país, podem reduzir os impactos dos altos investimentos e ajudar a mitigar riscos técnicos de projetos mais inovadores.

Belani e Gerard (2022) complementam este tópico com a menção da Regulação Federal 45Q dos Estados Unidos, a qual consiste na única legislação estabelecida que provê um valor definido por cada tonelada de CO₂ capturada e armazenada, no caso um crédito fiscal que pode chegar a USD 50/ton. Mecanismos como este citado podem contribuir para tornar projetos viáveis comercialmente. Além disso, é levantado que a seleção dos locais de armazenamento e os processos de licenciamento ambiental são itens muito importantes para a mitigação dos riscos associados com um sequestro de carbono seguro e de longo prazo. McCulloch (2022) lembra que apesar do potencial global de locais de armazenamento superar as necessidades previstas, o tempo requerido para identificar, analisar e desenvolvê-los pode levar anos.

Hoje em dia, a falta de maturidade do setor aliada ao desconhecimento dos reguladores tem atrasado o desenvolvimento de pontos de armazenamento. No caso dos Estados Unidos, obter uma licença de injeção de CO₂ em um local dedicado pode levar anos, enquanto que o mesmo processo para injeção em um reservatório para fins de aumento do fator de recuperação de óleo (*EOR – Enhanced Oil Recovery*) dura alguns meses e o processo para obtenção de licença de injeção de resíduos industriais leva algumas semanas (Belani e Gerard, 2022).

Clusters e redes

De acordo com o Global CCS Institute (2021), historicamente, os projetos implantados de CCS apresentam em sua maioria características de integração vertical, onde uma planta de captura possui seu próprio sistema de transporte. Este fato favoreceu o desenvolvimento de projetos maiores, os quais foram beneficiados por economias de escala. No entanto, uma nova tendência vem sendo identificada recentemente, especialmente nos Estados Unidos, Reino Unido e Noruega, onde projetos estão compartilhando a infraestrutura de transporte e armazenamento de CO₂, no caso, gasodutos, instalações portuárias, transporte marítimo e poços de armazenamento. Com isso, espera-se que projetos menores também possam se beneficiar de economias de escala.

Governos podem assumir papéis de liderança no planejamento inicial e na coordenação dessa estrutura de transporte e armazenamento, inclusive provendo apoio direto para o desenvolvimento de uma capacidade maior que a necessária no momento. Por exemplo, o projeto Alberta Carbon Trunk Line, no Canadá, recebeu centenas de milhões de dólares de apoio do governo, o que proporcionou que fosse construído com mais de 90% de sua capacidade de 14,6 MtCO₂ livre para acomodar futuras iniciativas (McCulloch, 2022).

Precificação do carbono

Conforme mencionado anteriormente, o CO₂ em si não tem um valor natural. Portanto, isso implica na necessidade de se impor, através de regulações, um valor artificial a esse elemento para incentivar a redução de emissões (Rørtveit et al, 2022). Segundo o Banco Mundial, a precificação do carbono consegue capturar as externalidades negativas das emissões e vinculá-las como um custo para suas fontes, transferindo o ônus do dano de volta para os responsáveis. Em vez de governos decidirem quem deve reduzir suas emissões e como, o preço do carbono fornece um sinal econômico para os agentes e os emissores acabam decidindo se descontinuam suas atividades poluidoras, reduzem emissões ou se pagam para continuar poluindo. Esta precificação por ser implementada essencialmente por 2 formas:

- Imposto sobre o carbono: define um preço específico que será aplicado como taxa a um montante de emissões.
- Sistema de comércio de emissões (ETS – Exchange Trading System): limita o nível total de emissões de gases estufa e permite que setores com baixas emissões vendam suas cotas remanescentes para emissores maiores. Ao criar oferta e demanda para as licenças de emissão, um ETS estabelece um preço de mercado para as emissões de gases estufa. Já o limite ajuda a garantir que as reduções de emissões necessárias ocorram, de modo a manter o conjunto de todos os emissores dentro de seu orçamento de carbono pré-definido.

Segundo o relatório State and Trends of Carbon Pricing, emitido pelo Banco Mundial em 2020, já existiam: 61 iniciativas de precificação de carbono implementadas ou programadas, sendo 31 ETS e 30 impostos sobre o carbono, as quais cobrem cerca de 22% das emissões globais de gases estufa.

