

Transporte de CO₂ como modelo de negócio para a Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)

Claudia Magalhães e Silva, Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ - Brasil, claudia.silva@ppe.ufrj.br
Alexandre Szklo, Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ - Brasil, szklo@ppe.ufrj.br
Roberto Schaeffer, Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ - Brasil, roberto@ppe.ufrj.br

Introdução

Tecnologias de captura, utilização e/ou armazenamento de carbono (CCUS) deverão assumir um papel fundamental na transição para uma indústria com emissões líquidas zero de CO₂ (IPCC 2022). Conforme mostra o relatório AR6, do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC 2022), os cenários de mitigação climática se utilizam de tecnologias de CCUS para propor possíveis trajetórias de mitigação até 2100.

Entre estas tecnologias estão a captura e o uso/armazenamento aplicados ao CO₂ fóssil (provenientes, por exemplo, de térmicas a carvão e unidades de processamento de gás natural), bem como tecnologias de captura e armazenamento associadas ao CO₂ biogênico (BECCS - bioenergy with carbon capture and storage) e de captura direta do ar ambiente (DACCS - direct air carbon capture and storage). Neste trabalho abordaremos todas as práticas de captura, uso e/ou armazenamento de carbono (CCUS), independente da tecnologia utilizada.

De fato, as análises oficiais da Agência Internacional de Energia (IEA) e do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indicam que, para alcançar as metas climáticas globais, serão necessárias taxas anuais de armazenamento de CO₂ de aproximadamente 1 Gtpa até 2030, crescendo para cerca de 10 Gtpa até 2050 (Global CCS Institute 2023a; IPCC 2022).

De acordo com o relatório *Global Status of CCS* (Global CCS Institute 2023a), a captura e o armazenamento de carbono estão começando a aumentar sua escala. Em julho de 2023, a capacidade total de captura dos projetos de CCUS em desenvolvimento, em construção e em operação era de 361 Mtpa, um aumento de 50% comparado à capacidade reportada no relatório de 2022. Aliada ao aumento dos projetos, a diversidade de indústrias, às quais a tecnologia CCUS está sendo aplicada, também aumentou significativamente nos últimos anos. Além disso, o relatório ressalta que, embora relativamente poucos projetos tenham avançado para etapa de operação, é importante frisar que determinados projetos levam 7 anos ou mais para se desenvolver, justificando a demora entre os projetos em desenvolvimento e os projetos que entram em operação.

Dentro desse cenário de evolução, os projetos de redes/hubs de CCUS, que compreendem projetos de infraestrutura de transporte e/ou armazenamento que serão compartilhados com plantas de captura de CO₂, estão em ascensão. Historicamente, as instalações de CCUS eram integradas verticalmente, compreendendo uma única planta de captura de CO₂, com sistemas de compressão, transporte e armazenamento dedicados. No entanto, o desenvolvimento de projetos de CCUS através de redes tem se tornado dominante, visto que proporcionam economias de escala, reduzem custos e criam sinergias de modelos de negócios, que reduzem riscos (Global CCS Institute 2023a).

Apesar das vantagens oferecidas pelo modelo de rede (Global CCS Institute 2023a; International Energy Agency 2023a), como o modelo de negócio de transporte de CO₂, o preço do petróleo ainda tem uma grande influência na viabilidade econômica desse modelo, conforme mostram Yao et al., 2018. Tal influência deriva de que a maioria dos projetos de CCUS em operação depende das receitas da recuperação avançada de petróleo (EOR).

Yao et al., 2018, apresentaram uma análise de viabilidade econômica de quatro potenciais modelos de negócio de CCUS na China, para diferentes cenários de preço de petróleo. Foram abordados os modelos: (i) Verticalmente Integrado, no qual a empresa de energia tem uma fonte de captura, um local de armazenamento/EOR, bem como as instalações de transporte; (ii) Joint Venture, estabelecido por uma sociedade de empresas relacionadas (de captura, transporte, armazenamento/uso), onde a empresa geradora de energia e a empresa do campo de petróleo por exemplo pertencem a uma terceira parte, porém podem ter participações acionárias na Joint Venture (iii) Operador de CCUS, onde os processos de captura, transporte, utilização e armazenamento são operados por uma única empresa terceirizada; e (iv) Transporte de CO₂, onde existe um responsável pelo papel de transporte do CO₂. Para cálculo das despesas e receitas dos modelos, foi considerada a captura de carbono a partir de uma usina típica de carvão e assumiu-se que o EOR era o único método para utilizar o CO₂ capturado, visto ser este o cenário mais atraente, no momento do estudo, para a implantação de projetos de CCUS.

Como resultado, os autores observaram que nenhum modelo de negócio foi viável no cenário de preço médio de petróleo a US\$ 40/barril. Em um cenário de US\$ 60/barril apenas o modelo verticalmente integrado foi viável e no cenário de US\$ 80/barril todos os modelos foram viáveis, seguindo a seguinte ordem de atratividade: modelo verticalmente integrado, joint venture, transporte de CO₂ e operador de CCUS. Considerando a premissa, adotada pelo estudo, de que a opção geológica mais atraente e madura para utilizar o CO₂ capturado é o

EOR, fica claro que o modelo de negócio do tipo verticalmente integrado apresenta maior viabilidade econômica quando comparado aos outros modelos. (Yao et al. 2018)

Yao et al., 2018, mostraram ainda que a adoção de leis, regulações e políticas, como a precificação do carbono, o comércio de créditos de carbono e os subsídios para o armazenamento, poderiam tornar alguns desses modelos de negócio viáveis, mesmo diante dos cenários de preços mais baixos de petróleo.

De fato, a influência do preço do petróleo nos projetos de CCUS pode ser observada ao longo dos anos, como por exemplo no projeto de CCUS Petra Nova, o qual captura o CO₂ dos gases de combustão de uma usina termelétrica e injeta o CO₂ capturado em um campo de petróleo, localizado no Texas, Estados Unidos, para aumentar a produção de petróleo bruto (EOR). O projeto de captura entrou em operação em 2017 e, em 2020, foi afetado pelos efeitos da recessão econômica mundial, incluindo a demanda e o preço do petróleo. Devido à situação, as operações de captura de carbono foram suspensas em maio de 2020 até que o ambiente dos preços do petróleo evoluísse e a condição econômica melhorasse (NRG Energy 2020). O projeto permaneceu suspenso até setembro de 2023, quando as operações foram retomadas, após a aquisição de 50% da Petra Nova Parish Holdings LLC pela JX Nippon Oil & Gas Exploration Corporation, com o objetivo de expandir seu conhecimento da tecnologia CCUS (JX Nippon Corporation 2023).

