

Os desafios tecnológicos e soluções para o desenvolvimento do CCUS: o papel relevante da área submarina na integridade das instalações de armazenamento de CO₂ frente ao PL 1425/2022

Technological challenges and solutions for the development of CCUS: the relevant role of the subsea area in the integrity of CO₂ storage facilities in front of PL 1425/2022

Romario de Carvalho Nunes 

Petrobras, Rio de Janeiro-Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: romario.carvalho@petrobras.com.br

Palavras-chave:

Monitoramento.
ESG.
Transição energética.
Aspectos legais.
Projeto de lei.

Keywords:

Monitoring.
ESG.
Energy transition.
Legal aspects.
Law project.

RESUMO

A tecnologia de CCUS se apresenta cada vez mais como capaz de atender às expectativas relacionadas à transição para o mundo Net-Zero. Porém, para o sucesso do CCUS, é necessário que uma das etapas mais críticas – o monitoramento – seja realizada de forma a atender a diversas diretrizes. Dessa forma, o objetivo deste artigo é verificar quais os desafios tecnológicos que a indústria de O&G enfrenta para o desenvolvimento do CCUS, de forma segura e responsável, reforçando seu posicionamento no mercado no âmbito do ESG. Em seguida, serão propostas alternativas, soluções e oportunidades para incentivar tal desenvolvimento. Ademais, será discutido o papel relevante da área submarina na integridade das instalações de armazenamento de CO₂ frente ao PL (Projeto de Lei) 1.425/2022 – em análise no Congresso Nacional – e os desafios da indústria para adequação às novas diretrizes do PL e futuras regulações. O trabalho conta com uma revisão integrativa e sistemática de literatura, bem como traz os referenciais teóricos e direcionadores que inspiraram diversos trechos do PL, já que o autor deste artigo é um dos formuladores do Projeto de Lei 1.425/2022. Os estudos demonstraram que toda a cadeia de valor da indústria de O&G pode se beneficiar da transição energética, incluindo uso de tecnologias como o CCUS. Contudo, para de fato auferir os resultados previstos, sobretudo no âmbito do ESG, ainda há trilhas a percorrer, principalmente no que tange à área submarina, incluindo o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂ em ambiente submarino.

ABSTRACT

CCUS technology increasingly appears capable of meeting expectations related to the transition to the Net-Zero world. However, for CCUS to be successful, one of the most critical steps – monitoring – must be carried out to meet several guidelines. Therefore, the objective of this article is to verify what technological challenges the O&G industry faces in developing CCUS safely and responsibly, reinforcing its market positioning within the scope of ESG. Alternatives, solutions and opportunities will then be proposed to encourage such development. Furthermore, the relevant role of the subsea area in the integrity of CO₂ storage facilities will be discussed in light of PL (Law Project) 1,425/2022 – under analysis in the National Congress – and the industry's challenges in adapting to the PL's new and future guidelines regulations. The work includes an integrative and systematic literature review and the theoretical references and guidelines that inspired several excerpts of the PL, as the author of this article is one of the formulators of Law Project 1,425/2022. Studies have shown that the entire O&G industry value chain can benefit from the energy transition, including using technologies such as CCUS. However, to achieve the expected results, especially within the scope of ESG, there are still paths to be followed, especially in the subsea area, including the development of monitoring technologies for CO₂ storage facilities the subsea area.

Recebido:

19 de novembro de 2024

Aceito para publicação:

22 de novembro de 2024

Publicado:

23 de dezembro de 2024

<https://doi.org/10.70369/few41r50>



1. INTRODUÇÃO

No contexto contemporâneo, o tema mitigação das mudanças climáticas é objeto de extrema relevância internacional, pois empresas e governos buscam alternativas para tratar as mudanças climáticas causadas, sobretudo, pelo aquecimento global, decorrente da intensificação da emissão de gases do efeito estufa. Entre os projetos capazes de amenizar a emissão desses gases, encontra-se a tecnologia denominada Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) (Egmond *et al.*, 2012; Nunes; Costa, 2019; Asl *et al.*, 2020). Além disso, a tecnologia deve desempenhar o papel central como um dos quatro principais pilares da transição energética de baixo carbono global, junto à eletrificação baseada em energia renovável, bioenergia e hidrogênio (IEA, 2010).

Porém, para que a atividade de CCUS possa auferir todos os benefícios intrínsecos, é necessário que a etapa mais crítica – o monitoramento – seja realizada de forma a atender as regulamentações inerentes à atividade. A tecnologia de CCUS se apresenta cada vez mais como capaz de atender as expectativas relacionadas tanto à transição para o mundo Net-Zero quanto ao cumprimento do ESG, sendo, portanto, necessário garantir o atendimento a tais expectativas (Blackford *et al.*, 2010; Dean; Tucker, 2017; Global CCS Institute, 2020).

Para tanto, existem desafios tecnológicos para que tal tecnologia seja difundida e desenvolvida na indústria do petróleo e gás e alcance os benefícios propostos. O investimento na Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) dessas tecnologias ajuda a garantir, por exemplo, a rentabilidade do projeto de CCUS – que possuem investimentos significativos e potencial de riscos elevados (Anyosa *et al.*, 2021) além do atendimento ao ESG. Aliás, o relatório da Global CCS Institute, denominado Global Status of CCUS 2021 – CCUS Accelerating to Net Zero, indica a necessidade de as empresas analisarem e reportarem atentamente os dados que possam impactar seu ESG, já que tais informações são consideradas cada vez mais importantes para os investidores, acionistas e público em geral (Global CCS Institute, 2021a).

A pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias e ferramentas tanto para o monitoramento quanto para contingência nas instalações de armazenamento de CO₂ estão bastante ligados ao ESG. No caso em tela, as informações não financeiras das empresas que utilizam a tecnologia de CCUS seriam, por exemplo, relatórios com os métodos – incluindo tecnologia e ferramentas utilizadas para coleta dos dados - e resultados obtidos com base no Plano de Monitoramento das suas instalações de armazenamento de CO₂ (EY, 2018).

Ademais, será discutido o papel relevante da área submarina na integridade das instalações de armazenamento de CO₂ frente ao PL (Projeto de Lei) 1.425/2022 - que disciplina a exploração da atividade de armazenamento permanente de dióxido de carbono de interesse público, em reservatórios geológicos ou temporários, e seu posterior reaproveitamento – e os desafios da indústria do petróleo para adequação às novas diretrizes do Projeto de Lei e futuras regulações derivadas desse PL.

Com base nesse arcabouço são formatados infográficos e tabelas que resumem as principais tecnologias já existentes na indústria, e conhecimentos que precisarão ser desenvolvidos. O autor, que é um dos formuladores do Projeto de Lei 1.425/2022, traz ainda os referenciais teóricos e direcionadores que inspiraram diversos trechos do PL, incluindo comparações do Brasil com outros países em relação à estrutura regulatória para o CCUS.

2. OBJETIVO

Verificar quais desafios tecnológicos a indústria do óleo e gás enfrenta para o desenvolvimento do CCUS de forma segura e responsável, para reforçar seu posicionamento no mercado no âmbito do ESG. Em seguida serão propostas alternativas, soluções e oportunidades para incentivar tal desenvolvimento.

3. INTEGRIDADE DOS SISTEMAS SUBMARINOS - IMPORTÂNCIA E RISCOS DA ETAPA DO MONITORAMENTO NO PROCESSO DE ARMAZENAMENTO DE CO₂

Assim como na indústria do petróleo e gás, existem riscos associados ao processo de CCUS que devem ser conhecidos, controlados e aprimorados. O risco de vazamento é um dos mais explorados na literatura e o monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂ o meio mais indicado para dirimir tais riscos. Para tanto, existem mecanismos naturais para garantia da integridade do armazenamento e mecanismos desenvolvidos durante o processo histórico de armazenamento de CO₂.

Em relação ao primeiro mecanismo, pode-se citar o aprisionamento que tem como função prevenir que o CO₂ injetado migre de volta à superfície. A pressão - resultante da profundidade necessária ao seu armazenamento - faz com que o CO₂ permaneça sob a forma de fluido supercrítico, estado físico que proporciona sua fixação nos espaços intersticiais das rochas, quando então irá se penetrar nos poros existentes, ao ser atingida a profundidade crítica. Parte desse CO₂ fica definitivamente bloqueada após a selagem dos furos de injeção, enquanto outra parte poderá mover-se durante alguns anos, até reagir com fluidos e rochas existentes, mineralizando (Alves, 2008).

Associado ao segundo mecanismo, pode-se citar, como exemplo, o estudo e a escolha de um local adequado para armazenamento do CO₂, a criação e gestão de programa de monitoramento para detecção de problemas, a existência de um sistema regulatório bem como o uso adequado dos métodos corretivos para parar ou controlar eventuais fugas de CO₂ (Gaspar, 2014). Além disso, Gaspar (2014) ressalta para a importância do conhecimento e gestão dos riscos ambientais, da saúde da população local e os riscos associados à segurança. Geralmente, para garantia da integridade da instalação de armazenamento de CO₂, considera-se que um vazamento de 1% do CO₂ armazenado em mil anos seria um valor aceitável (Ketzer *et al.*, 2016).

Portanto, para garantia da integridade da instalação de armazenamento de CO₂ foi desenvolvido um processo dentro de uma estrutura de gerenciamento de riscos que se baseia na abordagem bem estabelecida de barreiras (salvaguarda). O objetivo é identificar as tarefas de monitoramento necessárias e suas respectivas tecnologias para reduzir os riscos de armazenamento de CO₂ para o mínimo possível (Dean; Tucker, 2017). Além disso, a ISO 31000 aborda trechos importantes relacionado à responsabilização das partes. Segundo a norma, convém que a organização assegure que haja responsabilização, autoridade e competências apropriadas para gerenciar riscos, incluindo implementar e manter o processo de gestão de riscos, assegurar a suficiência, a eficácia e a eficiência de quaisquer controles (ABNT, 2009).

A partir disso, a norma discorre sobre as condições necessárias para que haja a devida responsabilização das partes envolvidas no risco e ressalta que é necessário identificar a quem pertence os riscos e que, portanto, tem a responsabilidade e a autoridade para gerenciá-los. Nesse caso, é necessário que a legislação inerente à atividade de CCUS deixe explícita a responsabilização das partes envolvidas no projeto (ABNT, 2009).