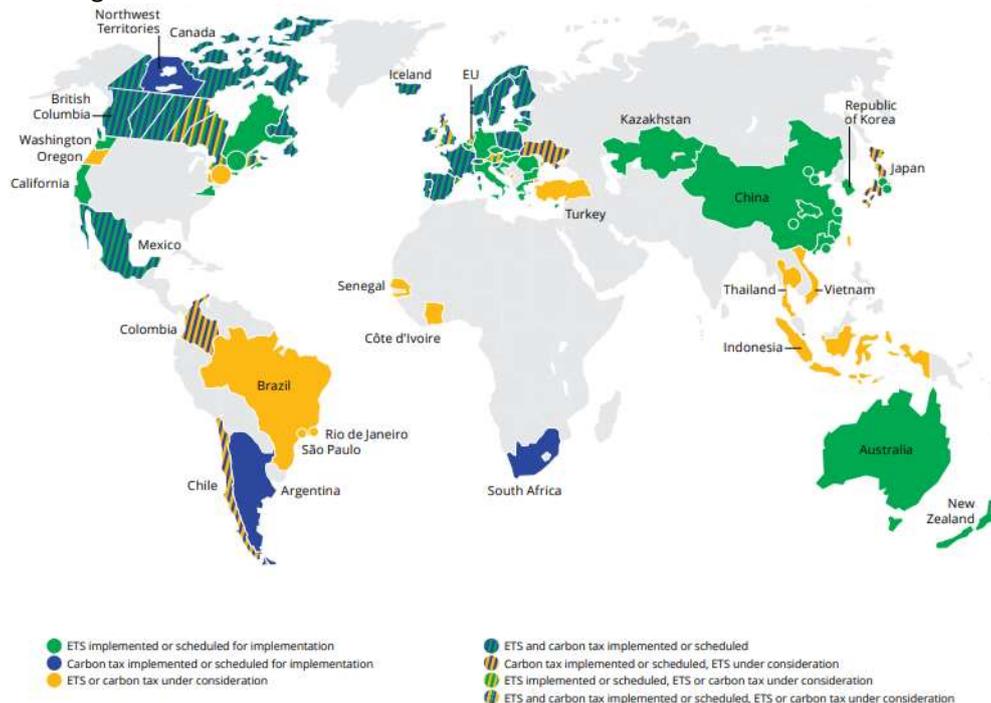


Figura 11 - Precificação de carbono no mundo

Fonte: World Bank Group (2020). State and Trends of Carbon Pricing.

Neste cenário, uma empresa que possui uma planta adaptada com tecnologia CCS e consegue reduzir as emissões de suas atividades, pode, através de um ETS, vender o seu saldo de emissões não utilizado para o mercado com base no preço vigente e obter receitas adicionais que podem servir para suportar o projeto de instalação do componente de CCUS. Todavia, de acordo com Fattouh et al (2022), reconhece-se que apenas impostos sobre o carbono e ETS não são suficientes para induzir os investimentos em CCUS, dado que os preços geralmente são voláteis e não são suficientes para reduzir o risco dos investidores e prover um fluxo contínuo e estável de receitas. Prova disso seria o fato de que ETS Europeu, o qual incluiu o tema CCS em seu sistema desde 2010, até agora não conseguiu oferecer incentivos suficientes para o desenvolvimento de nenhum projeto do tipo.

Contratos de suporte

Constituem-se em acordos vinculantes, onde a contraparte normalmente será uma entidade governamental ou uma empresa pública, cujo objeto é prover pagamentos pelo serviço ambiental de redução de emissões (Whitmore, 2022). O modelo principal apresentado é o Contrato de Carbono para Diferenças (CCfDs – *Carbon Contracts for Differences*), instrumento semelhante aos Contratos para Diferenças para Renováveis (RES CfDs – *Renewables Contracts for Differences*), já utilizado anteriormente para prover mais certeza às receitas de projetos de geração de energia renovável (Climate Friendly Materials Platform, 2020).

De acordo com o Climate Friendly Materials Platform (2020), nos CCfDs um agente acorda com uma entidade governamental um preço da tonelada de carbono sobre o qual poderá vender qualquer cota de emissões reduzidas em seu projeto. Se o preço de mercado do carbono for menor que o preço de exercício, o agente recebe a diferença. Caso o preço de mercado seja mais alto, o agente deve devolver a receita adicional ao governo.