Assim, este artigo busca avaliar modelos de negócio de transporte de CO₂, a partir do levantamento dos projetos em andamento no mundo e das leis, regulações e políticas existentes nas regiões e nos países que apresentam maior capacidade anunciada (MtCO₂/ano) desse tipo projeto.

Métodos

Com o objetivo de avaliar essa viabilidade, utilizou-se a base de dados da Agência Internacional de Energia (IEA), que apresenta os projetos de CCUS em andamento em todo o mundo (International Energy Agency 2023b). Essa base apresenta os projetos em operação, em construção e planejados, com seus respectivos detalhes, como o país envolvido, as empresas parceiras, data de entrada em operação, capacidade anunciada em MtCO₂/ano e destino do carbono capturado. Além disso, os projetos são classificados por tipo, como: (i) projetos de cadeia completa, que são os projetos onde o CO₂ é transportado de uma instalação de captura para um local de injeção, normalmente envolvendo um único operador; (ii) projetos de captura, são projetos de captura apenas (não incluem qualquer desenvolvimento de transporte e armazenamento, mas podem ser desenvolvidos como parte de um hub de CCUS); (iii) projetos de transporte, são projetos de transporte de CO₂ apenas, podendo incluir o transporte por navios, por duto, terminais com estação de liquefação, etc. (iv) projetos de armazenamento, são projetos apenas de armazenamento de CO₂ (sem menção à infraestrutura de ligação), incluindo armazenamento dedicado e EOR, (v) projetos de T&A, são projetos de transporte e armazenamento de CO₂, que incluem o desenvolvimento de transporte e armazenamento, e (vi) projetos de captura e utilização (CCU), são projetos de captura de CO₂ para uso (excluindo uso interno, como produção de ureia), com benefícios climáticos significativos e uma fonte claramente identificada para o CO₂ capturado. Outra informação disponibilizada é se os projetos fazem parte de um hub, ou seja, se um projeto de captura, transporte ou armazenamento foi ou está sendo desenvolvido no âmbito de um hub de CCUS.

Considerando o interesse do presente trabalho por modelos de negócio voltados para o transporte de CO₂, serão analisados de forma mais detalhada os projetos de transporte e os projetos de T&A.

De forma a analisar a influência da legislação, regulação e políticas, utilizaram-se sítios eletrônicos de legislação dos vários países, bem como algumas bases de dados com informações relacionadas, como a CO2RE, do Instituto Global de CCS (Global CCS Institute 2023b), que apresenta indicadores do nível de avanço dos países quanto à adoção de legislação, regulação e políticas, que possam influenciar direta ou indiretamente os projetos de CCUS. Outra base utilizada foi a base de dados do Banco Mundial (The World Bank 2023), que apresenta um painel de precificação de carbono, onde é possível verificar a adoção pelos países de iniciativas de precificação de carbono, como o tributo sobre o carbono e o sistema de comércio de emissões. Também foram consultados relatórios conceituados no tema, como os relatórios do Instituto Global de CCS e artigos encontrados através de pesquisa bibliográfica existente sobre o tema.

Resultados

Projetos em Andamento

Evolução dos projetos de Transporte e T&A

A partir da base de dados dos projetos em andamento (dentre eles, projetos em operação, em construção e planejados), observou-se um total de 569 projetos, totalizando uma capacidade de captura máxima anunciada de 390 MtCO₂/ano. Foi possível observar ainda que dos 569 projetos, 326 estão associados a algum hub, ou seja, o equivalente a 57% dos projetos.

Considerando os projetos já em operação, observou-se que a maioria são projetos do tipo cadeia completa, ou seja, projetos onde o CO₂ é transportado de uma instalação de captura para um local de injeção, normalmente envolvendo um único operador. A Figura 1a mostra a distribuição dos projetos pelo tipo, onde projetos do tipo cadeia completa totalizam 70%, seguido dos projetos de transporte com 15%, percentual relativamente baixo quando comparado aos 70%.

Analisando os projetos em construção e os planejados, a Figura 1b mostra um percentual maior dos projetos do tipo captura (os quais não incluem desenvolvimentos de transporte e armazenamento, mas podem ser desenvolvidos como parte de um hub CCUS). Estes projetos são um percentual de 44%, quando comparado com os demais, seguido dos projetos de cadeia completa com 21%.

Comparando a distribuição apresentada pelos projetos em operação (Figura 1a) e a distribuição apresentada pelos projetos em

construção e planejados (Figura 1b), observa-se uma redução dos tipos de projetos que configuram cadeia completa e um aumento dos projetos focados em atividades específicas da cadeia de valor do CCUS, como projetos só de captura, só de armazenamento e só de T&A, mostrando a tendência de surgimento de novos modelos de negócio.

Os modelos de Transporte e T&A, somados, saíram de 14,9% para 19,7%, quando comparados os projetos em operação com os projetos em construção e planejados. Considerando esse aumento, a drástica redução dos projetos de cadeia completa (redução de 70% para 21%) e a informação de que mais da metade (57%) dos projetos em andamento estão associados a algum hub, constata-se uma tendência no desenvolvimento de redes de locais de armazenamento de CO₂, bem como de infraestrutura de transporte compartilhada. Tendência essa também observada pelo Instituto Global de CCS (Global CCS Institute 2023a). Essa tendência mostra que existe espaço para o desenvolvimento de um modelo de negócio baseado no transporte de CO₂.

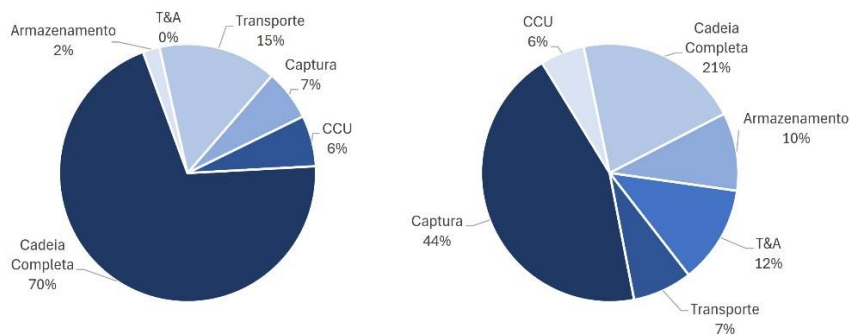


Figura 1 – Distribuição dos projetos pelo tipo de projeto. (a) Projetos em operação. (b) Projetos em construção e planejados.