Importante lembrar que a responsabilidade por quaisquer efeitos localizados decorrentes de emissão ou armazenamento de CO₂ pode ser legal/administrativa (por exemplo, violação das condições de autorização), penal (por negligência, homicídio culposo e crimes ambientais) ou lei civil propriamente dita (por exemplo, pelos danos a terceiros), além da civil e ambiental. A responsabilização dependerá das leis vigentes na jurisdição local, da causa do vazamento (ex.: por condições de autorização por parte do operador, negligência) e ainda o nível de dano causado (IEA, 2010).

No Brasil, por exemplo, a Lei n. 9.605/98 (Lei de Crimes Ambientais) e o Decreto nº 3.179 / 99, que a regulamenta, definem a responsabilidade da entidade legal - administrativo, civil e criminal - e também permitem que a pessoa física autora da infração seja incriminada. As ações de fiscalização são realizadas pela ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, sob a forma de auditorias, por meio de amostras e análise de dados e evidências, que visam a verificar a conformidade do operador com os requisitos da documentação técnica regulamentados pela Resolução ANP 37/2015, que dispõe sobre a concessão de prazo para o tratamento de não conformidades e eventual elaboração de auto de infração.

Associa-se a isso o fato de que a opinião pública é sempre importante e por isso governos e empresas procuram minimizar os impactos negativos de suas operações. Nesses casos, é benéfico para o operador minimizar os danos à reputação, documentando que possui um robusto e eficiente processo de monitoramento e que é capaz de localizar, quantificar e caracterizar qualquer vazamento ainda no estágio inicial (Waarum *et al.*, 2016).

Varela e Milone (2014) lembram que a ausência ou falha no monitoramento pode levar à ocorrência de grandes desastres socioambientais, quando é comum a queda imediata no valor das ações das empresas responsáveis. Nesse caso, é esperado que muitos investidores vendam suas ações em virtude do risco associado e pelo motivo de levar anos para as causas do acidente serem conhecidas.

3.1. Aspectos tecnológicos

Todos esses riscos podem acarretar acidentes de processos, os quais podem implicar uma série de consequências para o uso e o desenvolvimento da tecnologia de CCUS, bem como para os operadores. Dado esse potencial risco, os autores buscaram identificar a situação atual das tecnologias utilizadas no CCUS, bem como eventuais lacunas e desafios para o pleno desenvolvimento tecnológico e consequente avanço no uso da tecnologia.

Dado o fato, identificaram-se dezenas de tecnologias, ferramentas e protocolos para o monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂ (Dean; Tucker, 2017; Dixon; Romanak, 2015; Doe, 2009; Doe, 2017; Harbert *et al.*, 2016; IEAGHG, 2015; IEAGHG, 2021; Jenkins; Chadwick; Hovorka, 2015; WRI, 2008;). Foram observadas características bastantes latentes entre todos os autores no que se diz respeito à relevância do aprimoramento, pesquisas e desenvolvimento das tecnologias e ferramentas de monitoramento, quanto a isso, iremos explorar em seguida.

Em relação às características latentes observadas entre os materiais estudados, podemos verificar um destaque para a importância do aprimoramento das pesquisas e desenvolvimentos das tecnologias e ferramentas de monitoramento. Dixon e Romanak (2015), por exemplo, traz um contexto histórico, lembrando que desde os primeiros protocolos de monitoramento, importantes avanços foram feitos na detecção e atribuição de vazamentos, e importantes conhecimentos foram adquiridos pela experiência do projeto (Dixon; Romanak, 2015).

Essa discriminação ou atribuição da origem do vazamento também representa um ponto de decisão crítico que pode levar a nenhuma ação ou um monitoramento intenso e realização de remediações, a depender da origem do vazamento (Dixon; Romanak, 2015). A necessidade do PD&I também abrange o desenvolvimento de técnicas para atribuição da origem dos vazamentos (natural ou por meio de ação humana), tanto que é considerado assunto relevante em reuniões importantes do IEAGHG, denominadas Redes Conjuntas do IEAGHG (Dixon; Romanak, 2015). Essas técnicas foram fundamentais para, por exemplo, explorar as origens do vazamento do "caso Kerr", no projeto de Weyburn (Dixon; Romanak, 2015; Jenkins; Chadwick; Hovorka, 2015).

