

Análise comparativa legal do monitoramento do armazenamento de CO₂ em países selecionados

THAIZ DA SILVA VESCOVI CHEDID^I

ROMARIO DE CARVALHO NUNES^{II}

HIRDAN KATARINA DE MEDEIROS COSTA^{III}

EDMILSON MOUTINHO DOS SANTOS^{IV}

Introdução

AS EMISSÕES intensivas de Gases do Efeito Estufa são um dos principais contribuintes para o aquecimento global. Entre os projetos capazes de mitigar a emissão desses gases está uma tecnologia denominada Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS). O monitoramento dessas instalações de armazenamento de CO₂ se mostra cada vez mais relevante no atual cenário de mitigação das mudanças climáticas, uma vez que há necessidade de garantir a permanência definitiva desse gás injetado, validando a efetividade do uso da tecnologia, bem como a segurança e integridade das pessoas e o meio ambiente.

Para exercer tal atividade é necessário o cumprimento de uma série de requisitos, licenças e autorizações, prática essa comum em vários países estudados pela Agência Internacional de Energia (IEA). Essas informações incluem detalhes de como o projeto será operado, incluindo modelagem de resultados e um plano para armazenamento e monitoramento bem como o projeto será concluído, incluindo planos de desativação e reabilitação. Todas essas regras acontecem por meio de leis, regulamentos e outras normas emanadas do governo de acordo com as práticas de cada país.

Ademais, há alguns anos a Global CCS Institute revisou seu Legal and Regulatory Indicator mostrando que, dentre os 55 países analisados sob o viés legal e regulatório para atividade de CCUS, o Brasil ficou na 36^a posição, indicando importantes desafios para o uso e desenvolvimento dessa tecnologia no país. Dessa forma, este trabalho busca compreender as lacunas regulatórias no Brasil comparando-o aos países melhores ranqueados nessa lista, abarcando novas visões e caminhos para a implementação de uma legislação que satisfaça aos principais gargalos identificados.

Assim, este trabalho divide-se em duas etapas. Primeiramente, pretende

verificar os aspectos gerais de monitoramento, abordando os riscos relativos ao monitoramento, aspectos tecnológicos inerentes a atividade, bem como a legislação pertinente ao tema. Feito isso, busca tratar do assunto a partir de um estudo da legislação acerca do monitoramento em países selecionados, tratando do cenário que ocorre no Brasil, nos Estados Unidos, no Reino Unido, na Noruega, no Canadá, na Austrália, no Japão e na União Europeia.

Visa abordar o viés das práticas e recomendações internacionais com foco nos temas relacionados a autorização e monitoramento de instalações de armazenamento de CO₂, fazendo um cotejo, ou seja, uma comparação entre a legislação dos países selecionados com o objetivo de vislumbrar aspectos relevantes a uma proposta de lei no Brasil. Para isso, o trabalho utilizará o método dedutivo e o tipo de pesquisa exploratório e comparativo.

Por fim, busca então analisar as práticas e recomendações em países selecionados com foco em temas relacionados à autorização e monitoramento de instalações de armazenamento de CO₂ com a finalidade de propor uma proposta de lei com regras de monitoramento para o estado brasileiro.

Aspectos gerais de monitoramento

A tecnologia de captura e armazenamento de carbono pode ser entendida como um conjunto de tecnologias voltadas para redução das emissões de CO₂ e aplicável a grandes empreendimentos cujos processos resultam em geração de elevados volumes de gás, já que ainda dependemos de processos industriais que emitem quantidade significativa de CO₂ (Seixas, 2015; DNV, 2021). Esse CO₂ é removido dos gases de combustão emitidos nos processos, transportados por gasodutos, caminhões ou navios e estocado permanentemente no subsolo em grandes profundidades em vez de ser liberado na atmosfera, como campos de óleo e gás depletados e formações salinas profundas, ou ainda utilizados como método de recuperação avançada de óleo (EOR - Enhanced Oil Recovery) (IEA, 2010; Câmara et al., 2011; Seixas, 2015; Global CCS Institute, 2018; Tarakki, 2018). A tecnologia também é uma das soluções atualmente disponíveis para ajudar no cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris para diminuir as emissões de gases do efeito estufa e, ao mesmo tempo, diminuir a poluição causada pelo uso de carvão e outros combustíveis fósseis, que atendem às crescentes necessidades energéticas do mundo, ademais e nesse sentido, uma possibilidade importante apontada nos últimos relatórios do IPCC é a BECCS, armazenamento de CO₂ gerada em usinas termelétricas que queimem biomassa (Ashworth et al., 2010; Jenkins et al., 2011; Anyosa et al., 2021; Zhang et al., 2021).

A prática do monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂ é fundamental, dados a complexidade e os riscos envolvidos na operação e potenciais danos causados em eventual vazamento de CO₂ (IEA, 2010). Monitorar as atividades de CCUS é essencial para apoiar vários elementos cruciais de segurança e proteção e envolverá um portfólio de técnicas e esquemas de monitoramento para detectar, o quanto antes, o vazamento de CO₂ (IEA, 2010; Anyosa et

al., 2021). Além disso, envolve várias partes interessadas, tais como o operador, o órgão regulador e outras partes interessadas do projeto, incluindo o público em geral (Nunes; Costa, 2019).

Embora não aprofundado nos marcos legais dos países estudados, o armazenamento em depósitos geológicos que permitem a adsorção do CO₂ é um método capaz de reduzir os custos de monitoramento, inclusive após o fechamento do reservatório. O armazenamento geológico em formações ígneas como basalto, komatiitos e peridotitos são ótimas alternativas, sendo o basalto uma das melhores perspectivas para o armazenamento de CO₂. Formações basálticas são vantajosas para o armazenamento de CO₂, uma vez que o mecanismo de armazenamento que eles seguem é o aprisionamento mineral, que reduz o risco de vazamento a zero e armazena o CO₂ permanentemente como carbonatos sólidos, tornando-se uma das formas mais seguras de armazenamento (Patidar, 2023). A injeção intencional de CO₂ em formações geológicas ricas em silicatos seguida da conversão em carbonatos também não requer um monitoramento de longo prazo para identificação de vazamentos (Thonemann, 2022).

Necessário lembrar que um operador geralmente terá responsabilidade por quaisquer danos causados ao meio ambiente, saúde humana ou a outros recursos, e ser obrigado a tomar quaisquer medidas corretivas ou medidas de remediação associadas ao local de armazenamento e seus respectivos custos (IEA, 2010).

A atividade de monitoramento exige estudos e análises complexas, tanto para atender à regulação aplicável quanto à segurança das instalações (Nunes; Costa, 2019). A materialização disso se dá pela elaboração e implementação do Plano de Monitoramento, que reflete os princípios e critérios das boas práticas internacionais para o monitoramento de locais de armazenamento geológico e abrange análises tecnológicas e econômicas, dado o alto valor de investimento (Dixon; Romanak, 2015; Anyosa et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Tal plano deve ser construído a fim de formalizar e registrar junto aos órgãos reguladores e às licenças uma padronização a ser seguida nessa fase. A padronização e divulgação do Plano de Monitoramento dá robustez ao projeto, demonstra organização da empresa e mostra aos investidores e aos órgãos, confiança quanto à estrutura de gestão da empresa e seu empenho no quesito de Qualidade, Segurança, Meio Ambiente e Saúde (Nunes; Costa, 2019).

No Plano de Monitoramento é necessária a caracterização rigorosa para um processo minucioso de avaliação de riscos, com vistas a demonstrar que a probabilidade de qualquer evento de vazamento é muito baixa e que quaisquer impactos associados podem ser identificados, monitorados e mitigados de forma adequada (Ketzer et al., 2016).

Há uma literatura robusta na área de conhecimento relacionada ao monitoramento das instalações de armazenamento de CO₂. Enquanto os relatórios da Global CCS Institute e resoluções importantes ilustram a relevância do mo-

monitoramento (Decreto n.99.274 de 1990; Global CCS Institute, 2020; Global CCS Institute, 2021; IEA, 2010, Lei n.6.938/81), outras entidades levantam aspectos relacionados às tecnologias e ferramentas utilizadas para o monitoramento (Department of Energy, 2009; Department of Energy, 2017; International Energy Agency Greenhouse Gas, 2015; International Energy Agency Greenhouse Gas, 2021; World Resources Institute, 2008). Há também literatura que correlaciona o próprio monitoramento com o ESG – Environmental, Social and Governance (Global CCS Institute, 2017; Global CCS Institute, 2020; ONU, 2021). Contudo, não há literaturas que correlacione os aspectos legais do monitoramento entre os países que realizam o armazenamento de CO₂.

Riscos relativos ao monitoramento

O enfrentamento do risco em algum nível é algo corrente para indivíduos, empresas e sociedade. Desse modo, é preciso entender, descrever, analisar, gerenciar e comunicar esses riscos, para tanto, a disciplina de avaliação e gerenciamento de riscos foi desenvolvida para atender a essa necessidade (Aven, 2010).

Nas ciências sociais, existem duas definições predominantes de risco:

(i) Risco é uma situação ou evento onde algo de valor humano (incluindo os próprios humanos) está em jogo e o resultado é incerto (Aven, 2010).

(ii) O risco é uma consequência incerta de um evento ou atividade com respeito a algo que os humanos valorizam (Aven, 2010).

Risco é chance de um evento acontecer, seja ele uma ameaça, quando negativo, seja oportunidade, quando positivo. É o resultado obtido pela efetividade do perigo, e de acordo com as definições (i) e (ii), tem as seguintes propriedades:

- (a) acomoda tanto resultados indesejáveis quanto desejáveis;
- (b) aborda incertezas em vez de probabilidades e valores esperados;
- (c) aborda os riscos do resultado em vez de consequências específicas.