Perfil dos projetos de cadeia completa

Considerando que a maior quantidade de projetos em operação são projetos do tipo cadeia completa (70%), e de forma a mapear o perfil das empresas que atualmente operam esses projetos de CCUS no mundo, foi realizada uma análise das empresas parceiras dos oito projetos de maior capacidade anunciada (variando de 8,7 a 1,2 MtCO₂/ano), cujas datas de início de operação variam de 1986 a 2019.

Observou-se que, dos oito projetos, todos possuem a participação de empresas petroleiras, que exercem atividades de exploração e produção de óleo e gás natural. As empresas petroleiras aparecem como operadoras únicas, como visto em três projetos, ou como associadas a outras empresas petroleiras, como visto nos outros cinco projetos. Desses cinco projetos que apresentaram parceria entre empresas petroleiras, dois também apresentaram a participação de empresas não petroleiras, sendo uma empresa produtora de eletricidade e a outra produtora de gás natural sintético a partir do carvão.

Dando continuidade à análise e visando obter o perfil futuro dessas empresas, foram analisados também os projetos de cadeia completa em construção e planejados.

Seguindo a amostragem anterior, foram analisados os oito projetos em construção de maior capacidade anunciada (3,3 a 0,11 MtCO₂/ano), cujas datas de operação estão entre 2023 e 2025 (decisões finais de investimento entre 2021 e 2022). Dos projetos analisados, seis projetos estão relacionados a empresas petroleiras, sendo que, em três dos projetos, as empresas petroleiras são apresentadas como única operadora e, no restante dos três projetos, elas aparecem associadas a outras empresas, seja de setores correlatos à exploração e produção de óleo e gás (como empresas de serviços de soluções tecnológicas, engenharia, fornecedoras de equipamentos e construção, bem como empresas de processamento de gás natural), seja de setores correlatos às atividades de CCUS (empresas comercializadoras e fornecedoras de plantas de captura de CO₂ do ar – tecnologia DACCS). Por fim, dois projetos não apresentam petroleiras envolvidas, sendo um deles liderado por uma empresa de infraestrutura midstream de energia, com plantas de processamento de gás natural, e o outro liderado por uma empresa que trabalha com mineração, produtos agrícolas, distribuição de combustíveis e de energia.

Para análise dos projetos planejados, foram selecionados os oito projetos de maior capacidade anunciada (7,2 a 3 MtCO₂/ano), cujas datas de operação estão entre 2025 e 2028 (decisões finais de investimento, quando informadas apontam para 2023). Diferente dos projetos em operação, e até mesmo dos projetos em construção, dos oito projetos analisados, apenas um possui empresas petroleiras liderando. Os sete demais projetos são liderados por empresas (três projetos) ou um grupo de parceiras (quatro projetos). Entre as empresas parceiras estão geradoras de energia (plantas termelétricas, solar, eólica), fornecedoras de equipamentos, engenharia e construção, fornecedoras de gás com produção de H₂, fornecedoras de gás natural liquefeito, fornecedoras de soluções em CCS, fornecedoras de plantas de DAC, empresas de armazenamento de carbono e fornecedor de solução com membranas para captura de carbono. Um fato interessante é a associação de Universidades e Institutos de Pesquisa no grupo de parceiras. Além disso, nos sete projetos que não são liderados pelas petroleiras, observa-se a participação de várias empresas com expertises diferentes, contribuindo para uma mesma cadeia de valor do CCS.

A partir do mapeamento do perfil das empresas relacionadas aos projetos de cadeia completa foi possível observar uma mudança na tendência dos projetos, na medida em que estes deixam de ser liderados apenas pelas empresas petrolíferas e passam a ter participação de outras empresas, contribuindo com isso para o surgimento de novos entrantes e consequentemente de novos modelos de negócio. Nos projetos planejados inclusive, apenas um dos oito projetos amostrados apresentou a participação de uma empresa petroleira.

É importante ressaltar que o setor de petróleo e gás possui domínio sobre as técnicas de captura, transporte e injeção de gás em reservatórios geológicos (Leal Da Costa 2014), sendo razoável que essas empresas sejam as maiores pioneiras nos projetos de CCUS, conforme visto nos projetos de cadeia completa em operação e em construção.

Outra análise em relação aos projetos de cadeia completa é a análise da tendência do destino de carbono desses projetos, quanto

ao EOR. Dos 141 projetos totais existentes, 33 estão operacionais, 10 estão em construção e 98 são planejados. Dos 33 projetos operacionais, 52% possuem EOR como destino do carbono. Dos 10 projetos em construção, 30% são destinados a EOR e dos 98 projetos planejados, 17% serão para EOR.

A partir da análise, observou-se uma prevalência atual dos projetos de cadeia completa associados a EOR, com percentuais que vão reduzindo ao sair de projetos operacionais para projetos em construção e posteriormente planejados. Este fato provavelmente vai ocorrendo considerando a evolução nas políticas dos países, endereçando cada vez mais a questão da captura, utilização e armazenamento de carbono. Tópico este que será discutido mais adiante neste artigo.

Projetos de Transporte e T&A e Políticas de CCUS

Com o objetivo de analisar como as políticas influenciam a adoção do modelo de negócio de transporte de CO₂, buscou-se fazer um levantamento dos projetos de Transporte e T&A por país, para posteriormente analisar a política destes países.

Desta forma, a Figura 2 e a Figura 3, mostram os projetos de Transporte e T&A em andamento (International Energy Agency 2023b), em capacidade anunciada, por região e por país, respectivamente.

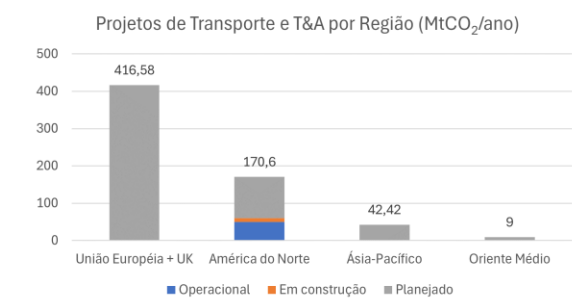


Figura 2 – Capacidade anunciada de projetos de Transporte e T&A por região.