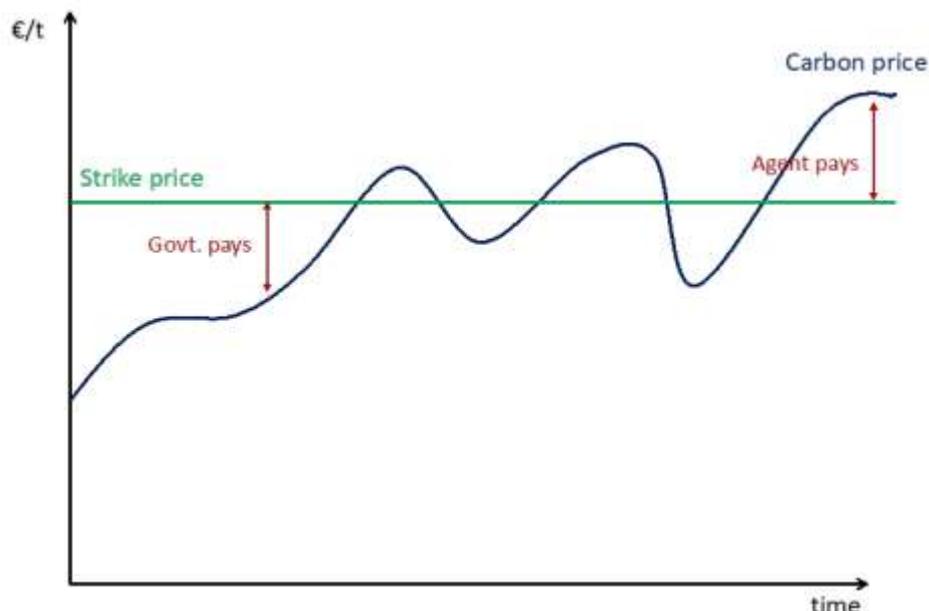


Figura 12 - Carbon contracts for differences

Fonte: Climate Friendly Materials Platform (2020). *Carbon Contracts for Differences: their role in European industrial decarbonization*

Ainda segundo o Climate Friendly Materials Platform (2020), investir em tecnologias de baixo carbono inovadoras traz muitos riscos, sendo um dos principais a incerteza quanto à receita que se pode obter no mercado de carbono na venda futura de cotas de redução de emissões,

dado a volatilidade e imprevisibilidade do preço de carbono vigente. Diante disso, os CCfDs agem como um instrumento de hedge, estabilizando o fluxo de receita, reduzindo incertezas e custos de financiamento e contornando a falha do mercado no suporte a soluções inovadoras.

Whitmore (2022) ressalta que outros fatores podem influenciar a modelagem desse tipo de contrato, como por exemplo se existirão permissões de emissões (*Emission Allowances*) e, caso existam, se serão gratuitamente concedidas pelo governo ou leiloadas. Outros pontos importantes a serem definidos no contrato apontados por Whitmore (2022): existência de um pagamento fixo anual independente dos volumes de CO₂, indexação de uma proporção do pagamento por tonelada aos preços de energia (componente importante dos custos do projeto), custos de transporte e armazenagem, duração (normalmente superior a 10 anos) e mecanismos de reequilíbrio (mudanças nos pagamentos por conta de alterações nas condições de mercado ou nas taxas de retorno).

Unidades de armazenamento de carbono (CSU – *Carbon Storage Units*)

Zakkour e Heidug (2022) sugerem a adoção em massa de CSUs, os quais consistem em um registro monitorado, verificado, confiável e transferível da adição de uma tonelada de CO₂ armazenado. Como aplicações e benefícios, teríamos: (i) geração de mais um sinal de preço para o armazenamento de carbono e criação um possível novo mercado de transação de CO₂ entre agentes; (ii) prover mais uma opção para incentivar produtores de combustíveis fósseis a utilizarem CCS e DACCS; (iii) rastrear os combustíveis fósseis ao longo da cadeia de suprimentos de energia, demonstrando qual a extensão que esses produtos podem ser considerados low-carbon ou conformes aos preceitos do Acordo de Paris e (iv) prover mais uma camada de financiamento direcionado para tecnologias de geosequestro.

Sugere-se que a aplicação dos CSUs pode ser feita através de pilotos, normalmente em acordos bilaterais entre setores específicos, especialmente o setor de aviação e de produção de combustíveis fósseis, ou em associações entre países que, por exemplo, tenham o interesse de continuar a utilizar e explorar combustíveis fósseis de uma forma alinhada às diretrizes do Acordo de Paris. Este grupo poderia promover o financiamento de iniciativas de CCS e a utilização/comercialização de CSUs, podendo incluir esse mecanismo sob a égide do Artigo 6, do Acordo de Paris. Esta visão, de integração do CSU a um sistema multilateral, também é abordada por Fattouh et al (2021), os quais adicionam que este sistema cria uma camada adicional de receita, separada das emissões reduzidas, a qual pode incentivar os agentes a investir em CCUS.

Financiamento

Os riscos climáticos estão sendo cada vez mais considerados nas análises de portfólio das instituições financeiras, dado uma pressão crescente para o desinvestimento em atividades poluentes. Ações mitigatórias como a implementação de CCS podem auxiliar essas instituições a reduzir sua exposição e não deixarem de suportar esses setores, dado que muitos deles proveem bens e serviços essenciais. Como exemplo desse movimento, grandes fundos de pensão como os da Noruega (*Norway's Government Pension Fund Global*) e Japão (*Japan's Government Pension Investment Fund*) estão engajando-se na gestão das suas companhias investidas em vez de abandonarem investimentos em combustíveis fósseis (Global CCS Institute, 2021).

Segundo o Global CCS Institute (2021), considerando as projeções contidas no Cenário de Desenvolvimento Sustentável da IEA, 15% das reduções de emissões que ocorrerão até 2050 se dão devido ao uso do CCS. Isso equivale à implementação de 2.000 novas instalações de grande capacidade nesse período, com uma necessidade de capital que estaria entre USD 650 bilhões e USD 1,3 trilhões. O relatório *Financing Clean Energy Transitions in Emerging and Developing Economies (EMDE)*, publicado pela IEA em 2021, fornece um panorama

interessante sobre o financiamento de iniciativas relacionadas à transição energética, com foco maior nos países emergentes.