A norma internacional ISO 31000 descreve que o Processo de Gestão de Riscos envolve a aplicação de políticas, procedimentos e práticas para as atividades de comunicação e consulta, estabelecimento de contexto e avaliação, tratamento, análise crítica, registro e relato de riscos. Considera ainda que a etapa que compõe o núcleo do Processo de Gestão de Riscos é a Avaliação de Riscos e que esta desdobra-se em três subprocessos: identificação, análise e avaliação.

Riscos associados ao armazenamento de CO₂

Uma avaliação de risco adequada deve levar em conta qualquer risco de vazamento para fora da formação, considerando os processos e vias de migração de CO₂ e substâncias presentes na formação de armazenamento geológico, seja durante ou após a injeção do CO₂. Essas avaliações devem ser específicas do local e considerando longo e curto prazo (Delprat-Jannaud, 2013).

Wilson et al. (2003) sugerem que riscos relacionados ao armazenamento geológico decorrentes de vazamentos para a atmosfera de CO₂ injetado sejam

distintos em riscos locais e globais. Por risco global entende-se como a incerteza na efetividade da contenção no reservatório do CO₂ injetado. Os riscos locais surgem de três processos: CO₂ na superfície baixa da atmosfera – elevadas concentrações de CO₂ associadas ao fluxo através do subsolo raso para a atmosfera; CO₂ dissolvido em fluidos de subsuperfície – efeitos químicos do CO₂ dissolvido no subsolo; deslocamento – são os efeitos decorrentes do deslocamento de fluidos da formação pelo CO₂ injetado, conforme pode ser observado na Figura 1.



Fonte: Criado pelos autores a partir de Wilson et al. (2003).

Figura 1 – Taxonomia de risco de armazenamento geológico.

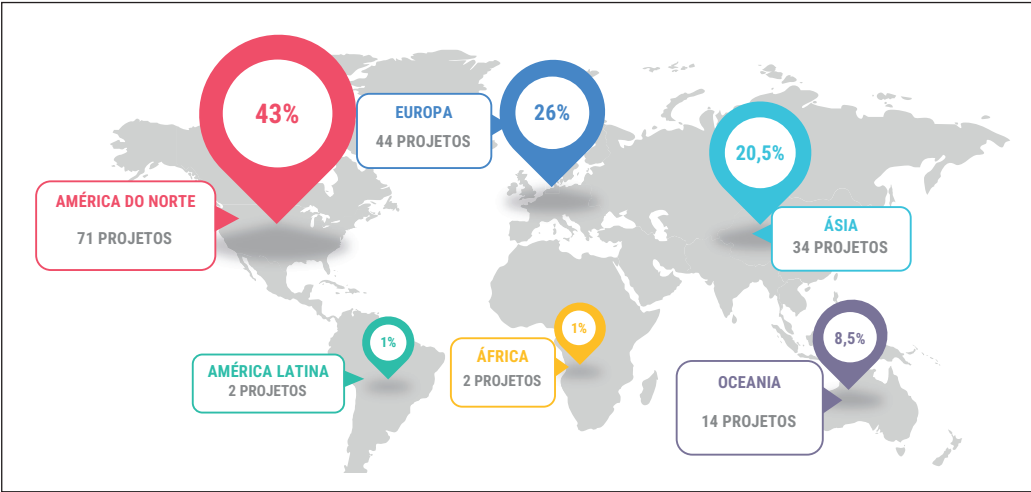
Os Projetos de CCUS no Mundo

Em relação às instalações de armazenamento de carbono, dados do Global CCS Institute mostram que as instalações de armazenamento de CO₂ contribuem para captura de, aproximadamente, 37 milhões de toneladas de CO₂ por ano (Mtpa), o equivalente à atividade de 8 milhões de carros. Além disso, de acordo com o The Global Status of CCS - 2017, mais de 220 milhões de toneladas de CO₂ foram armazenadas cumulativamente até o ano de 2017 (Global CCS Institute, 2017).

A partir dos dados coletados ao longo de 2020 e 2021 no site da Global CCS Institute, foram criados gráficos e infográficos capazes de retratar o panorama atual das instalações de armazenamento de CO₂ no mundo e, consequentemente, construir algumas conclusões, tais como a Figura 2, que mostra a destruição geográfica das instalações de armazenamento de CO₂ (Global CCS Institute, 2021a).

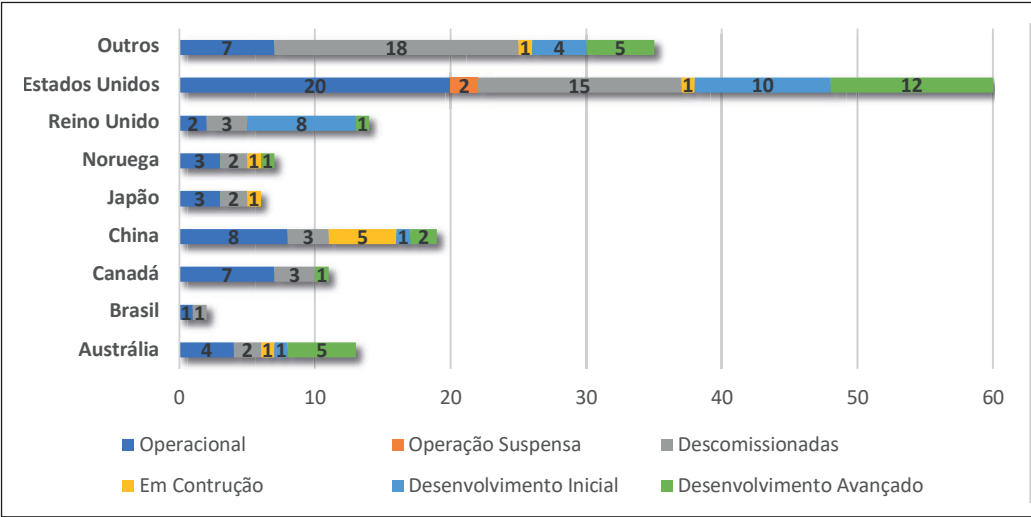
A Figura 2 mostra que há uma tendência na instalação e operação das instalações em países que produzem uma quantidade considerável de hidrocarbonetos (Canadá, Estados Unidos, Brasil, China, Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos, Argélia, Reino Unido e Noruega), bem como aqueles que o refinam

em quantidades consideráveis (Canadá, Estados Unidos, Brasil, China, Arábia Saudita e Japão). O motivo seria além do emprego do CO₂ capturado na recuperação terciária (EOR), também da infraestrutura já instalada no local no caso dos produtores, bem como quantidades consideráveis de emissões de CO₂ durante o refino onde, nesse caso, o Japão seria um exemplo. O destaque fica por conta da Austrália, que, embora tenha produção, consumo e refino de hidrocarbonetos relativamente baixos, tem um número considerável de instalações. Tal análise pode ser confirmada ao analisar o Gráfico 1, que mostra os países com mais instalações de armazenamento de CO₂ no ano de 2021.



Fonte: Elaborado pelos autores.

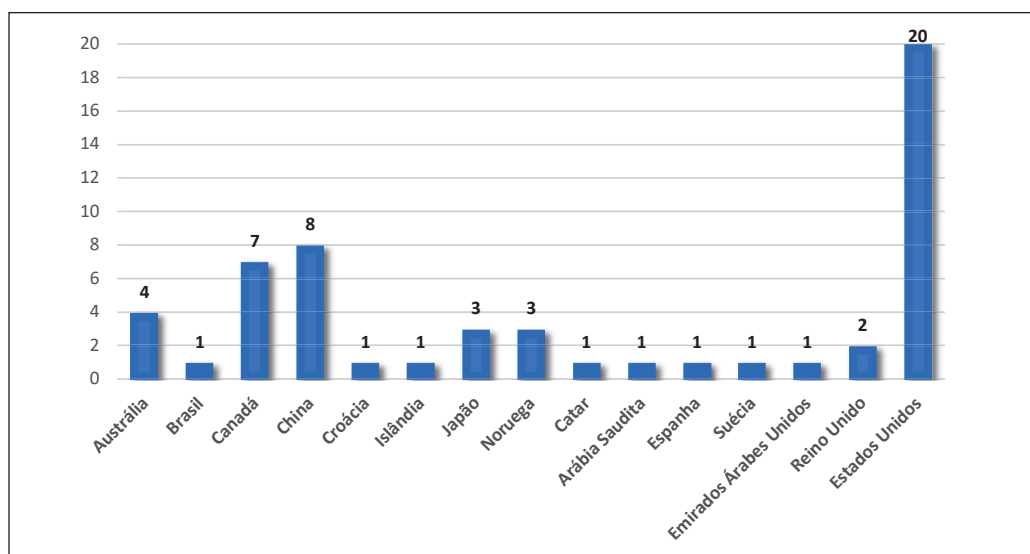
Figura 2 – Regiões com maior número de instalações de armazenamento de CO₂.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Gráfico 1 – Ranking dos sete países com mais instalações de armazenamento de CO₂ do mundo e Brasil.

Além disso, atualmente há 15 países que têm instalações de armazenamento de CO₂ em operação em todo o mundo, como mostra o Gráfico 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Gráfico 2 – Países com instalações de armazenamento de CO₂ em operação em 2021.