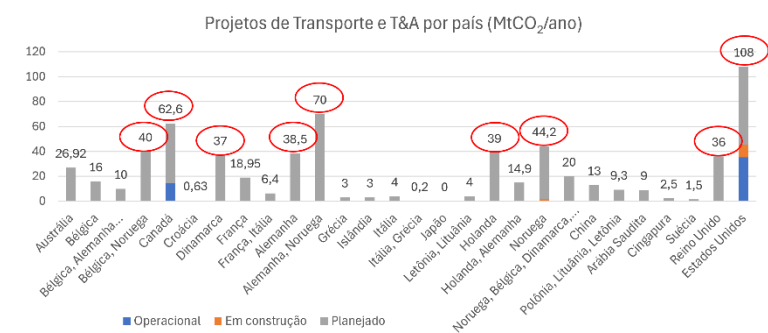


Figura 3 - Capacidade anunciada de projetos de Transporte e T&A por país.

Na Figura 2, onde os projetos foram separados por regiões, definidas conforme relatório do Instituto Global de CCS (Global CCS Institute 2023a), foi possível observar uma concentração de projetos na União Europeia-Reino Unido, seguido da América do Norte, Ásia-Pacífico e por último Oriente Médio.

Na Figura 3, os projetos de Transporte e T&A foram divididos pelos países, sendo possível observar uma maior capacidade anunciada de projetos, principalmente, nos Estados Unidos, seguidos do Canadá e posteriormente de países europeus, como Noruega, Holanda, Alemanha, Dinamarca e Reino Unido. Existem ainda vários projetos com a associação de vários países.

Políticas, Leis e Regulações de CCUS

A partir da base de dados CORE2 do Global CCS Institute (Global CCS Institute 2023b), foram obtidos mapas indicativos do nível de desenvolvimento dos países quanto à adoção de leis, regulações e políticas, que vão desde o apoio direto ao CCUS até políticas implícitas mais amplas em matéria de alterações climáticas e de redução de emissões que possam impactar, ainda que indiretamente, projetos de CCUS.

Analisando os mapas, Figura 4a e Figura 4b, cuja representação indica que, quanto mais forte a tonalidade da cor, maior será o índice de desenvolvimento daquele país, observou-se que as regiões da Figura 2 que apresentam maior capacidade anunciada de projetos de Transporte e T&A (União Europeia-Reino Unido e América do Norte), também são regiões que apresentam maiores índices de políticas, leis e regulações.

Observa-se também, a partir dos mapas da Figura 4a e Figura 4b, que os países de maior capacidade anunciada de projetos de Transporte e T&A (Estados Unidos, Canadá, Noruega, Holanda, Alemanha, Dinamarca e Reino Unido), em destaque na Figura 3, também apresentam índices mais altos, principalmente quando se considera o somatório dos indicadores de leis e regulações com os indicadores de políticas, conforme disponibilizado na base de dados CORE2.

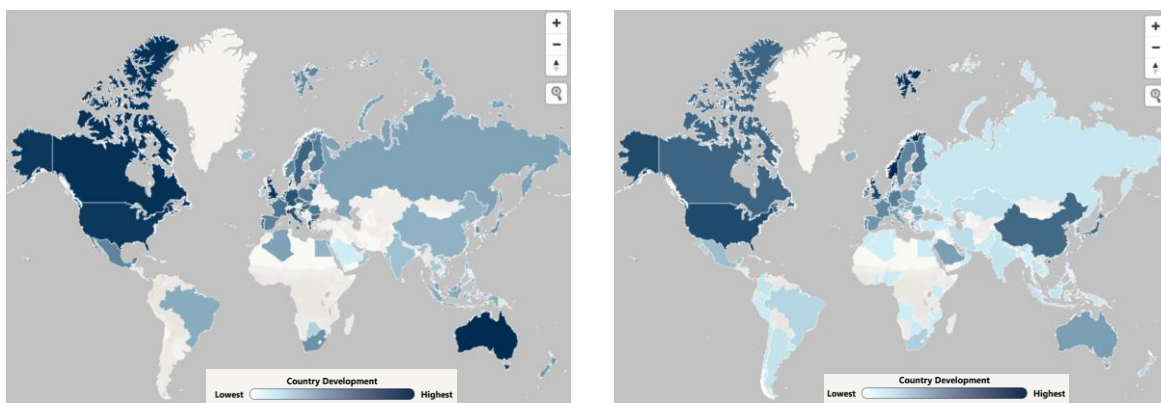


Figura 4 - Mapa indicativo do nível de avanço dos países quanto à adoção de leis, regulações e políticas. (a) Indicador Legal e Regulatório. (b) Indicador de Políticas. Fonte: (Global CCS Institute 2023b)

Considerando as informações obtidas na análise, foi possível observar que, as regiões e os países que possuem maior quantidade de projetos de CCUS de Transporte e T&A também possuem maiores avanços na adoção de leis, regulações e políticas.

Olhando de forma um pouco mais detalhada para as regiões da União Europeia e da América do Norte, conforme será apresentado nos próximos itens, foram observadas importantes políticas, leis e regulações que incentivam a pesquisa, o desenvolvimento e a implementação de soluções de CCUS. Da mesma forma, ao analisar os três países com maior capacidade anunciada de projetos de CCUS de Transporte e T&A (Estados Unidos, Canadá e Noruega), observou-se a existência de regulações significativas, o que costuma contribuir para geração de segurança jurídica e atração de investimentos das empresas nestes tipos de projeto.

O relatório Global Status of CCS (Global CCS Institute 2023a) corrobora com essa constatação. De acordo com o relatório, o crescimento recente na capacidade de projetos de CCUS concentrou-se na América do Norte e na Europa, onde as políticas de apoio e/ou a precificação de carbono são mais fortes. Ambas as regiões, demonstraram como as políticas e regulamentações podem influenciar no aumento do investimento em CCUS.

América do Norte

Considerando todos os projetos de CCUS, independentemente do tipo (captura, transporte, T&A, CCU, cadeia completa e armazenamento), a região da América do Norte é a que mais apresenta projetos de CCUS. Dos 569 projetos, 44% dos projetos são provenientes dos EUA e do Canadá, seguidos de 38% da União Europeia mais o Reino Unido e 18% de outras regiões (Ásia-Pacífico e Oriente Médio). (International Energy Agency 2023b)

De acordo com o relatório do Global Status of CCS (Global CCS Institute 2023a), a América do Norte continua a ser líder mundial na implementação de CCUS, acompanhando as melhorias nas leis, regulações e políticas, que vem sendo observadas nos países. O relatório cita ainda a importância da Lei de Redução da Inflação dos EUA (US Inflation Reduction Act, IRA) nesse avanço.

A IRA de 2022 é a legislação climática mais significativa da história dos EUA, oferecendo financiamento, programas e incentivos para acelerar a transição para uma economia de energia com menos emissões de dióxido de carbono (EPA 2024). Entre os seus incentivos está a atualização da Seção 45Q, reduzindo os limites de captura de carbono, aumentando o valor dos créditos fiscais e acrescentando disposições para pagamento direto e transferência de crédito fiscal (Global CCS Institute 2023a, Carbon Herald 2023).