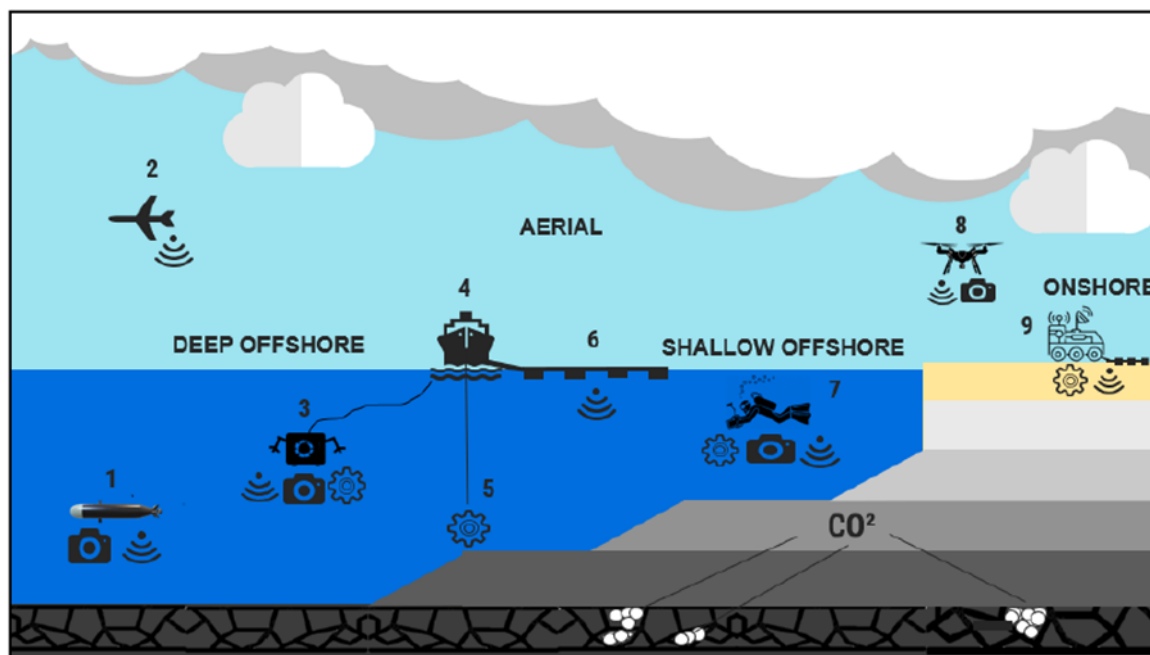
O desenvolvimento de linhas de pesquisas e inovação em tecnologias e ferramentas tendem a proporcionar redução de custos, sendo importante escolher bem os protocolos, as tecnologias e ferramentas para evitar que o monitoramento se torne dispendioso (Dean; Tucker, 2017; Dixon; Romanak, 2015).

4. LACUNAS E DESAFIOS PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO CO₂

Identificou-se que uma das lacunas fora a ausência de abordagem sobre como as tecnologias e ferramentas (exemplo: ROV, AUV, aeronaves etc.) poderiam ser utilizadas na prática para realizar o monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂. Apenas IEAGHG (2015) abordava, de forma superficial, esse tema. Por isso, em virtude desse gap de informações, foi construída uma esquemática, consolidando em uma única imagem, como as tecnologias e ferramentas podem ser utilizadas para monitorar tais instalações, tanto *onshore* (em terra) quanto *offshore* (no mar).

A partir disso, foi construído uma esquemática, consolidando em uma única imagem, como as tecnologias e ferramentas podem ser utilizadas para realização do monitoramento, tanto *onshore* (em terra) quanto *offshore* (no mar), como mostra a Figura 1 e descrito na Tabela 1.

Figura 1. Tecnologias e ferramentas utilizadas para o monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂ *onshore* e *offshore*



Fonte: Elaborado pelos autores.




Tabela 1 – Tecnologias e ferramentas utilizadas para realização do monitoramento *onshore* e *offshore*

Referencial	Descrição
1	AUV (Autonomous Underwater Vehicle)
2	Aeronave de apoio
3	ROV (Remotely Operated Vehicle)
4	RSV (ROV Support Vessel)
5	Equipamentos/Ferramentas Submarinas
6	Hidrofones
7	Mergulhador profissional (raso ou profundo)
8	Drone
9	Sismógrafos e geofones

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com o objetivo de tornar ainda mais didática a imagem, a pesquisa selecionou exemplos de técnicas utilizadas para cada tecnologia e ferramenta identificada, conforme Quadro 1.

Quadro 1. Exemplos de técnicas utilizadas para monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂

Referencial	Descrição
	Gravimetria, pesquisas sísmicas 3D, perfil sísmico vertical, dados de satélites ou aerotransportados.
	Mudanças na vegetação observadas no solo, ROV para detecção de vazamentos (bolhas), anomalias na vida marinha e Terrestre.
	Anomalias químicas na água do mar, amostras de fundo de mar, amostras do ar, solo e sedimentos, química dos fluxos de bolhas vazadas, pressão/temperatura do poço.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de (WRI, 2008; Doe, 2009; Dixon; Romanak, 2015; Jenkins; Chadwick; Hovorka, 2015; IEAGHG, 2015; Harbert et al., 2016; Dean; Tucker, 2017; Doe, 2017; IEAGHG, 2021).

Nessa esteira, há ainda a necessidade adicional de explorar e desenvolver os Planos de Monitoramento que, quando bem definidos, são capazes de detectar e quantificar o vazamento, determinar as causas, potenciais consequências e as remediações, atendendo à regulamentação do local (Dixon; Romanak, 2015). Há desafios adicionais em relação à quantificação de vazamento, pois além de ser cara, as técnicas de medição para quantificação exigem altas sensibilidades, baixas incertezas e alta densidade espacial - que pode tornar o projeto ainda mais caro - e pode depender de quão bem as etapas de monitoramento anteriores foram realizadas (Dixon; Romanak, 2015).