Portanto, além de Brasil, Estados Unidos, Reino Unido, Noruega, Canadá, Austrália, Japão e União Europeia foram escolhidos para análise neste artigo não só por apresentarem uma legislação madura e desenvolvida – quando comparado a outros países, mas também por terem uma atividade de armazenamento de CO₂ bastante ativa, capaz de trazer inúmeros dados e aspectos importantes para comparações e estudos.

Legislação relativa a monitoramento

Os métodos de armazenamento potenciais de CO₂ incluem (IPCC, 2005): (i) armazenamento em formações geológicas como campos de petróleo e gás, depósitos de carvão não mineráveis e formações salinas profundas; (ii) armazenamento oceânico com lançamento direto na coluna de água do oceano ou no fundo do mar; (iii) fixação industrial de CO₂ em carbonatos inorgânicos; (iv) uso industrial do CO₂. Este trabalho irá se concentrar na primeira modalidade, o armazenamento geológico, caracterizado como economicamente viável sob condições específicas (IPCC, 2005).

Em 2018, a Global CCS Institute revisou o CCUS (Captura e Armazenamento de Carbono) - LRI (Legal and Regulatory Indicator), índice que oferece avaliação detalhada dos marcos legais e regulatórios e classificação de cada país, com enfoque em um amplo espectro de acordos administrativos e de permissão ao longo do ciclo de vida do projeto, incluindo questões relacionadas a consultas públicas, impactos ambientais e responsabilidade a longo prazo, ao qual de 55 países analisados o Brasil aparece na 36^a posição (Havercroft; Macrory, 2014).

O indicador utiliza como metodologia de avaliação uma comparação entre os vários modelos e circunstâncias nacionais contrastantes, para determinar a “Abrangência” de uma jurisdição individual com estrutural legal e regulamentar para a implantação de Projetos de CCUS.

O modelo comporta uma ampla gama e diferentes abordagens legislativas para o desenvolvimento de estruturas legais e regulamentares subnacionais para a tecnologia, desenvolvida ao longo dos anos últimos dez anos. Em outras jurisdições, onde existem pouca ou nenhuma legislação específica da CCUS desenvolvida até o momento, o modelo também permite avaliar legislação e regulamentação existentes que possam apoiar a implantação da tecnologia.

Os desafios colocados por uma avaliação dessa natureza foram abordados empregando uma metodologia que aloca a cada país classificações quantitativas e qualitativas, com base na eficácia e extensividade (Chedid; Santos, 2019) do regime de CCUS de um país.

Os regimes legais e regulamentares para cada um dos 55 países foram, portanto, avaliados de acordo com vários critérios, que foram projetados para refletir os elementos principais de uma ampla modelo legal e regulatório da tecnologia. Os critérios abordam questões que provavelmente são críticas para o regulamento de um projeto durante todo o seu ciclo de vida e inclui arranjos administrativos e possíveis caminhos de permissão para projetos de CAC, bem como questões afins, como avaliação de impacto ambiental e consulta pública provisões.

Analisando os dados obtidos, é possível verificar que há uma tendência da implantação e operação das instalações em países que produzem quantidade considerável de hidrocarbonetos (Canadá, Estados Unidos, Brasil, China, Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos, Argélia, Reino Unido e Noruega), bem como aqueles que o refinam em quantidades consideráveis (Canadá, Estados Unidos, Brasil, China, Arábia Saudita e Japão). O motivo seria especialmente em razão da infraestrutura já instalada no local no caso dos produtores, bem como quantidades consideráveis de emissão de CO₂ durante o refino, caso do Japão. O destaque fica por conta da Austrália, que embora tenha produção, consumo e refino de hidrocarboneto baixo, tem número considerável de instalações; por esse motivo, alguns desses países foram escolhidos para serem estudados em particular neste artigo.

Brasil

Muito embora atividades como o monitoramento de armazenamento de CO₂ ou CCUS ainda não tenham previsão específica na legislação brasileira, na seara ambiental, que é muito abrangente, acaba por ser utilizada para abarcar uma parcela grande de temas relativos (Costa et al., 2018). Antes de mais nada, é importante compreender que a fase de monitoramento (incluindo a emissão de relatórios e eventuais inspeções) pode depender do tipo de licenciamento obtido pelo operador.

De acordo com art. 225, § 1º, IV, cabe ao Poder Público exigir, na forma da lei, estudo prévio de impacto à instalação de uma obra ou atividade potencialmente causando degradação ambiental significativa. Além disso, o art. 23 define a competência comum da União, do estados, do distrito federal e dos municípios para proteger o meio ambiente e combater poluição em qualquer das suas formas (Costa et al., 2018).

Portanto, para desempenhar esse papel, a Lei n.6.938/81 (Lei da Política Nacional do Meio Ambiente) prevê no artigo 10, § 4º, a competência do Ibama para atividades de licenciamento e obras com significativo impacto, nacional ou regional, posteriormente, regulado pelo Decreto n.99.274/90. Na indústria do petróleo e gás, a execução de atividades empresariais é majoritariamente monitorada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

A ANP já exerce suas funções pautadas pela legislação do setor e, no caso da responsabilidade ambiental penal, segue a Lei n.9.605/98 (Lei de Crimes Ambientais) e Decreto n.3.179 / 99, que a regulamenta (Costa et al., 2018). Essas normas tratam, em particular, dos aspectos relativos à ação penal, crimes contra o meio ambiente e infrações administrativas.

As ações de fiscalização da ANP são realizadas sob a forma de auditorias, através de amostras e análise de dados e evidências, que visam 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 (Costa et al., 2018). Portanto, para desempenhar esse papel, a Lei n.6.938/81 (Lei da Política Nacional do Meio Ambiente) prevê no artigo 10, § 4º, a competência do Ibama para atividades de licenciamento e obras com significativo impacto, nacional ou regional, posteriormente, regulado pelo Decreto n.99.274/90 (Costa et al., 2018).

A responsabilidade da entidade legal – administrativo, civil e criminal – e responsabilidade da autora da infração são previstas na Lei de Crimes Ambientais. As sanções podem resultar em suspensão ou cancelamento de registro, licença ou autorização, perda ou restrição de incentivos e benefícios fiscais, e perda ou suspensão da participação em financiamento a instituições de crédito.

A legislação brasileira sobre o meio ambiente, conjuntamente com a estrutura autárquica para supervisionar atividades no Brasil, torna o ambiente propício à criação de normas específicas para as atividades de CCUS (Costa et al., 2018). Em relação à estrutura de fiscalização, a própria regulamentação da ANP sobre segurança operacional já prescreve o exercício de suas funções em instalações marítimas, instalações terrestres, oleodutos e sistemas submarinos, aos quais as atividades de CCUS poderiam ser conjugadas.

O desenvolvimento de um aparato legal e regulatório deve ser realizado com o conhecimento pleno das leis existentes relevantes, pois o CCUS pode ser mais facilmente regulado pela modificação de estruturas existentes, em vez

da elaboração de aparatos completamente novos. Em geral, isso pode ocorrer em conjunto com as jurisdições referentes ao setor de petróleo e gás, como foi realizado no Canadá, na Noruega e na Austrália (Rathmann, 2017).

A estrutura regulatória deve incluir um conjunto de informações e procedimentos (etapas de um projeto, agentes atuantes e órgãos fiscalizadores) para a implementação segura e eficaz de técnicas de CCUS no Brasil com o foco principal nas etapas de transporte e armazenamento geológico de CO₂ (Rathmann, 2017).

É importante ressaltar que o setor de petróleo e gás domina as técnicas de captura, transporte e injeção de gás em reservatórios geológicos. Ou seja, os agentes atuantes no setor de petróleo e gás no Brasil têm experiência em utilizar tecnologias de separação de gases na produção de gás natural que seriam similares às tecnologias utilizadas para a captura de CO₂, por exemplo.

Sendo assim, faz sentido que o órgão regulador que deverá adequar e fiscalizar projetos de CCUS no Brasil tenha expertise em regulação no setor de petróleo e gás natural. A ANP foi considerada possível órgão regulador nessa proposta porque é responsável pela regulação das atividades do setor petróleo no Brasil. O órgão ambiental federal (Ibama) também teria papel relevante no caso de emissões de licenças (prévia, de instalação e operação) nas etapas de um projeto de CCUS em que estas são necessárias. (Rathmann, 2017).

Estados Unidos

Há mais de 40 anos a injeção de CO₂ é realizada nos Estados Unidos por meio das atividades de Recuperação Avançada de Petróleo (RAP). Existem nos Estados Unidos cerca de 13 mil poços em que a injeção de CO₂ é permitida, e desses, cerca de 6 mil poços estão em operação. Além disso, existem milhares de quilômetros de tubulações instaladas para o transporte exclusivo de Dióxido de carbono – carbidutos (Marston; Moore, 2008).

O órgão responsável por desenvolver parâmetros para injeção e armazenamento de CO₂ é a Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency – EPA), cuja maior preocupação concerne à contaminação de mananciais e águas subterrâneas. Assim, a injeção de CO₂ estaria incluída nas normas referentes a injeção de substâncias no subsolo via Programa de Controle de Injeção de Substâncias no Subsolo (Underground Injection Control Program – UICP) (EPA, 2008).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) traz ainda os requisitos em nível federal para operadoras que pretendem armazenar CO₂ para sequestro geológico (EPA, 2014), enquanto a Lei de Água Potável Segura (SDWA) estabelece que o operador deve provar que o armazenamento de CO₂ não implica nenhum risco para a água potável segura e que o operador precisa atender a uma série de requisitos regulamentares. A EPA foi recomendada por muitas partes interessadas para transferir a responsabilidade para o governo estadual ou federal ou mesmo para uma entidade financiada (EPA, 2014).