O crédito fiscal 45Q, introduzido nos EUA sob a Lei de Melhoria e Extensão de Energia (Energy Improvement and Extension Act, em inglês), de 2008, fornece aos operadores de captura créditos por cada tonelada de CO₂ armazenada ou utilizada, inclusive para EOR, que podem ser usados para reduzir sua responsabilidade fiscal. Se a obrigação fiscal de um operador de captura for inferior ao valor dos créditos fiscais recebidos, o operador de captura poderá transferir esses créditos ao operador de armazenamento ou outra organização qualificada (Global CCS Institute 2020). Em 2018, o 45Q foi expandido e estendido na Lei do Orçamento Bipartidário (Bipartisan Budget Act), visando proporcionar melhores oportunidades às pequenas e grandes empresas para reduzir suas emissões e despesas. Em 2022, ele foi novamente atualizado, através da IRA, incluindo o aumento no valor dos créditos fiscais de captura de carbono, bem como outros benefícios para incentivar os projetos de CCUS. Essa última alteração foi considerada uma melhoria substancial em relação à versão anterior de 2018 (Carbon Herald 2023; Global CCS Institute 2023a).

Grande parte dos projetos de CCUS que entrou em operação desde 2011 se beneficiou da combinação do crédito fiscal 45Q e das receitas de EOR, a qual estabeleceu um preço na captura de emissões de CO₂ (Global CCS Institute 2020).

A Lei de Infraestrutura Bipartidária (Bipartisan Infrastructure Law, BIL), de 2021, e a Lei de Semicondutores e Ciência (Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors and Science Act, CHIPS), de 2022, também possuem importância quanto ao fornecimento de incentivos financeiros e políticos para estimular a implantação do CCUS, proporcionando maior apoio financeiro.

A BIL, também conhecida como Lei de investimentos em infraestrutura e empregos, disponibilizou mais de \$ 62 bilhões de incentivos financeiros para o Departamento de Energia dos Estados Unidos (Department of Energy, DOE) para entregar uma energia com menos emissões de carbono, investindo na indústria e nos trabalhadores americanos (DOE 2022). A Lei inclui também, especificamente, investimentos na gestão do carbono, tanto para mitigar como para remover as emissões de CO₂. Neste contexto, foram alocados US\$ 2,1 bilhões para financiar o Transporte de CO₂ (Loan Programs Office 2023). O BIL estabeleceu ainda um prazo para o Departamento do Interior (Department of Interior, DOI) promulgar regulamentos para armazenamento offshore de CO₂ (Global CCS Institute 2023a).

A CHIPS, criada para promoção e financiamento da indústria de semicondutores e chips eletrônicos nos Estados Unidos, é considerada bastante importante para as políticas industrial e de ciência e tecnologia estadunidenses, devido à dimensão dos investimentos previstos para fomento estatal de um setor, desde o laboratório até a fábrica, e a relevância dos objetivos geopolíticos associados (IPEA 2022). Neste contexto, através da CHIPS, o DOE foi autorizado a estabelecer uma iniciativa de pesquisa de sequestro de carbono e ciência computacional geológica, com pelo menos 2 centros de pesquisa para coleta e análise de dados e modelagens avançadas da geologia subterrânea. Ações com o objetivo de proporcionar avanços no sequestro de carbono em áreas geológicas (Global CCS Institute 2023a).

Além dos incentivos financeiros e políticos, citados acima, alguns estados possuem implementados sistemas de precificação de carbono do tipo ETS (Sistemas de Comércio de Emissões, em inglês, Emissions Trading Systems), como é o caso da Califórnia, Washington, Massachusetts e Oregon (The World Bank 2023). Estes sistemas também influenciam positivamente a implementação de projetos de CCUS.

No Canadá, em 2012, o governo promulgou a regulamentação de Redução das Emissões de Dióxido de Carbono da Geração de Eletricidade a partir do Carvão, de acordo com a Lei de Proteção Ambiental Canadense (Canadian Environmental Protection Act, CEPA). A regulação entrou em vigor em 2015 e exige que todas as unidades geradoras de energia a partir de carvão, tanto novas, como convencionais em fim de vida útil, devem atender um padrão de desempenho de emissões de 420 gCO₂/kWh, antes de 2030.

Em 2018 foi aprovada a Lei de Precificação da Poluição por gases de efeito estufa (Greenhouse Gas Pollution Pricing Act), a qual implementou, a partir de 2019, um sistema federal mandatário de precificação de carbono, com aumento progressivo do preço do carbono para US\$ 170/tCO₂e até 2030. Em 2019, foi estabelecido um preço mínimo nacional para a poluição por carbono, começando em US\$ 20/tCO₂e e aumentando em US\$ 10/tCO₂e por ano, até alcançar US\$ 50/tCO₂e em 2022. A partir de 2023, o preço de carbono passou a aumentar US\$ 15/tCO₂e por ano até 2030 (Government of Canada 2023b; 2022).

O sistema de precificação possui 2 partes: uma de cobrança regulatória sobre os combustíveis fósseis (como um imposto sobre o carbono - "carbon tax") e outra de sistema de comércio regulado para a indústria, conhecido como Sistema de Preços Baseado em Produtos (OBPS, sigla em inglês), como um sistema de comércio de emissões (ETS) (Government of Canada 2022). O Governo fornece às províncias e territórios a flexibilidade para implementar o tipo de sistema que faz sentido para as suas circunstâncias. No entanto, devem seguir no mínimo os padrões exigidos na lei, podendo ser mais restritivos, caso entendam ser necessário (Government of Canada 2022).

No orçamento de 2021, o governo propôs a introdução de um Crédito Fiscal de Investimento (Investment Tax Credit, ITC) para o capital investido em projetos de CCUS, visando reduzir as emissões em pelo menos 15 MtCO₂ anualmente. O objetivo é disponibilizar esse crédito para uma ampla gama de projetos de CCUS, ao longo de 2022-2030, em diferentes subsectores industriais (como concreto, plásticos, combustíveis etc.), incluindo projetos de hidrogênio azul e projetos de captura direta de ar, desde que o CO₂ capturado não seja usado em projetos de recuperação avançada de petróleo (Government of Canada 2023a). O processo encontra-se em andamento, após realização de consulta pública, no final do ano de 2023, para apresentação de comentários sobre os projetos de propostas legislativas relacionadas ao novo crédito fiscal de investimento (Ernst & Young 2023).