Figura 13 - Investimento médio anual em captura de CO₂ por Setor, Região e Cenário (SDS – Desenvolvimento Sustentável e NZE – Net-Zero até 2050, ambos da IEA)

Fonte: IEA (2021). *Financing Clean Energy Transitions in Emerging and Developing Economies*.

Apesar de existirem diferenças entre os cenários de projeção fornecidos por diversas entidades, é fácil perceber que o nível de financiamento requerido é gigantesco. Ainda de acordo com a IEA (2021), os governos têm um papel primordial para ampliar as oportunidades de financiamento, estabelecendo regulações que prevejam fluxos de receita, reduzam riscos e no fim das contas criem um mercado e um modelo de negócio viável para os investimentos em CCUS. Alguns exemplos dessas iniciativas públicas são os créditos fiscais fornecidos pela Regulação Federal 45Q nos Estados Unidos, o mecanismo de subsídios SDE++ na Holanda e os fundos UK CCS Infrastructure Fund (Reino Unido), EU Innovation Fund e Horizon Europe (ambos da União Europeia).

Fattouh et al (2021) afirma que, além de instituições multilaterais, o setor financeiro global precisa incluir o CCUS como parte de suas métricas de financiamento ESG (*Environmental, Social and Governance*) para que recursos privados possam fluir mais facilmente. Segundo o Global CCS Institute (2021), essa necessidade de alinhamento às metas climáticas está gerando novos produtos financeiros e formas de endividamento. É interessante mencionar um deles, o empréstimo ligado à sustentabilidade (*SLL – Sustainability Linked Loan*), onde um mecanismo interno gera uma taxa de juros menor se o tomador alcançar certas metas ESG e uma taxa de juros maior caso o tomador não o faça. Nesta linha, cabe mencionar também mecanismos de endividamento sustentável, como títulos verdes (*green bonds*), desde que considerem projetos CCUS como parte de suas diretrizes, conforme reforma feita pela China em 2020 (IEA, 2021).

Em resumo, para desenvolver projetos de CCUS na escala necessária, requer-se um mix de diversas modalidades de financiamento.

		Pilot and demonstration projects	Capacity building*	Capital support	Operating or revenue support
Development finance institutions, MDBs	CCUS trust funds (ADB, World Bank)	●	●		
	Concessional loans from MDBs	●		●	○
	IFC leveraged investment	○		●	○
Climate finance / multilateral climate funds	Green Climate Fund	●		●	○
	Global Environment Facility	●		●	○
	Climate Technology Centre and Network	●	●		
Carbon markets	Joint Crediting Mechanism	○		○	●
	Clean Development Mechanism	○		○	●
	Voluntary carbon markets				●
Sustainable debt securities	Green/sustainability bonds	○		●	●
	Transition bonds	○	○	●	●
	Bank loans	○		●	●
Potential instruments	Storage certificates and credits	○		●	●
	Article 6 (Paris Agreement)	○		○	○

* Including legal and regulatory development and technology assistance.

Note: ● = eligible, ○ = may be eligible.

Figura 14 - Elegibilidade de CCUS por mecanismos de financiamento internacionais
 Fonte: IEA (2021). *Financing Clean Energy Transitions in Emerging and Developing Economies*.

5. Status do CCUS em alguns países

Conforme foi possível verificar previamente, atualmente, o desenvolvimento de projetos de CCUS é mais restrito a países desenvolvidos. Nesta última seção, será apresentado um rápido overview dos países e regiões que mais tem se destacado na implementação dessa tecnologia.

União Europeia

De acordo com Sweeney (2022), esta década é de grande importância para que a Europa atinja a neutralidade climática até 2050. Essa meta já foi incluída na legislação da União Europeia, juntamente com o objetivo de reduzir as emissões de gases estufa em 55%, comparado com níveis de 1990, até 2030 (*Europe's fit for 55*). Com isso, a Europa tem ocupado um lugar de destaque no que diz respeito à implementação de legislação e mecanismos de financiamento para suportar a ampliação do uso do CCS. Como avanços relacionados à regulação, valem destaque: (i) a atualização da Diretriz do Sistema de Comércio de Emissões da EU (*EU Emissions Trading System Directive*) com a inclusão de todas as modalidades de transporte de CO₂ em seu escopo, (ii) a inclusão de todas as modalidades de transporte e armazenamento de CO₂ na proposta de revisão da regulação TEN-E (*Trans-European Energy Networks*), a qual identifica corredores prioritários, áreas temáticas e projetos prioritários a serem desenvolvidos e (iii) a realização de um Fórum de CCUS de alto nível, organizado pela Comissão da UE.