Em um contexto macro, vale destacar que o Código Americano de Regulações Federais, Título 40: Proteção do Meio Ambiente, Partes 78 (Procedimentos de Apelação) e 98 (Relatórios Obrigatórios de Gases de Efeito Estufa) Regras de Relatórios de Armazenamento de CO₂) traz consigo marcos e definições importantes como uma das poucas legislações que explicam a diferença entre o injetor bem para armazenamento de CO₂ e o injetor bem para melhorar o desempenho e a eficiência da reserva de hidrocarbonetos, bem como determinar obrigações e deveres tanto do proprietário quanto do operador (EPA, 2014).

A lei também estabelece diretrizes técnicas e administrativas bem definidas, como a necessidade de os proprietários e operadores de tais instalações de sequestro de CO₂ seguirem os procedimentos de monitoramento, relatório e monitoramento, garantia de qualidade, estimativa de dados faltantes e manutenção de registros especificados, bem como carbono monitorar, estimando em seus relatórios, por exemplo, a quantidade de CO₂ a seguir os dados devem ser relatados: massa de CO₂ recebida, injetada, produzida, emitida por vazamento superficial e emissões de vazamentos de equipamentos e emissões ventiladas de equipamentos de superfície.

Reino Unido

Em dezembro de 2008, o Reino Unido, por meio de seu parlamento, trouxe os requisitos mínimos para regulação do armazenamento offshore e armazenamento a longo prazo de CO₂, por meio da Lei de Energia 2008, que restou revista em 2009 (Markusson; Hazeldine, 2010-2013).

Posteriormente, um regulamento para armazenamento de CO₂ foi aprovado em 2010 pelo Parlamento do Reino Unido para introduzir um regime de autorização para atividades offshore de CCUS e tal regulamento atendeu parcialmente ao compromisso do Reino Unido de transpor a Diretiva CCUS da União Europeia para o Reino Unido via lei doméstica (Markusson; Hazeldine, 2010-2013).

Nesse arcabouço legal, é possível destacar algumas leis e regulamentos relevantes, tais quais: Regulamentos 2010, SI 2010/2221, Lei de Compensação de 2006 Lei de Energia de 2008, Danos Ambientais (Prevenção e Remediação), Regulamentos de 2009, SI 2009/153, Lei de Compensação de Terras de 1973, Limitation Act 1980, Lei do Petróleo 1998, Lei de Planejamento de 2008, Lei de Sanções e Execução Regulatória de 2008, Armazenamento de dióxido de carbono (rescisão da licença) e Regulamentos 2011, SI 2011/1483 (Markusson; Hazeldine, 2010-2013).

Tais critérios incluem análises de viabilidade técnicas de retrofitting, transporte, identificação de locais para o armazenamento geológico e disponibilização de área no terreno da planta para estruturas e equipamentos relacionados à captura. Além de se adequar à política europeia na época, o governo britânico demonstrou uma diretiva para implantação de uma política de plantas ready como estágio preliminar necessário para se alcançar o CCUS (IEA, 2010).

Noruega

A Noruega é um país que trata da captura e armazenamento de carbono de modo cuidadoso, atribuindo ao assunto uma relevância há mais de 25 anos, desde a implantação do Projeto Spleiner, que seria responsável pelo armazenamento de uma média de 20 (vinte) milhões de toneladas de CO₂ (Cupertino, 2019).

Apesar de o aludido país não ter um arcabouço legal ou regulamentar particularmente na seara de armazenamento de CO₂, acaba por utilizar a regulamentação de petróleo, além de outros mecanismos internacionais de regulação de exploração e estocagem de CO₂, tendo como principal premissa a preocupação com impactos tanto econômicos como ambientais e a mitigação e danos e riscos (Cupertino, 2019).

A Noruega ratificou a emenda de exportação de CO₂ à 36^a reunião da Convenção de Londres e à 9^a reunião do Protocolo de Londres de 3 a 7 de novembro de 2015, e, quanto à responsabilidade de longo prazo, segue o regimento da União Europeia, respeitando o prazo mínimo de 20 anos pós fechamento do local de estocagem para que seja feita a transferência da responsabilidade a autoridade competente (Cupertino, 2019).

Tais Regulamentos se aplicam ao levantamento e exploração de reservatórios submarinos para armazenamento de CO₂, bem como a exploração, transporte e armazenamento de CO₂ em tais reservatórios em áreas sujeitas à jurisdição norueguesa. Nesse sentido, importante destacar a norma inserida adiante, que trata da avaliação de impacto nos planos de desenvolvimento e operação de um reservatório submarino para injeção e armazenamento de CO₂, que diz que uma avaliação de impacto em um plano de desenvolvimento e armazenamento de CO₂ em um reservatório submarino deve levar em conta os efeitos que o desenvolvimento pode ter para circunstâncias comerciais e ambientais, incluindo medidas preventivas e mitigadoras (Diretiva 2009/31/CE).

A avaliação de impacto deve, dentre outros requisitos, descrever o ambiente que pode ser significativamente afetado e avaliar e considerar as consequências ambientais do desenvolvimento e armazenamento, incluindo uma avaliação de como o monitoramento ambiental na área pode ser realizada (Diretiva 2009/31/CE).

Canadá

Existe um projeto completo de captura e armazenamento geológico que une os países Estados Unidos e Canadá, Projeto de Weyburn. Ambos os países se dedicam a elaborar mais normas baseando-se na experiência obtida através desse Projeto. A jurisdição é uma responsabilidade compartilhada e a propriedade e a regulamentação dos recursos naturais são realizadas pelas jurisdições provinciais (Shell Canada, 2011).

Dentre o arcabouço legal canadense, é possível destacar as seguintes leis e regulamentos: Lei de Alteração dos Estatutos de Captura e Armazenamento de

Carbono de 2010; Regulamento de Posse de Sequestro de Carbono, 179/2011; Regulamento da Regra de Prática do Regulador de Energia, 99/2013; Lei de Proteção e Melhoria Ambiental de 2000; Limitations Act 2000; Lei de Minas e Minerais de 2000; Lei de Conservação de Petróleo e Gás de 2000; Regulamento Geral da Lei de Desenvolvimento Energético Responsável, 90/2013; Water Act 2000 (Manuilova et al., 2009).

O Regulamento Canadense de Posse de Sequestro de Carbono complementa a questão determinando a necessidade de todos os planos da Monitorização, Relato e Verificação (MRV) apresentarem uma análise da probabilidade de as operações interferirem na recuperação mineral, além de vincular a renovação do contrato/arrendamento à renovação trienal do MRV (Havercroft; Macrory, 2014).

Além disso, estabelece obrigações para obtenção de contratos, tais como: pagar a taxa de aplicação prevista no Regulamento de Administração de Minas e Minerais; pagar a renda aplicável ao primeiro ano do contrato de arrendamento; apresentar provas de que a área abrangida pelo pedido é adequada para o sequestro de CO₂; submeter um plano de monitoramento, medição e verificação para aprovação; e enviar um plano de fechamento.

Assim, existe uma previsão de um plano de monitoramento que deverá ser estabelecido e cumprido durante o arranjo jurídico, que por sua vez tratará de monitorar o sequestro e armazenamento de carbono durante o período em que o aluguel será devido.

Austrália

De início, insta contextualizar de forma sucinta o cenário australiano que se traduz em uma forte dependência do carvão para a geração de eletricidade e dependência econômica da exportação de carvão. Nesse cenário, a Austrália se torna um dos maiores emissores de gases de efeito estufa (GEE) per capita do mundo (EPHC, Australia 2009).

A Austrália conta com legislação sobre CCUS nos níveis federal, estadual e territorial, com critérios importantes como competência, jurisdição, limites de emissões, incentivos fiscais, responsabilização. A função regulatória australiana inclui: proporcionar às empresas a oportunidade de se candidatarem a licenças de avaliação, arrendamentos e licenças de injeção, garantir que o gás de efeito estufa seja armazenado com segurança, fornece mecanismos para gerenciar as interações entre as indústrias verdes e de petróleo e regular fechamentos de espaços e tratamentos de responsabilidade de longo prazo (Global CCS Institute, 2016).

Dentre as principais questões relacionadas a regulação australiana para CCUS são a avaliação do projeto e processos de aprovação, o acesso a propriedades e direitos legais, o transporte de CO₂, o monitoramento e inspeções, a responsabilidade no período pós-encerramento dos reservatórios e os aspectos econômicos dessas práticas (Global CCS Institute, 2016).

No que diz respeito a captura e armazenamento de carbono, a principal legislação australiana é composta pelas seguintes leis e regulamentos: Greenhouse Gas Storage Act 2009 (Lei de Armazenamento de Gases de Efeito Estufa 2009), cujo principal objetivo é ajudar a reduzir o impacto de emissões de gases de efeito estufa no meio ambiente e facilitar o processo de armazenamento de gases de efeito estufa (armazenamento de GEE) (Cook, 2017).

Essa lei facilita o armazenamento de GEE prevendo a concessão de autoridades (denominado GEE autoridades) para explorar ou usar o subsolo, e estruturas para armazenar dióxido de carbono ou realizar atividades relacionadas; e visa a criação de um sistema regulatório para a realização de atividades relacionadas às autoridades de GEE (Global CCS Institute, 2016).

No que tange a responsabilidades (financeira, segurança, saúde e meio ambiente) pré encerramento, há determinação de que a estocagem de CO₂ não pode ser realizada quando representar risco para a saúde humana ou para o meio ambiente (seções 40 e 96).