Fato é que a execução do monitoramento não requer apenas o ato de monitorar, mas também constantes pesquisas, desenvolvimentos, observações, comparações entre teoria e prática, apresentando-se como um desafio adicional a ser desenvolvido e implementado para o CCUS. Um exemplo é a necessidade de verificar o comportamento inesperado de migração de pluma, migração de CO₂ fora da formação de contenção primária, verificação de novas tecnologias de monitoramento - que muitas das vezes requer ainda mais desenvolvimento, principalmente no ambiente *offshore* e até mesmo necessidade de adaptações à novas regulações (Dean; Tucker, 2017).

Outro desafio relevante para estudo e monitoramento é a variação natural das condições do ambiente marinho, já que a atividade biológica, as correntes, a turbidez, a temperatura da água e outros

componentes fazem com que a concentração da maioria das substâncias na coluna de água tenha flutuações naturais. Essas flutuações serão o resultado de várias flutuações sobrepostas ligadas a mudanças diurnas, lunares ou sazonais. Isso leva a um padrão complexo de variação em cada um dos parâmetros que torna difícil distinguir as flutuações naturais das condições iniciais de uma fuga do CO₂ armazenado (Waarum *et al.*, 2016).

Limitações tecnológicas, custos, frequência (contínua, anual etc.), necessidade de mapeamento e descrição do local de armazenamento de CO₂ são desafios adicionais que influenciam tanto na escolha da tecnologia a ser utilizada quanto na elaboração do plano de monitoramento (IPCC, 2006).

Outro desafio é a necessidade de investimento em pesquisas para avaliação das não conformidades encontradas no monitoramento e coleta/tratamento dos dados. A depender do caso, desvios substanciais podem não significar qualquer perspectiva de perda de contenção, enquanto em outros casos um desvio mínimo pode sinalizar até a perda de uma contenção. Para manutenção da conformidade, contenção de vazamentos e minimização de impactos ambientais, é necessário mostrar consistência entre observação e expectativa ou observação e exigência (Jenkins; Chadwick; Hovorka, 2015).

Há o desafio da regulação e o desafio de atender as premissas de contabilização das emissões de CO₂, tanto armazenados quanto eventualmente vazados. A contabilidade de gases de efeito estufa (GEE) é um método importante para mostrar conformidade com os compromissos de emissões assumidos sob protocolos vinculativos (ou seja, Protocolo de Quioto), para documentar créditos de esforços de mitigação de GEE em áreas onde os gases de efeito estufa são regulados (Dixon; Romanak, 2015).

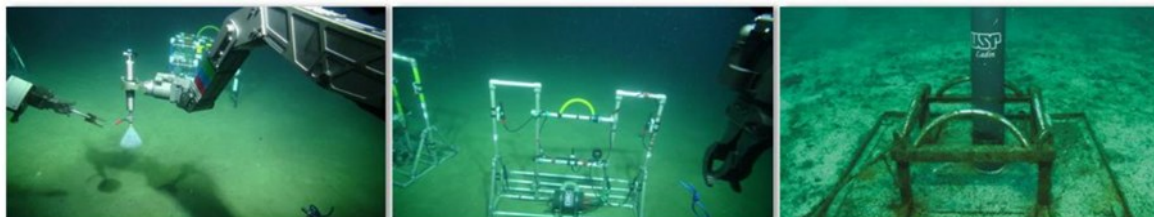
Ademais, as empresas que realizam armazenamento de CO₂ e não investem em pesquisa e desenvolvimento podem ter sua imagem afetada em um eventual vazamento de CO₂ e ainda perderem a oportunidade de investimentos em ESG. Como dito anteriormente, a quantidade emitida de títulos de sustentabilidade, que podem ser chamados de títulos ESG, aumentou de 14,8 bilhões de dólares em 2013 para 261,4 bilhões de dólares em 2018, o que é dezessete vezes mais do que o montante em 2013. Além disso, em 2019, foram 465 bilhões de dólares, quase o dobro do montante em 2018 (Kanamura, 2021).

5. PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES E OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS

O desenvolvimento e estudo de injeção permanente de CO₂ em cavernas de sal mostra-se uma oportunidade relevante para a indústria do petróleo e gás, principalmente em virtude das descobertas das jazidas de hidrocarbonetos nos campos do pré-sal. Já existem estudos iniciais nesse sentido, incluindo os mecanismos de aprisionamento iônico e mineral (Ketzer *et al.*, 2016). Ketzer *et al.* (2016) lembra que após a injeção do em formações salinas profundas, ao longo do tempo irá se dissolver parcialmente na água subterrânea salina (salmoura), presente nesses reservatórios e servir como um mecanismo adicional para imobilizar o CO₂ no reservatório e reduzir os riscos associados à eventual vazamento.

Outra oportunidade é desenvolver as tecnologias já existentes para o monitoramento durante a produção de petróleo e gás e aproveitar a ampla variedade de tecnologias de monitoramento destinadas a monitorar o reservatório, a sobrecarga, o fundo do mar ou a coluna de água. Exemplos de projetos ilustrados na Figura 2, como as Estratégias para Monitoramento Ambiental de Captura e o Armazenamento de Carbono Marinho (STEMM-CCUS) e as pesquisas do Research Centre for Greenhouse Gas Innovation (RCGI) demonstram que utilizando-se tecnologias e know-how de monitoramento na indústria de petróleo e gás pode-se criar um consistente, robusto e seguro processo de gestão de riscos.