Já dentro da União Europeia, é interessante ressaltar a experiência de 2 países, Noruega e Holanda. Na Noruega, segundo informações do Global CCS Institute (2021) e Rørtveit et al (2022), está em construção o projeto Longship, um empreendimento financiado pelo governo norueguês que consiste em uma infraestrutura de transporte e armazenamento, com capacidade máxima de 5Mt por ano, que irá capturar as emissões de CO₂ de uma planta de fabricação de cimento e uma usina de geração de bioenergia (*waste-to-energy*), transporta-las na forma liquefeita através de navios até um terminal que irá bombeá-las através de um gasoduto de 100km até serem injetadas em um reservatório salino submarino no Mar do Norte. A planta emissora será responsável por capturar, tratar e liquefazer o gás, enquanto que a Northern Lights, uma joint venture estabelecida por uma associação da Equinor, Shell e Total, será a responsável por administrar as instalações de transporte e armazenamento.

A tecnologia aplicada no projeto Longship não é nova. A Noruega é um grande player do setor de óleo e gás e possui vasta expertise no tratamento de gases e CO₂. O que inova no projeto é a modularização da cadeia de valor, onde qualquer nova planta com um acesso a um cais pode acoplar suas emissões capturadas à estrutura de transporte e armazenagem existente. A Northern Lights, portanto, está em discussões com potenciais clientes que podem no futuro utilizar toda a capacidade disponível do projeto.

Na Holanda, segundo Akerboom e Kramer (2022), foi decidido focar a utilização de CCS no setor industrial e não no setor de energia, como por exemplo um atenuador de usinas a carvão. O Global CCS Institute (2021) menciona que o Acordo Climático do Governo Holandês (*the Klimaatakkoord*) estipula que o país reduza suas emissões de gases estufa em 49% até 2030 e 95% até 2050, comparando com níveis de 1990. Neste acordo, é especificado que o setor industrial reduza suas emissões em 14 Mt por ano até 2030, permitindo que até 7,2 Mt por ano seja através do uso de CCS. Como empreendimento de destaque, vale mencionar o projeto Porthos, o qual consiste em um hub de transporte e armazenamento offshore instalado no Porto de Rotterdam, o qual irá capturar emissões industriais de CO₂ na área do porto e arredores, transporta-las via gasoduto e armazená-las em reservatórios submarinos depletados. O projeto, que vem sendo desenvolvido por uma parceria entre o Porto de Rotterdam, Gasunie e EBN, receberá cerca de EUR 2,1 bilhões em subsídios (ao longo de 15 anos) advindos do programa governamental SDE++ e tem previsão de entrar em operação em 2024.

Outros países da região que também valem a rápida menção devido à implementação de projetos CCS são: Dinamarca, Alemanha e Suécia.

Reino Unido

O Global CCS Institute (2021) menciona que o governo do Reino Unido publicou recentemente um plano de 10 ações focadas em implementar uma revolução industrial verde, além de ter definido uma meta de reduzir em 68% suas emissões de gases estufa até o fim de 2030. Neste plano de ação, é delineada a intenção de estabelecer 2 clusters industriais de CCUS até meados dos anos 2020 e 4 até 2030, com capacidade de captura de 10 Mt de CO₂ por ano. Para suportar esse desenvolvimento, o governo anunciou a criação do CCS Infrastructure Fund, com um capital de EUR 1 bilhão. Ademais, verifica-se que existem 6 grandes projetos de clusters de CCS, com capacidade de captura conjunta de cerca de 60 Mt de CO₂ por ano, que provavelmente irão competir por esses recursos e a prioridade na implantação. Uma publicação da Upstream Online de janeiro/2022 menciona que o projeto HyNet North West receberá uma decisão final de investimento ainda no ano de 2022, o que indica que este foi o projeto inicial escolhido.

Apesar desses avanços, Keay (2022) afirma que o governo do Reino Unido não tem uma estratégia bem definida sobre o uso do CCS no futuro e que está apoiando projetos individuais sem avaliar os impactos integrados na economia, o que pode gerar percalços

similares aos ocorridos ao sistema elétrico quando da inserção forçada da geração de renováveis intermitentes.

América do Norte

Conforme explicitado anteriormente, esta é a região onde mais existem projetos de CCS em desenvolvimento e em operação no mundo, especialmente nos Estados Unidos. Lá, diversos fatores se combinaram para suportar esse avanço, incluindo uma priorização mais forte no combate às mudanças climáticas por parte do governo americano, o retorno dos Estados Unidos ao Acordo de Paris, atualizações das regulações 45Q de créditos fiscais e uma antecipação da demanda global por combustíveis e produtos de baixo carbono (Global CCS Institute, 2021).