Exploradores de CCUS são obrigados a pagar ao estado a compensação de reabilitação ambiental como resultado de potencial ameaça ou ocorrência de sérios danos ambientais (Global CCS Summary Report, Australia, 2016).

No que diz respeito ao monitoramento, a aludida lei australiana chamada Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2008 afirma que antes de iniciar a injeção de CO₂ ou outros gases de efeito estufa, o titular de uma injeção, monitoramento e licença deve apresentar ao Ministro um “plano de injeção e monitoramento”, incluindo a descrição do monitoramento proposto técnicas, o plano de monitoramento e verificação detalhando como o comportamento de qualquer gás de efeito estufa armazenado será monitorado e uma estimativa do custo das atividades de monitoramento e verificação.

Japão

Na instalação de injeção onshore, o CO₂ é comprimido e injetado em dois reservatórios offshore diferentes por dois poços desviados separados. Os pontos de armazenamento estão localizados a 3 a 4 km da costa. O reservatório raso (Formação Moebetsu), um aquífero salino composto principalmente por arenito localizado a aproximadamente 1.000 m abaixo do fundo do mar, foi atingido por um poço de perfuração de alcance estendido (ERD) com inclinação máxima de 83 graus, profundidade vertical de 1.188m e alcance horizontal de 3.058 m (IPCC/IGES, Japan. IPCC, 2000).

Um *liner* perfurado coberto por telas de controle de areia foi instalado ao longo do intervalo de injeção de quase 1.200 m de comprimento, a fim de minimizar o fluxo de areia de volta para o poço. O reservatório profundo (Formação Takinoue) é um aquífero salino composto por rochas vulcânicas/vulcanoclásticas localizadas a aproximadamente 2.500 m abaixo do fundo do mar. O poço injetor profundo tem inclinação máxima de 72 graus, profundidade vertical de 2.753 m e alcance horizontal de 4.346 m (IPCC/IGES, Japan. IPCC, 2000).

São objetivos de monitoramento e verificação do Japão: a) confirmar a segurança e estabilidade da injeção de CO₂; b) monitorar o comportamento do CO₂ nos reservatórios continuamente para detectar qualquer vazamento de CO₂; c) realizar levantamentos sísmicos para delinear a distribuição subsuperficial de CO₂ e monitoramento do volume de CO₂ injetado, pressão de formação e temperatura serão realizados; d) realizar levantamentos sísmicos de linha de base foram realizados durante as fases de levantamento e preparação do local, e os levantamentos sísmicos 2D e 3D serão repetidos anualmente até o final do projeto; e) os dados de monitoramento serão usados para atualizar um modelo de simulação para prever o comportamento do CO₂; f) verificar se os terremotos naturais não afetam o CO₂ armazenado e se a injeção de CO₂ não causa nenhum aumento nos tremores perceptíveis; g) monitorar os terremotos naturais e micro-sismicidade; h) monitorar o ambiente marinho (Kubota; Shimota, 2017).

Pesquisas e monitoramento serão realizados nas correntes oceânicas, qualidade da água, lama do fundo do mar, organismos marinhos, de acordo com a “Lei de Prevenção da Poluição Marinha e Desastres Marítimos” (IPCC/IGES, Japan. IPCC, 2000).

União Europeia

Importante de início pontuar que a União Europeia é signatária do Protocolo de Kyoto com cenário de política climática e mercado de carbono estabelecidos. No tocante ao cenário energético, vale destacar que a dependência do carvão ainda é relevante em alguns países (EU, European Union, 2009).

Os países pertencentes à Comunidade Europeia apresentaram a proposta de Regulação para CCUS em janeiro do ano de 2008, também denominada Proposta de Diretiva do Parlamento Europeu relativa ao Armazenamento Geológico de CO₂. A Diretiva da União Europeia sobre o armazenamento geológico de CO₂ (Diretiva da UE 2009/29/CE) foi estabelecida em 2009 e restou parte do Pacote de Mudanças Climáticas da União Europeia (EU, European Union, 2009).

Ademais, resta destacar também a Diretiva 2003/87/CE do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece um regime de comércio de licenças de emissão de gases com efeito de estufa na Comunidade e altera a Diretiva 96/61/CE do Conselho (a Diretiva ETS) e a Diretiva 2004/35/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de abril de 2004, sobre responsabilidade ambiental em relação à prevenção e reparação de danos ambientais (a Diretiva de Responsabilidade Ambiental) (EU, European Union, 2009).

No que diz respeito às responsabilidades pré e pós-armazenamento, relativas às implicações financeiras, de segurança, de saúde e meio ambiente, enquanto o operador tiver a licença de operação, detém a responsabilidade de responder por qualquer situação que ocorra fora do planejado. Além disso, após a entrega para autoridade competente, esta se responsabiliza pela área. (EU, European Union, 2004).

Comparação entre legislação dos países selecionados

Antes de adentrar a comparação da legislação dos países selecionados, importante verificar que após a realização desta pesquisa científica verificou-se que o sucesso nas práticas e técnicas utilizadas em sequestro de carbono ocorre quando o CO₂ é armazenado de modo estável, por um longo período, de forma economicamente viável. Para tanto, devem ser aplicadas técnicas de monitoramento para medir e calcular a quantidade de CO₂ que, de fato, será armazenada ao longo dos anos (IPCC, 2007). Ou seja, se torna clara a importância do monitoramento do CO₂ de modo a respeitar as condições do armazenamento e minimizar os riscos de vazamento (IPCC, 2007).

Essa constatação verificada com este estudo pode ser reforçada ao analisar um estudo de caso, ocorrido no próprio Canadá, ao qual demonstraram a relevância da aplicação correta de práticas e técnicas de monitoramento de vazamento para minimizar riscos de vazamento ou, nesse caso, evidenciar a segurança da instalação.

Cameron e Jane Kerr realizaram uma coletiva de imprensa em 11 de janeiro de 2011 exigindo uma investigação pública completa em virtude de problemas relacionados à superfície e água do poço em sua fazenda perto de Goodwater, nas proximidades da operação de CCS Cenovus Weyburn. Os Kerrs disseram que notaram pela primeira vez mudanças que ocorreram em sua propriedade em 2004, um ano após a injeção de CO₂ começar perto de sua fazenda. (Boyd, 2016; IEAGHG, 2021).

Um estudo encomendado pelos Kerrs concluiu que a presença de CO₂ (<~ 11 vol. %) e CH₄ (~ 30 ppm) na fazenda Kerr tinha origem de operações de armazenamento de CO₂. No entanto, os dados levantaram dúvidas sobre confiabilidade do estudo. (Romanak, 2013)

A partir disto, sob a direção do Dr. Jerry Sherk, diretor de operações do IPAC-CO₂, uma equipe de especialistas internacionais foi reunida para conduzir uma investigação independente da fazenda Kerr. Katherine Romanak do Centro de Carbono da Costa do Golfo, a Bureau of Economic Geology e a Universidade do Texas em Austin, EUA, lideraram a investigação sobre gases do solo. (Romanak, 2013; IEAGHG, 2021)

A suspeita de vazamento na Fazenda Kerr era de origem natural, mas havia sido imprecisamente atribuída ao CCS. A alegação de vazamento foi posteriormente refutada pelos profissionais utilizando as mais recentes técnicas de atribuição (Dixon, 2015). Foi utilizada inclusive o método de monitoramento baseado em processos,¹ realizando diversas análises, como bio-respiração, dissolução de CO₂ e reação com carbonato de solo, dissolução de gás do solo através de mistura atmosférica, dentre outros. Adicionalmente, dois outros estudos foram realizados, inclusive um deles fora aclamado como sendo o primeiro e mais extenso conjunto de dados contínuos de gás emanado de um solo em um local voltado à CCS. A conclusão foi que a origem do gás não era advinda da operação de CCS, tendo sido detectado emanação natural do gás. (Romanak, 2013)

Baseado neste caso, foi realizado ainda em 2011 uma pesquisa para verificar a opinião pública acerca deste evento, com entrevistas de moradores da localidade. A maior parte das pessoas relataram que não achavam que haveria de fato um vazamento de CO₂ e que, caso houvesse, confiavam na equipe de pesquisadores que estavam trabalhando no local para dar o parecer real (Boyd, 2016). A confiança naqueles que gerenciavam o projeto de injeção de CO₂ bem como dos pesquisadores/investigadores foi descrito no estudo como uma das causas fundamentais para a positividade e segurança do público envolvido no suposto vazamento de CO₂ da fazenda. (Boyd, 2016)

Portanto, como visto nesse estudo de caso, o correto monitoramento – com uso de diversas técnicas e equipes especializadas – afasta maiores riscos jurídicos para a atividade de CCUS. Isso se refletiu não só na emissão conclusiva do laudo técnico, mas também na influência positiva na opinião pública que o uso dessas tecnologias e práticas de monitoramento puderam exercer, mostrando os resultados obtidos advindos de fatos e dados bastante robustos.

Além disso, na comparação entre o arcabouço legal relacionado ao monitoramento dos países selecionados é possível verificar que se torna necessária e relevante o estabelecimento da criação de uma legislação específica nesse sentido no Brasil. Da comparação e análise dos diplomas legais dos países selecionados ficou clara a importância de regras claras e critérios objetivos, seja para o monitoramento específico ou para as consequências de um monitoramento malsucedido, com a responsabilização por danos em curto e longo prazos, sejam eles ambientais, sociais ou econômicos.