Figura 2. Tecnologias e ferramentas utilizadas para coleta de amostras de gás, à medida que emergem debaixo do sedimento, bem como monitoramento dos sons emitidos pelas bolhas advindos de vazamento de gás



Fonte: Elaborado pelos autores.

O objetivo comum poderia ser detectar, caracterizar e quantificar qualquer vazamento de CO₂ do local de armazenamento pretendido, mas a escolha da solução técnica certa para um determinado projeto não é trivial. Os estudos sísmicos, por exemplo, oferecem informações altamente valiosas sobre a migração e o desenvolvimento da pluma de CO₂ e mudanças nas propriedades geofísicas dentro e acima do reservatório, porém, são pesquisas caras e realizadas raramente. Levantamentos eletromagnéticos e gravimétricos também são usados para monitorar o CO₂ armazenado, oferecendo informações potencialmente úteis, mas menos detalhadas (Waarum *et al.*, 2016).

Ainda nessa esteira, o desenvolvimento de novas técnicas de monitoramento, compreensão de processos e os avanços na aplicação de técnicas existentes, associados à crescente quantidade de técnicas, auxiliam na obtenção de confiabilidade do projeto, além de melhorar a precisão dos dados relatados (Dixon; Romanak, 2015; Dean; Tucker, 2017).

Uma outra solução seria a construção de normativos voltados à atividade de CCUS, no que tange às avaliações de riscos para a atividade. A avaliação de riscos e sua mitigação, bem como monitoramento, tornaram-se um importante campo de estudos, com desenvolvimento de metodologias variadas e acúmulo constante de experiências em projetos reais de armazenamento de CO₂. Esse desenvolvimento e amadurecimento elevam a maturidade dos processos e a percepção do público em geral, que apresenta muitas vezes oposição em relação à tecnologia de CCUS, em virtude dos potenciais danos causados (Jenkins; Chadwick; Hovorka, 2015; Nunes; Costa, 2019).

Por último, o desenvolvimento tecnológico pode remeter ao público geral uma percepção “menos poluidora” da indústria do petróleo no que tange ao ESG. Na conjuntura atual, observa-se o aumento do engajamento, interesse e investimentos de diversos setores no ESG, principalmente em virtude da necessidade da transição para o mundo Net-Zero (Global CCS Institute, 2020).

6. DESAFIOS E OPORTUNIDADES FRENTE AO PL 1425/2022

Nesse aspecto, o Projeto de Lei 1.425/2022 foi identificado no Brasil e atualmente tramita no Congresso Nacional, o que poderá trazer lições essenciais ao Brasil, com o marco legal das políticas e reduzir os riscos e desafios da atuação do CCUS.

Este Projeto de Lei “Disciplina a exploração da atividade de armazenamento permanente de dióxido de carbono de interesse público, em reservatórios geológicos ou temporários, e seu posterior reaproveitamento.”

Apresentado pelo ex-senador petista e atual presidente da Petrobras Jean-Paul Prates, o PL trata a atividade econômica de armazenamento de dióxido de carbono (CO₂) como de interesse público, capaz de contribuir para o cumprimento das metas nacionais de redução das emissões de dióxido de carbono (GEE) (Machado, 2023b).

O projeto diz que a injeção e o armazenamento permanente devem ocorrer em formação geológica localizada nas bacias sedimentares do território nacional, na zona econômica exclusiva ou na plataforma continental sob jurisdição do Brasil (Machado, 2023b). O armazenamento não permanente de CO₂ para fins de comercialização e reutilização será realizado em reservatórios acima da superfície que atendam às especificações mínimas de estanqueidade. (Machado, 2023b).

Outro ponto é a transferência da responsabilidade de longo prazo do operador privado para o governo federal. A proposta é ter uma etapa intermediária, durante 35 anos após o término da injeção, em que os ativos serão monitorados por agentes privados regulados pelo poder público (Machado, 2023b).

Segundo a CCS Brasil, há desafios adicionais que precisam ser superados para transformar experiências-piloto em ações concretas em escala comercial. No caso dos projetos CCUS, existem três desafios: segurança regulatória, viabilidade econômica e integração da cadeia (Morbach, 2023).

Morbach complementa ao citar que o maior desafio será formar mão de obra no volume e tempo necessários para dar escala a projetos de CCUS, além de estabelecer uma cadeia de suprimentos de equipamentos e materiais. Uma forte cadeia de suprimentos com equipamentos robustos auxiliaria ainda em outro desafio, que é a opinião pública acerca do assunto (Morbach, 2023).

No Brasil, a atividade CCUS pode gerar até US\$ 20 bilhões para as empresas brasileiras e tem atraído o interesse de empresas petrolíferas e produtores de etanol (Machado, 2023a).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, além da realização de uma ampla revisão sistemática de literatura, incluindo os principais manuais e as revisões de referências em tecnologias e ferramentas relacionadas ao monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂, foi possível identificar a relação da tecnologia do CCUS com a indústria do petróleo e gás, explorando os riscos para armazenamento de CO₂ - principalmente os riscos durante a operação de armazenamento de CO₂, soluções e desafios para o desenvolvimento da técnica.