Outra iniciativa do governo é uma proposta de introduzir Contratos de Carbono por Diferença (Carbon Contracts for Difference, CCfDs), como uma forma de reduzir o risco da precificação do carbono, eliminando incertezas de preços sobre os preços futuros (Global CCS Institute 2023a).

União Europeia

O CCUS na Europa continua a crescer, com a União Europeia (UE) à frente de várias novas propostas legislativas. Muitos países europeus tiveram avanços na implantação do CCUS. Alemanha e França lançando consultas públicas de políticas de suporte ao CCUS, bem como estudando a implementação de CCfDs. Dinamarca, Países Baixos, Noruega e Reino Unido continuando a apoiar projetos de CCUS através de suportes de financiamento, bem como programas de subsídio nacional individual. E o preço ETS alcançando pela primeira vez, em fevereiro de 2023, o valor de 100 euros por tonelada de CO₂, contribuindo para uma melhoria na viabilidade econômica de projetos de CCUS (Global CCS Institute 2023a).

Entre as novas propostas legislativas da UE, pode-se citar a proposta de Certificação de Remoção de Carbono (Certification of Carbon Removals) para o mercado voluntário, apresentada em novembro de 2022. A proposta estabelece critérios para definir remoções de carbono de alta qualidade e o processo para monitorar, relatar e verificar a autenticidade dessas remoções. Os tipos de remoção e armazenamento de carbono são divididos em três categorias como: (i) Soluções baseadas na natureza, com a restauração de florestas, solos e práticas agrícolas inovadoras; (ii) Tecnologia, como bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS), ou captura direta de carbono do ar e armazenamento (DACCS) e (iii) Armazenamento em produtos e materiais duradouros, como construção à base de madeira. A captura e armazenamento do carbono fóssil não está incluída, visto que estas tecnologias ajudam a reciclar ou armazenar novas emissões fósseis de CO₂, evitando que elas se adicionem ao CO₂ já existente na atmosfera, mas não removem o carbono da atmosfera (European Commission 2024a; 2022). Ainda que a captura e o armazenamento fóssil não estejam incluídos, a certificação da remoção por BECCS e DACCS incentivará o desenvolvimento de projetos de transporte e T&A.

Em fevereiro de 2023, a Comissão Europeia lançou seu Plano Ecológico para a Indústria (Green Deal Industrial Plan), baseado em 4 pilares: (i) um ambiente regulatório previsível e simplificado, (ii) aceleração do acesso ao financiamento, (iii) melhoria de competências e (iv) comércio aberto para cadeias de abastecimento resilientes (European Commission 2023). Como parte do primeiro pilar do Plano Ecológico Industrial, a Comissão Europeia propôs a Lei da Indústria Net-Zero (Net-Zero Industry Act), de março de 2023, que busca ampliar tecnologias que impulsionarão a descarbonização, incluindo CCUS. Em particular, a lei propõe uma meta de injeção de 50 MtCO₂ armazenadas por ano na UE até 2030 (European Commission 2024c).

Após 2 anos de negociação, em março de 2023, foi publicada a reforma do Sistema de Comércio de Emissões da UE (ETS Revision) de forma a apoiar a meta de redução de 55% das emissões de GEE até 2030 (Global CCS Institute 2023a). A reforma estendeu o sistema a novos setores (como o transporte marítimo) e reduziu o limite total de emissões. As emissões dos setores sob o regime ETS

terão de diminuir 62% até 2030, em comparação com 2005 (anteriormente essa meta era 43%). A velocidade das reduções anuais de emissões aumentará de 2,2% ao ano no sistema atual para 4,3% de 2024 a 2027 e 4,4% a partir de 2028. Além disso, a reforma também fortaleceu a Reserva de Estabilidade do Mercado (Market Stability Reserve, MSR), eliminando as licenças excedentes e melhorando a resiliência do sistema a grandes choques, ajustando a oferta de licenças a leiloar (European Commission 2024b).

Em maio de 2023, após a revisão do ETS, entrou em vigor o Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM). Esta ferramenta visa atribuir um preço justo ao carbono emitido durante a produção de bens que entram no mercado da UE, estimulando de fato processos de produção mais limpos em países fora da UE. Desde a implementação da fase de transição em outubro de 2023, o CBAM se aplica a importados que são carbono intensivos ou que possuem risco de vazamento de carbono (Global CCS Institute 2023a).

A Direção-Geral de Ação Climática da Comissão Europeia, DG CLIMA (responsável pelas negociações internacionais da UE sobre clima, desenvolvimento e implementação do Sistema de Comércio de Emissões da UE e produção do plano de transformação) vem trabalhando nos documentos de orientação da Diretiva de CCS (Directive 2009/31/EC) para refletir o estado do CCS no mundo e remover ambiguidades identificadas durante o desenvolvimento dos primeiros projetos no Espaço Econômico Europeu (Global CCS Institute 2023a).

A Diretiva relativa ao armazenamento geológico de CO₂ (Directive 2009/31/EC) estabelece a regulação para o desenvolvimento e operação de forma segura e responsável do armazenamento geológico de dióxido de carbono na UE. Um dos elementos da diretiva é o regime de licenças para o armazenamento de CO₂. As regras estabelecem requisitos mínimos para a seleção de locais de armazenamento, a fim de garantir que não haja risco significativo de reversão ou danos à saúde ou ao meio ambiente. Os operadores são obrigados a demonstrar segurança financeira antes de injetarem o CO₂, para cobrir potenciais responsabilidades, e devem monitorar os locais durante a fase operacional, para garantir a integridade e a contenção a longo prazo do CO₂ armazenado (Carbon Gap 2024).

Regulação nos Estados Unidos, Canadá e Noruega

Além das leis e políticas que podem incentivar a implementação de projetos de CCUS, a regulação tem papel fundamental na geração de segurança jurídica e atração de investimentos das empresas, podendo acelerar a implementação destes projetos.

Analisando a Regulação dos projetos de CCUS nos Estados Unidos, Canadá e Noruega, observou-se a existência de importantes regulamentos e agentes reguladores envolvidos nos principais temas que norteiam os projetos de CCUS, como pode ser observado no Quadro Regulatório, apresentado na Figura 5.