Este trabalho, com base em ranqueamento periódico da Global CCS Institute, elaborou um mapa de calor ao qual reforça as análises verificadas neste estudo. Conforme observado na Figura 3, o Brasil ainda está bastante distante dos demais países principalmente nos indicadores relacionados à “Políticas” e “Legal e Regulatório”. Veja:

No mapa de calor, as cores quentes indicam que o país tem uma pontuação alta naquele segmento e, portanto, estaria mais bem preparado para o uso e desenvolvimento do CCUS, enquanto as cores frias indicam justamente o contrário.

Aliás, nota-se um ligeiro regresso do país em alguns seguimentos, como é o caso do próprio indicador de “Políticas” como os indicadores de “Requisitos” e “Prontidão”.

Processo Monitorado	Indicador de Políticas		Indicador de Armazenamento		Indicador Legal e Regulatório		Indicador de Requisitos		Indicador de Prontidão		Capacidade de Armazenamento (GtCO2)	
	2018	2021	2018	2021	2018	2021	2018	2023	2018	2021	Min. < 1	Max. >100
País												
Austrália	23	24	86	86	77	77	57	57	62	62	100+	100+
Brasil	9	8	86	86	34	34	43	42	43	42	100+	100+
Canadá	40	41	98	98	75	75	48	48	71	71	100+	100+
USA	41	49	96	96	73	73	82	82	70	72	100+	100+
Japão	39	39	71	71	41	41	39	39	50	50	100+	100+
Noruega	56	58	96	96	45	47	26	26	65	67	10-100	10-100
Reino Unido	46	50	74	74	74	74	40	40	66	66	10-100	10-100
Escala	Min. 0	Max. 100	Min. 0	Max. 100	Min. 0	Max. 100	Min. 0	Max. 86	Min. 0	Max. 100		

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – Mapa de calor do uso e desenvolvimento do CCUS nos países selecionados.

A Tabela 1 mostra em detalhes os critérios abordados em cada um dos indicadores.

Tabela 1 – Definição de cada processo monitorado pela Global CCS Institute

Processo Monitorado	Descrição
Indicador de Políticas	Registra o desenvolvimento da política de cada nação. O Indicador acompanha um amplo espectro de políticas que vão desde o apoio direto até políticas implícitas mais amplas de alterações climáticas e redução de emissões. A pontuação representa um modelo abrangente para acompanhar o progresso e as oportunidades para o desenvolvimento de políticas de apoio à implantação da CCUS.
Indicador de Armazenamento	Registra o desenvolvimento de seus recursos de armazenamento de uma nação individual. O Indicador avalia o potencial de armazenamento geológico de um país, a maturidade das suas avaliações de armazenamento e o progresso na implantação de locais de injeção de CO ₂ .
Indicador Legal e Regulatório	Oferece um exame e avaliação detalhados das estruturas legais e regulatórias de uma nação. O Indicador centra-se num amplo espectro de acordos administrativos e de licenciamento ao longo do ciclo de vida do projeto, incluindo questões relacionadas com avaliações ambientais, consultas públicas e responsabilidade a longo prazo.
Indicador de Requisitos	Índice relativo baseado na participação global da produção e consumo de combustíveis fósseis. O Indicador fornece um guia sobre a necessidade de um país implementar a CCUS para reduzir as suas emissões provenientes de combustíveis fósseis.
Indicador de Prontidão	Monitora ativamente o progresso da implantação do CCUS. O Índice acompanha as necessidades de um país em termos de CCUS, a sua política, legislação e regulamentação e o desenvolvimento de recursos de armazenamento. Através destes indicadores, identifica as nações que são líderes na criação de um ambiente propício para a implantação comercial da CCUS.
Capacidade de Armazenamento (GtCO ₂)	Define a ampla visão geral das estimativas nacionais de armazenamento em todo o mundo. As estimativas publicadas incluem formações salinas profundas, campos de petróleo e gás esgotados e estimativas de CO ₂ -EOR.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nesse sentido, em praticamente todos os países vislumbrados neste trabalho pode se verificar a incumbência do monitoramento e das responsabilidades atinentes ao responsável pelo empreendimento pelo monitoramento por um determinado prazo de tempo, e que, após o traspasar desse prazo, e conferida

ao Estado-nação. No que diz respeito às responsabilidades pré e pós-armazenamento, relativas às implicações financeiras, de segurança, de saúde e meio ambiente, enquanto o operador tiver a licença de operação, detém a responsabilidade de responder por qualquer situação que ocorra fora do planejado, que perpassa ao Estado, no Brasil, a União, após o fim do prazo estipulado.

Da pesquisa das normativas previstas nos países selecionados também se pode extrair a necessidade de previsão de requisitos e mecanismos de prevenção e mitigação de danos e acidentes, tanto ambientais como sociais, com a gerência de riscos e previsão de regras específicas de segurança para monitoramento de armazenagem de CO₂.

Ainda no que tange a responsabilidades (financeira, segurança, saúde e meio ambiente) pré-encerramento, há determinação de que a estocagem de CO₂ não pode ser realizada quando representar risco para a saúde humana ou para o meio ambiente no cenário australiano, e ainda, a necessidade de seguir um plano de monitoramento e inspeção específico na forma de regulamentação, que destacamos ser ainda um ponto relevante a se considerar em uma normativa futura brasileira.

Do conjunto de países que têm legislação específica sobre as atividades de CCUS, as questões relacionadas com a Monitorização, Relato e Verificação (MRV) são principalmente direcionadas para a definição da metodologia de obtenção do licenciamento das operações de captura e armazenamento de CO₂ e também a forma como os proprietários e operadores devem administrar essas operações, especificando a periodicidade e as características técnicas mínimas na emissão dos relatórios de acompanhamento das atividades.

Dentre as legislações acima mencionadas, se destaca o Código Americano de Regulamentações Federais, Título 40: Proteção do Meio Ambiente, Partes 78 (Procedimentos de Apelação) e 98 (Relatórios Obrigatórios de Gases de Efeito Estufa) Regras de Relatórios de Armazenamento de CO₂) que traz consigo marcos e definições importantes como uma das poucas legislações que estabelece diretrizes técnicas e administrativas, como a necessidade de os proprietários e operadores de tais instalações de sequestro de CO₂ seguirem os procedimentos de monitoramento, relatório e monitoramento, garantia de qualidade, estimativa de dados faltantes e manutenção de registros especificados, bem como carbono monitorar, estimando em seus relatórios, por exemplo, a quantidade de CO₂ a seguir os dados devem ser relatados: massa de CO₂ recebida, injetada, produzida, emitida por vazamento superficial e emissões de vazamentos de equipamentos e emissões ventiladas de equipamentos de superfície.

De acordo com Ashworth et al. (2010), o monitoramento também desempenha um papel fundamental no melhor entendimento da sociedade sobre os projetos de CCUS, auxiliando na aceitação pública do projeto e reduzindo a preocupação pública. A preocupação pública aparece com destaque entre as questões que requerem o devido tratamento nas estruturas de EIA para CCUS, envolvendo comunicação e esclarecimento sobre o escopo do projeto, partici-

pação pública nas várias fases da tomada de decisão, divulgação de relatórios de monitoramento, conhecimento dos riscos reais do projeto, entre outros.

Em geral, os vários autores que lidam com esta questão indicam que a aceitação pública tem se mostrado fundamental para o desenvolvimento e implementação bem-sucedidos de projetos de CCUS (IPCC, 2006; Wallquist et al., 2011; Noothout et al., 2014; Ashworth et al., 2010; Chen et al., 2015; Yang et al., 2016).

Por fim, no tocante à fase de descomissionamento e pós-fechamento, ou seja, quando a injeção de armazenamento tiver cessado definitivamente e as instalações desativadas, restou clara a necessidade de continuidade do plano de monitoramento, do plano de medidas corretivas e das disposições de garantia financeira acordadas, que deverão ser mantidos em vigor (IPCC, 2006).

Aspectos relevantes para proposta de lei brasileira

Após verificação das legislações dos países selecionados, bem como consultas às bases de importantes órgãos internacionais como o IEA, uma proposta de lei brasileira deveria conter dois importantes pilares: um Plano de Monitoramento e um Plano de Contingência, ambos regidos através de parâmetros e premissas fundamentais.

Em relação aos parâmetros, os planos devem prever um monitoramento e avaliação de riscos contínuos, com ações preventivas e corretivas, devidamente calibrados e dados registrados junto ao órgão regulador. Os planos também devem ser capazes de, por exemplo, aferir a probabilidade de o armazenamento interferir na recuperação de minerais, aferir a probabilidade de o armazenamento interferir na recuperação de minerais, estimar os custos necessários para monitorar o local no período de licença e atuar em eventual contingência, detectando, quantificando e avaliando vazamentos, migração geológica anômala ou outra irregularidade no local de armazenamento.

Além disso, é necessário dissertar que o monitoramento também será necessário após a interrupção da injeção e posterior ao descomissionamento do local, pelo período definido pela autoridade competente além de disposições sobre algumas responsabilidades intrínsecas ao operador, antes e após o descomissionamento das instalações de armazenamento de CO₂.

Em relação às premissas fundamentais, é importante garantir que o armazenamento ocorra de forma segura e eficaz, seguindo todos os parâmetros acordados no Plano de Monitoramento e Plano de Contingência, identificando, alertando e agindo de forma precoce de modo a iniciar imediatamente medidas preventivas e corretivas.

Há também a necessidade de manter calibrados, aferidos e em estado operacional quaisquer ferramentas e equipamentos capazes de identificar e prevenir eventos não desejáveis além de manter em banco de dados, por tempo determinado pelo órgão competente, registros devidamente validados por profissional competente de todos os relatórios emitidos relacionados à operação de armaze-

namento de dióxido de carbono, inclusive àqueles vinculados ao Plano de Monitoramento e Plano de Contingência, de forma a garantir inclusive o cumprimento das obrigações previstas e eventualmente obtenção de crédito de carbono.