Lastreado por uma gama de legislações e um viés crescente da implementação de aspectos de ESG pelo mercado, mostra-se que o desenvolvimento tecnológico do CCUS voltado para a indústria do petróleo e gás faz-se necessário. O artigo mostrou que o atendimento às legislações garante não só o cumprimento das normas de operação segura das instalações de armazenamento, mas também

aspectos que abarcam o próprio ESG em si, mostrando respeito ao meio ambiente, à sociedade – diretamente impactada por eventuais vazamentos bem como a governança em torno do tema.

As análises por meio da pesquisa sistemática revelaram a necessidade de buscar os conceitos envolvendo o PD&I e monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂, bem como necessidade de realizar pesquisas especializadas sobre o tema proposto. As análises ainda evidenciaram determinadas lacunas na bibliografia. Além disso, verificaram-se novas oportunidades tecnológica para implementação do CCUS (como o VLFS – Very Large Floating Structures), que possui diversas interfaces e desafios para a área submarina da indústria do petróleo.

Em relação ao PL 1.425/2022 também foram observadas necessidades de desenvolvimento tecnológico e aprofundamento de conhecimento no MRV – Monitoramento, Reporte e Verificação no que tange às atividades de CCUS. O PL pode ser considerado uma lição aprendida com o Brasil, pois esse projeto permitiria que os agentes responsáveis pela armazenagem (operador) utilizassem práticas responsáveis e adequadas, derivadas de diretrizes internacionais para materializar o cumprimento dessa nova lei. Dessa forma, não haveria necessidade de criação de dispositivos legais como Resoluções emitidas por Agências Reguladoras como a ANP, Decretos, entre outros, doutrinando a metodologia para cumprimento da nova lei, cabendo apenas a eles exercer a função dos órgãos fiscalizadores para o cumprimento desta lei.

Os estudos também demonstraram que toda a cadeia de valor da indústria do petróleo pode se beneficiar da transição energética, incluindo uso de tecnologias como o CCUS. Contudo, para de fato auferir os resultados previstos, sobretudo no âmbito do ESG, ainda há trilhas a percorrer, principalmente no que tange à área submarina, incluindo o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂ em ambiente submarino.

A expectativa é que este estudo possa trazer à luz as deficiências atuais da indústria do petróleo e prepará-la tanto para a exploração das novas tecnologias advindas da transição energética quanto para atendimento às inúmeras diretrizes e legislações que serão implementadas. Dessa forma, a indústria de óleo e gás se consolidará como um importante motor da transição energética em nível mundial, respaldada pelo cumprimento na íntegra de todos os elementos e práticas de ESG.

Trabalho originalmente apresentado no Congresso ROG, em 2024. Acesse [aqui](#).

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR ISO 31000**: gestão de riscos – princípios e diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4656830/mod_resource/content/1/ISO31000.pdf. Acesso em: 14 fev. 2023.

ALVES, D. **Sequestro e armazenamento de CO₂**: aplicação da tecnologia em Portugal. 2008.

Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

Disponível em:

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://ria.ua.pt/bitstream/10773/605/1/2009000616.pdf&ved=2ahUKEwj1iaaNolaFAxXsqZUCHYziB3qQFnoECBoQAQ&usq=AOvVaw2xz24j4nYUavxyly2v0QP0>. Acesso em: 14 fev. 2023.

ANYOSA, S.; BUNTING, S.; EIDSVIK, J.; ROMDHANE, A.; BERGMO, P. Assessing the value of seismic monitoring of CO₂ storage using simulations and statistical analysis. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [s. l.], v. 105, 103219, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103219>. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103219>. Acesso em: 13 fev. 2023.

ASL, H.F.; ITAOKA, K.; CHAPMAN, A.; KATO, E.; KUROSAWA, A. Key factors for achieving emission reduction goals cognizant of CCS. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [s. l.], v. 99, 103097, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103097>. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103097>. Acesso em: 13 fev. 2023.

BLACKFORD, J.; WIDDICOMBE, S.; LOWE, D.; CHEN, B. Environmental risks and performance assessment of carbon dioxide (CO₂) leakage in marine ecosystems. In: MAROTO-VALER, M. Mercedes (Ed.). **Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO₂) Capture and Storage Technology: v 2 Carbon Dioxide (CO₂) Storage and Utilisation**. Sawston: Woodhead Publishing Series in Energy, 2010. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845697976500138?via%3Dihub>. Acesso em: 14 fev. 2023.

DEAN, M.; TUCKER, O. A risk-based framework for measurement, monitoring and verification (MMV) of the goldeneye storage complex for the Peterhead CCS project, UK. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [s. l.], v. 61, p. 1–15, 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.014>. Acesso em: 05 mar. 2023.

DIXON, T.; ROMANAK, K.D. Improving monitoring protocols for CO₂ geological storage with technical advances in CO₂ attribution monitoring. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 41, n. 1, p. 29–40, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.029>. Acesso em: 14 fev. 2023.

DEPARTMENT OF ENERGY. **Best practices for: monitoring, verification, and accounting of CO₂ storage in deep geologic formations**. DOE, 2009. Disponível em:

<https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/159708/best-practices-monitoring-verification-accounting-CO2-stored-deep-geologic-formations.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2023.

EGMOND, V.; BROUWER, J. H.; HEIMERIKS, G. J.; HEKKERT, M. P. Overview and analysis of the Dutch CCS program as a knowledge network. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [s. l.], v. 11, supp., p. S1–S9, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.11.004>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583612002563?via%3Dihub>. Acesso em: 05 fev. 2023.