Quadro Regulatório			
Temas	Estados Unidos	Canadá	Noruega
Transporte de CO ₂	Responsabilidade conjunta dos governos federal e estadual. A <i>Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA)</i> regula os padrões de segurança de CO ₂ e os governos estaduais são em grande parte responsáveis pela supervisão do desenvolvimento e operação do gasoduto de transporte de CO ₂ .	Responsabilidade de cada província, exceto quando atravessa uma fronteira provincial ou internacional, caso em que o governo federal assume a autoridade. O Canadá possui seus próprios regulamentos para dutos de CO ₂ (CSA Z662), os quais são referenciados pelas províncias.	Regulação pautada na Diretiva 2009/31/EC de armazenamento de CO ₂ , da UE, e implementada através de novos regulamentos, como o <i>CO₂ Storage Regulations</i> , e novos capítulos no <i>Pollution Control Regulations</i> e no <i>Petroleum Regulations</i> . Além do <i>CO₂ Safety Regulations</i> .
Injeção e pós-injeção de CO ₂	A <i>Environment Protection Agency (EPA)</i> estabelece os padrões mínimos para a construção, operação, licenciamento e fechamento de poços de injeção sob o <i>Underground Injection Control Program (UIC)</i> . A EPA pode delegar autoridade reguladora primária aos estados para administrar o programa UIC.	As principais autoridades responsáveis pela energia e pelos recursos naturais, de cada província, regulam essas atividades, de acordo com as leis e regulações relevantes daquela província. Quando um projeto atravessa fronteiras internacionais ou interprovinciais, o Governo assume jurisdição regulatória através do <i>National Energy Board (NEB)</i> .	O Ministério do Petróleo e Energia, o Ministério do Trabalho e Assuntos Sociais e o Ministério do Clima e Ambiente são responsáveis pelas diferentes partes da Diretiva implementada.
Armazenamento de longo prazo e gerenciamento de passivos	Geralmente tratada através de legislação e regulamentos a nível estatal. O período antes que o estado assuma a responsabilidade varia, podendo ocorrer a partir do ponto em que o poço de injeção foi fechado, ou entre 10 a 15 anos após seu fechamento, por exemplo.	Protagonismo das províncias. Em Alberta, o governo assume a responsabilidade de longo prazo pelos locais de armazenamento, e os operadores de captura e armazenamento são obrigados a contribuir para o Fundo de Administração Pós-Encerramento, para fins de monitoramento, manutenção e remediação necessárias.	Após o encerramento do local de armazenamento, todas as obrigações relativas ao monitoramento e medidas corretivas são transferidos para o estado, de acordo com as condições estabelecidas no <i>CO₂ Storage Regulations</i> .
Direitos de uso do espaço poroso	Geralmente detidos pelos proprietários do espaço poroso, que podem ser estados, governo federal ou particulares. O acesso e os direitos de exploração do subsolo são geralmente regidos por contrato.	O Canadá possui um regime de direito consuetudinário, com abordagem tradicional aos direitos de propriedade associados às atividades de óleo e gás. Em Alberta, o governo é o proprietário do espaço poroso e os projetos são obrigados a obter um arrendamento, ou contrato de posse, para o seu uso.	O Estado norueguês retém os direitos sobre o espaço poroso dentro da plataforma continental.

Figura 5 – Quadro Regulatório de CCUS nos Estados Unidos, Canadá e Noruega.

Fontes: (Global CCS Institute 2020, 2023a, International Energy Agency 2016, Norwegian Ministry of Petroleum and Energy 2019)

Conclusão

A partir do trabalho realizado, conclui-se que a maioria dos projetos, que atualmente se encontram operacionais, são projetos que compreendem a cadeia completa do CCUS (captura, transporte e uso e/ou armazenamento). No entanto, ao se analisar os projetos em construção e planejados, observa-se um aumento dos projetos focados em atividades específicas da cadeia de valor do CCUS, como projetos só de captura, só de transporte ou só de T&A, mostrando a tendência de surgimento de novos modelos de negócio. Também foi observada uma grande aposta nos hubs de transporte e transporte/armazenamento, com a constatação de que mais da metade (57%) dos projetos em andamento (independentemente do tipo) estão associados a algum hub.

O mapeamento do perfil das empresas relacionadas aos projetos de cadeia completa mostrou uma mudança de tendência destes projetos, onde estes deixam de ser liderados apenas pelas empresas petrolíferas e passam a ter participação de outras empresas (seja de setores correlatos à exploração e produção de óleo e gás, seja de setores correlatos às atividades de CCUS), contribuindo com isso para o surgimento de novos entrantes e consequentemente de novos modelos de negócio. Observou-se ainda uma prevalência atual dos projetos de cadeia completa associados a EOR, com percentuais que vão reduzindo ao sair de projetos operacionais para projetos em construção e, posteriormente, planejados. Entende-se que este movimento está relacionado à evolução nas políticas dos países, que contemplam cada vez mais a questão da captura, utilização e armazenamento de carbono, criando um mercado menos dependente do EOR.

Quanto aos projetos de CCUS de Transporte e T&A, observou-se que as regiões da União Europeia-Reino Unido e a região da América do Norte são aquelas que mais apresentam estes tipos de projetos. Analisando mais a fundo a nível dos países, observou-se uma maior capacidade anunciada de projetos, principalmente, nos Estados Unidos, seguido do Canadá e posteriormente de países europeus, como Noruega, Holanda, Alemanha, Dinamarca e Reino Unido.

Ao analisar o índice de desenvolvimento dos países quanto à adoção de leis, regulações e políticas de CCUS, observou-se que tanto as regiões, como os países, de maior capacidade anunciada de projetos de Transporte e T&A, também são regiões e países que apresentam índices mais altos de adoção de políticas, leis e regulações associadas ao CCUS.

Uma análise detalhada da União Europeia, da América do Norte e dos três países com maior capacidade anunciada de projetos de CCUS de Transporte e T&A (Estados Unidos, Canadá e Noruega), demonstrou a existência de importantes políticas, leis e regulações que incentivam a pesquisa, o desenvolvimento e a implementação de soluções de CCUS.

Além disso, observou-se que na União Europeia e na América do Norte muitas políticas, leis e regulações têm sido adotadas ou revisadas nos últimos anos, fato este que pode explicar parte do aumento expressivo ocorrido nos projetos de CCUS, entre 2022 e 2023, conforme constatado pelo relatório Global Status of CCS (Global CCS Institute 2023a). De fato, a existência de políticas, leis e regulações, que incentivam projetos de CCUS, atraem investimentos das empresas e propiciam a entrada de novos modelos de negócio, como é o caso do modelo de transporte e T&A, através dos hubs de CCUS.