Nos Estados Unidos, vale destacar a aprovação do US Energy Act de 2020, o qual, dentre outras disposições, autorizou mais de USD 6 bilhões para programas de pesquisa, desenvolvimento e demonstração de tecnologias para CCS, os quais seriam utilizados no período de 2021 a 2025. Existem mais de 50 projetos de CCS em desenvolvimento por lá, incluindo aí 6 grandes clusters e redes. Destas novas iniciativas, o Global CCS Institute (2021) evidencia o uso do CCS em biorefinarias e em instalações de gás natural liquefeito (GNL):

- No que se refere às biorefinarias, especialmente devido ao baixo custo de captura de CO₂ advindo da produção de bioetanol e a possibilidade de acessar o mercado de combustíveis de baixo carbono da Califórnia, 2 grandes redes de CCS estão em desenvolvimento. A Summit Carbon Solutions anunciou um projeto que iria capturar as emissões de CO₂ (cerca de 8Mt por ano) de mais de 30 instalações desse tipo no meio oeste dos Estados Unidos e armazená-las em reservatórios no estado de Dakota do Norte. Potencialmente, seria a maior rede CCS e o maior projeto de BECCS no mundo. Ademais, também é mencionado o Heartland Greenway Pipeline, sendo desenvolvido pela Navigator CO₂ Ventures, em associação com a Valero e a BlackRock, o qual consiste em um gasoduto que irá se estender por mais de 1.930km e transportará CO₂ de biorefinarias e outras instalações industriais localizadas nos estados de Iowa, Illinois, Nebraska, Minnesota e Dakota do Sul até um local de armazenamento geológico em Illinois, com capacidade de 5Mt por ano.
- Com o maior interesse do mercado em GNL de baixo carbono, cada vez mais instalações desse tipo estão anunciando ou construindo integrações para o uso do CCS em seus processos, valendo ressaltar a iniciativa da NextDecade de incluir CCS no seu projeto Rio Grande LNG no Texas, com o intuito de apoiar a descarbonização da cadeia de suprimento do GNL. Este projeto teria a capacidade de capturar até 5Mt de CO₂ por ano.

Já no Canadá, pode-se dizer que o uso de CCUS não é novidade para a indústria do país, onde algumas empresas já utilizam a anos a tecnologia para EOR na produção de petróleo de areias betuminosas (Ihejirika, 2022). Como destaque principal atual, desde meados de 2020 o projeto Alberta Carbon Trunk Line está operacional. Se trata de um grande sistema que captura emissões industriais e as transporta através de um gasoduto de 240km até reservatórios depletados no centro da província de Alberta. A capacidade do gasoduto pode chegar a 14,6 Mt de CO₂ por ano, mas hoje em dia, a utilização é de no máximo 2Mt, consistindo de emissões provenientes de uma refinaria e uma planta de fertilizantes (Global CCS Institute, 2020).

O Canadá também tem demonstrado disposição em avançar no âmbito da regulação. De acordo com o Global CCS Institute (2021), em dezembro de 2020 foram publicadas duas importantes diretrizes. A primeira (A Healthy Environment and a Healthy Economy) propôs o desenvolvimento de uma estratégia de CCS ampla para o país, enquanto que a segunda atualizou disposições do Clean Fuel Standard, incluindo o CCS como um dos caminhos para atingir a conformidade dos critérios do programa que regula as emissões do setor de

combustíveis. Outros avanços dignos de mencionar seriam: (i) a criação do fundo Strategic Innovation Fund – Net Zero Accelerator, o qual irá prover CAD 3 bilhões nos próximos 5 anos para suportar iniciativas de descarbonização de grandes emissores, (ii) a transformação em lei do Canadian Net-Zero Emissions Accountability Act, legislação que consagra o compromisso do Governo do Canadá de atingir zero emissões líquidas de gases estufa até 2050, além de fornecer uma estrutura de responsabilidades e transparência para cumpri-la, (iii) a formação de uma aliança das seis maiores empresas atuantes na produção de petróleo de areias betuminosas – Cenovus, CNRL, ConocoPhillips, Imperial, MEG Energy e Suncor – chamada Oilsands Pathways do Net Zero, a qual irá trabalhar para implementar grandes projetos de CCS no setor (Ihejirika, 2022) e (iv) a proposição, em abril de 2022, de um grande esquema de crédito fiscal destinado a cobrir 50% do custo com equipamentos de captura de CO2 para projetos de CCUS realizados por grandes emissores (Financial Post, 2022).

Brasil

No Brasil, é interessante ressaltar a experiência da Petrobras. Atualmente, a empresa conduz o maior programa de CCUS em operação do mundo. De acordo com informações da empresa, 9 plataformas do pré-sal foram equipadas com a tecnologia para realizar a separação do CO2 contido na composição do gás natural e reinjetá-lo de volta no reservatório de onde saiu inicialmente. A reinjeção serve para atender regulações que impedem a ventilação CO2 para a atmosfera e como técnica de EOR. Apenas em 2020 foram reinjetadas 7Mt de CO2, cerca de 19% de toda a capacidade mundial. Já em 2021, a quantidade foi ainda maior. Desde a primeira implantação, ocorrida em 2008, até setembro de 2021 a companhia havia reinjetado um total de 28,1 Mt de CO2 nos reservatórios. Já no que tange à novas tecnologias, “um exemplo é a tecnologia de High Pressure Separation (separação em alta pressão) – de forma abreviada, HISEP –, patenteada pela Petrobras e em fase de testes, pela qual o gás que sai do reservatório já é separado e reinjetado, a partir de um sistema localizado no fundo do mar. Com isso, a produção do campo é ampliada e é possível alcançar uma menor emissão de gases de efeito estufa para cada barril de óleo produzido” (Petrobras, 2022).