Além disso, faz-se necessário autorizar o órgão regulador a realizar auditorias nas instalações de pesquisa, instalações e atividades de injeção, nos registros de monitoramento realizados ou outros documentos solicitados, bem como acompanhar a execução da atividade de armazenamento de dióxido de carbono.

Considerações finais

Por meio deste artigo, vislumbrou-se a urgente necessidade de uma estrutura regulatória para armazenamento, captura e monitoramento de CO₂ no Brasil, incluindo as etapas correspondentes, identificação de pontos críticos, agentes envolvidos, responsabilidades econômicas, sociais e ambientais dos atores, bem como mitigação dos riscos e proteção das áreas e comunidades envolvidas.

Foram apontados os diferentes diplomas legais que regulam o assunto em países selecionados, objetivando verificar pontos relevantes que poderiam ser trazidos ao cenário regulatório brasileiro quando da implementação das normativas de CCUS em diploma específico.

Objetivando corrigir e reduzir as emissões de CO₂ advindas de setores energo-intensivos e corroborando com o atual cenário ambiental global na busca de implementação de tecnologias verdes, necessário vislumbrar um mercado com novos agentes e novas estruturas que requerem uma regulação específica.

Destacou-se que alguns países se encontram mais alinhados com o compromisso de diminuição dos gases de efeito estufa e conseqüentemente, com a função regulatória do CCUS de proporcionar regramentos mais específicos, fornecer mecanismos mais robustos de gerenciamento entre atores relacionados com um monitoramento mais cuidadoso e responsabilidades delimitadas, sejam de curto ou longo prazos.

No estudo de caso do estado brasileiro, verificou-se a ausência de regras específicas para armazenamento, captura e monitoramento de CO₂ e o uso da legislação ambiental na função regulatória improvisada, de modo que esta ausência legislativa necessita com urgência ser tratada e suprimida.

Portanto, um projeto de lei possibilitaria aos agentes responsáveis pelo armazenamento (operador) utilizar as práticas responsáveis e apropriadas, derivadas de diretrizes internacionais, para materializar o cumprimento desta nova lei. Dessa forma, não haveria necessidade de criação de dispositivos legais como Resoluções emanadas de Agências Regulatórias como Agência Nacional do Petróleo (ANP), Decretos, dentre outros, doutrinando a metodologia para cumprir-se a nova lei, restando-os apenas exercer o papel de órgãos fiscalizadores para o cumprimento dessa lei.

Por fim, verificamos que a partir das contribuições desta pesquisa será possível desenvolver outros estudos relevantes, com o aprofundamento da análise e até mesmo um projeto que vislumbre mais especificamente uma normativa

para o tema, que demonstre a necessidade de incorporar outras variáveis como localização de reservatórios, relevo, custos e ocupação das áreas, distâncias a serem percorridas, aspectos específicos de monitoramento e mitigação de riscos, dentre outros.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Shell Brasil e da Fapesp, através do Centro de Pesquisa para Inovação em Gás (conhecido pelo acrônimo em inglês, Research Center for Gas Innovation- RCGI) (Fapesp Proc. 2014 / 50279-4), hospedado pela Universidade de São Paulo, e o importante apoio estratégico prestado pela ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil) através do regulamento de promoção de atividades de P&D, bem como ao FUSP, Fundação de Apoio a Universidade de São Paulo, que por meio de seu programa de bolsas, tornou viável essa pesquisa.

Agradecemos o apoio da CNOOC Petroleum Brasil Ltda, e à importância estratégica do apoio da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) por meio da regulamentação da taxa de P&DI (Resolução ANP n.918/2023).

Nota

1 O método baseado em processo é uma técnica para monitoramento de zona vadosa acima dos locais CCUS que usa proporções de gases de solo coexistentes para distinguir um sinal de vazamento de uma zona vadosa natural de CO₂ sem a necessidade de monitoramento de fundo (Romanak, 2013).

Referências

ANYOSA, S. et al. Assessing the value of seismic monitoring of CO₂ storage using simulations and statistical analysis. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. v.105, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103219>.

ASHWORTH, P. et al. From research to action: Now we have to move on CCS communication. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v.4, Issue 2, p.426-33, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.10.012>

AVEN, T. *Misconceptions of Risk*. S. l.: John Wiley & Sons, Ltd. 2010.

BLACKFORD, J. et al. Marine baseline and monitoring strategies for carbon dioxide capture and storage (CCS). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v.38, p.221-9, July 2015.

BOYD, A. D. Risk perceptions of an alleged CO₂ leak at a carbon sequestration site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v.50, p.231-9, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.03.025>

BRASIL. Decreto n.99.274. 1990.

BRASIL. Lei n.6.938. 1981.

CAMARA, B. *Aspectos importantes do Armazenamento Geológico de CO₂ e uma proposta para seu modelo regulatório no Brasil*. Salvador, 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia.

CÂMARA, B.; ROCHA, P. S.; ANDRADE, J. C. Tecnologia de armazenamento geológico de dióxido de carbono: panorama mundial e situação brasileira. VII CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO. 2011.

CHEDID, T. da S. V.; SANTOS, E. M. dos. Aspectos de regulação internacional do petróleo: o caso Brasil. *Estud. av.* [online]. v.33, n.95, p.113-32, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142019000100113&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: mai 2021.

CHEN et al.. A large national survey of public perceptions of CCS technology in China. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261915009794>>. Acesso em: jan 2023.

COOK, P. J. CCS Research Development and Deployment in a Clean Energy Future: Lessons from Australia over the Past Two Decades. *Engineering*, v.3, p.477-84, 2017.

COSTA, H. K. de M. et al. Environmental License for Carbon Capture and Storage (CCUS) Projects in Brazil. *Journal of Public Administration and Governance*, v.8, p.163-85, 2018.

CUPERTINO, S. *A responsabilidade civil na estocagem de carbono no Brasil*. São Paulo, 2019. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106133/tde-290120173712/publico/DISSERTACAO.pdf>>. Acesso em: maio de 2021.

DELPRAT-JANNAUD, F. et al. State-of-the-art State of the art review of CO₂ Storage Site Selection and Characterization Methods. In: KORRE, A.; MCCONNELL, B.; DELPRAT-JANNAUD, F. (Ed.) *CGS Europe report No. D3.3*, September 2013, 116p.

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, p.29-40, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.029>

DNV. 2021. Carbon Capture and Storage - an effective tool to speed up decarbonization of industry. Disponível em: <<https://www.dnv.com/to2030/technology/carbon-capture-and-storage.html>>. Acesso em: 19 set. 2021.

DOE – Department of Energy. Best Practices for: Monitoring, Verification, and Accounting of CO₂ Storage in Deep Geologic Formations. NETL – National Energy Technology Laboratory. 2009. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/159708/best-practices-monitoring-verification-accounting-co2-stored-deep-geologic-formations.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2021.

DOE – Department of Energy. Best Practices: Monitoring, Verification, and Accounting (MVA) for Geologic Storage Projects. NETL – National Energy Technology Laboratory. 2017. Disponível em: <<https://netl.doe.gov/sites/default/files/2018-10/BPM-MVA-2012.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2021.

EPA, Environmental Protection Agency. “Geologic CO₂ Sequestration Technology and Cost Analysis”. *Technical Support Document*. 2008. Disponível em: <<http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2014-01-03/pdf/2013-31246.pdf>>. Acesso em: maio 2021.

EPA. Offshore Petroleum and Greenhouse Gas Storage (Environment) Regulations 2014. Statutory Rules 1999 No. 228 as amended made under the Offshore Petroleum and Greenhouse Gas Storage Act 2006. 2014. Disponível em: <<http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2014-01-03/pdf/2013-31246.pdf>>. Acesso em: maio 2021.

EPHC. Environmental Protection and Heritage Council. Environmental guidelines for carbon dioxide capture and geological storage. Adelaide, Australia. 2009.

EU, European Union. Directive 2009/31/EC on the Geological Storage of Carbon Dioxide. European Union, 2009.

EU, European Union. Directive 85/337/EEC on the Environmental Impact Assessment Directive 85/337/EEC. European Union, 1985.

GLOBAL CCS Institute, 2016. The Global Status Of CCS: 2016. Summary Report, Australia.

GLOBAL CCS INSTITUTE. The Global Status of CCS 2017. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/12/2017-Global-Status-Report.pdf>>.

GLOBAL CCS INSTITUTE. Fact Sheet, Transporting- CO₂-1. 2018. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/12/Global-CCS-Institute-Fact-Sheet_Transporting-CO2-1.pdf>.

GLOBAL CCS INSTITUTE. The Global Status of CCS 2020. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-English.pdf>>

GLOBAL CCS INSTITUTE. 2021a. co2re - Facilities. Disponível em: <<https://co2re.co/FacilityData>>.

GLOBAL CCS INSTITUTE. 2021b. The Global Status of CCS 2021. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/download/>>.

HAVERCROFT, I.; MACRORY, R. Legal Liability and carbon capture and storage – A comparative perspective. Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd, 2014.

IEA, International Energy Agency. Carbon Capture and Storage. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/>>. Acesso em: maio 2021.

IEA. Carbon Capture and Storage- Model Regulatory Framework. Paris: OECD/IEA, 2010.

IEAGHG. Review of offshore monitoring for CCS projects. 2015. Disponível em: <https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2015-02.pdf>. Acesso em: 19 set. 2021.