EY. **Does Your Nonfinancial Reporting Tell Your Value Creations Story?** 1 Jan. 2018. Disponível em: https://www.ey.com/en_gl/assurance/does-nonfinancial-reporting-tellvalue-creation-story. Acesso em: 05 fev. 2023.

GASPAR, Hugo Alexandre Curado. **Captura e armazenamento de CO₂**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014. Disponível em:

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://run.unl.pt/handle/10362/12397&ved=2ahUKEwimwFjFolaFAxVSkZUCHXlCjwQFnoECA4QAQ&usq=AOvVaw183-TLb1yXPgoXMXd7lNf->. Acesso em: 12 jan. 2023.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **The global status of CCS 2020**. Docklands, 2020. Disponível em:

<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCSReport-English.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2023.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **The Global Status of CCS 2021**. Docklands, 2021. Disponível em:

<https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/download/>. Acesso em: 14 fev. 2023.

HARBERT, W.; DALEY, T. M.; BROMHAL, G.; SULLIVAN, C.; HUANG, L. Progress in monitoring strategies for risk reduction in geologic CO₂ storage. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 260–275, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.05.007>. Acesso em: 12 jan. 2023.

IEA. **Carbon Capture and Storage- Model Regulatory Framework**. Paris, 1 jan. 2010. Disponível em:

<https://www.iea.org/reports/carbon-capture-and-storage-model-regulatory-framework>. Acesso em: 05 mar. 2023.

IEAGHG. **Review of offshore monitoring for CCS projects**. Cheltenham, 1 Jul. 2015. Disponível em:

https://ieaghq.org/docs/General_Docs/Reports/2015-02.pdf. Acesso em: 01 abr. 2023.

IEAGHG. **Funds research into the development and deployment of carbon capture and storage (ccs) Technologies**. Cheltenham, 1 Jan. 2021. Disponível em:

<https://ieaghq.org/2-uncategorised/267-ipac-report>. Acesso em: 05 mar. 2023.

IPCC. **Diretrizes para inventários nacionais de gases de efeito estufa**. Brasília, DF, 1 jan. 2006.

Disponível em:

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html&ved=2ahUKEwiambXOpYaFAxUFrpUCHZ5jC4AQFnoECBqQAQ&. Acesso em: 05 mar. 2023.

JENKINS, C.; CHADWICK, A.; HOVORKA, S.D. The state of the art in monitoring and verification—Ten years on. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 312–349, 2015.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.009>. Acesso em: 01abr. 2023.

KANAMURA, T. Risk Mitigation and Return Resilience for High Yield Bond ETFs with ESG Components.

Finance Research Letters, [s. l.], v. 41, n. 1, 101866, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.frl.2020.101866>. Acesso em: 12 jan. 2023.

KETZER, J. M. M. *et al.* (org.). **Atlas brasileiro de captura e armazenamento geológico de CO₂**.

Porto Alegre: EDIPUCRS, 2016. Disponível em:

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/202033/atlasbrasileiro.pdf&ved=2ahUKEwicvpvolaFAxUGqZUCHfkfCAIQFnoECA8QAQ&usq=AOvVaw2sQX8eucQrR9WoqX7PRAmZ>. Acesso em: 06 mar.2023.

MACHADO, Nayara. Entenda o marco legal da captura e armazenamento de carbono. **Eixos**, 12 jun.

2023a. Disponível em: <https://epbr.com.br/entenda-o-marco-legal-da-captura-e-armazenamento-de-carbono/>. Acesso em: 06 mar. 2023.

MACHADO, Nayara. PL de captura e armazenamento de carbono abre caminhos para indústria de etanol. **Eixos**, 06 jun. 2023b. Disponível em:

<https://epbr.com.br/pl-de-captura-e-armazenamento-de-carbono-abrecaminhos-para-industria-de-etanol/>. Acesso em: 01 abr. 2023.

MORBACH, I. (2024, January 1). Os desafios tecnológicos e soluções para o desenvolvimento do CCUS: o papel relevante da área submarina na integridade das instalações de armazenamento de CO₂ frente ao PL 1425/2022. *Entrevista*. n/a

NUNES, R.C.; COSTA, H.K.M. **Aspectos jurídicos da captura e armazenamento de carbono**. Rio de Janeiro: Lumen Juris, (2019).

VARELA, C.A.; MILONE, D. A Resposta do mercado aos Acidentes Ambientais na Indústria Petrolífera:

Estudo do Caso do Desastre no Golfo do México. *In*: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 16., 2014. **Anais eletrônicos** [...]. São Paulo: DEA/USP, 2014.

Disponível em: <https://www.engema.org.br/XVIENGEMA/148.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2023.

WAARUM, I.K.; BLOMBERG, A.E.A.; EEK, E. CCS Leakage Detection Technology - Industry Needs,

Government Regulations, and Sensor Performance. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 114, p. 3613–3627, 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1493>. Acesso em: 12 jan. 2023.

WRI. **CCS Guidelines**. WRI – WORLD RESOURCES INSTITUTE. Washington, 2008. Disponível em:

https://files.wri.org/d8/s3fs-public/pdf/ccs_guidelines.pdf. Acesso em: 15 fev. 2023.