Apesar do país como um todo não ter avançado muito na regulação do tema CCS, um aspecto importante é que um projeto de lei (PL 528/21) que regulamente o mercado de carbono está pronto para ser votado no Plenário da Câmara dos Deputados. Segundo a Agência Câmara de Notícias (2022), a proposta cria um Sistema Nacional de Registro, que vai concentrar informações sobre os projetos de remoção ou redução de gases e sobre as transações nacionais e internacionais com os créditos de carbono que têm origem no Brasil. Também serão estabelecidos os parâmetros para a definição dos valores dos créditos de carbono, a partir de padrões de certificação. Ademais, o projeto determina ainda a criação de um órgão que vai administrar o sistema de registro e propor metas de compensação ambiental que estejam de acordo com os tratados internacionais de combate às mudanças climáticas.

6. Conclusão

O mundo ainda está longe de possuir a infraestrutura necessária para capturar e armazenar as bilhões de toneladas anuais de CO2 estipuladas nos cenários de futuro previstos pelas principais entidades que acompanham o tema da transição energética e descarbonização (IEA, EIA, IPCC, IRENA, etc). Muitos avanços ainda são necessários, especialmente no que se refere à regulação, políticas públicas, financiamento, avanços tecnológicos e no estabelecimento de um modelo de negócio que assinala valor ao CO2 capturado e permita que esse tipo de projeto possa gerar uma receita específica. Segundo a IEA (2021), os desafios para implementação de projetos de CCUS são maiores para os países emergentes, os quais possuem menos espaço para o uso de finanças públicas, precisam perseguir diversas metas de desenvolvimento (o que inclui crescimento de suas demandas por energia) e possuem uma menor capacidade para acomodar maiores custos em geração de energia e produção industrial.

Dentre os principais benefícios, a utilização da tecnologia de captura e armazenamento de carbono tem o potencial de apoiar a descarbonização de setores de altas emissões, como geração de energia, produção de cimento, aço, fertilizante e combustíveis fósseis, ser um viabilizador da produção de hidrogênio azul e permitir o consumo de combustíveis fósseis para o suprimento energético mundial enquanto que fontes renováveis ainda não alcançam a magnitude necessária. Apesar dos desafios existentes, inúmeros avanços têm ocorrido recentemente, conforme foi possível verificar. Estes avanços têm o potencial de gerar uma nova onda de interesse e ações visando à escalabilidade dessa tecnologia. A Rystad Energy (2022) prevê inclusive que os gastos em desenvolvimento de CCS irão quadruplicar até 2025, atingindo um valor acumulado de USD 50 bilhões.

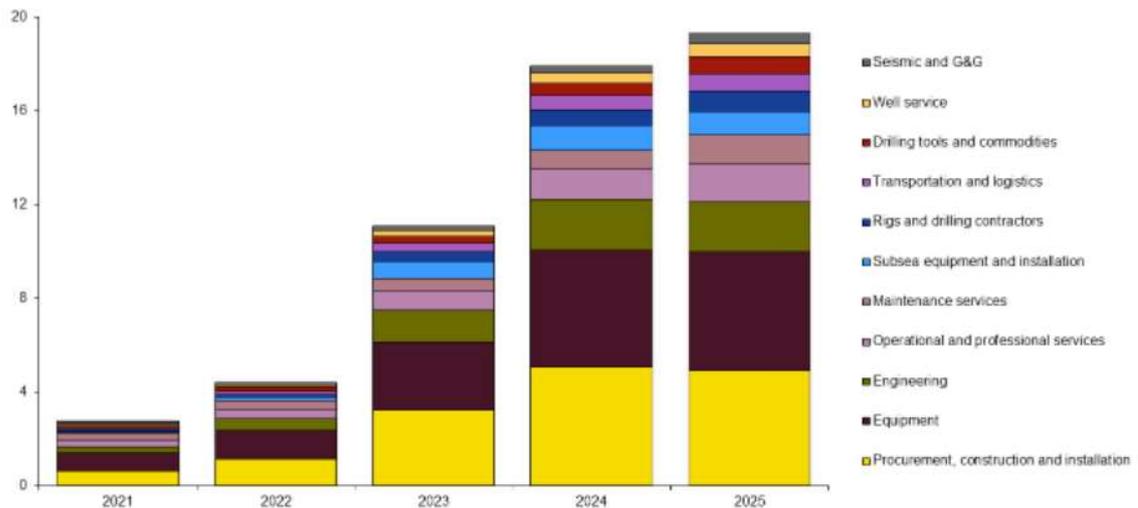


Figura 15 - Gasto global anual em CCS por setor
Fonte: Rystad Energy

De acordo com Belani e Gerard (2022), quando o CCS se tornar um negócio próspero, o tamanho do mercado é maior do que toda a indústria de óleo e gás, com o diferencial de que a demanda não precisa se desenvolver, ela já está inteiramente disponível. O que faremos nesta década será crucial para determinar o sucesso desse novo e promissor setor.