IEAGHG. IEAGHG Funds research into the development and deployment of carbon capture and storage (ccs) Technologies. 2021. Disponível em: <<https://ieaghg.org/2-uncategorised/267-ipac-report>>. Acesso em: 19 set. 2021.

IPCC/IGES, Japan. IPCC, 2000: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, J. Perman et al. (Ed.). IPCC/IEA/OECD/IGES, Japan.

IPCC. Carbon Dioxide Capture and Storage, Special Report, B. Metz, etc, Cambridge University Press, United Kingdom, 2005.

IPCC. Diretrizes para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa Volume 2 Capítulo 5, Energia, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Summary for Policymakers. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>> Acesso em: 15 fev. 2007.

ISO. 2009. ABNT NBR ISO 31000 - Gestão de riscos — Princípios e diretrizes. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4656830/mod_resource/content/1/ISO31000.pdf>.

JENKINS, C. et al. Safe storage and effective monitoring of CO₂ in depleted gas fields. PNAS. 2011. Doi: 10.1073/pnas.1107255108

KETZER, J. M. M. et al. *Atlas brasileiro de captura e armazenamento geológico de CO₂*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2016. 130p.

KUBOTA, H.; SHIMOTA, A. How should information about CCS be shared with the Japanese public? *Energy Procedia*, v.114, p.7205-11, 2017.

MACRORY. SCCS CO₂-EOR JIP Legal Status of CO₂ – Enhanced Oil Recovery; UCL Carbon Capture Legal Programme, 2013.

MANUILOVA, A.; SUEBSIRI, J.; WILSON, M. Should Life Cycle Assessment be part of the Environmental Impact Assessment? Case study: EIA of CO₂ capture and storage in Canada. *Energy Procedia* 1, p.4511-18, 2009.

MARKUSSON, H C.; HAZELDINE, R. S. *Nature Climate Change*. v.3, n.2, p.105-11, 2010- 2013.

MARKUSSON, N. et al. A socio-technical framework for assessing the viability of carbon capture and storage technology. *Technological Forecasting & Social Change*, v.79, p.903-18, 2012.

MARSTON, P.; MOORE, P. From EOR to CCS: The evolving Legal and Regulatory Framework for CCS. *Energy Law Journal*, v.29, p.421-90, 2008.

METZ, B. et al. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005. 443p.

NOOTHOUT, Paulo et al. CO₂ Pipeline Infrastructure – Lessons Learnt. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214020864>>. Acesso em: jan 2023.

NUNES, R.; COSTA, H. K. de M. Operação e fechamento de instalações de armazenamento para atividades de CCS no Brasil. In: COSTA, H. K. de M. (Org.) *Aspectos jurídicos da captura e armazenamento de carbono*. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2019.

OIL PRODUCTION. *International petroleum encyclopedia*. Oklahoma: Penwell, 2001.

PATIDAR, A. K. et al. The prominence of carbon capture, utilization and storage technique, a special consideration on India. *Gas Science and Engineering*, v.115, July 2023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.204999>

RATHMANN, R. R. *Clean Energy Technologies Analysis Using RETScreen*. Brasília: MCTIC, 2017.

RIBEIRO, E. *Direito do petróleo, gás e energia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

RIBEIRO, M. R. de S. (Org.) *Novos rumos do Direito do petróleo*. Rio de Janeiro: Renovar, 2009.

ROMANAK, K. et al. Assessment of Alleged CO₂ Leakage at the Kerr Farm using a Simple Process-based Soil Gas Technique: Implications for Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Monitoring. *Energy Procedia*, v.37, p.4242-8, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.326>

SACHS, I. *Da civilização do petróleo a uma nova civilização verde*. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de energia (PNE 2030). Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 5 abr. 2010.

SEIXAS, J. et al. *Captura e armazenamento de CO₂ em Portugal: Uma ponte para uma economia de baixo carbono*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2015.

SHELL Canada. Quest Carbon Capture and Storage. *Project Environmental Impact Statement*, v.1, 2011.

TARAKKI, N. et al. A meta-analysis of the surface soil gas measurement monitoring and verification (MMV) program at the Aquistore Project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v.75, p.189-97, August 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.007>

THONEMANN, N. et al. Environmental impacts of carbon capture and utilization by mineral carbonation: A systematic literature review and meta life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. v.332, jan. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130067>

UN GLOBAL COMPACT. 2021. Entenda o significado da sigla ESG (Ambiental, Social e Governança) e saiba como inserir esses princípios no dia a dia de sua empresa. Disponível em: <<https://www.pactoglobal.org.br/pg/esg>>. Acesso em: 19 set. 2021.

WAARUN, I.-K. et al. CCS leakage detection technology - Industry needs, government regulations, and sensor performance. 13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREENHOUSE GAS CONTROL TECHNOLOGIES, GHGT-13, 14-18 November 2016, Lausanne, Switzerland.

WALLQUIST et al., Communication of CCS monitoring activities may not have a reassuring effect on the public. 2011. Disponível em:< <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583611001034>>. Acesso em jan 2023.

WILSON, E. J. et al. Regulating the Ultimate Sink: Managing the Risks of Geologic CO₂ Storage. *Environmental Science & Technology*, v.37, n.16, 2003.

WRI – WORLD RESOURCES INSTITUTE. 2008. CCS Guidelines. Disponível em: <https://files.wri.org/d8/s3fs-public/pdf/ccs_guidelines.pdf>.

YANG et al. The effect of trust on people's acceptance of CCS (carbon capture and storage) technologies: Evidence from a survey in the People's Republic of China. 2016. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215016862>>. Acesso em jan 2023.

ZAMITH, M. R. M.; MOUTINHO DOS SANTOS, E. *Atividades Onshore no Brasil: Regulação, políticas públicas e desenvolvimento local*. São Paulo: Annablume Editora, 2007.

ZHANG, T. et al. CO₂ capture and storage monitoring based on remote sensing techniques: A review. *Journal of Cleaner Production*, v.281, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124409>.

RESUMO – O presente trabalho tem por objeto realizar uma análise comparativa dos aspectos legais relacionados ao monitoramento para armazenamento de CO₂ em países selecionados, vislumbrando qual o cenário legislativo no Brasil, nos Estados Unidos, no Reino Unido, na Noruega, no Canadá, na Austrália, no Japão e na União Europeia. Utilizando o método dedutivo e o tipo de pesquisa exploratório e comparativo, o artigo busca introduzir o leitor ao tema, discorrendo sobre as particularidades dos aspectos gerais de monitoramento, trazendo os riscos relativos ao monitoramento bem como alguns aspectos tecnológicos importantes. O foco da primeira parte do artigo é a integridade e segurança das instalações de armazenamento e conceitos relacionados ao monitoramento de tais instalações. Para tanto, cuida de apresentar a importância do tema sob a óptica legal, de modo que as estruturas regulatórias para armazenamento de CO₂ garantam que quaisquer anomalias sejam corrigidas de maneira a remediar eventuais danos. Adentra-se em seguida na temática da legislação relativa ao monitoramento em cada um dos países selecionados. No desenvolvimento da questão, são trazidos à tona os possíveis cenários entre o futuro do monitoramento para armazenamento de CO₂, obtidos a partir do cotejo dos resultados da pesquisa dentre os países selecionados, em que são ressaltados os aspectos positivos e negativos de cada caso e as lições a serem apreendidas pelo Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: MRV, Integridade e segurança de instalações, Armazenamento de CO₂, Aspectos legais.

ABSTRACT – The present work aims to analyze the legal aspects of monitoring CO₂ storage in selected countries, glimpsing the legislative scenario in Brazil, the United States, the United Kingdom, Norway, Canada, Australia, Japan, and the European Union. Using the deductive method and the exploratory and comparative research, the article seeks to introduce the reader to the topic, discussing the particularities of the general aspects of monitoring, bringing the risks related to monitoring, and some essential technological aspects. The focus of the first part of the article is the integrity and security of storage facilities and concepts related to monitoring such facilities. To this end, it takes care to present the importance of the subject from a legal perspective so that the regulatory structures for CO₂ storage ensure that any anomalies are corrected to remedy any damages. It then goes into the topic of legislation related to monitoring in each selected country. In the development of the question, the possible scenarios for the future of monitoring CO₂ storage are brought to light, obtained from the comparison of research results among the selected countries. The positive and negative aspects of each case are highlighted, and Brazil's lessons are to be learned.

KEYWORDS: MRV, Integrity and safety of facilities, CO₂ storage, Legal aspects.

Thaiz da Silva Vescovi Chedid é pós-doutorada em Energia pelo Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PPGE/USP).

@ – thaizvescovi@hotmail.com / <https://orcid.org/0000-0003-3725-7072>.

Romario de Carvalho Nunes é doutorando em Energia pelo Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PPGE/USP).

@ – romario.carvalho@usp.br / <https://orcid.org/0000-0002-9289-6697>.

Hirdan Katarina de Medeiros Costa é pós-doutorado em Sustentabilidade pela Escola de Artes, Ciências e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo (EACH/USP), pós-doutorado em Energia pelo Instituto de Energia e Ambiente da USP.

@ – hirdan@usp.br / <https://orcid.org/0000-0002-0114-9224>.

Edmilson Moutinho dos Santos é professor associado no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP). @ – edsantos@iee.usp.br / <https://orcid.org/0000-0003-3088-855X>.

Recebido em 27.6.2022 e aceito em 11.12.2023.

^{I,II,IV} Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente, São Paulo, Brasil.

^{III} Universidade de São Paulo, Escola de Artes, Ciências e Ciências Humanas, São Paulo, Brasil.