Em suma, pode-se concluir que o modelo de negócio de transporte de CO₂, bem como de T&A, é possível de ser implementado e tem sido bastante discutido e vem progredindo, com maior intensidade nos países onde a legislação está mais avançada. Considerando ainda o caráter de indústria de rede, característico de projetos que necessitam de investimento em infraestrutura, como o transporte por dutos, a tendência é aumentar o interesse dos agentes de mercado por esse modelo de negócio. No entanto, para ser viável economicamente e se desenvolver em grande escala, precisa de uma base de políticas, leis e regulações que incentivem a adoção de projetos de CCUS, sem depender necessariamente das receitas de EOR.

Cabe ressaltar que a análise dos projetos em andamento se baseia nos projetos anunciados pelas empresas, muitos ainda em planejamento, inclusive com sua etapa de decisão final de investimento a ser executada, o que não deixa de ser uma limitação deste trabalho, visto que algum dos projetos anunciados podem nem vir a serem implementados. No entanto, é a melhor informação disponível, dos projetos em andamento no mundo, que a IEA pode oferecer. Existe ainda uma outra base de dados, de projetos de CCUS em andamento no mundo, disponibilizada pelo Global CCS Institute, porém é uma versão disponível apenas para assinantes.

Como sugestões de trabalhos futuros, pode-se analisar os projetos de Transporte de CO₂ na base de dados do Global CCS Institute, bem como o cenário de políticas, leis e regulações em outros países e regiões, diferentes daqueles analisados neste trabalho, fazendo inclusive uma comparação entre eles.

Referências

- Carbon Gap. 2024. “CCS Directive.” <https://Tracker.CarbonGap.Org/Policy/Eu-Ccs-Directive/?PrintThis=true&nonce=a67eff2a66>. January 2024.
- Carbon Herald. 2023. “What Is The 45Q Tax Credit?” <https://Carbonherald.Com/What-Is-45q-Tax-Credit/>. November 8, 2023.
- Congressional Budget Office. 2023. “Carbon Capture and Storage in the United States.” <https://www.cbo.gov/publication/59832#:~:Text=The%20federal%20government%20subsidizes%20the,Capturing%20and%20storing%20CO2>. December 2023.
- DOE. 2022. “DOE Optimizes Structure to Implement \$62 Billion in Clean Energy Investments from Bipartisan Infrastructure Law.” <https://www.energy.gov/articles/doe-optimizes-structure-implement-62-billion-clean-energy-investments-bipartisan>. February 9, 2022.
- EPA. 2024. “Summary of Inflation Reduction Act Provisions Related to Renewable Energy.” <https://www.epa.gov/green-power-markets/summary-inflation-reduction-act-provisions-related-renewable-energy#:~:Text=The%20Inflation%20Reduction%20Act%20of,Of%20new%20clean%20electricity%20resources>. January 10, 2024.
- Ernst & Young. 2023. “Canada | Legislative Update for the CCUS Investment Tax Credit.” https://www.ey.com/en_gl/Tax-Alerts/Canada---Legislative-Update-for-the-Ccus-Investment-Tax-Credit. August 24, 2023.
- European Commission. 2022. “Delivering the European Green Deal: First EU Certification of Carbon Removals.” <https://doi.org/10.2775/75433>.
- . 2023. “The Green Deal Industrial Plan: Putting Europe’s Net-Zero Industry in the Lead.” https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_510. February 1, 2023.
- . 2024a. “Carbon Removal Certification.” https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles/carbon-removal-certification_en. January 2024.
- . 2024b. “Questions and Answers – Strengthening and Expanding EU Emissions Trading with a Dedicated Social Climate Fund to Help Citizens in the Transition.” https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_23_4756. January 2024.
- . 2024c. “The Net-Zero Industry Act: Accelerating the Transition to Climate Neutrality.” https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en. January 2024.
- Global CCS Institute. 2020. “Overview of Organisations and Policies Supporting the Deployment of Large-Scale CCS Facilities.”
- . 2023a. “GLOBAL STATUS OF CCS 2023.”
- . 2023b. “Policy, Legal & Regulatory Indicator Database.” <https://co2re.co/facilitydata>. December 10, 2023.
- Government of Canada. 2022. “The Federal Carbon Pollution Pricing Benchmark.” <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/carbon-pollution-pricing-federal-benchmark-information.html>. November 22, 2022.
- . 2023a. “Investment Tax Credit for Carbon Capture, Utilization, and Storage.” <https://www.canada.ca/en/department-finance/programs/consultations/2021/investment-tax-credit-carbon-capture-utilization-storage.html>. June 2, 2023.
- . 2023b. “Output-Based Pricing System.” <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/output-based-pricing-system.html>. December 12, 2023.
- International Energy Agency. 2023a. “How New Business Models Are Boosting Momentum on CCUS.” <https://www.iea.org/commentaries/how-new-business-models-are-boosting-momentum-on-ccus>. March 24, 2023.
- . 2023b. “IEA CCUS Projects Database 2023.” <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>. November 20, 2023.
- International Energy Agency, IEA. 2016. “Carbon Capture and Storage: Legal and Regulatory Review Edition 5.” www.iea.org/t&c/.
- IPCC. 2022. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Mitigation of Climate Change. www.ipcc.ch.
- IPEA. 2022. “‘Lei Dos Chips’ Sinaliza Nova Orientação Para Política de CT&I Dos Estados Unidos.” <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/noticias/noticias/320-Lei-Dos-Chips-Sinaliza-Nova-Orientacao-Para-Politica-de-Ct-i-Dos-Estados-Unidos>. November 2, 2022.
- JX Nippon Corporation. 2023. “Restart of the Large-Scale Petra Nova Carbon Capture Facility in the U.S.”
- Leal Da Costa, Isabella Vaz. 2014. “Proposta de Estrutura Regulatória para Sequestro Geológico de CO2 no Brasil e uma Aplicação para o Estado do Rio de Janeiro.”
- Loan Programs Office. 2023. “Carbon Dioxide Transportation Infrastructure.” <https://www.energy.gov/lpo/carbon-dioxide-transportation-infrastructure>. December 5, 2023.
- Natural Resources Canada. 2014. “Canada Update: Select CCS Regulatory Developments IEA 6 Th CCS Regulatory Network Meeting.”
- Norwegian Ministry of Petroleum and Energy. 2019. “Longship – Carbon Capture and Storage.”
- NRG Energy, Inc. 2020. “Petra Nova Status Update.” <https://www.nrg.com/about/newsroom/2020/petra-nova-status-update.html>. August 26, 2020.
- The World Bank. 2023. “Carbon Pricing Dashboard.” https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data. December 10, 2023.
- Yao, Xing, Ping Zhong, Xian Zhang, and Lei Zhu. 2018. “Business Model Design for the Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) Project in China.” *Energy Policy* 121 (October): 519–33. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.06.019>.