7. Bibliografia

- FATTOUH, B.; HEIDUG, W.; ZAKKOUR, P. (2021). Transitioning to Net-Zero: CCUS and the Role of Oil and Gas Producing Countries. OIES Energy Insight #90
- IEA (2021), About CCUS, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/about-ccus>
- GLOBAL CCS INSTITUTE (2021), Global Status of CCS 2021: CCS accelerating to net zero.
- GLOBAL CCS INSTITUTE (2020), Alberta Carbon Trunk Line now fully operational. Disponível em <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/latest-news/alberta-carbon-trunk-line-now-fully-operational/>
- MCCULLOCH, S. (2022). Scaling CCUS to meet net-zero goals. OIES Forum.
- BELANI, A.; GERARD, D. (2022). Carbon capture and sequestration – the business. OIES Forum.
- WHITMORE, A. (2022). Contracts to support deployment of carbon capture. OIES Forum.
- ZAKKOUR, P.; HEIDUG, W. (2022). Achieving net-zero: a novel supply-side climate policy to value carbon sinks. OIES Forum.
- FATTOUH, B. (2022). Enabling CCS is vital for blue hydrogen. OIES Forum.
- SWEENEY, G. (2022). CCS in the EU: prospects, challenges, and EU policy measures needed. OIES Forum.
- KEAY, M. (2022). CCUS in the UK – where is the strategy? OIES Forum.

- KNUDSEN, J.; PHILLIPS, D.; AASEN, E.; VALEN, H. (2022). Carbon capture and storage (CCS) in Norway: experiences and challenges from within. OIES Forum.
- RØRTVEIT, R.; EGELAND, I; WÆRNESS, E. (2022). CCS in Norway: lessons for commercialization across Europe. OIES Forum.
- AKERBOOM, S.; KRAMER, G. (2022). The Dutch approach to carbon capture and storage. OIES Forum.
- GHAZZAWI, A.; KHOWAITER, A. (2022). CCUS opportunities, global challenges and deployment enablers. OIES Forum.
- IHEJIRIKA, N. (2022). CCUS in Canada: potential and prospects. OIES Forum.
- ANDREWS-SPEED, P. (2022). China's policies and actions on carbon capture, utilization, and storage (CCUS). OIES Forum.
- MUSLEMANI, H. (2022). Tech-based carbon removal credits: what's the fuss all about? OIES Forum.
- FREUDENSTEIN, P.; UZOR, L.; BEUTTLER, C. (2022). The pertinent role of carbon dioxide removal and direct air capture in achieving the goals of the Paris Agreement. OIES Forum.
- MUSLEMANI, H. (2022). Linking direct air capture (DAC) technology to the voluntary carbon credits market. OIES Forum.
- GAMBHIR, A.; TAVONI, M. (2019). Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation.
- World Resources Institute (2021). Disponível em <https://www.wri.org/initiatives/carbon-removal>
- Climate Friendly Materials Platform (2020). Carbon Contracts for Differences: their role in European industrial decarbonization
- World Bank. Carbon Pricing. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon#CarbonPricing>
- World Bank Group (2020). State and Trends of Carbon Pricing.
- IEA (2021). Financing Clean Energy Transitions in Emerging and Developing Economies.
- Financial Post (2022). Trudeau proposes tax credit to cover 50% of carbon capture technology cost. Disponível em: <https://financialpost.com/commodities/energy/oil-gas/trudeau-proposes-tax-credit-to-cover-50-of-carbon-capture-technology-cost>
- Petrobras (2022). Programa de CCUS da Petrobras no pré-sal é o maior do mundo em volume de gás carbônico (CO₂) reinjetado. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/programa-de-ccus-da-petrobras-no-pre-sal-e-o-maior-do-mundo-em-volume-de-gas-carbonico-co2-reinjetado.htm>
- Agência Câmara de Notícias (2022). Projeto que regulamenta mercado de carbono está pronto para ser votado no Plenário. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/848104-projeto-que-regulamenta-mercado-de-carbono-esta-pronto-para-ser-votado-no-plenario/>
- Rystad Energy (2022). Carbon capture and storage service spending to total more than \$50 billion globally by 2025. Disponível em: [https://www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/carbon-capture-and-storage-service-spending-to-total-more-than-\\$50-billion-globally-by-2025/?utm_campaign=&utm_content=&utm_medium=&utm_source=linkedin](https://www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/carbon-capture-and-storage-service-spending-to-total-more-than-$50-billion-globally-by-2025/?utm_campaign=&utm_content=&utm_medium=&utm_source=linkedin)